

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA  
FABRICAÇÃO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO  
POLICRISTALINO

Rodrigo Bastos

Passo Fundo



Rodrigo Bastos

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA FABRICAÇÃO DE  
UM MÓDULO FOTOVOLTAICO DE SILÍCIO POLICRISTALINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Júnior e coorientação do Prof. Dr. Iziqiel Cecchin.

Passo Fundo, RS

2020

CIP – Catalogação na Publicação

---

B327a Bastos, Rodrigo  
Avaliação dos impactos ambientais da fabricação de um  
módulo fotovoltaico de silício policristalino [recurso eletrônico] /  
Rodrigo Bastos. – 2020.  
4.8 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Iziquiel Cecchin.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de  
Passo Fundo, 2020.

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Silício. 3. Impacto  
ambiental. 4. Energia solar. I. Lopes Júnior, Luizmar da Silva,  
orientador. II. Cecchin, Iziquiel, coorientador. III. Título.

CDU: 620.91

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Universidade de Passo Fundo  
Faculdade de Engenharia e Arquitetura  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

A Comissão Examinadora, abaixo assina e aprova a dissertação de mestrado intitulada “Avaliação dos impactos ambientais da fabricação de um módulo fotovoltaico de silício policristalino”, elaborado por Rodrigo Bastos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Data de aprovação: 14 de maio de 2020.

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luizmar da Silva Lopes Júnior  
Universidade de Passo Fundo – UPF  
Orientador

Prof. Dr. Iziquiel Cecchin  
Universidade de Passo Fundo – UPF  
Coorientador

Prof. Dra. Luciana Londero Brandli  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Prof. Dr. Marcelo Esposito  
Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Prof. Dr. Eduardo Korf  
Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Passo Fundo, RS

2020

## RESUMO

O investimento em fontes renováveis de energia elétrica vem crescendo exponencialmente no mundo, principalmente com o objetivo de reduzir o impacto ambiental causado por fontes não renováveis e altamente poluidoras, como o petróleo e o carvão mineral. Entre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica vem se destacando como uma excelente alternativa para suprir a necessidade energética. Esta pesquisa procurou avaliar e analisar os impactos ambientais relacionados à fabricação do módulo fotovoltaico de silício policristalino. A fabricação do painel foi analisada desde a obtenção da matéria prima de produção, por meio da extração do silício, seguindo para as etapas de obtenção do silício em grau metalúrgico, purificação do silício em grau solar, fabricação dos lingotes e *wafers*, fabricação da célula fotovoltaica e do painel, caracterizando uma abordagem de berço-ao-portão. Somou-se a este processo, a caracterização dos impactos para a etapa de transporte até ao destino de instalação do painel. Para realizar este objetivo, foi empregado a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) por meio do *software* SimaPro para analisar os impactos gerados ao longo da cadeia produtiva do painel e seu transporte. Para implementar a ACV foram modelados 3 cenários. No cenário 1 foi considerado a fabricação total do painel fotovoltaico na China com o seu transporte para o Brasil. O cenário 2 foi avaliado considerando a fabricação do *wafers* na China e o transporte deste ao Brasil para posterior fabricação da célula e do painel. No cenário 3, idealizou-se a fabricação completa do painel no Brasil. Analisou-se os impactos gerados por meio da metodologia de avaliação Impact 2002+ que caracterizou os impactos em 14 indicadores de ponto médio e 4 indicadores de ponto final. Aplicaram-se também as métricas de avaliação de Demanda Acumulada de Energia, Tempo de Retorno de Energia e Emissão de Gases de Efeito Estufa. A avaliação de todos os indicadores nos 3 cenários, mostrou que a produção do painel fotovoltaico no Brasil (cenário 3) é o que apresenta menor valor nos impactos avaliados.

Palavras-chave: Impactos ambientais; Avaliação do ciclo de vida; Painel fotovoltaico; Silício policristalino.

## ABSTRACT

The investment in renewable sources of electric energy has been growing exponentially in the world, mainly with the objective of reducing the environmental impact caused by non-renewable and highly polluting sources, such as oil and coal. Among renewable sources, photovoltaic solar energy is highlighted as an excellent alternative to supply the energy need. This research allows to evaluate and analyze the environmental impacts related to the manufacture of polycrystalline silicon photovoltaic panel. A manufacturing panel was analyzed from a primary production material, through silicon extraction, proceeding to the steps of using metallurgical grade silicon, solar grade silicon purification, ingots and wafers manufacturing, fabric manufacturing photovoltaic and panel, featuring a cradle-to-gate approach. This process was added, a characterization of the impacts for the transport stage to the destination of the panel installation. To achieve this objective, an LCA (Life Cycle Assessment) was used through the SimaPro software to analyze the impacts generated along the panel's production chain and its transportation. To implement an LCA, 3 scenarios were modeled. No scenario 1 was considered as a total photovoltaic panel in China with its transport to Brazil. Scenario 2 was evaluated considering the manufacture of wafer in China and its transport to Brazil for later manufacture of cell and panel. In scenario 3, a complete panel fabrication was conceived in Brazil. Analyze the impacts generated using the Impact 2002+ assessment methodology, which characterized the impacts in 14 midpoint indicators and 4 endpoint indicators. It was also applied as measures to assess accumulated energy demand, energy return time and emission of greenhouse gases. The evaluation of all indicators in the 3 scenarios, showed that the production of the photovoltaic panel in Brazil (scenario 3) is the one that presents less value in the alterations caused.

**Keywords:** Environmental impacts; Life cycle assessment; Photovoltaic panel; Polycrystalline silicon.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar

ACV – Análise do Ciclo de Vida

AIE – Agência Internacional de Energia

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

aSi:H – Silício Amorfo Hidrogenado

BOS – Componentes de Balanço do Sistema (*System of Balance*)

CdS – Sulfeto de Cádmio

CdSe – Seleneto de Cádmio

CdTe – Telureto de Cádmio

CFC's - Clorofluorcarbonos

CIGS – Disseleneto de Índio e Gálio

CIS – Disseleneto de Cobre e Índio

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CZ – Czochralski

DAF – Depleção Abiótica Fóssil

DSSC – Células Sensibilizadas por Corante (*Dye Sensitized Solar Cells*)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPFL – Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausanne

EVA – Acetato de Etil Vinila (*Ethylene Vinyl Acetate*)

FZ – Zona Flutuante (*Float Zone*)

GD – Geração Distribuída

GJ – Gigajoules

GW – Gigawatt

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

ISO – Organização de Padronização Internacional (*International Organization Standardization*)

kg - Kilograms

kWh – Kilowatt hora

MJ – Megajoules

mPt – Milionésimo de Pontos

MRI – *Midwest Research Institute*

m-Si – Silício Monocristalino

MW - Megawatt

NREL – Laboratório Nacional de Energias Renováveis (*National Renewable Energy Laboratory*)

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organization for Economic Co-operation and Development*)

ONG – Organização Não Governamental

PA – Potencial de Acidificação

PAG – Potencial de Aquecimento Global

PE – Potencial de Eutrofização

PQ – Ponto Quântico

p-Si – Silício Policristalino

PTH – Potencial de Toxicidade Humana

SD – Solidificação Direcional

Si-gE – Silício Grau Eletrônico

Si-gM – Silício Grau Metalúrgico

Si-gS – Silício Grau Solar

SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre

TCO – Filme de Condutor Transparente

USEPA – *U. S. Environmental Protection Agency*

Wp – Watt pico

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução mundial da capacidade instalada de energia fotovoltaica.....	21
Figura 2 - Países com maior capacidade acumulada de geração de energia fotovoltaica. ....	21
Figura 3 - Países com maior capacidade instalada em 2017. ....	22
Figura 4 - Radiação solar média anual no Brasil.....	23
Figura 5 - Matriz de energia elétrica brasileira.....	23
Figura 6 - Efeito fotovoltaico na célula. ....	25
Figura 7 - Representação do processo Siemens.....	26
Figura 8 - Fabricação dos lingotes de silício monocristalino. ....	27
Figura 9 - Etapas da formação do lingote de silício monocristalino durante o processo Czochraslki. ....	28
Figura 10 - Método da solidificação direcional.....	29
Figura 11 - Módulo monocristalino e policristalino.....	29
Figura 12 - Esquema de fabricação de um módulo fotovoltaico de silício cristalino .....	31
Figura 13 - Sequência dos processos para fabricação do módulo fotovoltaico de silício. ....	31
Figura 14- Fluxograma para fabricação de células de filmes finos. ....	33
Figura 15 - Célula sensibilizada por corante. ....	33
Figura 16 - Princípio de funcionamento da célula sensibilizada por PQs.....	35
Figura 17 - Sistema isolado ( <i>Off-grid</i> ). ....	36
Figura 18 - Sistema conectado a rede ( <i>Grid-tie</i> ). ....	37
Figura 19 - Etapas do ciclo de vida de um produto.....	39
Figura 20 - Etapas da ACV.....	40
Figura 21 - Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa. ....	59
Figura 22 - Limites de fronteira da ACV .....	60
Figura 23 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do silício grau metalúrgico.....	68
Figura 24 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do silício grau solar. ....	70
Figura 25 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do <i>wafers</i> de p-Si. ....	71
Figura 26 - Esquema básico de uma célula fotovoltaica de silício.....	73
Figura 27 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação da célula fotovoltaica. ....	74
Figura 28 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do painel de silício policristalino. .....	76
Figura 29 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 1. ....	78
Figura 30 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 2. ....	79

Figura 31 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 3. ....	80
Figura 32 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 1.....	84
Figura 33 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 2.....	85
Figura 34 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 3.....	85
Figura 35 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 1. ....	87
Figura 36 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 2. ....	87
Figura 37 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 3. ....	88
Figura 38 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 1. ....	88
Figura 39 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 2. ....	89
Figura 40 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 3. ....	90
Figura 41 - Emissão de CO <sub>2</sub> em cada etapa do cenário 1.....	92
Figura 42 - Emissão de CO <sub>2</sub> em cada etapa do cenário 2. ....	92
Figura 43 - Emissão de CO <sub>2</sub> em cada etapa do cenário 3.....	93
Figura 44 - Impactos totais de cada etapa de produção de cada cenário.....	95
Figura 45 - Impacto ambiental total em cada cenário. ....	95
Figura 46 - Demanda acumulada de energia total em cada cenário. ....	96
Figura 47 - Total de CO <sub>2</sub> emitido em cada cenário. ....	96

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão da literatura internacional sobre ACV e painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino. ....	52
Quadro 2 - Características do painel fotovoltaico em estudo. ....	61
Quadro 3 - Dados ambientais e unidades de medida. ....	62
Quadro 4 – Categorias de impacto <i>midpoints</i> e <i>endpoints</i> .....	63
Quadro 5 - Transporte e distâncias do cenário 1. ....	66
Quadro 6 - Transporte e distâncias do cenário 2. ....	66
Quadro 7 – Emissões da fabricação do silício grau metalúrgico. ....	69
Quadro 8 – Emissões da fabricação do silício grau solar .....	70
Quadro 9 – Emissões da fabricação do <i>wafers</i> de silício policristalino. ....	72
Quadro 10 – Emissões da fabricação da célula fotovoltaica de silício policristalino. ....	75
Quadro 11 - Emissões da fabricação do painel de silício policristalino. ....	75

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Problema da pesquisa.....	15
1.2	Justificativa .....	17
1.3	Objetivos .....	19
1.3.1	Objetivo geral .....	19
1.3.2	Objetivos específicos .....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Panorama da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo .....	20
2.2	Tecnologias fotovoltaicas .....	24
2.2.1	Célula fotovoltaica de silício cristalino .....	25
2.2.2	Célula solar de filme fino .....	32
2.2.3	Célula solar sensibilizada por corante .....	33
2.2.4	Célula solar de perovskita.....	34
2.2.5	Célula solar sensibilizada por pontos quânticos .....	34
2.3	Componentes do sistema fotovoltaico .....	35
2.4	Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	37
2.4.1	História e definição da ACV .....	37
2.4.2	Ferramentas computacionais para ACV .....	42
2.4.2.1	Impact 2002+ .....	43
2.4.3	Avaliação do ciclo de vida aplicada em painel fotovoltaico .....	45
3	METODOLOGIA .....	58
3.1	Análise do Ciclo de Vida do painel fotovoltaico de silício cristalino .....	59
3.1.1	Definição do objetivo e escopo da ACV .....	59
3.1.2	Inventário do ciclo de vida - ICV .....	61
3.1.3	Avaliação dos impactos .....	62
3.1.4	Interpretação do ciclo de vida.....	64
3.2	Modelagem dos cenários .....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	67
4.1	Inventário do ciclo de vida – fabricação do painel .....	67
4.2	Avaliação dos impactos ambientais para produção do painel fotovoltaico .....	77
4.2.1	Avaliação dos indicadores de impacto por ponto médio.....	77
4.2.2	Avaliação dos impactos ambientais totais de cada etapa da fabricação do painel	84
4.2.3	Avaliação dos impactos ambientais por categoria de dano .....	86
4.2.4	Avaliação da Demanda de Acumulada de Energia .....	88
4.2.5	Cálculo do Tempo de Retorno de Energia (EPBT) .....	90

4.2.6	Avaliação da Emissão de Gases de Efeito Estufa ( <i>GHG</i> ) .....	91
4.3	Interpretação do ciclo de vida da fabricação do painel fotovoltaico .....	93
5	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99

## 1 INTRODUÇÃO

A capacidade de utilização de fontes de energia para suprir necessidades proporcionou a sobrevivência humana e o desenvolvimento da atual sociedade. Na pré-história, o domínio e o controle do fogo permitiu a utilização de sua energia térmica para aquecimento, cocção de alimentos e proteção contra predadores. Devido a revolução industrial e o emprego de carvão e petróleo como recursos energéticos, a utilização da máquina a vapor e a industrialização, houve um expressivo crescimento populacional que provocou um significativo crescimento da demanda de energia (NAKABAYASHI, 2014).

Os problemas relacionados ao aumento do consumo de energia estão se tornando cada vez mais significativos ao passo que se relaciona o crescimento da demanda energética com o emprego de recursos naturais na geração de energia. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2019), a matriz global de energia é principalmente formada por fontes não renováveis, contribui no esgotamento de recursos naturais e gera diversos impactos ambientais. Neste contexto, o investimento em fontes renováveis de energia torna-se uma excelente alternativa para promover a sustentabilidade e garantir a segurança energética para uma nação.

Para atrair consumidores para o uso de energias renováveis, surgiram nos últimos anos uma série de programas, planos e políticas públicas, em nível mundial e nacional, que incentivaram e fomentaram a utilização de fontes renováveis para geração de energia e, conseqüentemente, colaboram para promover a sustentabilidade da matriz energética e confiabilidade ao setor elétrico. Segundo Ludin et al. (2018), entre os recursos de energias renováveis, a energia solar é o recurso natural mais abundante na Terra, é facilmente explorável, limpa, discreta, inesgotável, duradoura e confiável. Essas vantagens credenciam a energia solar como uma excelente fonte para atender à crescente demanda mundial por energia elétrica devido ao aumento da população humana e à expansão da infraestrutura.

Conforme a Agência Internacional de Energia - AIE (IEA, 2018), as energias renováveis têm crescido rapidamente nos últimos anos e a geração solar fotovoltaica é a principal responsável pelo crescimento em virtude da acentuada redução dos custos de sua implantação. No Brasil, por exemplo, segundo os dados da Empresa de Pesquisa Energética (2018), houve um aumento de 875,6% na oferta de energia solar fotovoltaica no país entre 2016 e 2017. Este elevado crescimento pode ser atribuído por um acréscimo de 3836% da capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica neste mesmo período no país. Como conseqüente expansão deste tipo de geração de energia, em curto e médio prazo, uma grande

quantidade de painéis fotovoltaicos serão produzidos. Futuramente, ao término da vida útil, será necessário descartá-los, gerando uma grande quantidade de resíduos. Assim, as consequências deste crescimento permitem questionamentos relacionados com as implicações ambientais que o uso da tecnologia fotovoltaica em grande escala pode ocasionar.

Entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas utilizadas no mundo, segundo Ogbomo et al. (2016), 84% são painéis fotovoltaicos que utilizam células de silício cristalino, sendo que deste total, 54% são com células de silício policristalino. Para a fabricação de painéis que utilizam células fotovoltaicas de silício policristalino, tem-se um longo processo envolvido. Tudo inicia com a extração da matéria-prima para fabricação das células fotovoltaicas e segue por uma série de etapas até a finalização e acabamento do painel. Lu (2013) aborda que apesar do sistema fotovoltaico ser reconhecido como a tecnologia mais limpa na produção de eletricidade, muitos pesquisadores acreditam que a energia consumida no seu ciclo de vida é superior a energia gerada durante sua vida útil. Em relação ao processo de operação, a tecnologia fotovoltaica pode ser considerada completamente limpa. No entanto, ao considerar o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, desde a mineração da sílica até a instalação do sistema, o consumo de energia e as emissões para o meio ambiente não podem ser ignorados (YUAN et al., 2014).

Observa-se por meio disso a necessidade da elaboração de estudos que possam verificar e quantificar as emissões de poluentes e o consumo de energia para a fabricação de painéis fotovoltaicos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui um importante método de avaliação e quantificação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto. Assim, a aplicação desta ferramenta contribui no processo de tomada de decisão visando a melhoria da eficiência e minimização de impactos ambientais na produção de diferentes produtos e processos.

## 1.1 Problema da pesquisa

O Brasil, assim como outros países, tem assumido o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes em virtude das alterações climáticas e elevações de temperatura registradas no planeta nos últimos anos (FUNAG, 2010). Na Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas de 2015, o Brasil comprometeu-se em reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis registrados em 2005, até 2025, e em 43% até 2030. Uma das metas para atingir os resultados almejados, é o aumento da participação de energias renováveis na composição da matriz energética brasileira, com uma perspectiva de atingir 45% em 2030 (BRASIL, 2017).

Com esta finalidade, o governo implantou políticas de incentivo à eficiência energética, às fontes de energia renováveis e principalmente, à geração distribuída (GD), que têm colaborado para aumentar a competitividade de sistemas de GD por fontes renováveis. De acordo com Gerbinet et al. (2014), o uso de painéis fotovoltaicos para geração de eletricidade aumentou rapidamente nos últimos anos, apesar de seus impactos ambientais ainda não estarem totalmente determinados. Espera-se que o rápido crescimento da capacidade fotovoltaica global continue nos próximos anos devido à redução dos custos da tecnologia fotovoltaica, ao aumento dos requisitos de energia limpa, ao desenvolvimento sustentável e aos altos custos da eletricidade (HONG et al., 2016).

À medida que o mercado fotovoltaico cresce, seu desenvolvimento precisa ser compreendido, e seu desempenho ambiental e energético presente e futuro deve ser avaliado. Conforme a abordagem de Zhong (2011), o uso das chamadas “tecnologias verdes” nem sempre garante a produção sustentável de energia, e um exemplo disso são as tecnologias fotovoltaicas, onde durante o processo de fabricação das células solares é utilizado uma grande quantidade de energia, produtos químicos e a exploração de minerais.

A ACV é uma técnica de gestão ambiental que permite avaliar os impactos ambientais originados dentro da cadeia de produção de um determinado produto ou processo. Isso permite realizar uma avaliação desde a extração da matéria prima, a produção do produto e posteriormente o seu descarte (ABNT, 2009). Udo de Haes et al. (2004), afirmam que a origem histórica da ACV é baseada na busca por uma técnica adequada que possibilite comparar o desempenho ambiental de produtos. Segundo Gerbinet et al.(2014) os primeiros estudos envolvendo ACV e painéis fotovoltaicos foram realizados na década de 70, no entanto, agora estão desatualizados devido ao desenvolvimento tecnológico dos painéis ao longo dos anos.

O início do ciclo de vida de um painel fotovoltaico começa a partir do processo de fabricação da célula solar, e segue, posteriormente, com a fabricação do módulo fotovoltaico, produção dos outros componentes necessários ao sistema, transporte do material e instalação. Ao final deste ciclo, é consumida uma quantidade significativa de energia (MA et al., 2017). Atualmente, existem diferentes tipos de tecnologias fotovoltaicas que podem ser utilizadas na fabricação dos painéis solares, sendo que, cada uma destas apresenta características específicas que influenciam diretamente nos impactos ambientais gerados.

Segundo Nian (2016), entre as tecnologias fotovoltaicas existentes hoje, as células solares de silício cristalino são as mais populares e utilizadas no mundo. Pinho e Galdino (2014) citam que a tecnologia correspondente ao silício cristalino corresponde a 85% do mercado fotovoltaico devido a sua melhor eficiência e confiabilidade estabelecida em comparação às outras tecnologias fotovoltaicas. As tecnologias comercialmente disponíveis permitem reciclar cerca de 80 a 90% dos materiais usados nos painéis, não incluindo as células fotovoltaicas de silício (CONTRERAS-LISPERGUER, et al. 2017)

Com base no que foi apresentado, este trabalho busca responder os seguintes problemas: Considerando a fabricação de painéis fotovoltaicos de silício policristalino no Brasil, quais são os impactos ambientais produzidos ao longo do ciclo de vida deste painel? Qual é o tempo para este painel operar e gerar a energia que foi gasta para a sua fabricação?

## 1.2 Justificativa

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e a incessante busca pela diversificação da matriz de geração de energia elétrica, associado com o aumento na demanda por energia, impulsionou a geração de energia elétrica no Brasil e no mundo a partir de fontes renováveis. Embora inicialmente mais caras, tornam-se mais competitivas na medida em que se expandem, sendo a competitividade resultante da redução dos custos devido ao ganho de escala e dos avanços tecnológicos (NASCIMENTO, 2017).

Em virtude do aumento da exploração de fontes de energias renováveis, a energia solar vem se destacando no Brasil. O país possui níveis de irradiação solar superior aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, China e Estados Unidos. Embora a geração de energia usando um sistema fotovoltaico esteja livre de emissões de gases de efeito estufa e consumo de combustível, a energia e as emissões envolvidas na fabricação, transporte e eliminação dos seus elementos devem ser consideradas (GARCÍA-VALVERDE et al., 2009). Alsema e Nieuwlaar (2000) afirmam que há uma alta demanda energética envolvida no processo de purificação do silício, principal matéria prima para fabricação de células fotovoltaicas.

Yu e Halog (2015) abordam que diferentes tipos de instalações fotovoltaicas tem sido exploradas a várias décadas na Europa, comprovando a confiabilidade da tecnologia. Porém, a difusão em larga escala de instalações fotovoltaicas é ainda limitada, e por isso, é de fundamental importância descobrir se a energia fotovoltaica é realmente uma opção sustentável. Hou et al., (2015) afirmam que há controvérsias sobre a geração de energia fotovoltaica. Opositores contra a energia fotovoltaica argumentam que a produção total de energia de um sistema fotovoltaico não compensa o consumo de energia durante a fabricação. Outros insistem que a energia fotovoltaica não é uma energia limpa devido ao seu alto consumo de energia e emissão de gases durante a fabricação.

Peng et al., (2013) destacam em seu trabalho a urgente necessidade de novas tecnologias renováveis, em especial a tecnologia fotovoltaica, para combater futuramente desafios como a escassez de energia e problemas ambientais em decorrência de mudanças climáticas, como o aquecimento global, a poluição do ar e a chuva ácida.

Para Li et al., (2017) todas essas incertezas em torno de tecnologias energéticas necessitam de uma avaliação abrangente, explorando o desempenho dessas tecnologias em relação a sustentabilidade. Segundo Luo et al., (2018), uma análise ambiental mais aprofundada é necessária porque além de entender o desempenho da tecnologia fotovoltaica,

gera informações para a otimização do produto ou dos processos que envolvem a produção dos painéis fotovoltaicos. Neste contexto, deve-se buscar meios de avaliar quantitativamente os impactos causados pela fabricação das tecnologias fotovoltaicas.

Uma ferramenta muito empregada para avaliar os impactos que um processo produtivo ou serviço possa ter é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV é um método que pode ser utilizado para quantificar impactos ambientais. Além de avaliar os impactos ambientais, a ACV é importante para o aprimoramento de um processo produtivo, pois auxilia na tomada de decisões e definição de prioridades (OLIVEIRA, 2017). Portanto, a ACV constitui uma ferramenta de grande relevância para analisar e quantificar os impactos produzidos em todo o ciclo de vida de um produto, que neste estudo é o painel fotovoltaico de silício policristalino. Assim, o estudo visa a identificação e conhecimento acerca dos impactos ambientais do ciclo de vida deste painel e serve de base para um planejamento estratégico para mitigar possíveis impactos ou para buscar meios alternativos para a fabricação dos painéis.

Deste modo, este trabalho busca preencher uma lacuna científica, promovendo uma análise mais ampla dos impactos ambientais provenientes da fabricação de painéis fotovoltaicos de silício policristalino no Brasil, desde a extração de recursos para as suas matérias primas até a finalização do painel. Procura-se por meio disso, contribuir para a literatura científica sobre esta fonte renovável de energia, que reconhecidamente não produz impactos durante sua operação, mas carece de maior embasamento científico sobre os impactos gerados pelo seu processo de fabricação.

O Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em sua linha de pesquisa Infraestrutura Sustentável, no qual este estudo está inserido, vem desenvolvendo vários trabalhos que visam fomentar a sustentabilidade e a utilização de energias renováveis. Esta dissertação traz um novo tema na linha de pesquisa que contribuirá para expandir e inserir o tema com as questões relacionadas à geração de energia fotovoltaica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Avaliar os impactos ambientais causados pelos painéis fotovoltaicos de silício policristalino ao longo do seu ciclo de vida para o cenário brasileiro.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) Caracterizar a fabricação de um painel fotovoltaico de silício policristalino;
- b) Modelar a fabricação do painel fotovoltaico no cenário brasileiro e chinês;
- c) Comparar os impactos ambientais identificados na fabricação brasileira e na fabricação chinesa;
- d) Determinar o tempo de retorno de energia para o painel gerar a energia gasta durante sua fabricação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Objetivando uma busca mais refinada foram utilizadas palavras chave relacionadas ao processo de fabricação de painéis fotovoltaicos de silício policristalino e sobre a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), como, por exemplo, extração do silício, purificação do silício grau solar, célula fotovoltaica de silício policristalino, ciclo de vida do painel fotovoltaico e outras.

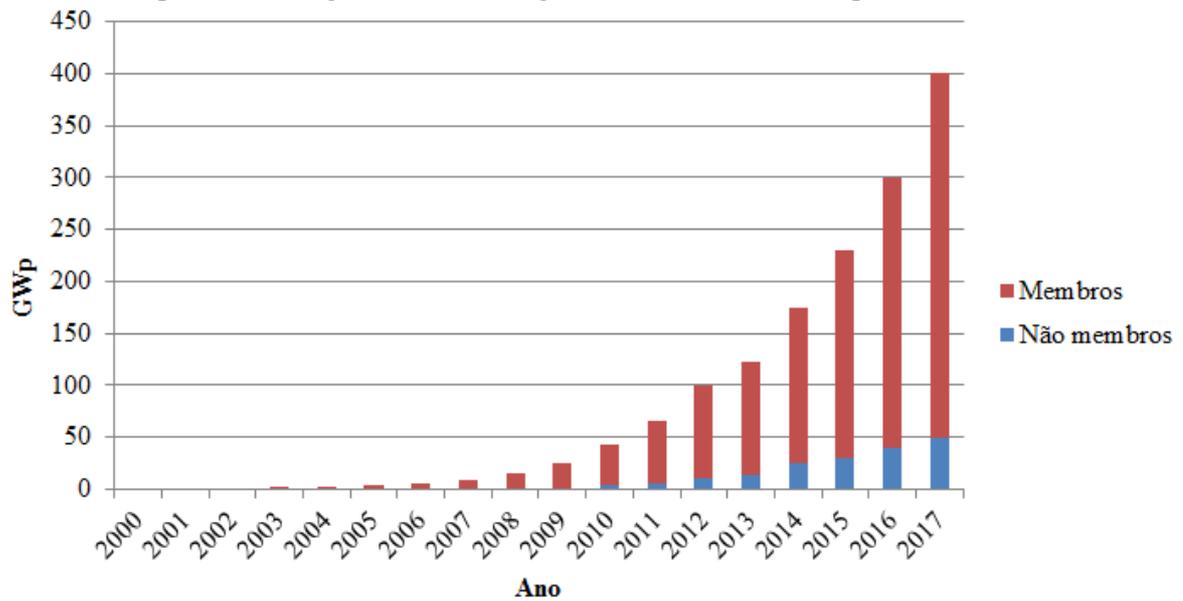
### 2.1 Panorama da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo

No século XX, com a crise de energia na década de 70, evidenciou-se mundialmente exagerada dependência por combustíveis fósseis, provocando a necessidade de pesquisas e investimentos em energias alternativas. A partir disso, esforços significativos foram direcionados para o aproveitamento de outras fontes de energia, principalmente as fontes renováveis (INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE, 2009). As fontes renováveis apresentam crescimento tanto na oferta como no consumo total de energia no mundo, em virtude de políticas governamentais que visam uma matriz energética mais limpa e segura (REN 21, 2016).

Na busca por suprir o fornecimento de eletricidade a partir de outras fontes energéticas, as tecnologias fotovoltaicas são vistas como um meio potencialmente valioso de contribuir significativamente para uma série de objetivos da política energética, incluindo aqueles relacionados ao impacto ambiental, segurança de fornecimento e acessibilidade energética (LEICESTER et al., 2016). Segundo Morais (2015), com a redução de preços no setor e desenvolvimento tecnológico dos materiais semicondutores utilizados na fabricação de painéis fotovoltaicos, a energia solar aumentou sua participação na oferta total de energia no mundo.

A Figura 1 apresenta a evolução da capacidade total instalada de geração de energia fotovoltaica no mundo a partir do ano 2000, no qual observa-se um crescimento exponencial a partir de 2003. Conforme a IEA-PVPS (2018), a capacidade total de geração de energia fotovoltaica no mundo, ao final do ano de 2017, atingiu cerca de 402,5 GWp, sendo que deste montante, 397 GWp, representa a capacidade de geração fotovoltaica dos 32 países que são membros do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento de Energias Renováveis da IEA. O restante desta capacidade, 5,5 GWp, é a capacidade instalada no restante dos países do mundo e que não integram o programa.

Figura 1 - Evolução mundial da capacidade instalada de energia fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de IEA-PVPS (2018).

Analisando a capacidade acumulada de energia solar por país, de acordo com o mapa da Figura 2, elaborado a partir das informações da Agência Internacional de Energia - AIE (IEA-PVPS, 2018), a China lidera com uma grande vantagem em relação ao segundo colocado do ranking que é os Estados Unidos. Esta grande diferença de capacidade acumulada, é atribuída, principalmente, pelo aumento da capacidade instalada no país em 2017.

Figura 2 - Países com maior capacidade acumulada de geração de energia fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de IEA-PVPS (2018).

A Figura 3 apresenta um mapa com os países que tiveram a maior capacidade instalada de energia fotovoltaica no ano de 2017, segundo dados da AIE (IEA-PVPS, 2018). Verifica-se que com um incremento de 0,9 GW de geração em sua matriz fotovoltaica, o Brasil figurou entre os dez países com maior capacidade instalada em 2017.



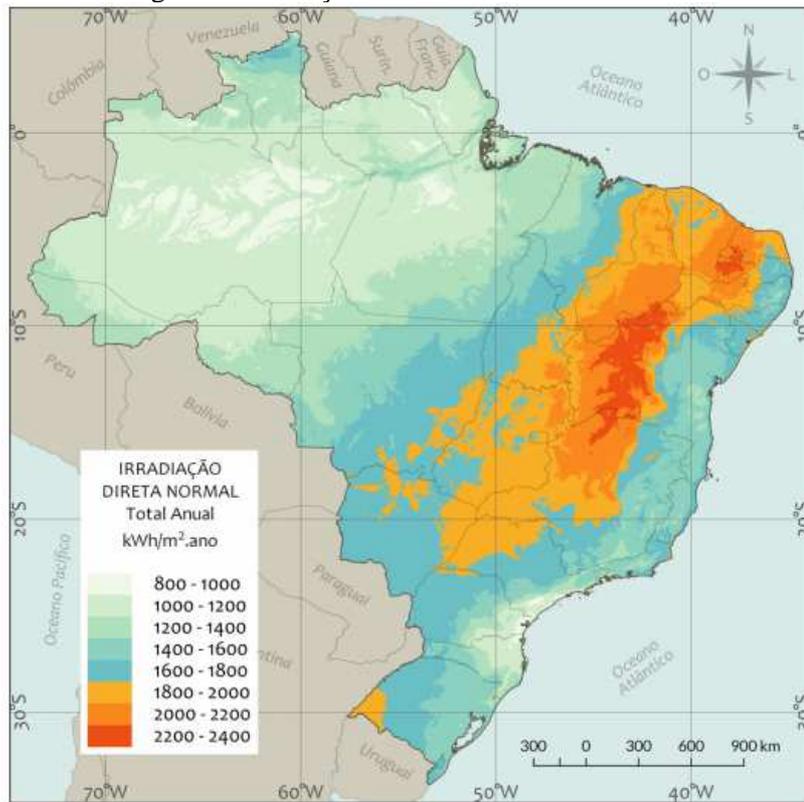
Fonte: Adaptado de IEA-PVPS (2018).

Nascimento (2017) destaca que o Brasil possui expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir de fonte solar, contando com níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia fotovoltaica são amplamente difundidos e realizados há mais tempo se comparados ao Brasil. A Figura 4 apresenta um mapa com os índices de irradiação direta normal anual, em kWh/m<sup>2</sup>.ano, no Brasil, destacando as regiões com maior potencial de aproveitamento da energia solar concentrada.

A participação de sistemas fotovoltaicos na matriz de energia elétrica brasileira ainda é muito pequena se comparada com a energia hídrica que gera 60% da energia utilizada no país, como apresentado na Figura 5. Conforme a Associação Brasileira de Energia Solar - ABSOLAR (2020), apenas 1,6% da energia elétrica produzida é proveniente dos sistemas fotovoltaicos.

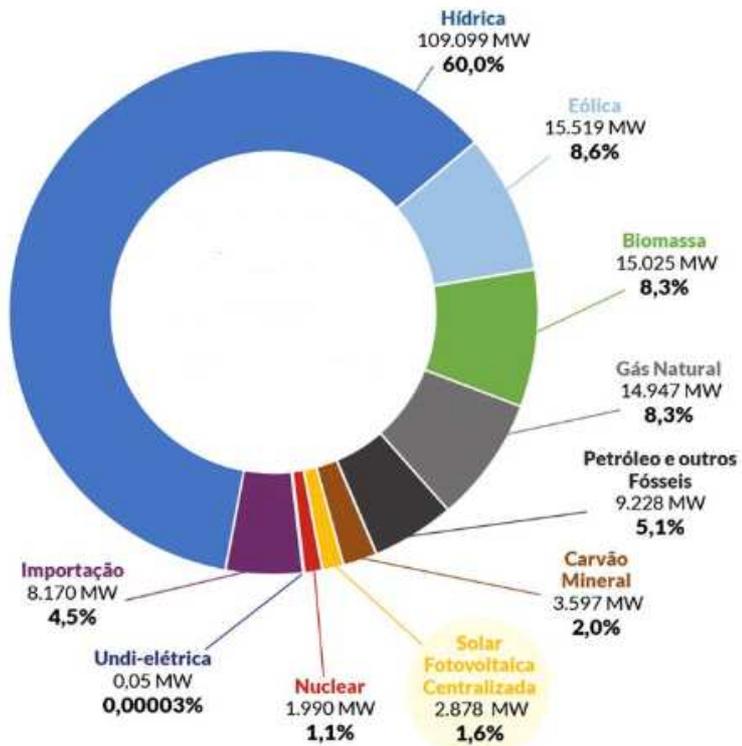
Conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), a micro e mini geração distribuída por meio da fonte solar fotovoltaica vem crescendo em um ritmo acelerado no país, devido alterações regulatórias que viabilizaram a compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte. Segundo a ABSOLAR (2020), a micro e mini geração apresentam uma capacidade instalada de 2.638,0 MW, que somados a potência de geração centralizada de energia fotovoltaica da Figura 5, totalizam 5.516,0 MW de potência operacional total.

Figura 4 - Radiação solar média anual no Brasil.



Fonte: Pereira et al.(2017)

Figura 5 - Matriz de energia elétrica brasileira.



Fonte: ABSOLAR (2020).

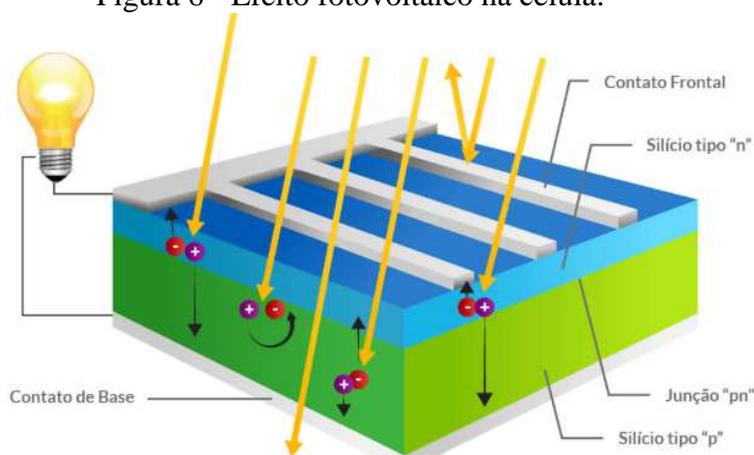
A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) menciona que a energia solar fotovoltaica é a mais recente entre as novas fontes renováveis a contribuir para o desenvolvimento sustentável da matriz energética brasileira. A sua aplicação, tem proporcionado ao país inúmeros benefícios socioeconômicos, ambientais e estratégicos, por não produzir ruído, ter baixa manutenção e ser de simples e rápida instalação.

A primeira empresa a fabricar painéis solares no Brasil foi a Globo Brasil, uma empresa brasileira de capital privado que instalou sua planta fabril em 2015 na cidade de Valinhos, em São Paulo. A empresa possui, atualmente, uma capacidade de fabricação de 2000 painéis solares ao dia (GLOBO BRASIL, 2018). A expansão do mercado fotovoltaico no Brasil fez com que outras empresas viessem a se instalarem no país para a fabricação dos painéis. A Canadian Solar, uma empresa de origem canadense e uma das maiores fabricantes de painéis fotovoltaicos do mundo instalou, em 2016, sua fábrica na cidade de Sorocaba em São Paulo, sendo está a maior do Brasil até o momento. Ainda em 2016, a empresa S4 Solar do Brasil inaugurou a sua fábrica em Suape, Pernambuco, com capacidade anual de produção de 600 mil painéis (S4 SOLAR DO BRASIL, 2018). Em 2017 a empresa chinesa BYD instalou em Campinas, São Paulo, junto a sua unidade fabril para fabricação de chassis de veículos elétricos uma divisão para fabricação dos painéis.

## **2.2 Tecnologias fotovoltaicas**

Os sistemas fotovoltaicos utilizam células fabricadas a partir de materiais semicondutores para converter a radiação solar em eletricidade. Segundo Imhoff (2007) a energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de uma célula fotovoltaica utiliza o princípio do efeito fotoelétrico, como retratado na Figura 6. Este efeito ocorre quando a radiação solar é absorvida na superfície da junção semicondutora da célula, que é formada por duas camadas: camada tipo P, onde existe um excesso de carga positiva e camada tipo N com excesso de carga negativa, que, quando excitadas com a radiação solar, criam um fluxo de corrente elétrica (ADRIANO, 2015).

Figura 6 - Efeito fotovoltaico na célula.



Fonte: CRESESB (2018).

De acordo com o *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), vinculado ao departamento de energia dos Estados Unidos, as células solares de primeira geração são feitas de silício e, de modo geral, são as mais eficientes. As células solares de segunda geração são chamadas de células solares de película fina, devido à utilização de materiais derivados de silício amorfo ou de materiais como o telureto de cádmio. As células solares de filmes finos usam as camadas de materiais semicondutores com apenas alguns micrômetros de espessura, o que as torna flexíveis e permite a sua utilização em telhas e fachadas de edifícios. As células solares de terceira geração ainda estão em desenvolvimento, mas estão sendo feitas a partir de uma variedade de novos materiais além do silício, incluindo tintas solares usando tecnologias convencionais de impressão e plásticos condutivos.

Atualmente, existem diferentes tecnologias que são utilizadas para a fabricação das células fotovoltaicas, as principais, serão abordadas na sequência deste item, com uma ênfase maior para as células de silício policristalino que são as mais utilizadas no mundo.

### 2.2.1 Célula fotovoltaica de silício cristalino

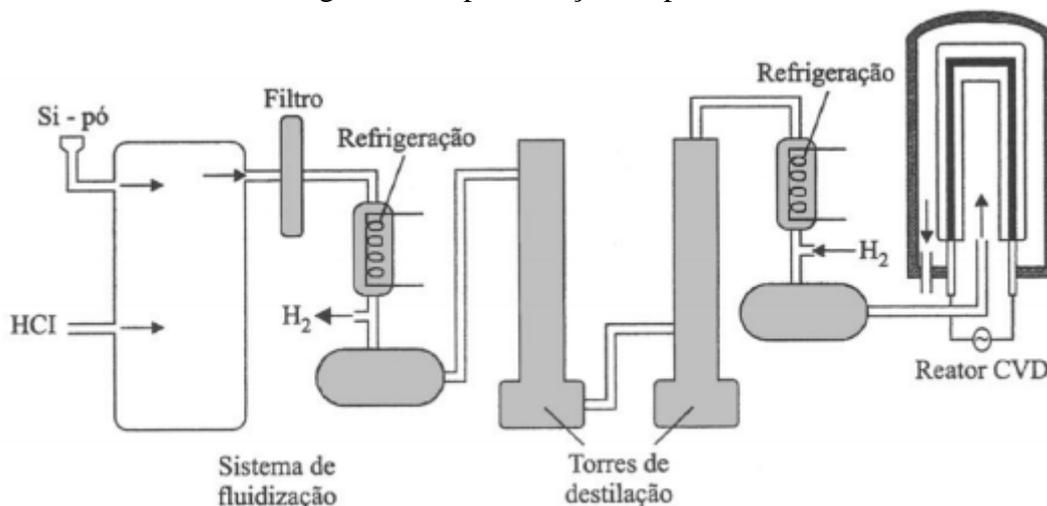
O silício não é encontrado na natureza em seu estado elementar, mas na forma de compostos minerais (LUDKE, 2018). É o segundo elemento químico mais abundante da Terra, após o oxigênio e o semicondutor mais abundante do mundo (ENVIRONMENT CANADA, 2012). O silício teve seu desenvolvimento tecnológico com o crescimento da indústria eletrônica. Com a evolução dos componentes eletrônicos, a tecnologia para a extração e purificação do silício se desenvolveu (ESPOSITO e FUCHS, 2013).

A produção dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino decorre de uma sequência de etapas que inicia com a extração do silício. Basicamente, a produção inicia com a extração da matéria prima por meio da mineração das jazidas de quartzo e segue com o processamento da sílica da areia de quartzo que é reduzida para silício de grau metalúrgico (Si-gM) em forno a arco elétrico (FTHENAKIS et al., 2008).

Na sequência do processo, o Si-gM precisa ser purificado para silício de grau solar (Si-gS), atingindo uma pureza maior que 99,99% e para isso, é empregado o método Siemens ou Siemens modificado (PENG et. al, 2013). Para Pinho e Galdino (2014), nesta etapa o silício deve ser ultrapuro, pode ser empregado o silício de grau eletrônico (Si-gE) com uma pureza de 99,9999999%, denominada de 9N (nove noves), ou então o Si-gS, com 99,9999 (6N – seis noves), de menor custo e que não poder ser utilizado na indústria da eletrônica. Segundo Wong (2016), nesta etapa uma quantidade considerável de energia é consumida porque a temperatura de trabalho no método Siemens é entre 1100°C e 1200°C para o silício atingir o grau de pureza desejado.

A Figura 7 mostra o processo Siemens que foi desenvolvido na Alemanha na década de 50 e segue a seguinte sequência: gaseificação do Si-gM, destilação e deposição de silício puro (MARQUES, 2013). Conforme Peng et al. (2013), o processo ocorre em uma câmara de reator na qual os gases triclorosilano ( $\text{SiHCl}_3$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) são aquecidos na faixa de 1100-1200°C para a reação, enquanto no processo Siemens modificado os gases silano ( $\text{SiH}_4$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) precisam ser aquecidos a uma temperatura menor, cerca de 800°C, o que acaba gerando economia no processo (FTHENAKIS et al, 2008).

Figura 7 - Representação do processo Siemens.

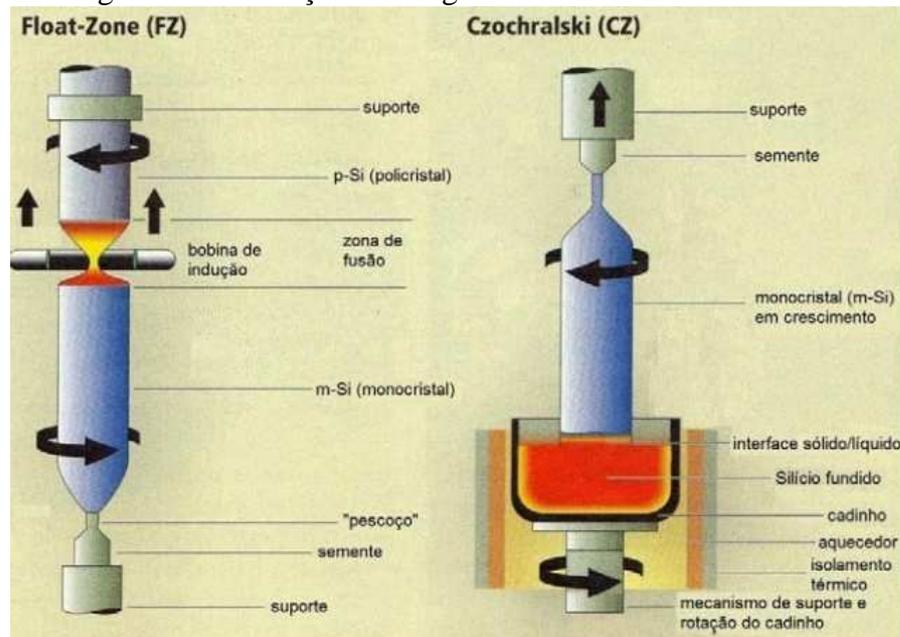


Fonte: Moreira (2009).

Ao final do processo Siemens tem-se o Si-gS purificado e pronto para a formação dos lingotes de silício que poderão ser do tipo monocristalino (m-Si) ou policristalino (p-Si).

Há dois processos de solidificação para a obtenção dos lingotes de silício monocristalino: o crescimento Czochralski (CZ) e o crescimento em zona flutuante (FZ – Floating Zone) (ZULEHNER, 2000). A Figura 8 apresenta a fabricação do lingote de silício por meio destas técnicas.

Figura 8 - Fabricação dos lingotes de silício monocristalino.



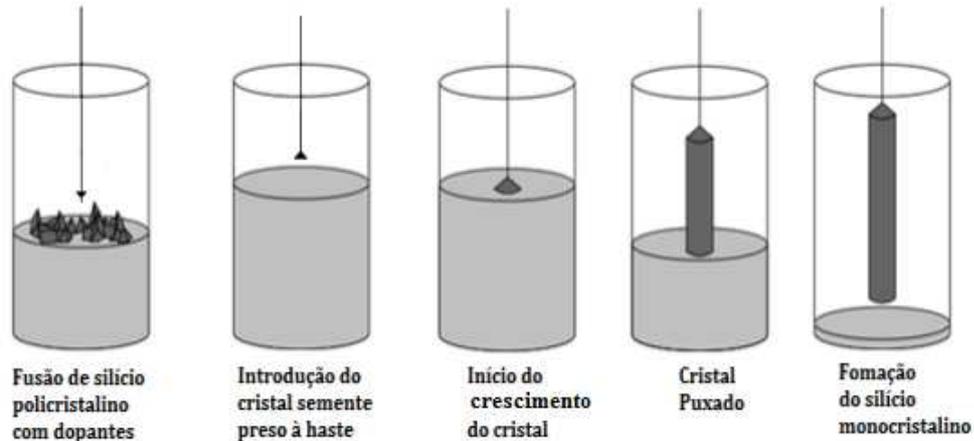
Fonte: Pinho e Galdino (2014).

O processo Czochralski, também conhecido pela abreviação CZ, foi desenvolvido pelo polonês Jan Czochralski em 1918 e aperfeiçoado na década de 1950. Esta técnica é muito mais utilizada que o processo Floating Zone (SWART, 2010). O método utiliza um cristal semente de silício preso em uma haste e mergulhado em silício fundido em um cadinho de quartzo. Quando a semente entra em contato com o silício fundido, ocorre um resfriamento da superfície do silício fundido, iniciando-se o processo de cristalização. Na sequência, o cristal é puxado e rodado muito lentamente pela haste formando um lingote monocristalino (MARQUES, 2013).

A Figura 9 ilustra as etapas da formação do lingote durante o processo Czochralski, que resulta em um lingote em formato de cilindro com 10 centímetros de diâmetro, que posteriormente é cortado em fatias finas de 300  $\mu\text{m}$  de espessura, formando o *wafers* de silício (ASSUNÇÃO, 2014). Os *wafers* ou bolachas de silício, como também são denominados, são obtidos pela laminação dos lingotes, que depois de fabricados, passam por processos

mecânicos de usinagem, corte, desbaste, arredondamento das bordas, limpeza e polimento (MORI, 2007). Jungbluth et al. (2010), citam que o processo de laminação dos lingotes é realizado em conjunto para *wafers* de m-Si e p-Si, pois o que diferencia a produção das células é o meio de purificação do silício, sendo o restante do processo equivalente.

Figura 9 - Etapas da formação do lingote de silício monocristalino durante o processo Czochralski.



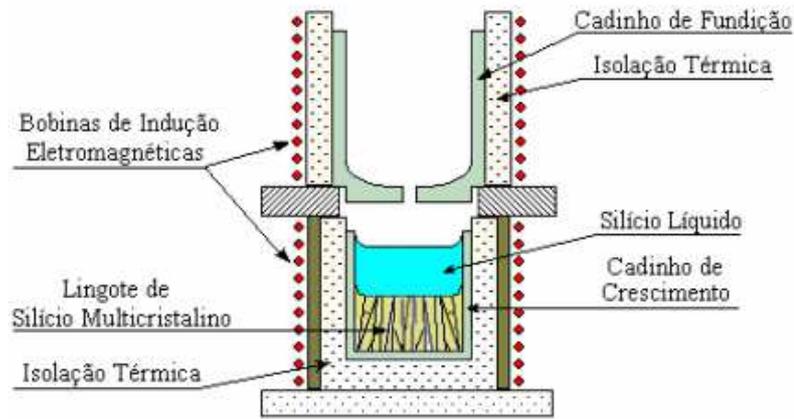
Fonte: Marques (2013).

O Processo Floating Zone (FZ) ou Fusão Zonal é uma alternativa ao processo Czochralski. Neste processo, é usado um tarugo de silício com tamanho aproximado ao do lingote que se deseja obter do processo, sendo inserida uma semente de silício em sua extremidade. O tarugo é montado em um sistema onde se tem uma espira aquecida por rádio frequência, que irá induzir uma corrente elétrica como se fosse o secundário de um transformador em curto-circuito, fundindo o material (MOREIRA, 2009; MARQUES, 2013). Para Pinho e Galdino (2014), as células monocristalinas apresentam um alto custo e um alto consumo de energia na sua fabricação.

O silício policristalino possui um processo mais simples para a sua solidificação. Para a fabricação deste material, o Si-gM que foi purificado em Si-gS sofre o processo de Solidificação Direcional (SD), conforme Figura 10. Funde-se o silício em um cadinho de quartzo por meio de indução magnética seguida de uma lenta solidificação. (GHENSEV, 2006). Segundo Ruther (2004), a eficiência da célula de silício policristalino é menor que a do silício monocristalino, mesmo sendo fabricados pelo mesmo material. Isso se deve porque após a fundição e solidificação direcional, o resultado é um bloco com grandes quantidades de grãos ou cristais, concentrando maior número de defeitos no contorno destes grãos. Em função disso, o seu custo é mais baixo quando comparados às células monocristalinas. A

eficiência dos painéis monocristalinos variam entre 14 a 24,7%, enquanto a dos painéis policristalinos variam entre 13 a 19,8% (ASSUNÇÃO, 2014).

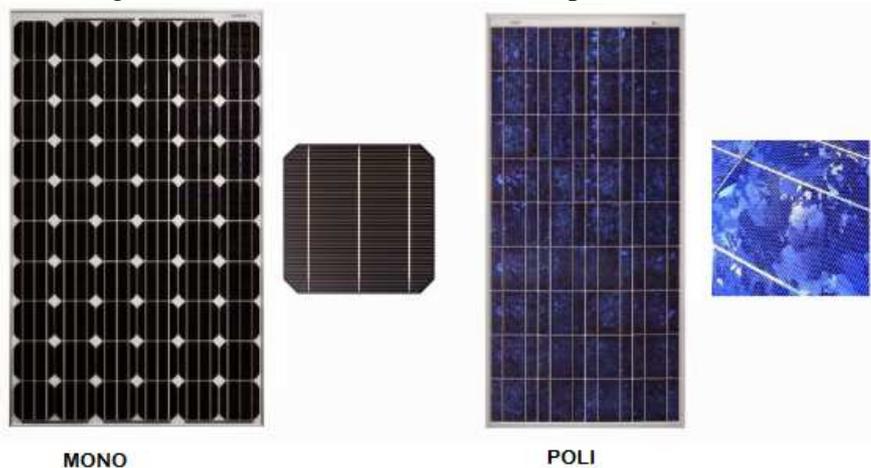
Figura 10 - Método da solidificação direcional.



Fonte: Ghensev (2006).

Conforme Pinho e Galdino (2014), a célula policristalina é produzida a partir de pedaços de silício. Os átomos de silício não se organizam em um único cristal, criando-se assim uma célula com várias superfícies. Isso pode ser observado na Figura 11 que coloca lado a lado um painel monocristalino e outro policristalino, sendo possível perceber que o módulo policristalino não apresenta uma estrutura homogeneizada. Outra diferenciação que pode ser observada na Figura 11 é o formato das células. Os cantos da célula monocristalina são cortados em forma de octógono porque os *wafers* são cortados a partir de lingotes cilíndricos que são gerados pelo processo de Czochralski. Já na célula policristalina, após a solidificação direcional, o lingote tem a forma de um bloco retangular.

Figura 11 - Módulo monocristalino e policristalino.



Fonte: Moreira (2009).

Conforme descrito anteriormente, após a fabricação dos lingotes, eles são serrados para obtenção do *wafers*. Segundo Jungbluth et al. (2010), a maioria dos produtores utilizam uma tecnologia de fatiamento denominada multi-fio, por apresentar melhor rendimento em comparação com outros tipos de serras. Normalmente, as colunas são serradas em *wafers* quadrados com uma área de 156 mm<sup>2</sup> e uma espessura que varia de 180 a 270 mm (Ludin et al. 2018). Após o corte, as lâminas de silício passam por um processo padrão antes da fabricação do módulo, Ludin et al. (2018) e Pinho e Galdino (2014) citam que este processo pode ser resumido pela seguinte sequência de etapas:

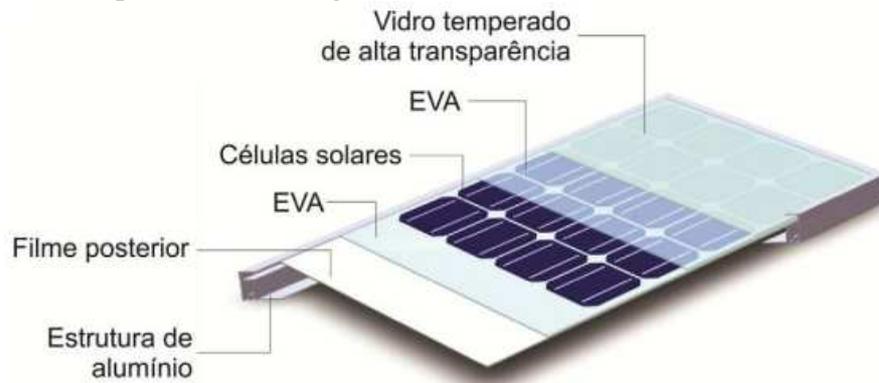
- Texturização: um ataque químico é realizado para a formação de micro pirâmides nas superfícies das lâminas de p-Si e m-Si, com o objetivo de aumentar a absorção da luz pelo silício. O ataque químico em lâminas de p-Si é realizado com substâncias em meio ácido e para as lâminas de m-Si utiliza-se substâncias em meio alcalino.
- Limpeza: após a texturização é realizado o processo de limpeza para a remoção de contaminantes com a utilização de soluções químicas.
- Doping: o processo de dopagem é realizado nas lâminas para criar a junção PN fotoativa. Os elementos mais comumente adotados como dopantes para o silício são o Boro, que produz um semicondutor do tipo P e o Fósforo, que produz um semicondutor do tipo N.
- Metalização: confecção dos contatos metálicos da face frontal e traseira com a utilização de pastas de prata ou prata-alumínio.
- Revestimento: para aumentar a irradiação e melhorar a eficiência, o revestimento antirreflexo é pintado na face frontal.
- Verificação: a célula finalizada deve ser verificada quanto às características elétricas, bem como a eficiência.

Com a finalização da célula, elas são associadas eletricamente e encapsuladas para formar o módulo fotovoltaico. De acordo com as características elétricas de tensão, corrente e potência as células são associadas em série e paralelo e podem formar um conjunto que varia de 36 até 216 células por módulo (PINHO E GALDINO, 2014). As células são encapsuladas a fim de protegê-las das intempéries do tempo e proporcionar resistência mecânica ao módulo. O encapsulamento é constituído por camadas de vidro temperado de alta transparência, acetato de etil-vinila (*Ethylene-vinyl acetate* - EVA) estabilizado para radiação ultravioleta, células fotovoltaicas, estabilizado novamente com EVA e um filme isolante

constituído a partir de uma combinação de polímeros. Por fim, é instalada uma moldura de alumínio anodizado e caixa para as conexões elétricas (PINHO E GALDINO, 2014). A Figura 12 representa o esquema de fabricação descrito.

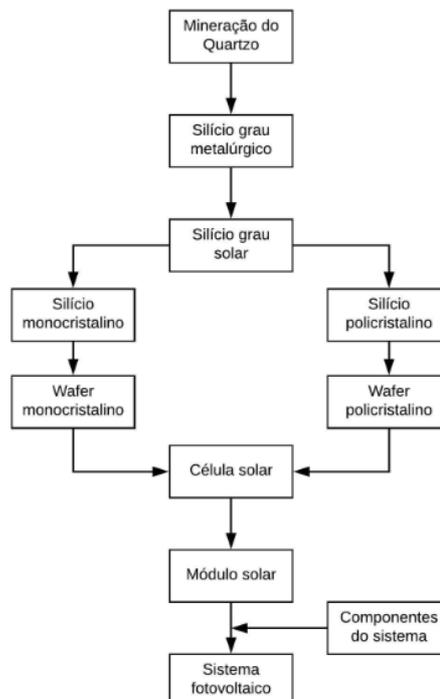
Todo o processo para fabricação do módulo fotovoltaico de silício cristalino, desde a extração da matéria prima até a confecção do módulo, pode ser representado pelo fluxograma apresentado na Figura 13.

Figura 12 - Esquema de fabricação de um módulo fotovoltaico de silício cristalino



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Figura 13 - Sequência dos processos para fabricação do módulo fotovoltaico de silício.



Fonte: Adaptado de Fthenakis (2011).

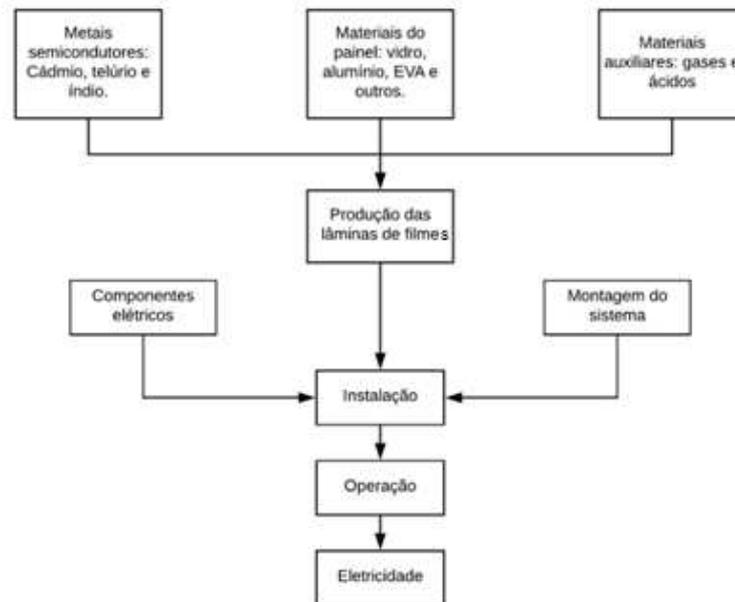
### 2.2.2 Célula solar de filme fino

Os filmes finos surgiram como uma alternativa mais barata para a produção de células, em relação aos *wafers* de silício cristalino. Contudo, as células baseadas em filmes finos apresentam menores eficiências de conversão, reduzindo sua vantagem comparativa (ABINEE, 2012). Ruther (2004) relata que a tecnologia fotovoltaica de filmes finos está sendo desenvolvida porque apresentam baixos custos de produção em virtude de uma menor quantidade de material utilizada, a baixa quantidade de energia utilizada na produção e a grande capacidade de produção, refletindo em um baixo custo capital. Outro fator positivo é que as células de filmes finos não ficam restritas aos formatos das células de silício cristalino, surgindo assim a possibilidade de aplicação em superfícies amplas e até flexíveis (Pinho e Galdino, 2014).

Entre os principais materiais utilizados na produção da célula de filme fino, estão o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS), índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe) (Pinho e Galdino, 2014). Historicamente, o silício amorfo foi a tecnologia mais utilizada para fabricação de filmes finos, embora atualmente a maior quantidade de módulos com células de filme fino utiliza a tecnologia CdTe (ABINEE, 2012). A grande desvantagem da utilização de filmes finos é em virtude da sua eficiência comercial que fica entre 6% a 12%, apesar que, em testes de laboratório atingiu-se valores de 21,7% e 21% para células de filmes finos de CIGS e CdTe respectivamente (LIMA, 2017).

Na Figura 14 é apresentado um fluxograma para fabricação de células de filmes finos proposto por Peng et al. (2013).

Figura 14- Fluxograma para fabricação de células de filmes finos.

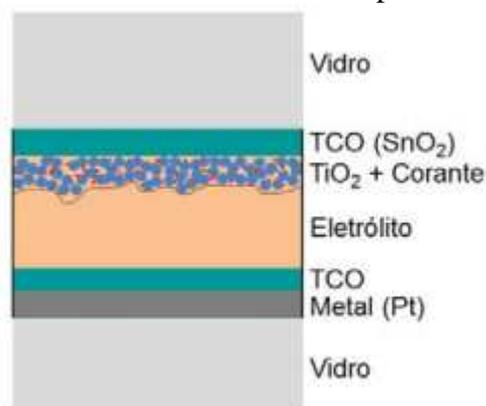


Fonte: Adaptado de Peng et al. (2013).

### 2.2.3 Célula solar sensibilizada por corante

As células fotovoltaicas sensibilizadas por corantes (DSSC – *Dye Sensitized Solar Cells*) foram desenvolvidas em 1991, por Michael Gratzel e O'Regan (GRATZEL e O'REGAN,1991). A sua estrutura básica é composta por um substrato de vidro, um filme condutor transparente (TCO), uma camada composta por dióxido de titânio poroso e embebida em um corante com rutênio, um eletrólito, outra camada de TCO e por fim, um contato metálico traseiro de platina e vidro (PINHO E GALDINO, 2014). A Figura 15 retrata de maneira simplificada a célula solar sensibilizada por corante.

Figura 15 - Célula sensibilizada por corante.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Sob condições de luz difusa e em altas temperaturas, as DSSC têm performance relativamente melhor que as outras células solares, como por exemplo a de silício cristalino. Isso ocorre porque as DSSC possuem superfícies rugosas, que são relativamente melhores na absorção de luzes difusas do que superfícies planas (HAGFELDT et al., 2010). Outro fator importante a ser considerado quando se pensa na inserção no mercado desta categoria de célula solar é o custo, que atualmente pode ser equiparado ao das células convencionais de silício cristalino, pois envolve processos de manufatura mais simples e, portanto, mais baratos. Porém, como a eficiência das DSSC ainda é baixa, atualmente elas competem no mesmo mercado que as células de silício amorfo (BAXTER, 2012).

#### **2.2.4 Célula solar de perovskita**

As células solares de perovskita de haleto orgânico-inorgânicos vêm tendo desenvolvimento significativo no campo da energia fotovoltaica na década atual e são a melhor aposta para satisfazer a necessidade de alta eficiência, permitindo a fabricação com soluções de baixo custo (SUM e MATHEWS, 2014). Perovskitas de haleto de metilamônio de chumbo surgiram como materiais fotovoltaicos promissores devido às suas propriedades ópticas, tais como elevados coeficientes de absorção para uma ampla gama de absorção de luz solar. Além disso, a abundância da matéria-prima e a habilidade de serem processadas em solução fazem das perovskitas de haleto de metilamônio de chumbo as mais adequadas para as tecnologias fotovoltaicas (JIANG et al., 2015).

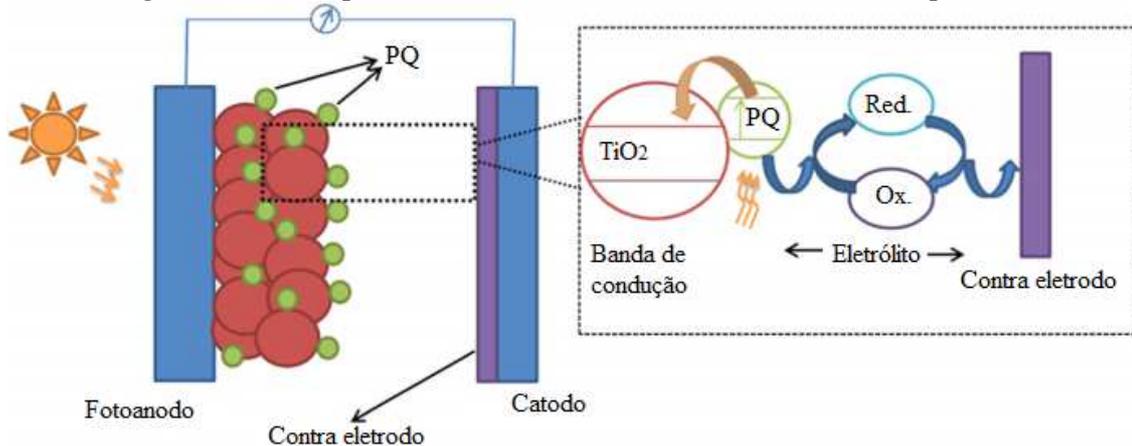
Como a célula solar de Perovskita ainda é um tipo de tecnologia fotovoltaica recente, sendo ainda considerada como uma tecnologia emergente, o seu desenvolvimento e melhor aplicação ainda carece de estudos. Djuricic et al. (2017), afirmam que a partir de relatórios iniciais sobre a eficiência da célula de perovskita em 2012, uma grande quantidade de publicações e aumento da eficiência desta célula são relatados. Para Park (2015) um dos desafios para esta tecnologia é superar a baixa estabilidade do material quando a umidade relativa do ar é alta.

#### **2.2.5 Célula solar sensibilizada por pontos quânticos**

Um ponto quântico (PQ) é qualquer estrutura com suas três dimensões na escala nanométrica, sendo a estrutura eletrônica sua característica mais importante, a qual apresenta níveis de energia quantizados parecidos com os de átomos, fazendo com que eles também

sejam conhecidos como átomos artificiais (SUELA, 2007). Ao decorrer dos últimos anos, os PQs de semicondutores nanocristalinos têm atraído grande atenção para aplicações fotovoltaicas (RUHLE, 2010). A Figura 16 demonstra o funcionamento da célula sensibilizada por PQs.

Figura 16 - Princípio de funcionamento da célula sensibilizada por PQs.



Fonte: Adaptado de Kouhnavard et al. (2014).

As células solares sensibilizadas por pontos quânticos foram desenvolvidas utilizando os mesmos materiais empregados nos dispositivos convencionais e que já apresentavam resultados favoráveis. Entretanto a arquitetura e alguns componentes foram modificados em busca de uma melhor eficiência (BERNARDES, 2015). A escolha convencional de materiais semicondutores para serem utilizados como sensibilizadores neste tipo de célula solar tem sido os PQs de Sulfeto de Cádmio (CdS) e Seleneto de Cádmio (CdSe). A preferência pelo uso destes decorre de estudos realizados, que mostraram a sua capacidade em captar uma parte da região visível do espectro solar e suas boas propriedades de separação de carga (SILVA, 2016).

### 2.3 Componentes do sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico consiste no módulo fotovoltaico e nos chamados componentes de balanço do sistema que deriva do termo inglês *system of balance* (BOS). O módulo engloba a superfície que aproveita a energia solar. Os componentes do BOS abrangem todas as outras infraestruturas de suporte que incluem a fiação, chaves para conexão à rede elétrica, suporte para instalação dos módulos e inversores para converter corrente contínua em corrente alternada (APUL, 2015). Para Bilich et al. (2017), os

componentes de BOS irão depender do tipo de sistema fotovoltaico instalado, caso seja um sistema isolado ou híbrido, a principal diferença deste sistema para um sistema que é conectado a rede da concessionária de energia, é a presença de um conjunto de baterias e controladores de carga. Portanto, os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados, denominados comumente como *Off-grid* ou conectados à rede, denominados de *Grid-tie*.

Os sistemas isolados são caracterizados por não se conectar a rede elétrica. São utilizados em locais remotos onde não há acesso da rede de distribuição de energia elétrica ou onde o custo de se conectar a rede elétrica é elevado. A energia produzida é armazenada em baterias que garantem o abastecimento em períodos sem sol (SIQUEIRA, 2013). Já os sistemas *Grid-tie*, são caracterizados por estarem conectados com a rede de distribuição de energia elétrica e devido a isso, não é necessário a utilização de banco de bateria e controlador de carga, como pode ser observado nas Figuras 17 e 18 que representam os sistemas *Off-grid* e *rid-tie*, respectivamente.

Resumidamente, os componentes BOS do sistema fotovoltaico serão os inversores, cabos, estruturas para fixação dos painéis e dispositivos elétricos de proteção. Porém, se o sistema fotovoltaico for um sistema isolado, acrescenta-se aos componentes o banco de baterias e o controlador de carga.

Figura 17 - Sistema isolado (*Off-grid*).



Fonte: Go solar (2018).

Figura 18 - Sistema conectado a rede (*Grid-tie*).



Fonte: Go solar (2018).

## 2.4 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

### 2.4.1 História e definição da ACV

Coltro (2007) cita que os estudos de ACV tiveram início na década de 60 em razão da crise do petróleo que levou a sociedade a questionar o limite da extração dos recursos naturais, mais especificadamente, combustíveis fósseis e recursos minerais. Os estudos iniciais tinham como objetivo quantificar o consumo de energia e devido a isso utilizavam um fluxograma de processo com balanço de massa e energia. Para a ABNT (2009a) o surgimento da ACV está relacionado com a problemática de preservação ambiental e os possíveis impactos relacionados aos produtos (bens e serviços) ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Segundo Hunt e Franklin (1996 apud Ferreira 2004, p.7), o primeiro estudo deste tipo foi realizado pela *Midwest Research Institute* (MRI) para a empresa Coca-Cola em 1969 nos Estados Unidos. O objetivo do estudo foi analisar os diferentes tipos de embalagens de refrigerantes e quantificar o consumo de recursos naturais e as emissões produzidas durante a fabricação das embalagens. Este trabalho foi nomeado de *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA) e seus resultados serviram de base para o desenvolvimento e elaboração da ACV.

Desta forma, em 1972, o MRI aperfeiçoou o estudo através da elaboração de um novo trabalho solicitado pela *U. S. Environmental Protection Agency* (USEPA) com o objetivo de comparar diferentes embalagens de cerveja. Esta foi considerada a mais ousada REPA realizada até aquele momento, pois além do processo de fabricação da embalagem,

consideraram-se as ligações do processo produtivo com as fases de distribuição e utilização, bem como a cadeia produtiva de mais de 40 materiais, como vidro, plástico e alumínio (HUNT E FRANKLIN, 1996, apud FERREIRA, 2004, p.7). Para Jensen et al. (1997) devido ao nível de complexidade e abrangência do trabalho para a época, este trabalho pode ser considerado o marco inicial para o que hoje é denominado de ACV.

Conforme Heijungs et al. (1992), a visão de ciclo de vida surgiu como uma opção para a visão convencional de avaliar os problemas ambientais apenas sobre o processo de fabricação dos produtos. A avaliação de desempenho ambiental da maneira convencional pode ser uma desvantagem, pois a visão sobre o processo fica prejudicada não englobando todas as etapas do ciclo de vida. Por consequência disso, os impactos analisados podem não ser os mais importantes. Ao adotar o conceito de ciclo de vida, esta vantagem é superada porque todas as etapas do ciclo são consideradas, onde o foco principal está no produto e não no processo.

De acordo com Campos (2012), com a crescente aplicação de estudos de ACV e a intenção de aumentar a confiabilidade desses estudos, surgiu a necessidade de normatização desta técnica. Com este objetivo, em 1992, a *International Organization for Standardization* (ISO) criou o Comitê Técnico TC207/SC 5 (TIBOR E FELDMAN, 1996). Atualmente, as normas ISO que regem a ACV são a ISO 14040:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) e ISO 14044:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) realizou a transcrição destas normas internacionais para o Brasil, com a criação das normas NBR ISO 14040:2009 (Gestão ambiental – Avaliação ambiental – Princípios e estrutura) e NBR ISO 14044:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações).

Blumenschein e Miller (2016) definem o ciclo de vida como um conjunto de etapas dentro de uma cadeia produtiva. Assim, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma ferramenta utilizada para tomada de decisões baseadas nos resultados obtidos por essa avaliação, principalmente, por meio dos impactos ambientais contabilizados. A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima, manufatura dos produtos, embalagem e distribuição, uso e manutenção do produto, até completar o ciclo com a sua disposição (ABNT, 2009a). A Figura 19 demonstra esta sequência de etapas.

Figura 19 - Etapas do ciclo de vida de um produto.

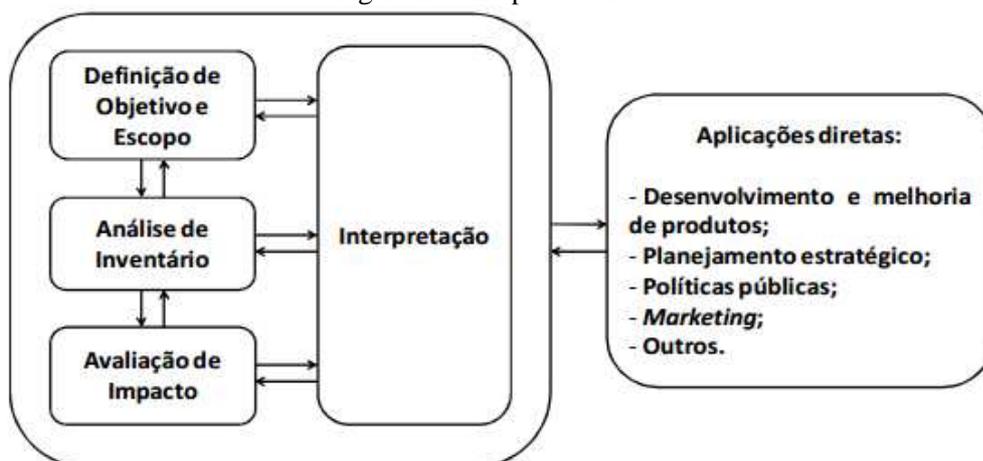


Fonte: SILVA (2012).

Para Barbosa Júnior (2008) a ACV é um instrumento científico qualitativo e quantitativo, que avalia todos os estágios do ciclo de vida e tipos de impactos ambientais direcionados ao produto, com o intuito de levantar e interpretar os aspectos e impactos potenciais envolvidos em todo o processo; aprimorar o processo produtivo e os produtos de uma empresa; comparar, de uma forma integrada, o desempenho ambiental de seus produtos; auxiliar na tomada de decisões da indústria, do governo e das ONGs, na definição de prioridades e no desenvolvimento de projetos e processos; fornecer informações referentes aos recursos utilizados no consumo de energia e nas emissões de poluentes; subsidiar as estratégias de marketing (comparação de produtos, rotulagem e declarações ambientais), gerando uma diferenciação na competitividade dos produtos no mercado cada vez mais exigente.

Atualmente, as etapas da ACV definidas pela NBR ISO 14040:2009 são: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, análise dos impactos do ciclo de vida, e interpretação do ciclo de vida, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Etapas da ACV.



Fonte: ABNT (2009 a).

A fase de definição de objetivo e escopo é a primeira fase para aplicação de uma ACV. Visa em primeiro lugar, definir o objetivo do estudo. Neste momento deve-se declarar a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo e o público alvo (ABNT, 2009a). Para Mendes (2013) a definição do objetivo orienta todos os aspectos do escopo e permite o controle de qualidade do trabalho, pois é decisivo para todas as outras fases da ACV. Para a determinação do escopo leva-se em consideração o sistema ou sistemas a serem estudados e a unidade funcional que é um fator essencial nesta etapa. A unidade funcional é estabelecida para fornecer uma base de referência em relação a quais dados de entrada e saída são mensurados e, a partir disso, definir qual a quantidade de produto necessário para cumprir com a função expressa pela unidade funcional (SILVA, 2012).

O escopo da ACV pode ser definido de acordo com as etapas do ciclo de vida do sistema analisado adotando uma das seguintes abordagens (OLIVEIRA, 2017; CAMPOS, 2012):

- *Cradle to gate* (do berço ao portão): este tipo de fronteira analisa o início da extração da matéria prima até o produto no portão da fábrica, excluindo o uso e o estágio do fim da vida do produto.
- *Cradle to grave* (do berço ao túmulo): inicia com a extração da matéria prima e passa pelas fases de produção, transporte, utilização do produto até sua disposição final ou a sua reciclagem.
- *Gate to gate* (do portão ao portão): ocorre quando tem-se a intenção de avaliar as fases de produção que ocorrem dentro do portão da fábrica.

Este tipo de avaliação pode ser usado, por exemplo, para analisar um único processo inserido na fase produtiva de um determinado produto.

- *Gate to grave* (do portão ao túmulo): é empregado para avaliar um produto que sai da sua produção e é utilizado até a disposição final ou reciclagem.

Na segunda etapa da ACV o inventário do ciclo de vida é realizado por meio da coleta de dados e o estabelecimento dos procedimentos de cálculo e a quantificação dos fluxos de materiais, energia e saídas (produtos, emissões, etc.) ao longo do ciclo de vida do produto (ABNT, 2009a). O inventário deve ser consistente as definições de escopo e de objetivo, sendo também um *feedback* da fase anterior de definição de objetivo e escopo, pois é devidamente interpolada pela interpretação visando melhorias e ajustes (EUROPEAN COMMISSION, 2010a). Os resultados obtidos nesta fase, são utilizados na fase seguinte onde é feita a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), e também um *feedback* com relação as configurações do escopo inicial, o qual muitas vezes precisa ser alterado ao longo do estudo (EC-JRC, 2010c).

A fase de avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida visa à compreensão e a análise da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do ciclo de vida do produto (ABNT, 2009b). Esses dados de impacto são associados com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, tentando desta forma entender tais impactos associados a produtos e processos. Conforme a ABNT (2009b), a avaliação dos impactos consiste em elementos obrigatórios (seleção das categorias de impacto, classificação e caracterização) e opcionais (a normalização, agrupamento, ponderação e análise adicional da qualidade dos dados).

A última fase da ACV consiste na interpretação do ciclo de vida. Nesta fase, a identificação e análise dos resultados obtidos nas fases de inventário e avaliação de impactos ambientais de acordo com o objetivo e o escopo definido para o estudo em questão são realizadas (CHEHEBE, 1998).

De acordo com a ABNT (2009a), a fase de interpretação de um estudo de ACV, compreende 3 elementos básicos:

- Identificação dos pontos significativos baseados nos resultados das fases de ICV ou AICV do estudo ACV.
- Avaliação do estudo considerando as verificações de completeza, sensibilidade e consistência. A análise de completeza visa verificar se todas as informações relevantes e dados necessários para o estudo de ciclo de vida estão disponíveis

e completos. A verificação de sensibilidade avalia a confiabilidade final dos resultados e as conclusões determinando o quanto eles são afetados pelas incertezas de dados, métodos de alocação, alteração de pressupostos, etc. A análise de consistência analisa o quanto que as hipóteses traçadas, métodos e dados obtidos são consistentes ao longo do ciclo de vida do produto (SILVA, 2012).

- Conclusões e recomendações: através das definições de escopo e objetivos, alinhados com os resultados da identificação das questões pertinentes ao estudo são realizadas as conclusões. Considerando as conclusões finais elaboradas, são apresentadas as recomendações pertinentes às conclusões geradas e atreladas ao estudo.

#### **2.4.2 Ferramentas computacionais para ACV**

Diversas ferramentas computacionais foram desenvolvidas para realização de estudos ambientais de ACV. Campolina (2015) realizou uma revisão da literatura sobre *softwares* empregados em estudos de ACV, sendo os principais: BEES, ECO-it, GaBi, GREET, IDEMAT, KCL-ECO, LCAPIX, REGIS, SimaPro, SPOLD e Umberto.

Por meio da análise de diversas publicações que envolvem ACV de painéis fotovoltaicos, bem como a análise de impactos ambientais de painéis fotovoltaicos de silício policristalino, apresentados no Quadro 1 deste trabalho, verificou-se que o *software* SimaPro é o mais empregado neste tipo de estudo. Em virtude disso, neste item, apresenta-se de forma mais detalhada as características deste *software*.

O *software* SimaPro (*System for Intergrate Environmental Assessment of Products*), uma ferramenta profissional para coletar, analisar e monitorar os dados de desempenho ambiental de produtos e serviços. Foi desenvolvido pela Pré Consultants, em 1990, na Holanda. Com sua utilização é possível modelar e analisar facilmente ciclos de vida complexos de maneira sistemática e transparente, medindo o impacto ambiental de produtos e serviços em todos os estágios do ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a fabricação, distribuição, uso e descarte (PRÉ CONSULTANTS, 2018).

O SimaPro possui nove base de dados fixas e seis bases opcionais para realização de inventários. As bases de dados fornecem informações de uma variada gama de processos de produtos, onde se destaca a *Ecoinvent*. Este banco é baseado diretamente em dados obtidos por profissionais dentro da indústria. Para Jungbluth et al. (2008) este é um banco de dados

muito conhecido e confiável. O banco de dados *Ecoinvet* é considerado o principal banco de dados de inventário de ciclo de vida, possui mais de 12.800 conjuntos de dados de análise de inventário, em diferentes áreas, como: fornecimento de energia, agricultura, transportes, produtos químicos, materiais de construção, materiais de embalagem, e outros (PRÉ CONSULTANTS, 2018).

Para a avaliação dos impactos o SimaPro possui 32 métodos de avaliação, sendo que cada método de avaliação pode apresentar cinco etapas: caracterização, avaliação de danos, ponderação, normalização e adição. Segundo a NBR ISO 14040 (2009 b) apenas a etapa de caracterização é obrigatória para todos os métodos, sendo as demais opcionais. A principal diferenciação entre os métodos de avaliação se dá em função ao local em que este pode ser empregado, existem métodos que são específicos para aplicação nos EUA como o CML 1992. Os métodos também variam devido aos indicadores, alguns métodos como o EDIP, CML-2 e TRACI consideram indicadores de ponto médio, enquanto outros como o Eco-indicator 99, EPS e Eco-scarcity baseiam-se em impactos de ponto extremo. Há também os métodos que consideram os dois indicadores, como o IMPACT 2002+ e o Recipe (PRÉ CONSULTANTS, 2018).

#### **2.4.2.1 Impact 2002+**

Conforme detalhado no item anterior, o *software* SimaPro possui diversas metodologias que podem ser aplicadas na análise dos impactos do ciclo de vida. Alvarenga (2010) relata que os métodos clássicos compilam os resultados do inventário do ciclo de vida (ICV) em categorias de pontos médios (*midpoints*), como ecotoxicidade e acidificação, por exemplo. Sendo o método CML e EDIP exemplos desta aplicação. Porém, os métodos orientados ao dano modelam a cadeia de causa-efeito do ciclo de vida até os seus pontos finais, ou dano (*endpoint*), como saúde humana e qualidade do ecossistema. O método mais usado neste caso é o *Eco-Indicator 99*.

Piekarski et al., (2013) abordam que o método Impact 2002+ (*Impact Assessment of Chemical Toxics*) é a junção dos métodos clássicos com os orientados ao dano, a fim de absorver suas respectivas limitações e agrupar os pontos positivos dos métodos mais utilizados mundialmente em ACV. Piekarski et al.,(2013) apud Goedkoop et al. (2008) afirmam que o Impact 2002+ é uma combinação entre o Impact 2002 (primeira versão) e os métodos Eco-indicator 99 e CML 2000.

O Impact 2002+ é uma metodologia de avaliação de impacto originalmente desenvolvido no Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausanne (EPFL). Este método propõe uma implementação viável de uma combinação de indicadores de ponto médio (*midpoints*) e de ponto final (*endpoint*), ligando os resultados do inventário do ciclo de vida, através de 14 categorias de ponto médio para quatro categorias de danos (JOLLIET et al., 2003).

As categorias de dano, ou de ponto final (*endpoint*) são: saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos. Já as categorias de ponto médio (*midpoint*) são classificadas em:

- Toxidade Humana: este indicador ocorre quando substâncias de propriedades tóxicas, não biodegradáveis e acumulativas em organismos vivos, são expostas aos seres humanos por meio da respiração ou ingestão de alimentos (WENZEL et al., 1997). Desta forma, suas consequências são avaliadas em relação aos efeitos cancerígenos e não cancerígenos, que refletem sintomas leves ou até mesmo fatais conforme o grau de exposição ao agente nocivo.
- Efeitos Respiratórios: segundo Jolliet et al.,(2003) esta categoria refere-se aos efeitos respiratórios causados por substâncias inorgânicas, que são provenientes de origem mineral.
- Radiação Ionizante: refere-se a quantidade de CFC's (clorofluorcarbonos) que incidem sobre a atmosfera e a água (JOLLIET et al., 2003).
- Depleção da Camada de Ozônio: mostra a redução da camada de ozônio reduzindo os níveis de proteção terrestre contra os raios solares, fazendo com que as radiações UV-B atinjam a superfície terrestre, afetando a saúde de diversos organismos e seres humanos (BAIRD, 2002).
- Ecotoxicidade Aquática: este impacto refere-se à presença de contaminantes em ambientes aquáticos de água doce ou marinha e que afetam os organismos que vivem nestes meios
- Ecotoxicidade Terrestre: semelhante a ecotoxicidade aquática, este indicador refere-se a capacidade de prejudicar os organismo vivos que habitam e ocupam os solos.
- Acidificação Aquática: a acidificação tanto da água doce ou marinha se dá em função da emissão de diversos componentes que são lançados diretamente nos meios aquáticos, ou indiretamente pelo ar ou ao solo, que acabam contaminando as águas subterrâneas. Segundo Hannan e Rummer (2018), a emissão de dióxido

de carbono é o principal agente causador do aumento da acidificação aquática em nível mundial.

- Acidificação Terrestre: este indicador avalia o impacto direto de substâncias que são lançadas no meio ambiente e interferem no nível de acidez do solo, impactando, por exemplo, nas plantações agrícolas. Segundo Huijbregts et al., (2017) apud Bezerra et al., (2018), as emissões principais que contribuem para essa categoria são os óxidos nitrosos, amônia e dióxido de carbono.
- Ocupação dos Solos: este indicador considera os efeitos do uso do solo, a quantidade de área envolvida e a duração da sua ocupação (FARAGÒ et al., 2019).
- Eutrofização Aquática: ocorre devido ao descarte e aumento da concentração de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, no solo ou na água, que podem levar a ocorrência de um rápido desenvolvimento de algas e crescimento excessivo de plantas aquáticas, alterando o ecossistema aquático HUIJBREGTS et al., (2017) APUD BEZERRA et al., (2018).
- Aquecimento Global: é relacionado com a emissão de CFC's (clorofluorcarbonos) para a atmosfera (JOLLIET et al., 2003).
- Energias Não Renováveis: avalia a quantidade de energia primária utilizada proveniente de fontes não renováveis (JOLLIET et al., 2003).
- Extração Mineral: analisa a extração mineral de recursos para fornecimento de matéria prima para fabricação na indústria.

Conforme orientação dos autores do método, Jolliet et al.,(2003), é aconselhado avaliar as pontuações normalizadas ao nível de danos (*endpoints*) para as quatro categorias de impacto (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos), ou opcionalmente, os 14 indicadores de ponto médio (*midpoint*) individualmente na etapa de interpretação da ACV.

### **2.4.3 Avaliação do ciclo de vida aplicada em painel fotovoltaico**

Segundo Ludin et al. (2018) há vários estudos de ACV de painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino, sendo que, a maior parte destes estudos surgiram a partir do ano 2000. Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos internacionais

de ACV que envolvem a aplicação de painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino, alvo deste trabalho. O Quadro 1 apresenta uma revisão, informando os autores do estudo, o ano da publicação do trabalho realizado, o objetivo do trabalho, a metodologia/dados utilizados, o local onde o estudo ocorreu e os indicadores avaliados.

De acordo com a revisão bibliográfica, nota-se o predomínio de três indicadores de avaliação de impacto ambiental que são: Demanda Acumulada de Energia, Tempo de Retorno de Energia e Emissão de Gases de Efeito Estufa. Conforme Fthenakis (2017) estes são os indicadores mais comumente utilizados em avaliações de sistemas fotovoltaicos de energia.

No contexto internacional, o trabalho de Kreith et al. (1990) foram os primeiros que analisaram a emissão de dióxido de carbono de sistemas fotovoltaicos de silício cristalino. O trabalho comparou a produção de dióxido de carbono de uma usina solar fotovoltaica de pequeno e grande porte, com a de uma central elétrica a carvão e uma central térmica solar, considerando uma vida útil de 30 anos para ambos os casos. Os resultados apontaram que a central elétrica a carvão produz 1041 toneladas de dióxido de carbono para cada Giga Watt hora (GWh), enquanto a térmica solar e a fotovoltaica produzem 43 e 24 toneladas/GWh, respectivamente.

Phylipsen e Anselma (1995) realizaram um estudo para avaliar o fluxo de energia de todo o ciclo de vida de células solares de silício policristalino aplicando os indicadores de Demanda de Energia Acumulada e Tempo de Retorno de Energia em três diferentes cenários. O primeiro cenário foi analisado baseando-se no processo de fabricação da célula na época e considerando a célula com uma eficiência de 13%. O segundo e terceiro cenário foram modelados considerando a evolução da tecnologia fotovoltaica e dos meios de produção dos módulos fotovoltaicos acompanhados de uma melhoria na eficiência em 16% e após 18%. Para os três cenários propostos, o modelo mais otimista, com eficiência de 18%, foi o que obteve os menores impactos, comprovando que a melhoria de eficiência da célula fotovoltaica possui uma relação inversamente proporcional com os indicadores que foram analisados.

Anselma e Nieuwlaar (2000) realizaram um estudo que abordou os três principais indicadores juntos. A emissão de gases de efeito estufa, demanda de energia acumulada e o tempo de retorno de energia, foram analisados, para um sistema fotovoltaico conectado a rede, instalado no oeste da Europa. Conforme o estudo, a quantidade de gás de efeito estufa emitido é consideravelmente menor do que fontes de energia que utilizam combustíveis fósseis, mas um pouco mais alta do que a de energia eólica e de biomassa. Já o tempo de retorno da energia gasta ao longo do ciclo de vida varia de 3 anos para sistemas instalados no telhado e 4 anos para instalação fixa no solo.

Os três principais indicadores de avaliação de impacto ambiental, foram analisados com a utilização de um *software* no trabalho de Battisti e Corrado (2005). Por meio da utilização do *software* SimaPro 5.1 e a metodologia Eco Indicator 95 foi traçado um perfil energético ambiental de um sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica de distribuição. De acordo com os tipos de instalações analisadas, o tempo de retorno para recuperação de energia variou de 3 a 4 anos.

Também com a utilização do *software* SimaPro, o estudo de Alsema e Wild-Scholten (2006) procurou realizar uma atualização com a utilização de novos dados obtidos pelo banco de dados *Ecoinvent 2000* e a aplicação da metodologia CML 2000. Os dados considerados envolveram desde a produção da matéria prima de silício até a fabricação de células e módulos fotovoltaicos de silício policristalino e monocristalino, para avaliar o tempo de retorno de energia e a emissão de CO<sub>2</sub>. Obteve-se tempo de retorno entre 1,7 e 2,7 anos considerando a utilização na Europa e a emissão de CO<sub>2</sub> entre 30 a 45 g/kWh.

Na pesquisa desenvolvida por Jungbluth et al. (2007) foram realizados inventários de ciclo de vida para plantas fotovoltaicas de até 3kWp, considerando uma abordagem de berço ao túmulo e assumindo um tempo de operação de 30 anos. O inventário realizado utilizou diferentes tecnologias fotovoltaicas, como: células fotovoltaicas de silício policristalino e monocristalino, células de silício amorfo, de filmes finos, de telureto de cádmio e de seleneto de cobre, índio e gálio. Os dados para o inventário foram obtidos no banco de dados *Ecoinvent*. O estudo comprovou que diferentes tecnologias fotovoltaicas possuem tempos de retorno de energia diferentes e que o índice solarimétrico interfere diretamente neste resultado, através de uma comparação realizada com outros estudos.

Glockner e Wild-Scholten (2008) aplicaram a metodologia de avaliação de ciclo de vida em uma planta solar na Noruega. Para isso, foi utilizado o *software* SimaPro, o banco de dados *Ecoinvent* e o inventário de ciclo de vida e avaliação do ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos da Agência Internacional de Energia. Um dos diferenciais do trabalho foi considerar o processo de fabricação de silício grau solar de uma empresa Norueguesa como sendo a única fonte para um sistema fotovoltaico policristalino. Por meio disso, o estudo apontou um tempo de retorno de energia entre 1,1 e 1,9 anos e uma emissão de CO<sub>2</sub> de 23 g/kWh.

A investigação da influência do local de instalação no desempenho do sistema fotovoltaico foi realizada no trabalho de Nishmura et al. (2010). Através da ACV e considerando duas instalações fotovoltaicas idênticas, uma em Toyohashi no Japão e outra no deserto de Gobi na China, avaliou-se a emissão de gases de efeito estufa, a demanda

acumulada de energia e o tempo de retorno de energia. Evidenciou-se no estudo que em termos totais de impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, que o sistema instalado no deserto de Gobi são 5% menor do que o instalado em Toyohashi.

O trabalho de Desideri et al. (2012) utilizou a ACV para avaliar o impacto ambiental de uma usina fotovoltaica de 1778 kWp e comparar o impacto com as de outras fontes tradicionais de energia na Itália. Com a modelagem na ACV no SimaPro e a utilização da metodologia Eco Indicator 99, quantificaram, em milionésimo de pontos (mPt), a produção de 1kWh de energia da usina fotovoltaica com as demais fontes. Conforme o estudo, a pontuação para a produção de 1kWh da usina fotovoltaica é de 7,34 mPt, de uma usina a carvão mineral é 29,4 mPt, de óleo 80 mPt, gás natural 22,6 mPt e, considerando a matriz energética italiana é de 43,3 mPt, evidenciando-se assim, os benefícios ambientais da energia fotovoltaica comparada com outros sistema de produção de energia.

Peng et al. (2013) realizou uma revisão bibliográfica comparando a emissão de CO<sub>2</sub> e o tempo de retorno de energia para cinco diferentes tecnologias fotovoltaicas (monocristalino, policristalino, silício amorfo, células de telureto de cádmio e de seleneto de cobre, índio e gálio). Os resultados apontaram que entre as tecnológicas fotovoltaicas do estudo, o sistema fotovoltaico com células de telureto de cádmio apresenta o melhor desempenho ambiental para os indicadores avaliados. O resultado é atribuído à baixa necessidade de energia no ciclo de vida e a uma alta eficiência de conversão de energia comparada com as demais tecnologias fotovoltaicas empregadas.

Para identificar os principais benefícios e problemas ambientais associados com a implementação de sistemas fotovoltaicos monocristalino e policristalino, através da modelagem no *software* SimaPro, Kim et al. (2014) analisaram o potencial de aquecimento global, consumo de combustíveis fósseis, tempo de retorno de energia e emissão de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida e comparou com os resultados da matriz energética da Coreia do Sul. Os resultados foram muito benéficos e evidenciaram a necessidade de uma maior participação da energia fotovoltaica na matriz energética do país. De acordo com os números apresentados, a substituição de 0,45% da matriz energética Coreana pela energia fotovoltaica proporcionou uma redução de 69,8 M/ton (Mega tonelada) de CO<sub>2</sub>, considerando uma eficiência de conversão de 20,3% dos módulos fotovoltaicos.

A ACV de um sistema fotovoltaico de silício policristalino foi realizado na China para avaliar a demanda de energia primária, o tempo de retorno da energia e alguns impactos ambientais no trabalho de Fu et al. (2014). Por meio da utilização do *software* Gabi e o banco de dados *Ecoinvent*, os resultados mostraram que a fase mais crítica do ciclo de vida do

sistema fotovoltaico chinês é a transformação do silício de grau metalúrgico em silício grau solar, caracterizado pelo alto consumo de eletricidade, representando a maior parte do impacto ambiental. Conforme os autores, este resultado é reflexo da predominância de usinas a carvão como principal fonte energética do país.

Adriano (2015) efetuou a caracterização do desempenho de sistemas fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino de 250 Wp em Portugal. Para isso, empregou a metodologia EcoBlok que tem como objetivo avaliar o desempenho ambiental de um produto e o banco de dados *Ecoinvent*. Verificou que os painéis fotovoltaicos de silício policristalino possuem menores valores de impactos ambientais para todos os 7 indicadores avaliados em comparação aos painéis monocristalinos. O estudo concluiu também que a fase mais problemática em termos de impacto ambiental para esta tecnologia é a produção da célula e a produção de outros componentes necessários para o sistema funcionar.

Chen et al. (2016) utilizaram diferentes métodos de avaliação de impacto ambiental para realizar a ACV para a produção de células fotovoltaicas de silício monocristalino na China. Foram utilizados os métodos ReCiPe, Impact 2002+, TRACI e CML que permitiram avaliar diferentes categorias de impacto. Os resultados mostraram que o impacto gerado pelas categorias de toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e depleção de metais contribuem de maneira preponderante para a carga ambiental global. Independentemente do método de avaliação adotado, as categorias de impacto similares de cada método obtiveram valores indicativos de impacto muito próximo.

A avaliação da sustentabilidade através de uma abordagem de ACV foi realizada no trabalho de Li et al. (2017). No modelo proposto a sustentabilidade foi avaliada nas categorias de impactos econômicas (viabilidade financeira, custo e confiabilidade), sociais (pobreza e oferta de emprego) e ambientais (tempo de retorno de energia, aquecimento global, eutrofização, acidificação, depleção da camada de ozônio e circularidade material) considerando as etapas de produção, instalação, operação e fim de vida, para as tecnologias fotovoltaicas de silício monocristalino, silício policristalino e de telureto de cádmio. Através do estudo evidenciou-se que a célula fotovoltaica de silício monocristalino tem o melhor desempenho em todos os indicadores e que a eficiência da conversão de energia solar em elétrica é um dos fatores mais influentes de desempenho de um sistema fotovoltaico.

Ludin et al. (2018) analisaram e revisaram trabalhos sobre ACV de tecnologias fotovoltaicas verificando a demanda acumulada de energia, tempo de retorno de energia e emissão de CO<sub>2</sub> para células de silício, filmes finos, célula sensibilizada por corante, célula solar de perovskita e célula solar sensível a pontos quânticos. Os resultados de ACV

mostraram que a tecnologia de silício monocristalino tem o maior consumo de energia, tempo de retorno mais longo e a maior taxa de emissão de gases de efeito estufa em comparação com outras tecnologias de energia solar fotovoltaica.

No cenário brasileiro são poucos os estudos que envolvem ACV e as tecnologias fotovoltaicas. O estudo de ACV proposto por Bezerra et al. (2018) inicia com a produção do silício de grau metalúrgico (Si-gM) até a fabricação do módulo fotovoltaico, ou seja, uma abordagem de berço ao portão. O inventário foi modelado com o *software* SimaPro 8 com a utilização dos métodos de avaliação Demanda de Energia Acumulada e ReCiPe, que permite avaliar indicadores de ecotoxicidade, toxicidade humana, eutrofização da água doce, depleção de recursos fósseis, depleção de metais, acidificação terrestre e mudanças climáticas.

O objetivo do trabalho realizado por Bezerra et al. (2018) foi identificar a carga ambiental e quais são os processos mais prejudiciais ao meio ambiente da tecnologia fotovoltaica de silício policristalino. Conforme os resultados obtidos, os processos com maior demanda energética e de impactos ambientais foram a produção do silício grau metalúrgico e a produção do módulo fotovoltaico, respectivamente.

O trabalho de Oliveira (2017) avalia os impactos ambientais da geração de eletricidade fotovoltaica de painéis de silício cristalinos, considerando desde a fase de extração da matéria prima até a sua instalação, não considera o descarte e reciclagem dos módulos. O trabalho realizou a modelagem em dois cenários, o cenário 1 considera toda a produção do painel na China, enquanto o cenário 2, a fabricação do painel é realizada no Brasil com todas as peças provenientes da China. A modelagem dos cenários foi realizada utilizando o *software* Gabi e os indicadores ambientais analisados foram: consumo de água e energia, o Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Eutrofização (PE), o Potencial de Toxicidade Humana (PTH) e a Depleção Abiótica Fóssil (DAF).

De acordo com os resultados obtidos por Oliveira (2017), entre todas as categorias de impactos analisadas, o cenário 2 mostrou-se como o de menor impacto em relação as categorias avaliadas. A matriz energética de cada país interfere diretamente na quantificação dos impactos avaliados, visto que, em uma matriz composta predominantemente por energias não renováveis a carga ambiental para fabricação de um produto será maior.

No estudo de caso de Junqueira e Uturbey (2017), foi realizada a valoração econômica de impactos ambientais da energia fotovoltaica, através da ACV e o método econômico de restrição orçamentária. Foi aplicado o método de avaliação de impacto ambiental IMPACT2002+ e os resultados foram apresentados em três áreas de proteção: saúde humana, ecossistema e recursos. Os resultados obtidos evidenciaram a potencialidade da energia

fotovoltaica para aplicação em larga escala, pois os valores de externalidades ambientais são comparáveis aos de usinas hidrelétricas e inferiores aos custos externos atuais da matriz energética brasileira.

Quadro 1 - Revisão da literatura internacional sobre ACV e painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Metodologia/dados</b>	<b>Localização</b>	<b>Indicadores</b>
Kreith et al.	1990	Comparar a emissão de dióxido de carbono de um sistema fotovoltaico com uma central elétrica a carvão e uma central térmica solar.	Banco de dados do Departamento de Energia dos EUA; Banco de dados do serviço de pesquisa do congresso dos EUA.	Estados Unidos	Emissão de gases de efeito estufa.
Phylipsen e Alsema	1995	Analisar o fluxo de energia de todo ciclo de vida de células solares de silício policristalino.	Baseado na metodologia CML, com adaptações para o estudo. Base de dados do laboratório Nacional de Brookhaven.	Mundial	Demanda de energia acumulada; Tempo de retorno de energia.
Wilson e Young	1996	Avaliar o tempo de retorno de energia do sistema de geração solar de dois prédios.	Dados obtidos a partir da Unidade de Apoio a Tecnologia de Energia do Departamento de Comércio e Indústria do Reino Unido.	Reino Unido	Tempo de retorno de energia.
Kato et al.	1998	Avaliar a emissão de CO <sub>2</sub> e o tempo de retorno de energia de uma instalação fotovoltaica residencial	Não disponível	Japão	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Dones e Frischknecht	1998	Analisar a emissão de gases de efeito estufa de um sistema solar conectado com a rede de energia.	Inventário Ambiental do Instituto Federal Suíço de Zurique	Suíça	Emissão de gases de efeito estufa
Alsema et al.	1998	Realizar uma revisão sobre a energia gasta na fabricação de sistemas fotovoltaicos e apresentar exemplos de cálculos para o retorno de energia.	Não disponível	Itália	Tempo de retorno de energia.
Alsema	2000	Revisar a literatura sobre fabricação de sistemas fotovoltaicos e investigar os efeitos da utilização de energia fotovoltaica na emissão de CO <sub>2</sub> .	Os dados de emissões e de tempo de retorno de energia foram baseados em uma revisão dos trabalhos publicados até a época.	Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Alsema e Nieuwlaar	2000	Analisar o balanço de energia e as emissões de um sistema fotovoltaico policristalino conectado a rede de energia.	Dados obtidos da literatura técnica da área.	Oeste da Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.

Knaap e Jester	2000	Avaliar o tempo de retorno de energia de módulos fotovoltaicos.	Caracterização das etapas de produção do painel. Os dados de energia de cada etapa são empíricos, sendo adotados de outros trabalhos na área.	Estados Unidos	Tempo de retorno de energia.
Battisti e Corrado	2005	A ACV foi utilizada para fazer um perfil energético e ambiental completo e estendido dos sistemas fotovoltaicos.	Eco indicator 95 <i>Software SimaPro 5.1</i>	Itália	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Jungbluth	2005	Realizar o estudo de 12 sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica.	Centro Suíço de Inventário do Ciclo de Vida Eco indicator 99	Suíça	Demanda acumulada de energia; Tempo de retorno de energia; Alterações climáticas; Uso solo; Radiação; Camada do ozônio; Acidificação/eutrofização; Ecotoxicidade; Uso de minerais; Combustíveis fósseis, Agentes Cancerígenos.
Hondo	2005	Analisar as emissões de gases de efeito estufa considerando a ACV de um sistema fotovoltaico.	Dados obtidos na literatura técnica da área.	Japão	Emissão de gases de efeito estufa.
Kannan et al.	2006	ACV de um sistema solar fotovoltaico de 2,7kWp instalado em Singapura.	Não disponível	Singapura	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Alsema e Fthenakis	2006	Atualizar os dados para cálculo de tempo de retorno de energia e emissão de gases de efeito estufa	Os dados são baseados nas informações repassadas pelos fabricantes.	Sul da Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Alsema e Wild-Scholten	2006	Atualização de estudos anteriores sobre a tecnologia fotovoltaica, aplicando novos dados obtidos sobre o sistema fotovoltaico.	<i>SimaPro 6.0</i> Banco de dados <i>Ecoinvent 2000</i> Metodologia CML 2000	Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.

Alsema et al.	2006	Comparar o desempenho ambiental da energia fotovoltaica com outros tipos de energia.	SimaPro 7.0 Banco de dados <i>Ecoinvent</i>	Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Jungbluth et al.	2007	Realizar o inventário do ciclo de vida para plantas fotovoltaicas de 3kWp, considerando o processo de berço ao túmulo.	Banco de dados <i>Ecoinvent</i>	Suíça	Demanda acumulada de energia; Tempo de retorno de energia.
Pacca et al.	2007	Avaliar o desempenho ambiental de dois sistemas fotovoltaicos com a ACV.	Não disponível	Estados Unidos	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Raugei et al.	2007	ACV de módulos fotovoltaicos de silício e telureto de cádmio.	Método de avaliação de impacto próprio intitulado de SUMMA.	Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Fthenakis et al	2008	Apresenta um estudo sobre a emissão de poluentes e metais pesados a partir de tecnologias fotovoltaicas.	Dados para o estudo obtidos com empresas da Europa, EUA e da literatura já existente.	Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Metais pesados.
Glockner e Wild-Scholten	2008	ACV de uma planta solar na Noruega.	<i>Software</i> SimaPro; Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ; IEA task 12 guideline.	Noruega	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Ito et al.	2008	Comparar cinco tipos de geração fotovoltaica em grande escala.	Análise de variação (VLS-PV)	Deserto de Gobi - China	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Stoppato	2008	ACV de painel fotovoltaico desde a extração da sílica até a montagem do painel.	Dados obtidos da literatura técnica existente na área.	Alemanha	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Varun et al.	2009	ACV das energias renováveis para geração de eletricidade.	Não disponível	Não disponível	Emissão de gases de efeito estufa.
Ito et al.	2010	Calcular as taxas de emissão e tempo de retorno de energia para 50 conjuntos fotovoltaicos de 500 kW.	Não disponível	Japão	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Lu e Yang	2010	Medir a sustentabilidade de um sistema fotovoltaico de 22 kWp conectado a rede.	Dados obtidos da literatura técnica existente na área.	Hong Kong	Tempo de retorno do gás de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.

Nishmura et al.	2010	Investigar a influência do local de instalação no desempenho ambiental do sistema fotovoltaico.	Dados estatísticos de organizações públicas.	China e Japão	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Sherwani et al.	2010	Revisão da ACV do silício amorfo, mono e policristalino para produção de painéis PV.	Não disponível	Mundial	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Ito et al.	2011	Identificar, do ponto de vista ambiental, o módulo solar mais adequado por meio da ACV.	Não disponível	Japão	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Fthenakis e Kim	2011	Realizar ACV de sistemas fotovoltaicos	Não disponível	Não disponível	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Desideri et al.	2012	ACV de uma planta solar e comparação com outro sistema de produção de energia.	Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ; <i>Software Simapro 7.1</i> ;	Itália	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Fthenakis et al.	2012	ACV dos painéis de silício monocristalino de alto rendimento	Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ; <i>Software Simapro</i> ; IEA task 12 guideline.	Estados Unidos	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Peng et al.	2013	Revisão sobre ACV de 5 tipos de sistemas fotovoltaicos	Não disponível	Mundial	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Kim et al.	2014	ACV de painéis mono e poli cristalino de um sistema fotovoltaico de 100kWp.	<i>Software SimaPro</i> ; IEA task 12 guideline.	Coreia	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia; Aquecimento global; Combustíveis fósseis.
Fu et al.	2014	ACV de um sistema fotovoltaico na China para o desenvolvimento sustentável da indústria chinesa.	<i>Software Gabi</i> ; Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ;	China	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia; Aquecimento global; Eutrofização.
Gerbinet et al.	2014	Apresentar uma revisão de ACV de diferentes tecnologias fotovoltaicas.	Eco-indicator 99; CML 2001.	Mundial	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Yue et al.	2014	Emprego da ACV para uma análise comparativa da manufatura de painel fotovoltaico.	Banco de Dados do Ciclo de Vida Chinês; Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ;	Sul da Europa	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.

Adriano	2015	Efetuar a caracterização do desempenho ambiental da tecnologia fotovoltaica em Portugal, e posterior comparação à tecnologia hídrica, tecnologia eólica e gás natural.	Metodologia ecoblok Banco de dados <i>Ecoinvent</i> ;	Portugal	Extração de água; Extração de recursos; Uso do solo; Emissão de GEE; Poluição da água e do solo; Poluição do ar (PA); Dioxinas e furanos.
Hou et al.	2015	Analisar os impactos ambientais da geração de energia fotovoltaica de módulos solares de silício cristalino.	Não disponível	China	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia.
Apul et al.	2015	Realizar uma revisão sistemática sobre o retorno de investimento e energia de um sistema fotovoltaico.	Não disponível	Estados Unidos	Tempo de retorno de investimento; Tempo de retorno de energia.
Hong et al.	2016	Identificar os efeitos ambientais associados a produção do painel fotovoltaico de silício policristalino na China	Método ReCiPe Impact2002+ TRACI	China	Cancerígenos; Não cancerígenos; Radiação ionizante; Efeitos respiratórios (orgânicos e inorgânicos); Depleção da camada de ozônio; Ecotoxicidade aquática; Ecotoxicidade terrestre; Acidificação terrestre; Ocupação do solo; Acidificação aquática; Eutrofização aquática; Aquecimento global; Energias não renováveis; Extração mineral.
Chen et al.	2016	Avaliar a carga ambiental, identificar fatores-chave e explorar abordagens para potencial melhoria ambiental.	Método ReCiPe Impact2002+ TRACI CML	China	Alterações climáticas; Radiação; Camada do ozono; Acidificação/eutrofização; Formação de material particulado; Ocupação de terras agrícolas e urbanas;

					Ecotoxicidade; Uso solo; Uso de minerais; Combustíveis fósseis; Ecotoxicidade da água potável, água do mar e da terra.
Li et al.	2017	Avaliar a sustentabilidade por meio de uma abordagem de ciclo de vida e teoria da sustentabilidade.	Método ReCiPe; Método CML 2001; <i>Software</i> GaBi.	Nordeste da Inglaterra	Tempo de retorno de energia; Alterações climáticas; Camada do ozônio; Acidificação/eutrofização; Aquecimento global. Impacto social; Impacto econômico.
MA	2017	Analisar o desempenho ambiental de um sistema fotovoltaico policristalino.	Não disponível	China	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Ludin et al.	2018	Analisar e revisar estudos de ACV sobre tecnologias fotovoltaicas.	Não disponível	Mundial	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.
Luo et al.	2018	Apresentar uma avaliação comparativa do ciclo de vida da geração de energia fotovoltaica em Singapura através de várias tecnologias fotovoltaicas de silício.	Banco de dados <i>Ecoinvent</i> .	Singapura	Emissão de gases de efeito estufa; Tempo de retorno de energia; Demanda acumulada de energia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3 METODOLOGIA

O emprego da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é fundamental para quantificar os impactos ambientais gerados, as emissões produzidas e o consumo energético ao longo do ciclo de vida de um produto. Para isso, foram adotadas as recomendações preconizadas de acordo com as normativas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, que no Brasil, são representadas pela NBR ISO 14040 e a NBR ISO 14044 da ABNT (2009).

Para a modelagem do ciclo de vida do painel fotovoltaico de silício cristalino foi utilizado o *software* SimaPro (*System for Integrate Environmental Assessment of Products*). A utilização do software foi possível porque a empresa detentora do software disponibiliza gratuitamente uma licença Faculty, para universidades de países que não são membros da Organização para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OCDE), que é o caso do Brasil. Os resultados obtidos foram tabulados no programa Excel para apresentação e discussão dos resultados.

A Figura 21 apresenta o fluxograma das etapas do trabalho para se atingir os objetivos propostos. A primeira etapa constitui a identificação dos processos para fabricação do módulo fotovoltaico. Após a identificação dos processos de fabricação foi definido o objetivo da ACV, o limite do sistema e unidade funcional para completar a segunda etapa. A terceira etapa corresponde a entrada e saída de dados de cada processo identificado na primeira etapa. Os dados quantitativos da terceira etapa foram obtidos através do banco de dados *Ecoinvent* e de inventários físicos da área. A quarta etapa corresponde à quantificação dos impactos ambientais para o sistema fotovoltaico em estudo através da metodologia Impact 2002+ e os indicadores de avaliação Demanda Acumulada de Energia, Tempo de Retorno de Energia e Emissão de Gases de Efeito Estufa. A última etapa consiste na análise dos indicadores de impacto ambiental de cada processo.

Figura 21 - Fluxograma das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 Análise do Ciclo de Vida do painel fotovoltaico de silício cristalino

Conforme já delineado no item 2.4, o emprego da ACV consiste em quatro diferentes etapas, que são: Definição de Objetivo e Escopo, Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a Interpretação. Na sequência é descrito detalhadamente a metodologia de cada etapa.

#### 3.1.1 Definição do objetivo e escopo da ACV

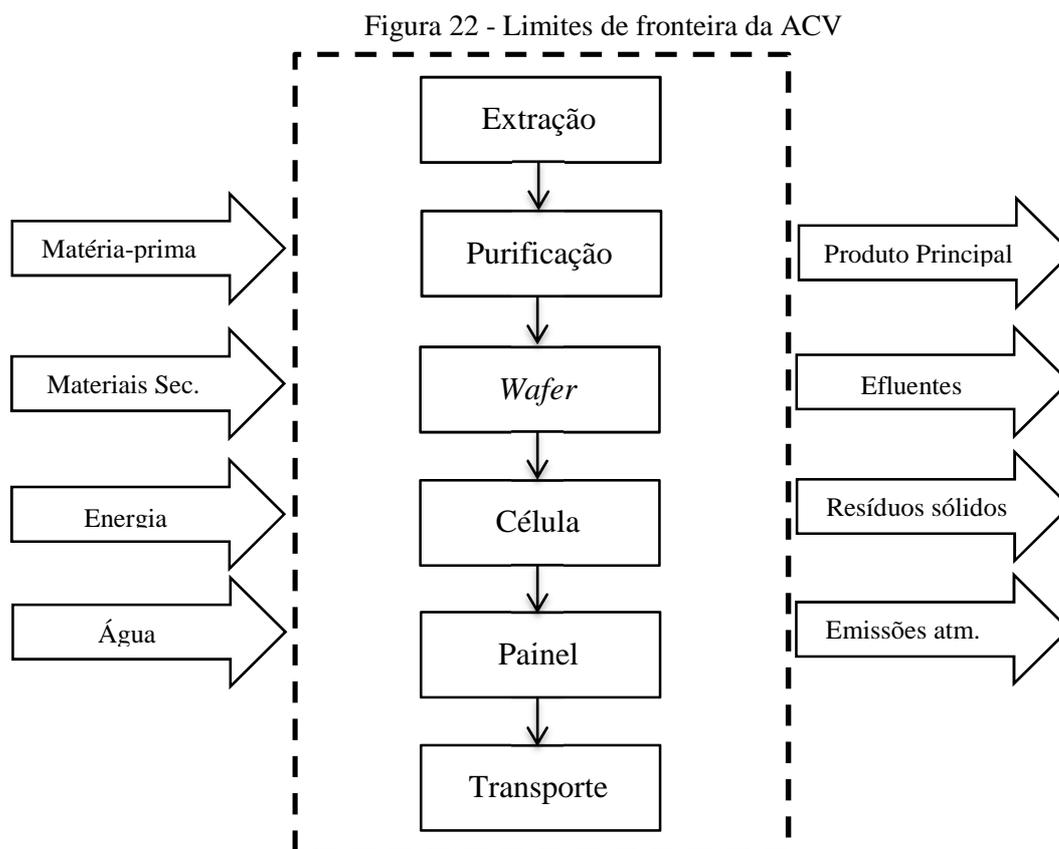
Conforme preconizado pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), na primeira etapa desta ACV foram determinados: os objetivos do estudo, o escopo, a limitação das fronteiras do sistema estudado e a unidade funcional.

O objetivo deste estudo foi a avaliação dos impactos ambientais gerados pelo painel fotovoltaico de silício policristalino. Pretende-se identificar por meio dos resultados as principais consequências ambientais para fabricação do painel, de maneira que se consiga identificar possibilidades de melhorias durante o seu processo de fabricação e outras

informações que possam auxiliar em tomadas de decisões técnicas a cerca do desenvolvimento deste produto.

O escopo deste trabalho compreende a fabricação do painel fotovoltaico de silício policristalino desde a extração da matéria prima até a obtenção do produto final. Assim, uma abordagem de berço-ao-portão é empregada para analisar as etapas que compreendem a extração da matéria prima (silício) até a fabricação e acabamento final do painel, englobando todo o processamento dos materiais utilizados, a manufatura usada na fabricação do mesmo e o transporte do produto até o distribuidor final. Portanto, exclui-se deste estudo todo e qualquer processo após o transporte deste painel até o local da instalação, como por exemplo, instalação, manutenção do sistema fotovoltaico ao longo do tempo, reciclagem e a fabricação de dispositivos auxiliares para o funcionamento do sistema, como os inversores e estruturas para fixação dos painéis.

A Figura 22 apresenta os limites de fronteira do sistema em estudo, que inicia com a extração da matéria prima e finaliza com o transporte do produto até o distribuidor final.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a definição dos limites de fronteira do sistema, todas as etapas apresentadas na Figura 22 são abordadas detalhadamente considerando todas as suas entradas e saídas ao

longo do ciclo de vida do painel. Assim, a unidade funcional deste trabalho é um painel fotovoltaico de silício policristalino com as características apresentadas no Quadro 2. A escolha desta unidade funcional é em razão de ser o modelo de painel fotovoltaico mais comercializado, segundo informação obtida junto a empresa Renovigi Energia Solar, que é distribuidora de painéis fotovoltaicos para todo o Brasil. Outras empresas foram contatadas, porém, apenas a empresa Renovigi retornou contato fornecendo as informações solicitadas. Todas as emissões, substâncias produzidas, energia gasta e os materiais utilizados foram baseados na unidade funcional adotada.

Quadro 2 - Características do painel fotovoltaico em estudo.

Potência do painel	330 Wp
Número de células	72 células (6x12)
Dimensões do painel	1960 mm x 992 mm x 40 mm
Peso	22,0 Kg
Tipo de célula	Policristalino
Dimensões da célula	156,75 mm x 156,75 mm
Eficiência da célula	19,6%

Fonte: Renovigi Energia Solar (2019).

### 3.1.2 Inventário do ciclo de vida - ICV

Nesta segunda etapa do estudo foram adicionadas as entradas e as saídas de dados quantitativos associados a todos os processos, desde a extração da matéria prima até a fabricação final e transporte do painel fotovoltaico. Para a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) o inventário consiste na coleta de dados para atingir os objetivos do estudo. Devido a inviabilidade de tempo para realizar a coleta de todos os dados necessários, buscou-se informações em inventários existentes acerca do assunto e no banco de dados *Ecoinvent*.

O banco de dados *Ecoinvent* forneceu informações referentes a extração de matéria prima, produção de eletricidade, transporte, combustíveis, água e produtos químicos. Todos os dados foram selecionados de acordo com a localização geográfica do local de fabricação, ou seja, o país no qual a empresa fabricante se localiza. Além do banco de dados *Ecoinvent*, os inventários elaborados por Frischknecht et al. (2015) e Jungbluth et al. (2012) também foram empregados neste trabalho. De acordo com o trabalho realizado por Bezerra et al.

(2018), estes são os inventários mais atuais e completos acerca do assunto abordado no estudo.

Os indicadores utilizados e as unidades de medidas destes dados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Dados ambientais e unidades de medida.

<b>Indicadores ambientais</b>	<b>Unidade de medida</b>
Uso de matérias primas	kg
Consumo de energia elétrica	kWh
Consumo de combustíveis	l
Consumo de água	m <sup>3</sup>
Geração de resíduos sólidos	kg
Geração de efluentes	kg
Emissões atmosféricas	kg

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Avaliação dos impactos

Esta terceira etapa da ACV tem como premissa a compreensão e a avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produção ao longo do ciclo de vida do produto (ABNT, 2009b). Para realização desta etapa, os dados de inventário foram relacionados com categorias e indicadores de impacto ambiental através da utilização de métodos técnico-científicos, através de três etapas mandatórias: seleção, classificação e caracterização.

A norma NBR ISO 14040 (2009b) define as categorias de impactos como classes representativas de questões ambientais atribuídas aos resultados do inventário do ciclo de vida. Entre as categorias de impactos geralmente selecionados estão: aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade, consumo de recursos naturais e redução da camada de ozônio (MENDES et al., 2016). Conforme Lassio (2013) os indicadores de impactos são representações quantificáveis das categorias de impacto, e podem descrever um problema ambiental (*midpoint*) ou avaliar o dano causado sobre um domínio ou área de proteção, como saúde humana, meio ambiente e recursos naturais (*endpoint*).

Buscando contemplar a avaliação destes impactos foi empregado neste trabalho a metodologia Impact 2002+, um método suíço que propõe a implementação da avaliação combinada em indicadores *midpoint* e *endpoint* ligando todos os tipos de resultados do

inventário nestas categorias (JOLLIET et al., 2003). O Quadro 4 apresenta as categorias de impacto em ponto médio (*midpoint*) e em ponto final (*endpoint*), usadas no presente trabalho.

Quadro 4 – Categorias de impacto *midpoints* e *endpoints*

<b>Categoria de impacto (<i>midpoints</i>)</b>	<b>Categoria de danos (<i>endpoints</i>)</b>
Cancerígenos (Toxicidade Humana)	Saúde Humana
Não cancerígenos (Toxicidade Humana)	
Efeitos respiratórios	
Radiação ionizante	
Depleção da camada de ozônio	
Ecotoxicidade aquática	Qualidade dos ecossistemas
Ecotoxicidade terrestre	
Acidificação aquática	
Eutrofização aquática	
Ocupação terrestre	
Aquecimento global	Mudança climática
Energia não renovável	Recursos Naturais
Extração mineral	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho, foram avaliados também a Demanda Acumulada de Energia, o Tempo de Retorno de Energia e a Emissão de Gases de Efeito Estufa. A opção por estes indicadores é baseada na literatura técnica da área. Segundo Fthenakis (2017) essas são as métricas mais comumente utilizadas em avaliações de sistemas fotovoltaicos de energia desde 2010.

A Demanda Acumulada de Energia ou *Cumulative Energy Demand (CED)* é uma metodologia usada para quantificar o uso direto e indireto de energia primária em MJ (Megajoules) por todo o ciclo de um produto ou processo, incluindo a energia consumida durante a extração, fabricação e descarte de materiais (MENOUI, 2011). Este indicador realiza o somatório de toda energia primária envolvida em cada etapa do processo, renovável ou não, que reflete na utilização de combustíveis, eletricidade e obtenção dos insumos de materiais necessários ao longo do ciclo. A aplicação desta métrica irá identificar em qual processo está havendo o maior consumo de energia direto ou indireto, auxiliando na tomada de decisão para um processo mais eficiente.

O Tempo de Retorno de Energia ou *Energy Payback Time (EPBT)* é definido como o período necessário para um sistema de energia renovável gerar a mesma quantidade de energia que foi usada para produzir o próprio produto (FTHENAKIS, 2017). Conforme Lu (2013) o *EPBT* é um indicador de sustentabilidade, pois através deste é possível avaliar se o sistema fotovoltaico pode trazer um ganho líquido de energia para o usuário do sistema e em que medida isso se dá ao longo de sua vida útil. Com base nos trabalhos de Alsema e Nieuwlaar (2000), Laleman et al. (2011) e Bhandari et al. (2015), o valor do indicador de *EPBT* foi calculado através das Equações 1 e 2.

A Equação 1 determina a produção anual de energia considerando as características solarimétricas da região de instalação e do sistema fotovoltaico. A energia anual gerada é considerada a mesma para os três cenários propostos. Na Equação 2, o valor da CED é de acordo com o resultado de cada cenário e o coeficiente de conversão permanece constante para todos os cenários.

$$E_p = I \times A \times \eta \times p \quad (1)$$

Onde,  $E_p$  é a produção anual de energia em kWh-ano;  $I$  é a irradiação solar média anual em kWh/m<sup>2</sup>-ano;  $A$  é área de superfície do painel em m<sup>2</sup>;  $\eta$  é a eficiência do módulo fotovoltaico em percentual (%) e  $p$  expressa a taxa de desempenho do sistema em percentual (%).

$$EPBT = (CED/E_p) \times C \quad (2)$$

Sendo,  $EPBT$  o tempo de retorno de energia em anos,  $CED$  é a demanda de energia acumulada em MJ;  $E_p$  é a produção anual de energia em kWh-ano e  $C$  é um fator de conversão de energia elétrica para primária.

A avaliação da Emissão de Gases de Efeito Estufa ou *Greenhouse Gases (GHG)*, embora não aconteça durante a fase de operação do sistema fotovoltaico, uma grande quantidade é produzida durante os processos de fabricação e transporte do sistema fotovoltaico (YUAN et al., 2014). Em virtude do impacto que os gases produzem no meio ambiente, é importante analisar este indicador.

### 3.1.4 Interpretação do ciclo de vida

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009b), os objetivos desta etapa são de qualificar, identificar, verificar, avaliar os resultados, realizar conclusões, esclarecer limitações e sugerir recomendações baseadas no trabalho realizado.

Nesta última etapa da ACV, os resultados do inventário e da avaliação dos impactos do ciclo de vida foram sintetizados para esclarecimento das conclusões, recomendações e para alcançar uma tomada de decisão conforme a definição dos objetivos e do escopo do trabalho.

### 3.2 Modelagem dos cenários

A aplicação da metodologia de ACV se ateve a três diferentes cenários. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a procedência da grande maioria dos painéis fotovoltaicos comercializados no Brasil, em torno de 85% é chinesa. Ainda segundo a ABSOLAR, o Brasil possui algumas empresas que efetuam a fabricação dos módulos no país, porém os componentes necessários vêm prontos de fora do país.

No cenário 1 adotou-se a fabricação total do painel na China, considerando apenas o transporte deste para o Brasil. Neste cenário foi considerado desde a extração da matéria prima até a fabricação final do painel na China, mais precisamente na fábrica da Jinko Solar na província de Jiangxi. A escolha do painel fotovoltaico produzido por esta empresa foi pelo fato da Jinko Solar ser considerada uma das cinco maiores fabricantes mundiais de painéis fotovoltaicos de acordo com pesquisa realizada pela empresa *Infiniti Research* (2019). Além disso, a empresa possui uma cadeia de produção verticalmente integrada, produzindo os lingotes de silício, o *wafers*, a célula e o painel (JINKO SOLAR, 2016).

A etapa de transporte do painel no cenário 1 é apresentado no Quadro 5. A primeira etapa do transporte foi considerada da fábrica da Jinko Solar até o porto de Ningbo Zhoushan devido a proximidade deste porto com a fábrica. A segunda etapa foi caracterizada pelo transporte marítimo da China para o Brasil até o porto de Santos em São Paulo, por ser considerado o porto com a maior movimentação de cargas no país segundo a Agência Nacional de Transportes Aquáticos (ANTAQ, 2019). Na última etapa do transporte foi considerado o deslocamento até a cidade onde painel será instalado, neste caso, adotou-se a cidade de Passo Fundo, localizado ao norte do estado do Rio Grande do Sul. A distância marítima adotada foi obtida junto ao aplicativo do site SeaRates, uma empresa de logística de rotas marítimas comerciais. As distâncias terrestres foram definidas através da ferramenta Google Maps.

O trabalho de Oliveira (2017) analisou um cenário semelhante a este, a diferença está nos locais considerados de fabricação e logística do painel, refletindo em diferentes distâncias. Porém, o trabalho utilizou um inventário para a entrada e saída de dados baseado na pesquisa de Alsema e Wild-Scholten (2006) e nas avaliações de impacto aplicou a metodologia CML, que avalia apenas 6 indicadores de impacto de ponto médio (*midpoints*).

Quadro 5 - Transporte e distâncias do cenário 1.

<b>Transporte</b>	<b>Deslocamento</b>	<b>Distância (km)</b>
Etapa 1: Caminhão	Fábrica Jinko Solar (Jiangxi) para porto de Ningbo Zhoushan	530
Etapa 2: Navio	Porto de Ningbo Zhoushan para porto de Santos	20.216
Etapa 3: Caminhão	Porto de Santos (Brasil) para cidade de Passo Fundo/RS	955

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cenário 2 considerou a fabricação dos painéis no Brasil, trazendo apenas o *wafer* de silício da China. O local considerado para a fabricação do painel no Brasil para a modelagem da distância foi o endereço da empresa Globo Brasil, considerada a primeira montadora de painéis fotovoltaicos no país e localizada na cidade de Valinhos, em São Paulo. O Quadro 6 apresenta as distâncias do cenário 2. O trabalho de Oliveira (2017) também abordou um cenário semelhante a este, considerando a fabricação do painel no Brasil na mesma empresa.

Quadro 6 - Transporte e distâncias do cenário 2.

<b>Transporte</b>	<b>Deslocamento</b>	<b>Distância (km)</b>
Etapa 1: Caminhão	Fábrica Jinko Solar (Jiangxi) para porto de Ningbo Zhoushan	530
Etapa 2: Navio	Porto de Ningbo Zhoushan para porto de Santos	20.216
Etapa 3: Caminhão	Porto de Santos para a cidade de Valinhos/SP	187
Etapa 4: Caminhão	Valinhos/SP para cidade de Passo Fundo/RS	1.053

Fonte: Elaborado pelo autor.

No cenário 3 foi considerado que o painel fotovoltaico é totalmente fabricado no Brasil. Assim, adotou-se a localização da empresa Globo Brasil como local de produção e o único transporte a ser considerado neste cenário é de Valinhos/SP para Passo Fundo/RS, totalizando 1.053 km.

A proposição destes 3 cenários de análise busca verificar de que maneira a mudança da matriz energética afeta os impactos ambientais que foram quantificados, pois cada país possui uma matriz energética diferente em relação a geração de energia elétrica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

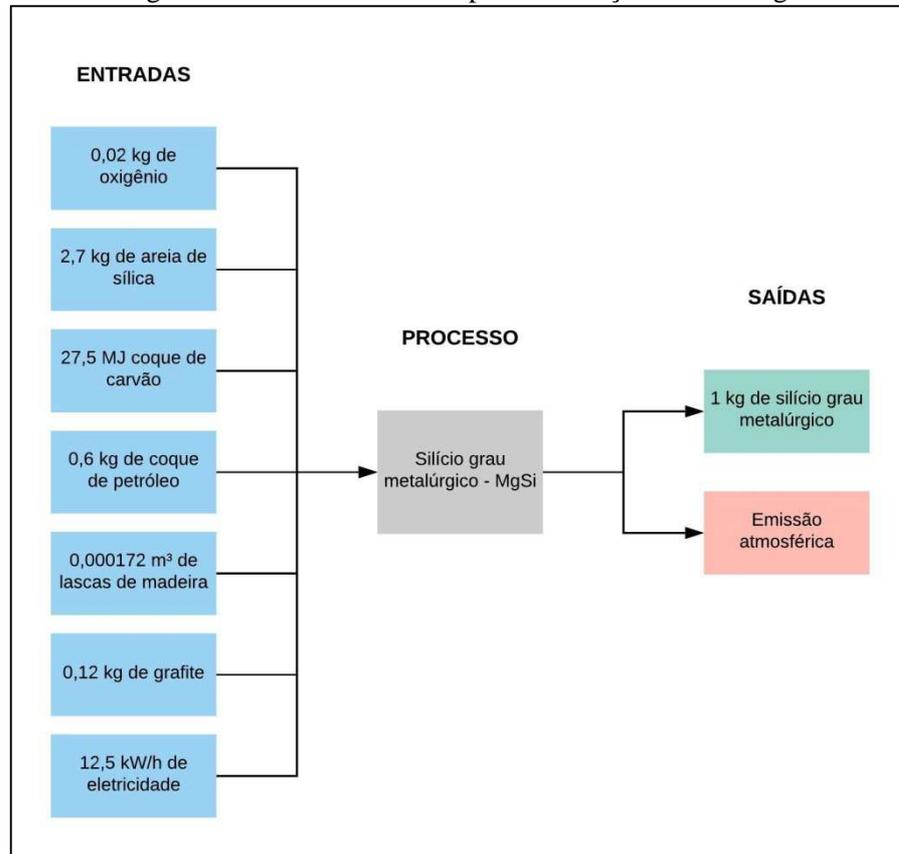
A ACV foi realizada para a fabricação de um painel fotovoltaico de silício policristalino para os três cenários propostos no capítulo anterior. A análise foi executada utilizando o *software* SimaPro o qual foi alimentado com informações do inventário do ciclo de vida para fabricação do painel em estudo. Conforme proposta desta dissertação, foram analisados dados e informações pertinentes a fabricação do painel desde a extração da matéria prima até sua fabricação final e posterior transporte ao local de instalação. Com base nestas informações, são apresentados na sequência os resultados para as etapas de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação.

### 4.1 Inventário do ciclo de vida – fabricação do painel

Conforme Safarian et al. (2012), o Silício Grau Metalúrgico (Si-gM) é a matéria-prima inicial para a produção do Silício Grau Solar (Si-gS) utilizado na fabricação de células fotovoltaicas ou de grau eletrônico, utilizado na fabricação de componentes eletrônicos e que requerem um maior grau de pureza. Para obter o Si-gM é realizado um processo de redução de óxido de silício com carbono em forno elétrico a arco com temperaturas entre 1100°C e 1200°C.

Para a modelagem desta etapa utilizou-se as informações da planilha “*silica sand, at plant*” da base de dados da *Ecoinvent* que considera os dados de extração do silício. Verificou-se que são necessários 2,70 kg de areia de sílica para obter 1,00 kg de silício Si-gM. A fabricação do Si-gM é representado no fluxograma da Figura 23 que mostra as entradas e saídas desta etapa baseada na planilha “*MG silicon, at plant*” do inventário de Frischknecht et al. (2015). Em relação às saídas deste processo, além do produto principal, tem-se as emissões para o ar de diversos elementos que são apresentados no Quadro 7.

Figura 23 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do silício grau metalúrgico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção do Si-gM é necessário realizar a purificação do mesmo para atingir um grau de 0,01 até 0,00001 ppm de impurezas. De acordo com a concentração de impurezas obtidas, o silício pode ser classificado como Si-gS com 0,01 ppm ou silício de grau eletrônico (Si-gE) com 0,00001 ppm (Jungbluth et al., 2012).

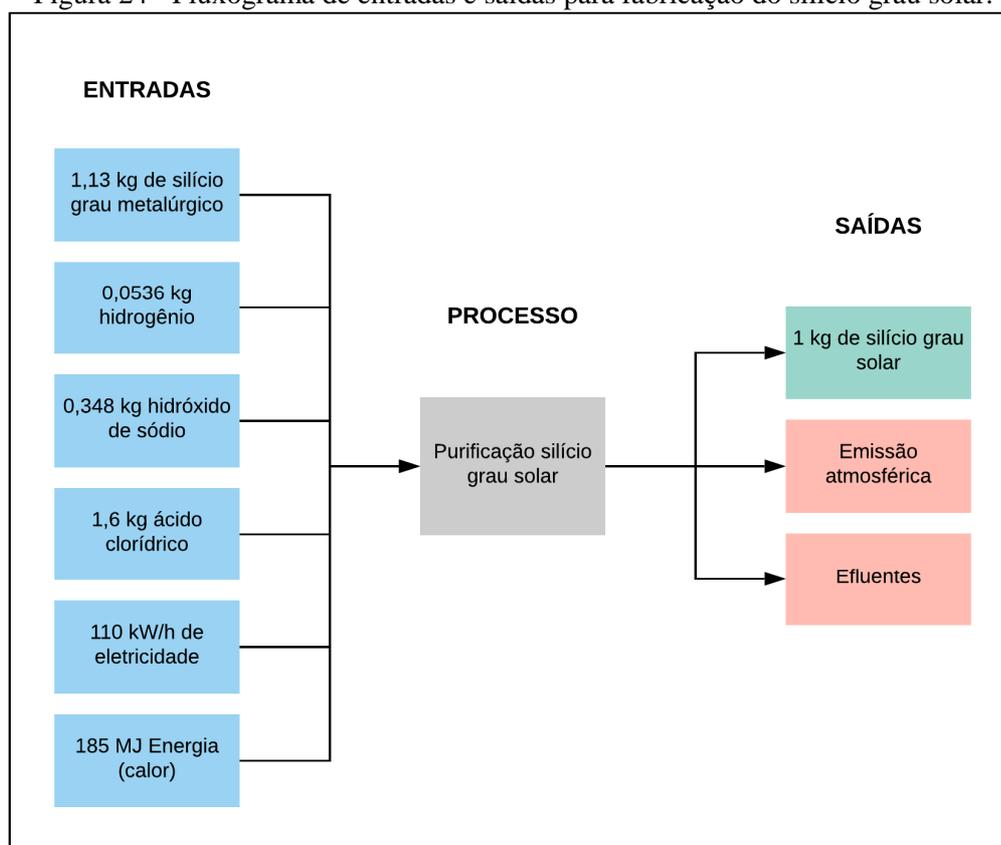
No desenvolvimento deste trabalho foi considerado apenas a utilização do Si-gS para a fabricação da célula de silício policristalino. De acordo com Wong et al. (2016) o processo Siemens modificado é muito empregado na purificação porque requer menos energia em virtude da temperatura de trabalho ser menor. Assim, apurou-se na planilha “*silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant*” de Frischknecht et al. (2015), que para obter 1,00 kg de Si-gS são necessários 1,13 kg de Si-gM e os demais insumos como apresentado na Figura 24, com todas as entradas e saídas desta etapa. O silício purificado é fundido e transformado em um lingote de silício policristalino para posterior fabricação dos *wafers*. Todas as emissões geradas nesta etapa são mostradas no Quadro 8.

Quadro 7 – Emissões da fabricação do silício grau metalúrgico.

SAÍDA	UNIDADE	QUANTIDADE
Emissões atmosféricas		
Arsênico	kg	9,42E-9
Alumínio	kg	1,55E-6
Antimônio	kg	7,85E-9
Boro	kg	2,79E-7
Cádmio	kg	3,14E-10
Cálcio	kg	7,75E-7
Dióxido de carbono fóssil	kg	3,58E0
Dióxido de carbono não fóssil	kg	1,61E0
Monóxido de carbono fóssil	kg	1,38E-3
Monóxido de carbono não fóssil	kg	6,20E-4
Cromo	kg	7,85E-9
Cloro	kg	7,85E-8
Cianeto	kg	6,87E-6
Flúor	kg	3,88E-8
Sulfato de hidrogênio	kg	5,00E-4
Fluoreto de hidrogênio	kg	5,00E-4
Ferro	kg	3,88E-6
Chumbo	kg	3,44E-7
Mercúrio	kg	7,85E-9
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, de origem não especificada.	kg	9,60E-5
Óxidos de nitrogênio	kg	9,74E-3
Partículas, > 10 µm	kg	7,75E-3
Potássio	kg	6,20E-5
Silício	kg	7,51E-3
Sódio	kg	7,75E-7
Dióxido de enxofre	kg	1,22E-2

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Frischknecht et al. (2015)

Figura 24 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do silício grau solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

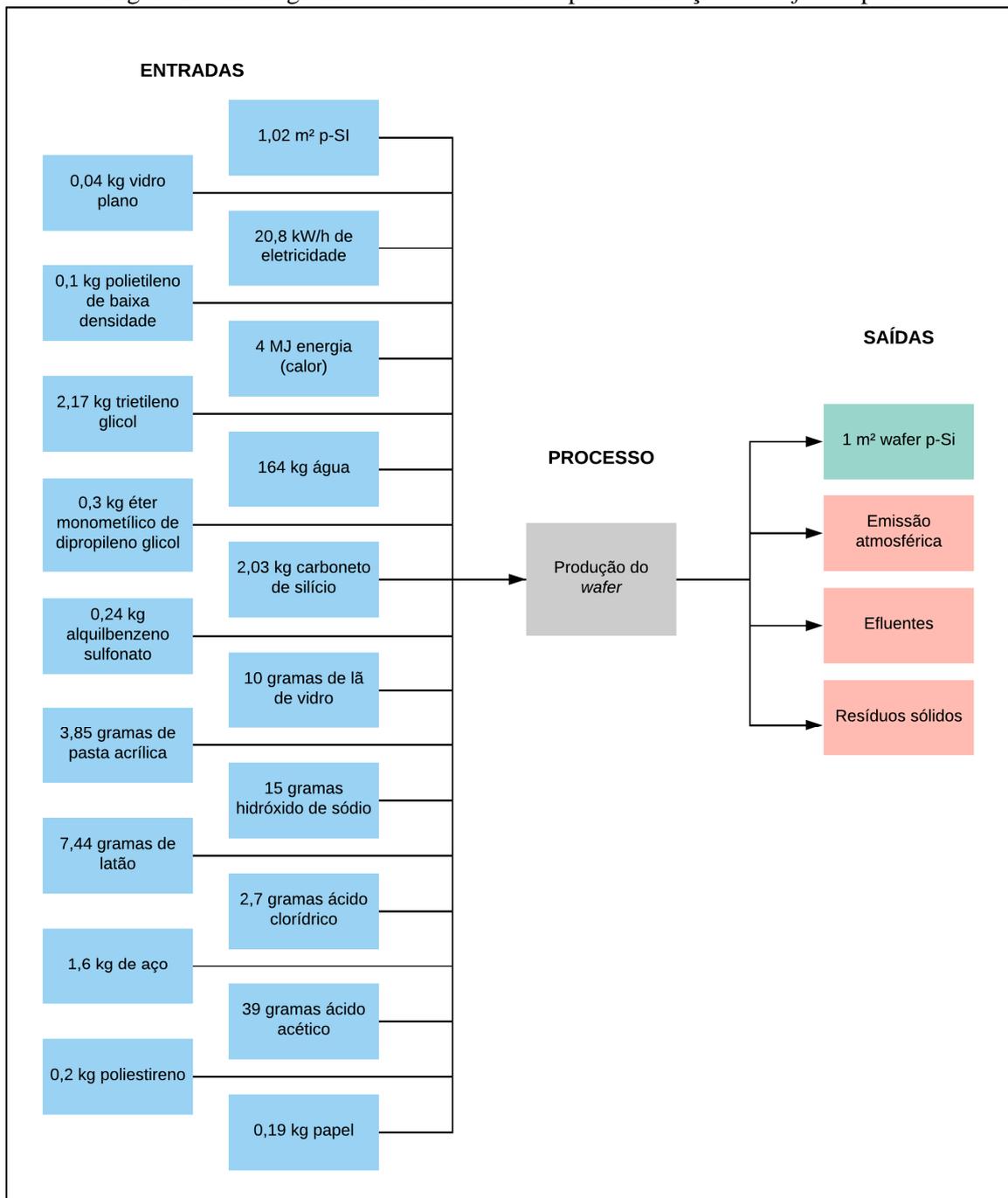
Quadro 8 – Emissões da fabricação do silício grau solar

SAÍDA	UNIDADE	QUANTIDADE
Emissões atmosféricas		
Desperdício de calor	MJ	351
Efluentes		
Compostos organo-halogenados adsorvíveis (AOX)	kg	1,26E-5
Demanda biológica de oxigênio (DBO5)	kg	2,05E-4
Demanda química de oxigênio (COD)	kg	2,02E-3
Cloreto	kg	3,60E-2
Cobre, íon	kg	1,02E-7
Nitrogênio	kg	2,08E-4
Fosfato	kg	2,80E-6
Sódio, íon	kg	3,38E-2
Zinco, íon	kg	1,96E-6
Ferro, íon	kg	5,61E-6
Carbono orgânico dissolvido (DOC)	kg	9,10E-4
Carbono orgânico total (TOC)	kg	9,10E-4

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Frischknecht et al. (2015)

As entradas e saídas do processo para fabricação dos *wafers* são apresentadas na Figura 25. Os dados foram obtidos da planilha “*multi Si, wafer, at plant*” do inventário de Frischknecht et al. (2015). Foram considerados *wafers* de 156 mm por 156 mm, ou seja, 0,0243 m<sup>2</sup> de área cada um. Jungbluth et al. (2012) afirmam que a maioria dos fabricantes atuais utilizam a tecnologia de corte através de múltiplos fios (*Multi-Wire Sawing – MWS*) para o corte das lâminas utilizadas na montagem do *wafer*.

Figura 25 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do *wafer* de p-Si.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As emissões geradas pela fabricação do *wafer* são mostradas no Quadro 9.

Quadro 9 – Emissões da fabricação do *wafer* de silício policristalino.

SAÍDA	UNIDADE	QUANTIDADE
Emissões atmosféricas		
Vapor de água	MJ	74,9
Efluentes		
Compostos organo-halogenados adsorvíveis (AOX)	kg	5,01E-4
Demanda biológica de oxigênio (DBO5)	kg	2,95E-2
Demanda química de oxigênio (COD)	kg	2,95E-2
Cádmio, íon	kg	6,05E-2
Cobre, íon	kg	6,05E-1
Nitrogênio	kg	9,95E-3
Fosfato	kg	5,01E-4
Sódio, íon	kg	3,38E-2
Cromo, íon	kg	3,03E-1
Níquel, íon	kg	5,61E-6
Mercurio	kg	6,05E-2
Chumbo	kg	3,03E-1
Carbono orgânico dissolvido (DOC)	kg	1,11E-2
Carbono orgânico total (TOC)	kg	1,11E-2
Resíduos sólidos		
Resíduos da produção do <i>wafer</i> de silício	kg	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Frischknecht et al. (2015)

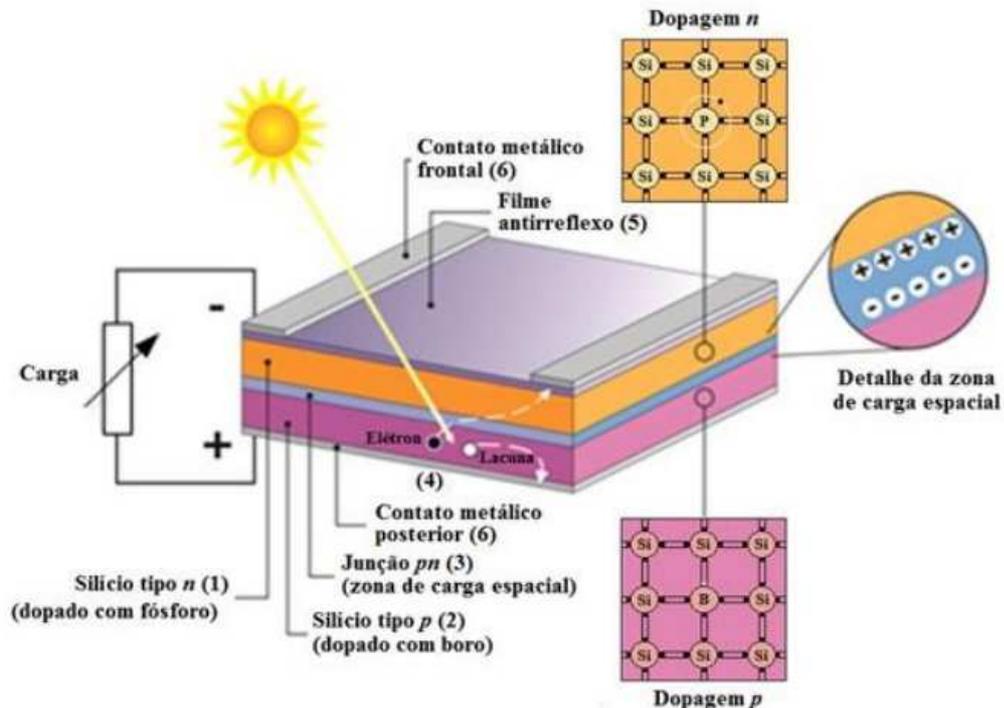
Com o *wafer* de silício já produzido é necessário realizar a junção PN da célula fotovoltaica. Segundo Pinho e Galdino (2014), para se obter a junção PN da célula é necessário, por exemplo, de uma lâmina de silício cristalino já previamente dopada, em sua fabricação, com átomos do tipo P e se introduzem átomos do tipo N, de maneira a compensar a região previamente dopada e obter uma região tipo N na lâmina. Na prática isso é realizado com a introdução do material em um forno a alta temperatura contendo um composto de Fósforo em forma gasosa. Do mesmo jeito, também se pode formar a junção PN em uma lâmina de silício tipo N, com introdução posterior de átomos tipo P.

Ainda conforme Pinho e Galdino (2014), se um material semiconductor dotado de uma junção PN for exposto a fótons com energia maior que a do *gap*<sup>1</sup>, então ocorrerá a fotogeração de pares elétron-lacuna, gerando energia elétrica. A Figura 26 demonstra o esquema básico de uma célula fotovoltaica de silício, destacando as regiões do tipo N e P, a região de cargas

<sup>1</sup> Região de separação entre duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores, também denominada de banda proibida.

espacial onde se originou a junção PN, a geração do par elétron-lacuna, filme antirreflexo e os contatos metálicos da célula.

Figura 26 - Esquema básico de uma célula fotovoltaica de silício.



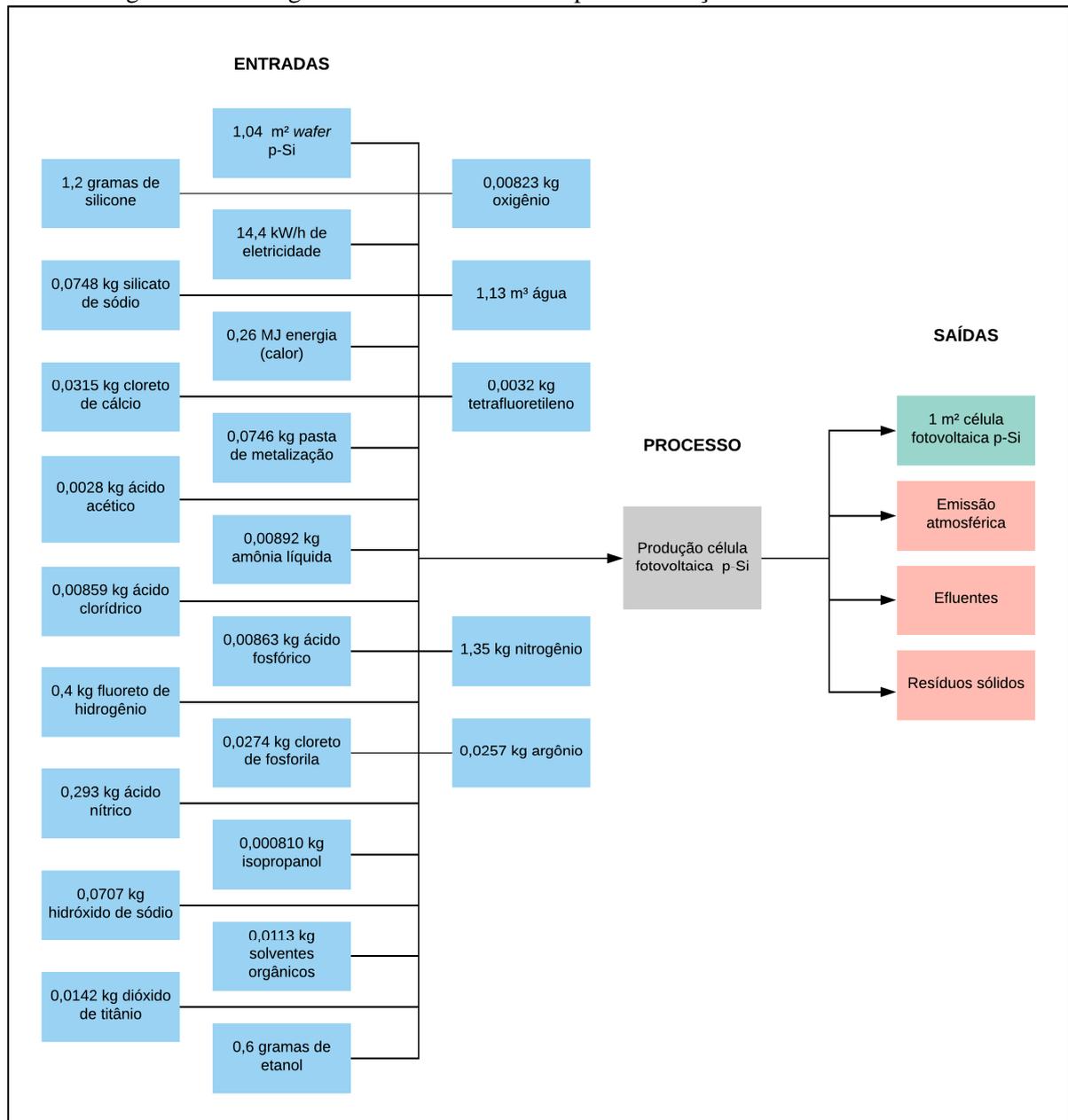
Fonte: Pinho e Galdino (2014)

Na Figura 27 é demonstrado o fluxograma de entradas e saídas para a fabricação da célula fotovoltaica de silício policristalino, a partir dos dados obtidos da planilha “*photovoltaic cell, multi-Si, at plant*” do inventário de Frischknecht et al. (2015). Nesta etapa estão incluídas as etapas de limpeza, texturização, metalização, revestimento e testes de verificação. O Quadro 10 apresenta todas as emissões geradas pela fabricação da célula de silício policristalino.

Com a célula fotovoltaica produzida é realizada a fabricação do painel policristalino. Os dados de entrada e saída desta etapa, representados no fluxograma da Figura 28, foram extraídos da planilha “*photovoltaic panel, multi-Si, at plant*” de Frischknecht et al. (2015). Nesta etapa, as células fotovoltaicas são conectadas por condutores de cobre revestidos de estanho para fortalecer as soldas. O próximo passo desta etapa é a adição do revestimento de acetado etileno de vinila (EVA). A parte traseira é revestida por um filme de poliéster e fluoreto de polivinila. Na sequência o vidro, que tem grande participação no peso do painel, é adicionado ao painel e unido sob pressão. Finalizando o processo, são acrescentadas as

molduras de alumínio juntamente com a caixa de conexão (Jungbluth et al., 2012). O Quadro 11 demonstra todas as emissões geradas na etapa de fabricação do painel.

Figura 27 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação da célula fotovoltaica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10 – Emissões da fabricação da célula fotovoltaica de silício policristalino.

SAÍDA	UNIDADE	QUANTIDADE
Efluentes		
Efluente da produção da célula	m <sup>3</sup>	7,89E-2
Emissões atmosféricas		
Desperdício de calor	MJ	51,8
Alumínio	kg	7,73E-6
Etano, hexafluoro, HFC 116	kg	1,19E-4
Cloreto de hidrogênio	kg	2,66E-4
Fluoreto de hidrogênio	kg	6,90E-4
Chumbo	kg	7,73E-6
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, de origem não especificada.	kg	1,94E-1
Óxido de nitrogênio	kg	5,0E-5
Metano, tetrafluoro, R14	kg	2,48E-4
Partículas < 2,5 µm	kg	2,66E-3
Silício	kg	3,17E-8
Prata	kg	7,73E-6
Sódio	kg	4,85E-1
Lata	kg	7,73E-6
Resíduos sólidos		
Resíduos de <i>wafers</i> de silício	kg	2,74

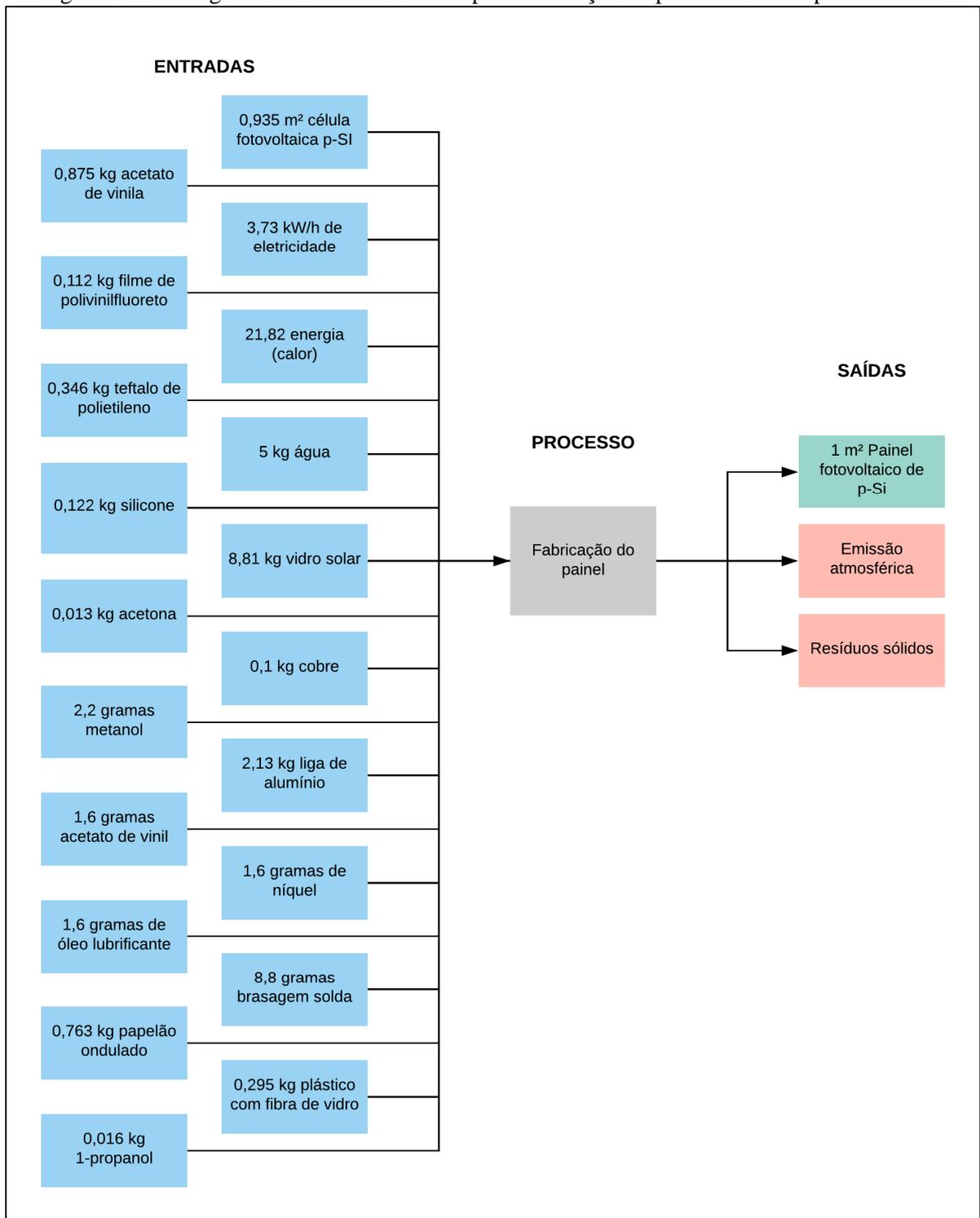
Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Frischknecht et al. (2015)

Quadro 11 - Emissões da fabricação do painel de silício policristalino

SAÍDA	UNIDADE	QUANTIDADE
Resíduos sólidos		
Resíduos sólidos municipais	kg	3,0E-2
Resíduos de polivinilfluoreto	kg	1,12E-1
Resíduos de plástico, mistura	kg	1,64E0
Resíduos de óleo mineral usado	kg	1,61E-3
Águas residuais	kg	5,03E-3
Emissões atmosféricas		
Desperdício de calor	MJ	13,4

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Frischknecht et al. (2015)

Figura 28 - Fluxograma de entradas e saídas para fabricação do painel de silício policristalino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a finalização do painel o mesmo é encaminhado para o transporte até chegar ao destino final. As distâncias a serem percorridas são de acordo com os três cenários que foram modelados, sendo que nos cenários 1 e 2 acontece o transporte terrestre por caminhão e o marítimo através de navio. Enquanto que, para o cenário 3, tem-se apenas o transporte

terrestre por caminhão. Para padronizar a análise de ciclo de vida foi adotado o mesmo tipo de navio e o mesmo tipo de caminhão para todos os cenários, implicando na adoção de um mesmo inventário para cada tipo de transporte. Assim, através de uma consulta ao banco de dados *Ecoinvent* utilizou-se o inventário “*Transport, freight, transoceanic ship*” para o transporte marítimo e o inventário “*Transport, truck 10-20t, EURO3, 100% LF, default, GLO Economic*” para o transporte terrestre, considerando um caminhão de porte médio.

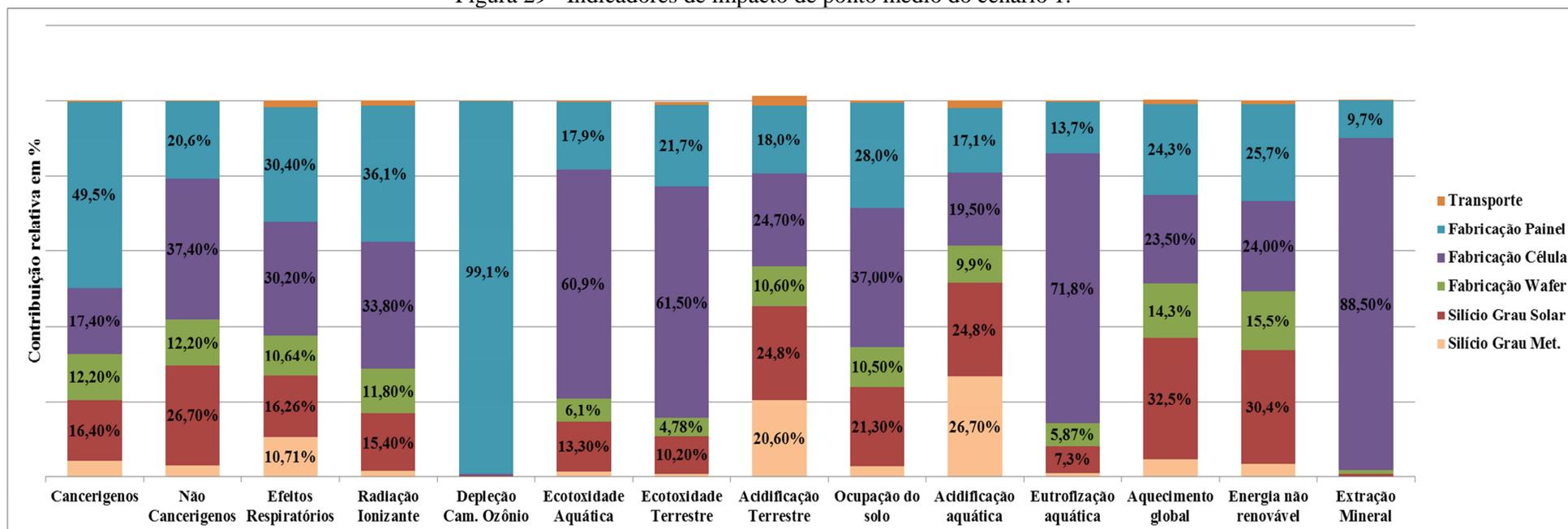
## **4.2 Avaliação dos impactos ambientais para produção do painel fotovoltaico**

Através da aplicação da metodologia Impact 2002+, as análises são apresentadas em nível de danos considerando as quatro categorias de impacto orientadas (saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos) e também os 14 indicadores de ponto médio por meio de pontuações normalizadas conforme sugerem os autores do método (JOLLIET et al., 2003). A demanda acumulada de energia, o tempo de retorno de energia e a emissão de gases de efeitos estufa foram avaliados em cada cenário e também são apresentados.

### **4.2.1 Avaliação dos indicadores de impacto por ponto médio**

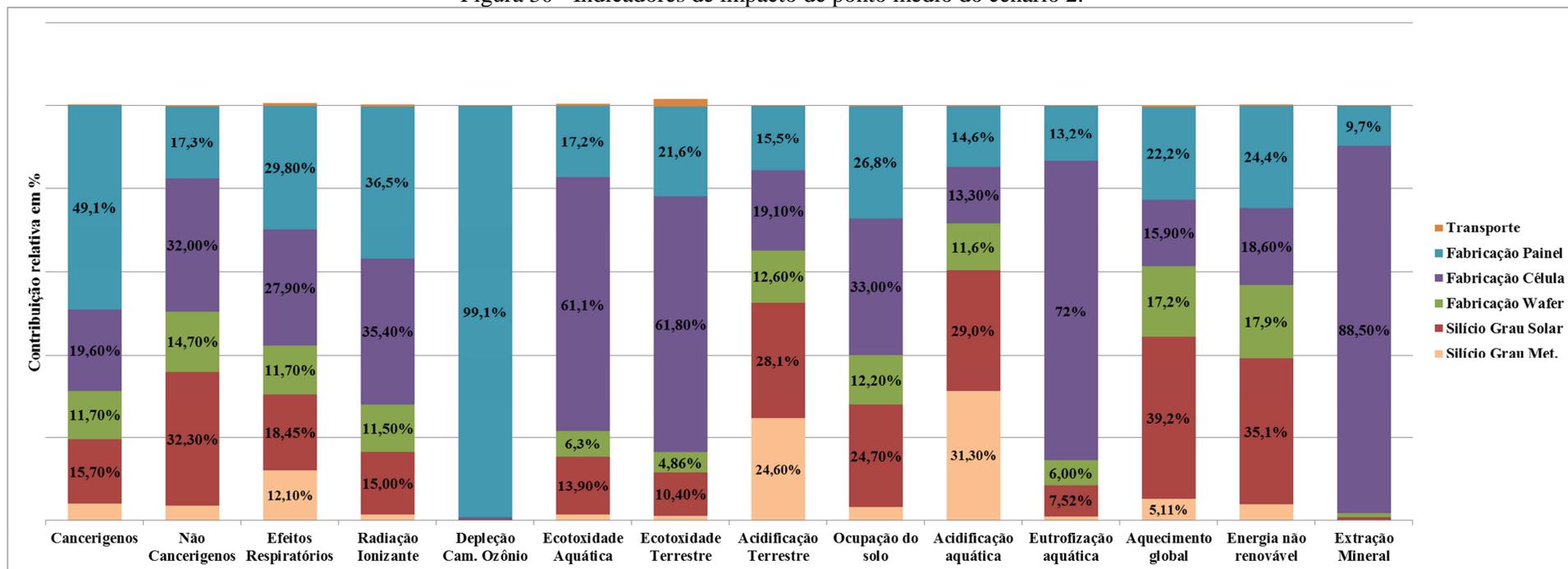
As Figuras 29, 30 e 31 representam a contribuição relativa (%) referente às 14 categorias de impacto de ponto médio avaliadas para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. Observa-se que de acordo com cada categoria de impacto avaliada e o cenário analisado, tem-se a participação de uma etapa do processo de fabricação do painel que contribui de maneira mais significativa na formação do indicador, por exemplo, o indicador de aquecimento global. Para o cenários 1 e 2, a etapa de fabricação de maior impacto na formação do indicador foi a purificação do Si-gS, porém, para o cenário 3, a etapa de fabricação do painel foi a de maior contribuição na formação do indicador.

Figura 29 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 1.



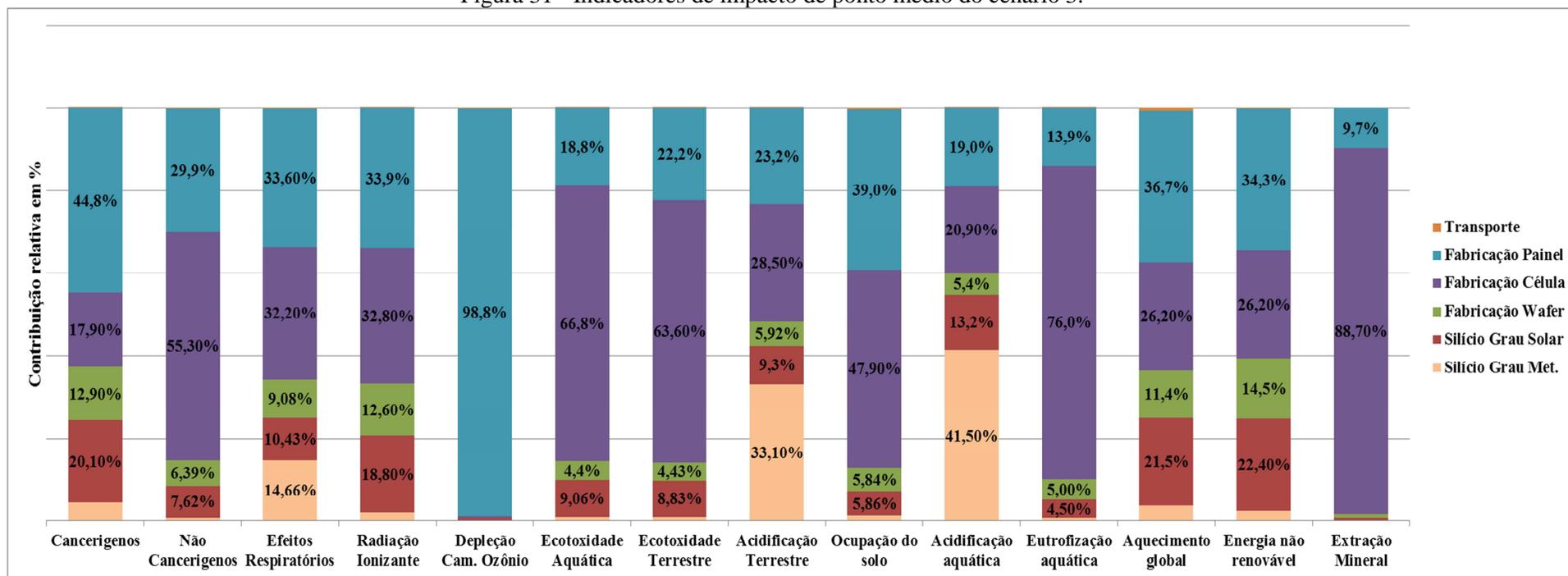
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Indicadores de impacto de ponto médio do cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No indicador de Cancerígenos verifica-se que quase metade do impacto é proveniente da etapa de fabricação do painel fotovoltaico. Este resultado pode ser compreendido quando se analisa os elementos empregados na etapa de fabricação do painel e a quantidade de material utilizado, principalmente, a liga de alumínio anodizado empregado na moldura do painel. A liga de alumínio anodizado fabricada utilizando o elemento magnésio com a finalidade de deixar a moldura do painel mais leve. Segundo Leite et al. (2015) o alumínio e o magnésio são classificados como metais pesados e o acúmulo de metais pesados no organismo humano pode vir a desencadear entre outras doenças o câncer, se medidas de segurança ocupacional não forem adotadas na sua manipulação, visto que o organismo humano não consegue eliminá-los. Na ACV realizada por Bezerra et al. (2018) foi utilizado o método de avaliação *ReCiPe*, que possui o indicador de Toxicidade Humana e analisa diferentes consequências sobre a saúde humana, inclusive os cancerígenos. A etapa de fabricação do painel fotovoltaico foi a de maior contribuição ao indicador de Toxicidade Humana.

Para o indicador de Não Cancerígenos, a etapa de fabricação da célula fotovoltaica de silício policristalino teve maior contribuição relativa para os cenários 1 e 3, enquanto que, para o cenário 2, a etapa de fabricação da célula e da purificação do Si-gS tiveram contribuições muito próximas, 32% e 32,3%, respectivamente. Através do fluxo em rede no *software* SimaPro, verificou-se que para este indicador a utilização da pasta de metalização, a base de prata e alumínio, aplicada na fabricação da célula e das emissões atmosféricas provocadas pela geração de energia elétrica, devido a grande demanda de energia no processo de purificação do Si-gS, são significativos na formação do indicador. Este resultado vai de encontro ao trabalho de Chen et al. (2016), que apontaram a presença do metal Prata e a geração de eletricidade como os principais contribuintes no indicador de Toxicidade Humana.

Analisando o indicador de Efeitos Respiratórios, constatou-se uma maior contribuição na formação do indicador pela etapa de fabricação do painel fotovoltaico, seguido da fabricação da célula fotovoltaica, nos três cenários analisados. Adriano (2015) aplicou um indicador de Poluição do Ar através da metodologia *Ecoblok*, que também resultou na etapa de fabricação do painel e da célula como os de maior contribuição ao indicador. Ainda segundo Adriano (2015), na fabricação do painel acontece a soldagem das células com o cobre e na fabricação da célula tem-se a queima de metais pesados, o que pode explicar os resultados.

Para o indicador de Radiações Ionizantes, a fabricação da liga de alumínio e magnésio impacta significativamente na etapa de fabricação do painel fotovoltaico, sendo esta a etapa

de maior impacto deste indicador, para os três cenários avaliados. No trabalho de Bezerra et al. (2018) a etapa de fabricação do *wafers* seguida da fabricação do painel foram as etapas de maior contribuição no indicador de Radiações Ionizantes.

A fabricação do painel fotovoltaico é responsável, de maneira quase totalitária, na formação do indicador de Depleção da Camada de Ozônio, para os três cenários analisados. Com a utilização do fluxo em rede do *software* SimaPro, verificou-se que a presença do composto tetrafluoretileno em um filme isolante aplicado no revestimento do painel é o maior agente causador na formação deste indicador de impacto. Da mesma forma, esta mesma etapa, também foi apontada como a de maior contribuição no indicador de Depleção da Camada de Ozônio no trabalho de Bezerra et al. (2018).

Os indicadores de Ecotoxicidade Aquática e Ecotoxicidade Terrestre apresentaram contribuições mais significativas da etapa de fabricação da célula fotovoltaica de silício policristalino nos três cenários avaliados. O processo de metalização na célula fotovoltaica, onde é utilizada uma pasta de prata ou prata-alumínio, segundo a análise de fluxo em rede do *software*, contribui preponderantemente no impacto causado por esta etapa nos indicadores. No trabalho de Bezerra et al. (2018) a etapa de maior contribuição na Ecotoxicidade aquática foi a fabricação do painel e para a Ecotoxicidade Terrestre foi a fabricação do *wafers*. Já o trabalho de Chen et al. (2016) relaciona a presença de pasta de prata como maior agente contaminante para o indicador de Ecotoxicidade Aquática e a geração de eletricidade como principal agente contaminante do indicador de Ecotoxicidade Terrestre.

Avaliando o indicador de Acidificação Aquática, verifica-se que as etapas de purificação do Si-gM e Si-gS, se somadas, correspondem a maior parte da formação deste indicador para os cenários 1 e 2. Analisando essas etapas, constatou-se uma alta emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) liberado para a atmosfera, provenientes do fornecimento de energia elétrica para estes processos. Possivelmente, este indicador está relacionado ao fato de que aproximadamente 70% da produção de energia elétrica chinesa são provenientes da queima de carvão e combustíveis fósseis, segundo os dados publicados pelo Portal de Energia Chinesa em 2018. Em relação ao cenário 3, a etapa de maior impacto no indicador foi a purificação do Si-gM, seguido das etapas de fabricação da célula e do painel. Hong et al. (2016) atribuíram a maior relevância do impacto de Acidificação Aquática para a etapa de fabricação do *wafers* devido ao consumo de eletricidade e as matérias prima utilizadas, em especial o alumínio, que teve uma importante carga ambiental.

Situação semelhante ao indicador de Acidificação Aquática ocorre com o indicador de Acidificação Terrestre, onde se tem as mesmas etapas de fabricação do painel sendo as de

maior relevância na formação do indicador. No trabalho de Hong et al (2016) a etapa de fabricação do *wafers* apresenta a maior carga ambiental na formação do indicador de Acidificação Terrestre, já para Bezerra et al. (2018), as etapas de purificação do Si-gM e fabricação do módulo fotovoltaico são as mais relevantes.

A etapa de fabricação da célula fotovoltaica é a que apresenta a maior carga ambiental para o indicador de Ocupação de Solo nos três cenários avaliados. Através da rede de fluxo do *software*, verificou-se que a extração e mineração da prata utilizada no processo de metalização da célula tem o maior impacto neste processo juntamente com a utilização de alumínio e vidro. Hong et al. (2016) destacam a etapa de fabricação do *wafers* como a de maior carga ambiental, somado a utilização de alumínio e vidro.

Com uma participação maior que 70%, nos três cenários analisados, a etapa de fabricação da célula fotovoltaica tem a maior carga ambiental no indicador de Eutrofização Aquática. Constatou-se através da rede de fluxo que este alto percentual está relacionado ao tratamento de rejeitos proveniente das atividades de mineração, principalmente da prata que está associado ao processo de metalização da célula. Hong et al. (2016) também atribuem a formação deste indicador para fabricação da célula com a necessidade do tratamento de rejeitos.

Em relação ao indicador de Aquecimento Global, a geração de energia elétrica a partir recursos fósseis e a consequente emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), faz com que, a etapa de purificação do Si-gS apresente a maior contribuição para o indicador em relação aos cenários 1 e 2, em que a fabricação do Si-gS é na China. Para o cenário 3, as etapas de maior impacto foram a fabricação do painel e da célula, respectivamente. O trabalho de Oliveira (2017) afirmou que a fabricação do painel fotovoltaico é a etapa de maior impacto ao indicador de Aquecimento Global para os dois cenários em que analisou. Hong et al. (2016) atribuem a formação do impacto de Aquecimento Global devido a geração de eletricidade na China devido a utilização de fontes não renováveis para geração de energia como, carvão, gás natural e óleo cru.

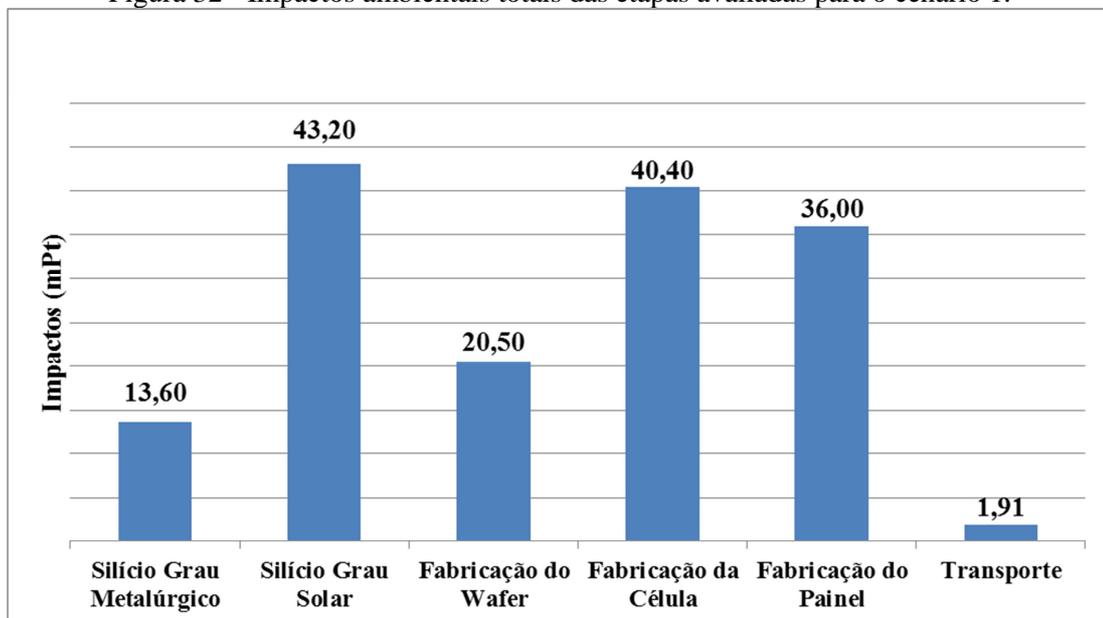
Assim como no indicador de Aquecimento Global, as mesmas etapas de fabricação são também as mais significativas para o indicador de Energia Não Renovável nos três cenários analisados. Em relação ao indicador de Extração Mineral, o processo de fabricação da célula é o mais impactante para os três cenários, representando mais 80 % na formação do indicador em cada cenário. Pela análise de fluxo em rede no *software*, constatou-se que a mineração da Prata (Ag) e do Alumínio (Al), foi determinante na formação do indicador de

Extração Mineral. Verifica-se ainda, que a etapa de transporte teve peso pouco significativo em todos os indicadores, para os três cenários.

#### 4.2.2 Avaliação dos impactos ambientais totais de cada etapa da fabricação do painel

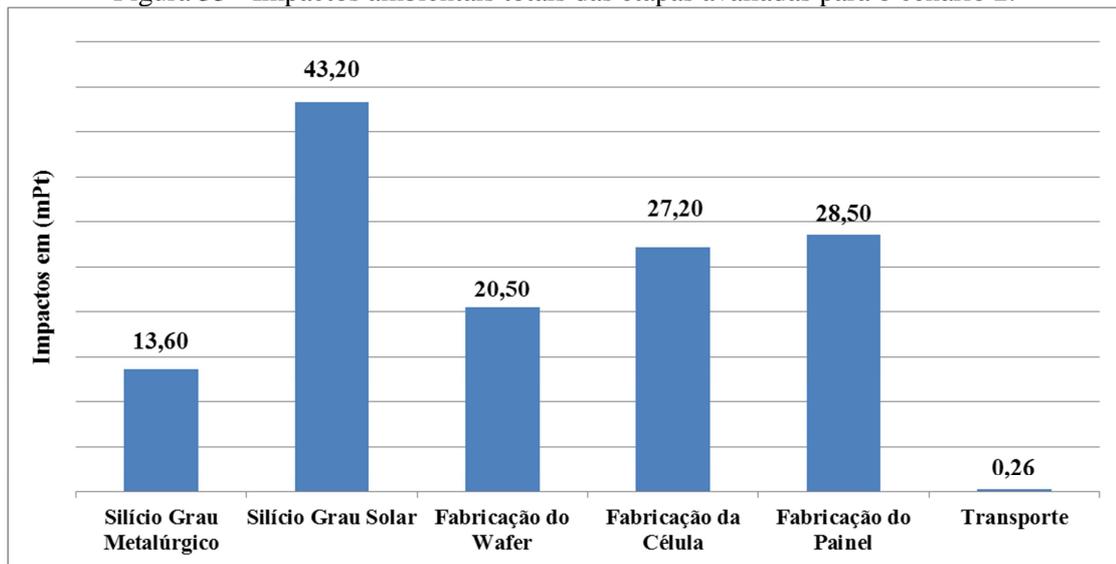
As Figuras 32, 33 e 34 apresentam o impacto ambiental global normalizado para cada etapa da fabricação de um painel fotovoltaico de silício policristalino, em nível de danos, para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente. As avaliações dos impactos são expressas em mPt (milionésimo de pontos), onde um ponto representa o impacto em uma pessoa por ano. Esta normalização dos impactos é realizada dividindo o impacto por unidade de emissão pelo impacto total de todas as substâncias da categoria específica para qual existem fatores de caracterização, por pessoa por ano (FIORI et al., 2014). No final, os valores são expressos em termos de pontuação única (fator de ponderação) em uma unidade chamada Ecopontos (Pt) ou em mPt, quando o resultado em Pt é dividido por 1000. Quanto maior for o valor deste indicador, maior será o impacto ambiental do produto, atividade ou exploração (FIORI et al., 2014).

Figura 32 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 1.



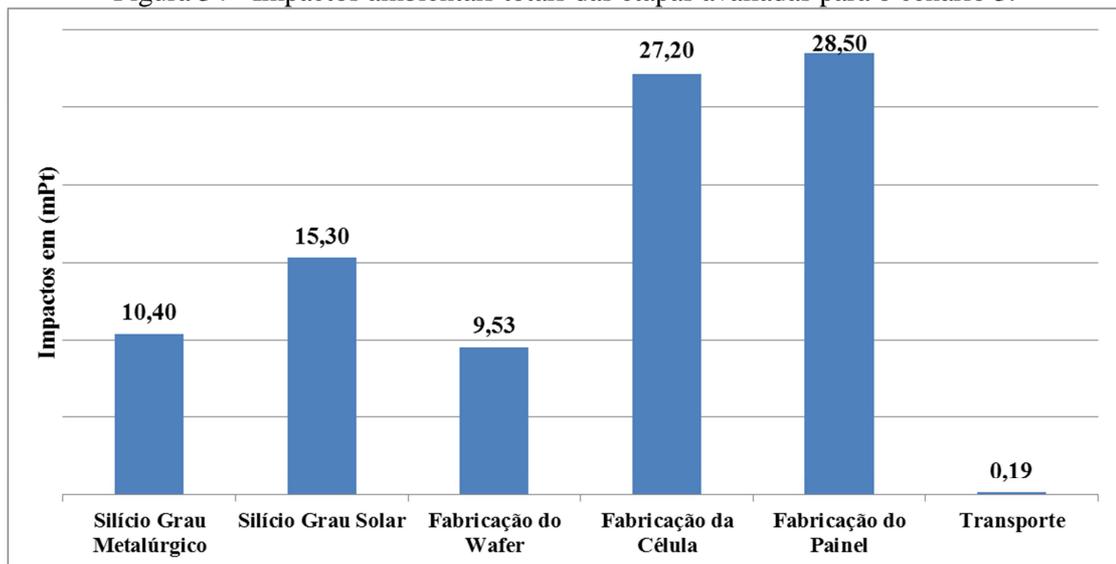
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Impactos ambientais totais das etapas avaliadas para o cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os impactos ambientais globais refletem os indicadores de impacto por categoria em ponto médio. Verifica-se que para os cenários 1 e 2, através das Figuras 32 e 33, que a etapa de purificação do Si-gS apresenta um maior impacto ambiental em relação as demais etapas de fabricação do painel. Para Oliveira (2017) isso pode ser explicado ao fato de haver um grande consumo de eletricidade e a matriz elétrica chinesa, ser predominantemente composta por fontes não renováveis de energia. García-Valverde et al. (2009) afirmam que as fontes da matriz energética de um país interferem diretamente na carga ambiental de ACV de um sistema fotovoltaico. Ainda em relação aos cenários 1 e 2, nota-se uma redução significativa

dos impactos das etapas da fabricação da célula e do painel no cenário 2 em comparação ao cenário 1, com percentuais de 32,58% e 20,8% respectivamente. Claramente, isso é uma consequência da alteração do local de fabricação dessas etapas, que passaram da China para o Brasil.

Considerando os impactos ambientais totais do cenário 3, Figura 34, verifica-se que a etapa de fabricação do painel, seguido da etapa de fabricação da célula, são as que causam o maior impacto ambiental. Para Oliveira (2017) o fato da produção do módulo fotovoltaico apresentar a maior parcela de contribuição do impacto, se deve pela quantidade de vidro e alumínio que são empregados. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2018), aproximadamente 75% de um painel fotovoltaico é composto de vidro e 10% de alumínio.

No trabalho de Bezerra et al. (2018), as etapas que mais apresentaram participação na formação dos indicadores avaliados foram a fabricação do Si-gM e a fabricação do painel, considerando toda a produção na China e o transporte para o Brasil. Na pesquisa de Oliveira (2017) a fabricação do módulo fotovoltaico foi a que mais contribuiu nas categorias de impacto, tanto para o cenário de produção na China, como o que foi realizado parte na China e parte no Brasil. Fu et al. (2014) afirmam que o processo de purificação Si-gS é o de maior impacto ambiental, considerando a fabricação do painel na China. Stopatto (2008) também considerou a etapa de purificação do Si-gS a de maior impacto realizando a fabricação na Alemanha.

#### **4.2.3 Avaliação dos impactos ambientais por categoria de dano**

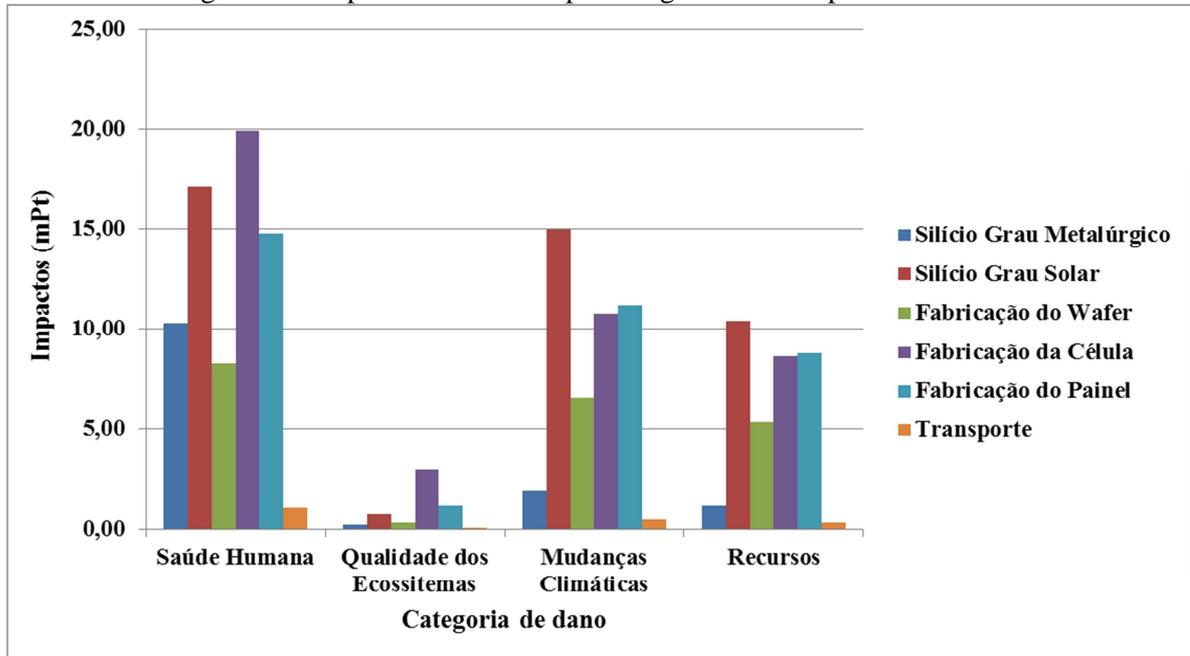
As Figuras 36, 35 e 37 apresentam os impactos ambientais para os cenários 1, 2 e 3, respectivamente, por categoria de dano, que são: Saúde Humana, Qualidade dos Ecossistemas, Mudanças Climáticas e Recursos.

Analisando as contribuições de cada etapa do cenário 1, verifica-se que na categoria Saúde Humana e Qualidade dos Ecossistemas o processo de fabricação da célula fotovoltaica apresenta maior contribuição, enquanto que, na categoria de Mudanças Climáticas e Recursos a produção do Si-gS é o processo mais impactante. Em relação ao cenário 2, nota-se que teve redução dos impactos no processo de fabricação da célula e do painel. O impacto produzido pela purificação do Si-gS, só não é predominante na categoria de Qualidade dos Ecossistemas.

Para o cenário 3 teve-se redução em todas as categorias de dano. Nas categorias de Saúde Humana e Qualidade dos Ecossistemas, os impactos das etapas de fabricação do painel

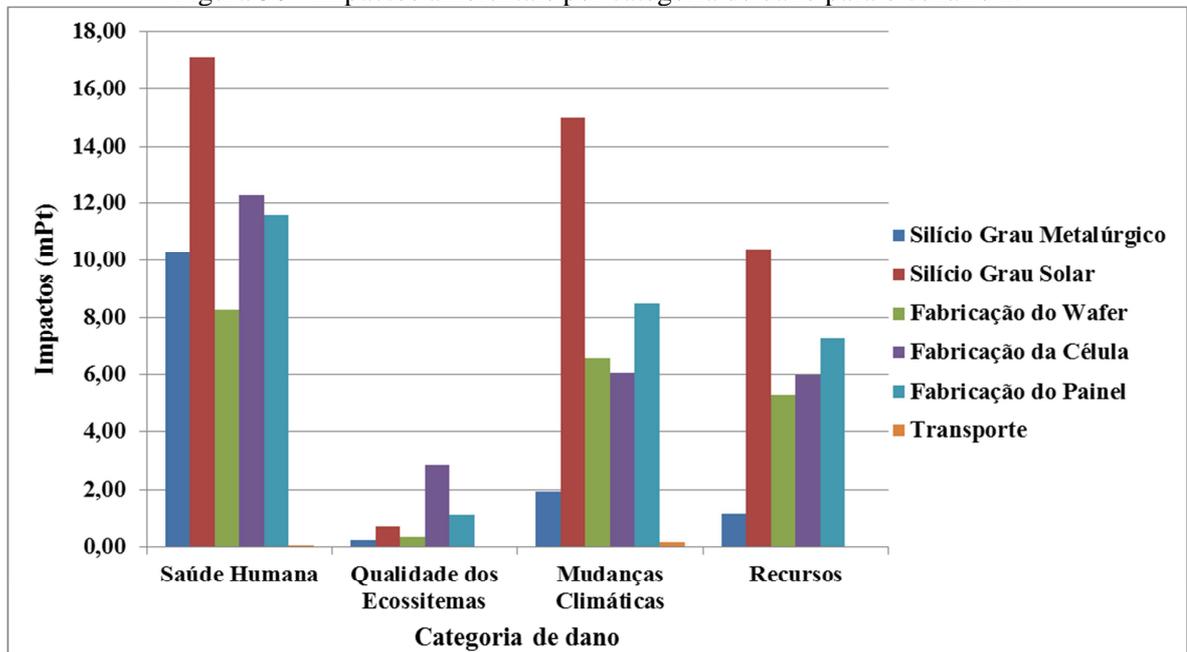
e da célula atingiram a mesma magnitude. Na categoria de Mudanças Climáticas e Recursos a etapa de fabricação da célula teve a maior carga ambiental.

Figura 35 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 1.



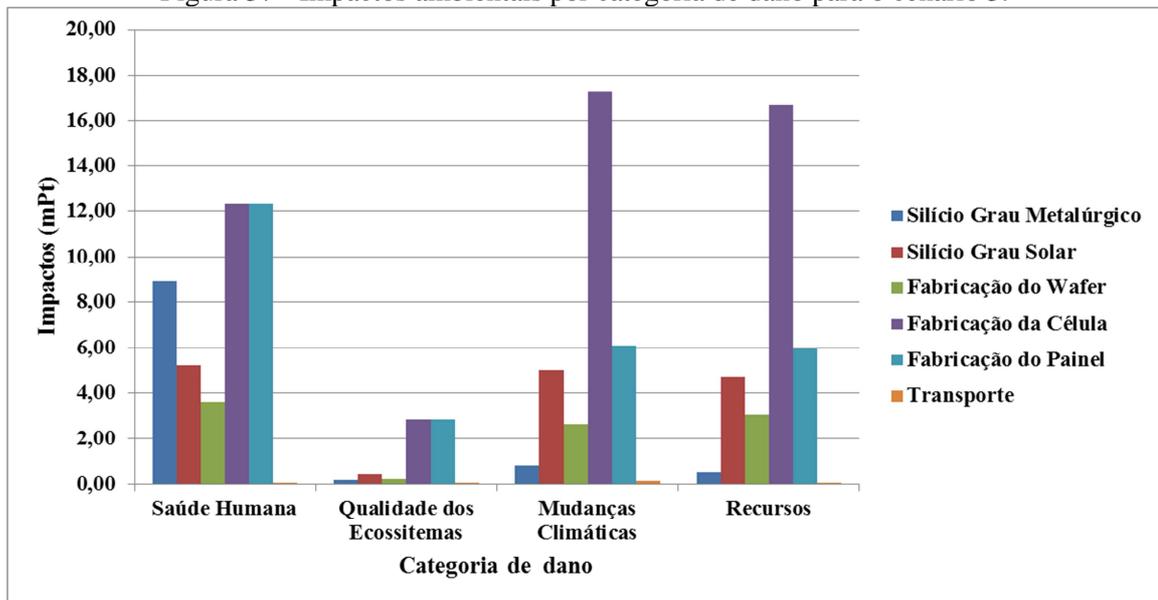
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Impactos ambientais por categoria de dano para o cenário 3.

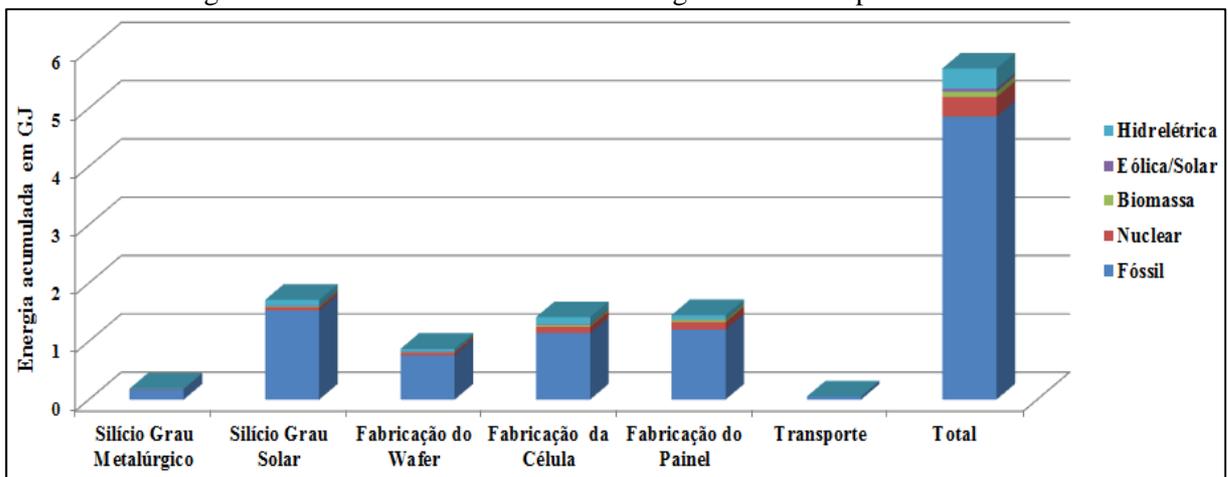


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.4 Avaliação da Demanda de Acumulada de Energia

Na simulação da Demanda Acumulada de Energia para o cenário 1, representada na Figura 38, pode se verificar que a energia proveniente de fontes fósseis é responsável por 4,8GJ, representando 85% do total de energia utilizada. Este cenário considerou a fabricação do painel na China, onde fontes não renováveis de energia como o carvão mineral e petróleo são predominantes. Para Pautasso e Oliveira (2008) este é um fator de grande influência que contribui diretamente no desempenho energético nesta etapa.

Figura 38 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 1.

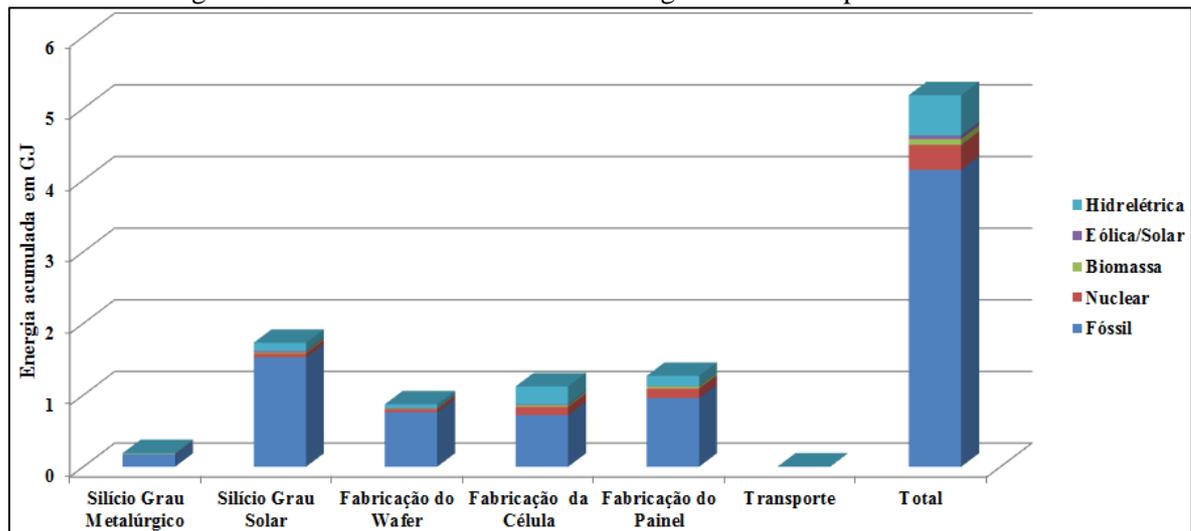


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda em relação ao cenário 1, a segunda forma de energia mais utilizada é proveniente de fontes nucleares com 6% de participação. No montante total para a produção do painel fotovoltaico de silício policristalino são necessários 5,67GJ de demanda energética. O processo que mais utiliza energia é o de purificação Si-gS com 1,71GJ, seguido da fabricação do painel e da célula fotovoltaica, com 1,44GJ e 1,41GJ, respectivamente.

Na simulação da Demanda Acumulada de Energia do cenário 2, Figura 39, percebe-se pouca variação da demanda de energia total em relação ao cenário 1, que de 5,67GJ passou para 5,17GJ. Porém, verifica-se um aumento da participação da energia proveniente de hidrelétricas na fabricação da célula e do painel. Este fator pode ser atribuído ao fato de haver uma maior participação de fontes hídricas na matriz energética brasileira em comparação com a matriz chinesa.

Figura 39 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 2.



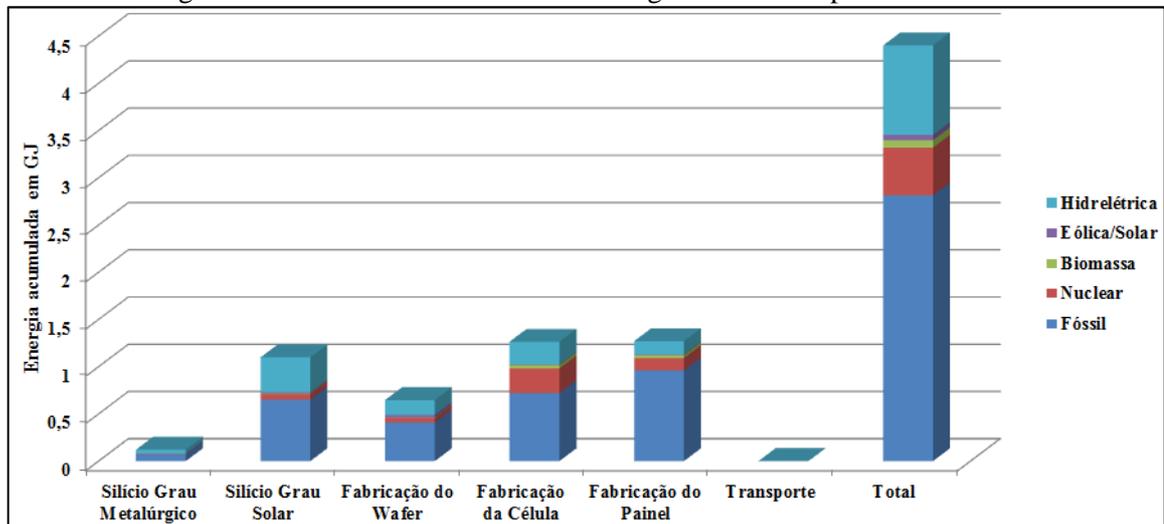
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Demanda Acumulada de Energia para o cenário 3, apresenta o menor valor entre os três cenários analisados, com um total de 4,26GJ acumulados e um significativo aumento da participação de energia hídrica em cada etapa para fabricação do painel, como pode ser visto na Figura 40.

Diversos outros trabalhos determinaram a Demanda de Energia Acumulada para a ACV de um painel ou sistema fotovoltaico policristalino. No entanto, cada ACV apresenta suas particularidades que influenciam no resultado final, como por exemplo, diferentes tipos de abordagens, o limite do sistema adotado, a unidade funcional e outras especificidades que prejudicam a comparação de resultados entre diferentes ACV. Na revisão bibliográfica realizada por Gerbinet et al. (2014) é relatado que apesar de existir um grande número de

ACV de painéis fotovoltaicos, a falta de detalhes publicados sobre o sistema e a metodologia dificultam comparações, levando a resultados, muitas vezes, muito divergentes.

Figura 40 - Demanda Acumulada de Energia em cada etapa do cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas ACV de Hou et al. (2015) e Fu et al. (2014), ambas realizadas na China, a Demanda Acumulada de Energia foi de 1,09GJ e 2,5GJ, respectivamente. No trabalho de Yue et al. (2014), com a ACV realizada no Sul da Europa, o resultado foi 3,0 GJ. Na pesquisa de Pacca et al. (2007), feita nos Estados Unidos, o resultado foi de 4,32GJ. No estudo de Battisti e Corrado (2005) realizado na Itália, o resultado foi 5,15 GJ.

#### 4.2.5 Cálculo do Tempo de Retorno de Energia (EPBT)

Após a determinação da demanda de energia acumulada de cada cenário, aplicou-se as Equações 1 e 2 apresentadas no item 3.1.3 para determinar o Tempo de Retorno da Energia (EPBT) de cada cenário. Conforme informação do CRESESB (2018) a irradiação solar média para a região de Passo Fundo/RS, é de 4,55 kWh/m<sup>2</sup>-dia, fornecendo anualmente 1660,75 kWh/m<sup>2</sup>-ano. A área total do painel, conforme as dimensões apresentadas no Quadro 2, é de 1,94 m<sup>2</sup> e seu rendimento de 19,6%. Adotou-se uma taxa de desempenho do sistema fotovoltaico de 80%, que engloba as perdas nos inversores, zonas de sombreamento, cabeamento elétrico e o efeito da temperatura na célula fotovoltaica, pois segundo a SMA Solar Technology, este rendimento representa um valor médio para a performance de sistemas fotovoltaicos. Com estes valores aplicados na Equação 1, obtém-se uma energia produzida anual de 505,18 kWh/ano, que foi considerada na análise dos três cenários propostos.

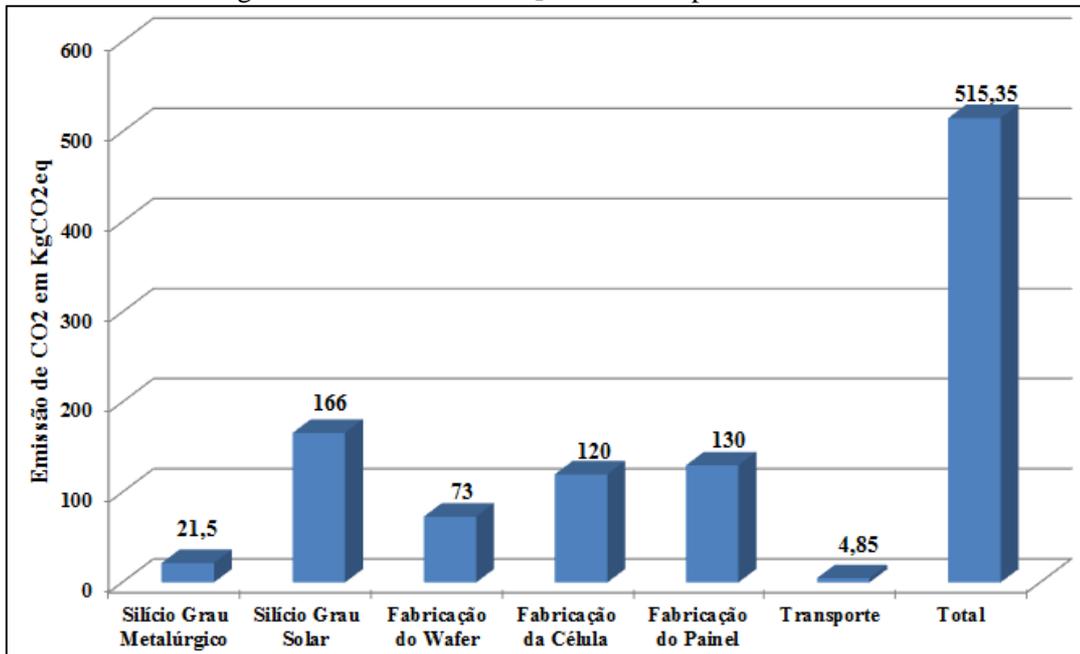
Com o valor da energia anual gerada e adotando-se um coeficiente de conversão de energia primária em elétrica de 0,35, baseado nos trabalhos de Bhandari et al., (2015) e Laleman et al., (2011), por meio da utilização da Equação 2 chegou-se em um *EPBT* de 3,92 anos para o cenário 1. O *EPBT* para o cenário 2, foi de 3,58 anos, pois há uma redução de apenas 0,5GJ na energia total demandada em comparação ao cenário 1. Já para o cenário 3, em que a Demanda Acumulada de Energia foi a menor entre os cenários, o *EPBT* foi de 2,95 anos.

No trabalho de Bezerra et al. (2018) o *EPBT* calculado foi de 2,94 anos, considerando a fabricação total na China e transporte ao Brasil. Hou et al. (2015) e Fu et al. (2014), tiveram um *EPBT* de 1,6 e 2,52 anos, respectivamente, para a fabricação e uso na China. Desideri et al. (2012) obtiveram um *EPBT* de 4,17 anos, considerando fabricação e uso na Itália. Pacca et al. (2007), calcularam um *EPBT* de 7,5 anos para produção e operação nos Estados Unidos. Jungbluth et al. (2007), considerou a produção e uso na Suíça e chegou em um *EPBT* de 2,9 anos. Kim et al. (2014) realizaram a ACV na Coreia do Sul e obtiveram um *EPBT* de 3,68 anos.

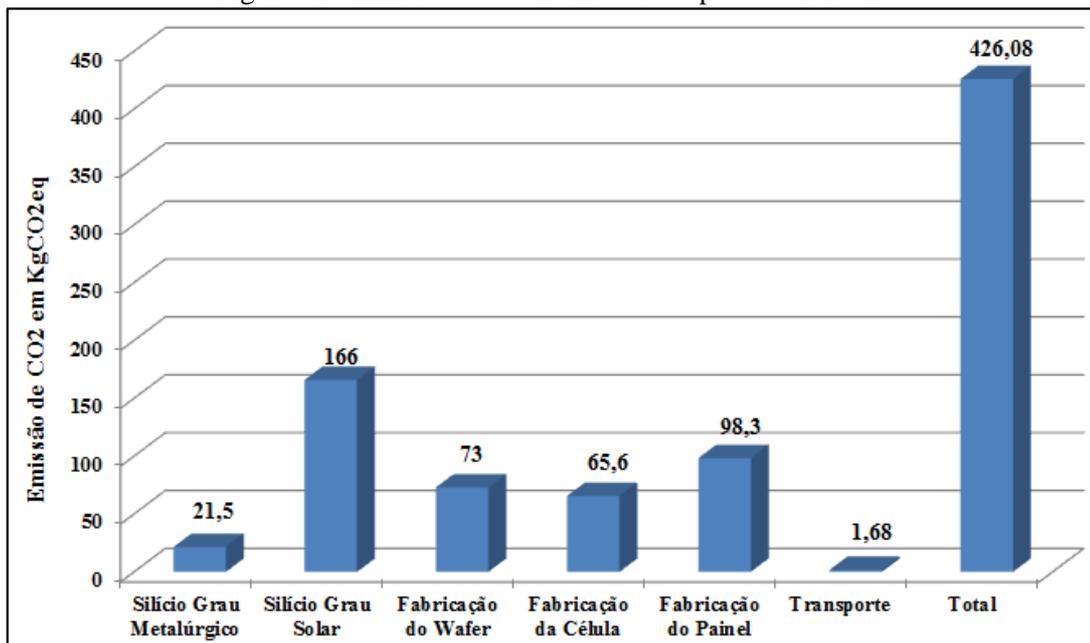
#### **4.2.6 Avaliação da Emissão de Gases de Efeito Estufa (*GHG*)**

A Emissão de Gases de Efeito Estufa (*GHG*) é expressa para os cenários avaliados em função da unidade KgCO<sub>2</sub>eq, que segundo Laleman et al. (2001) representa o potencial de aquecimento global dos gases envolvidos e calcula quanto de CO<sub>2</sub> é emitido, se todos os gases de efeito estufa fossem emitidos como esse gás. A Figura 41, apresenta a *GHG* do cenário 1, onde a emissão ocorrida durante a fabricação do Si-gS é de 166 KgCO<sub>2</sub>eq, ou seja, 32,2% do total de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido durante toda a fabricação do painel. A quantidade de energia utilizada nesta etapa é a maior entre todas as etapas de fabricação. Logo, em virtude da maior parte da energia consumida no cenário 1 ser gerada a partir de fontes não renováveis, tem-se um impacto direto na quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido.

Em relação ao cenário 2, Figura 42, as etapas de fabricação do painel fotovoltaico, da célula e do transporte tiveram seus indicadores reduzidos em comparação ao cenário 1. A etapa de purificação do Si-gS continua como a de maior impacto, sendo que no montante, considerando todas as etapas, houve uma redução de 17,3% da emissão de CO<sub>2</sub>.

Figura 41 - Emissão de CO<sub>2</sub> em cada etapa do cenário 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

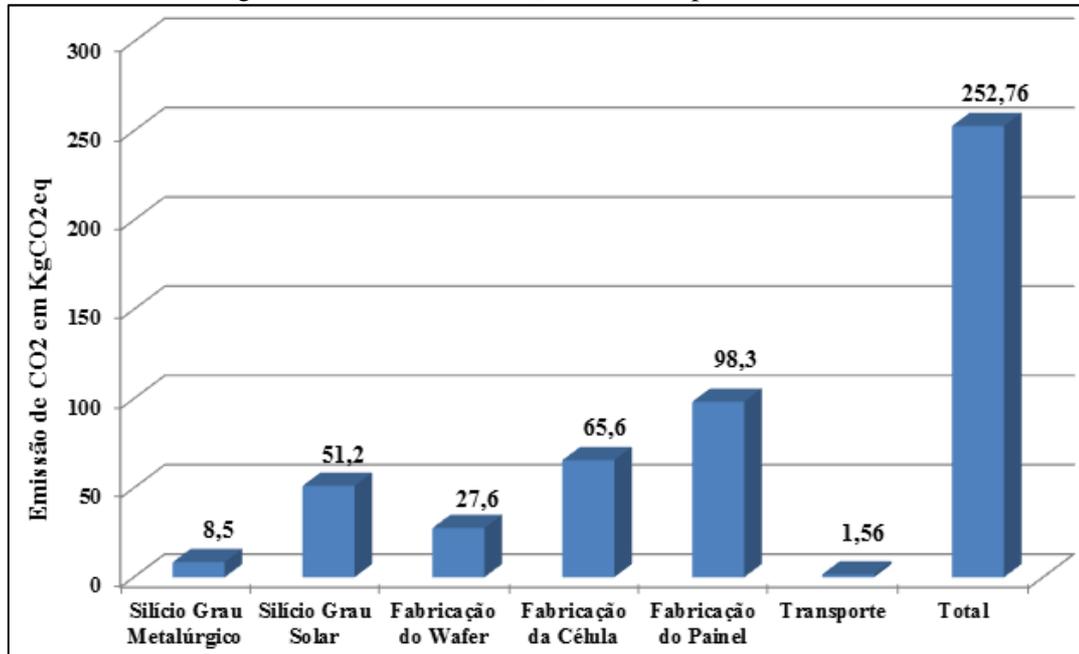
Figura 42 - Emissão de CO<sub>2</sub> em cada etapa do cenário 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Emissão de Gases de Efeito Estufa do cenário 3, Figura 43, teve um redução bastante significativa em relação aos cenários 1 e 2 como pode ser visto na Figura 41. A fabricação do painel é a etapa com maior valor de emissão, seguido pela fabricação da célula e purificação do Si-gS. Em virtude do cenário 3 apresentar uma matriz elétrica, em sua grande

parte com a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, teve-se uma redução de quase 70% das emissões emitidas na etapa de purificação do silício em grau solar.

Figura 43 - Emissão de CO<sub>2</sub> em cada etapa do cenário 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Laleman et al. (2011), realizaram a ACV para um sistema fotovoltaico de 3 kWp na Europa para diferentes tipos de células fotovoltaicas. Para células de silício policristalino, chegou-se em um valor de 5000 kgCO<sub>2</sub>eq. Battisti e Corrado (2005) aplicaram a ACV para um sistema fotovoltaico policristalino de 1kWp, instalado em Roma, na Itália. Foi concluído que para 1 metro quadrado de módulo fotovoltaico são gerados 463 kgCO<sub>2</sub>eq, enquanto que, para todo o sistema são emitidos 4730 kgCO<sub>2</sub>eq. Ito et al. (2011) apresentaram um total de 135,2 kgCO<sub>2</sub>eq para a fabricação de um módulo de silício policristalino, em um estudo que utilizou a ACV no Japão.

#### 4.3 Interpretação do ciclo de vida da fabricação do painel fotovoltaico

Observou-se, por meio dos 14 indicadores de impacto de ponto médio, uma variação nos percentuais de contribuição de cada processo para fabricação do painel fotovoltaico entre os cenários 1 e 2, onde o processo que possui maior percentual de contribuição de impacto é o mesmo para os dois cenários. No entanto, o mesmo não se pode afirmar a respeito do cenário 3, quando tem-se etapas do processo de fabricação do painel que passam a contribuir de

maneira mais relevante na formação de impacto do indicador. Um exemplo disso é o caso da etapa de purificação do Si-gM e sua participação nos indicadores de Acidificação Terrestre e Aquática ou da etapa de fabricação do painel fotovoltaico nos indicadores de Aquecimento Global e Energia Não Renovável.

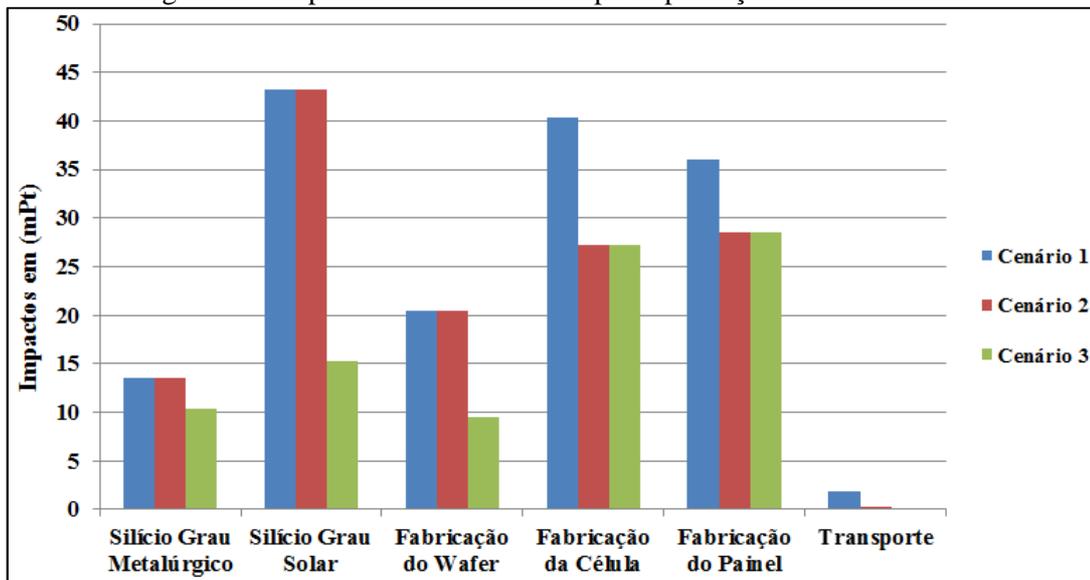
Avaliando a formação destes indicadores de ponto médio, constatou-se que alguns materiais empregados em determinados processos contribuem de maneira preponderante na formação do indicador, como a utilização do elemento químico Prata (Ag), na composição de uma pasta, utilizada no processo de metalização das células fotovoltaicas. O emprego de ligas de alumínio-magnésio na fabricação de molduras utilizadas no painel e o emprego de um filme para revestimento do painel que possui em sua composição o composto tetrafluoretileno. Assim, uma possível substituição destes materiais por outros similares e mais sustentáveis é uma opção para reduzir os impactos da fabricação do painel.

Em relação as quatro categorias de dano avaliadas em ponto final (saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos), verifica-se um maior impacto da etapa de purificação do Si-gS nos cenários 1 e 2. Enquanto que no cenário 3, as etapas de fabricação da célula fotovoltaica e do painel apresentam maior impacto em cada categoria.

A Figura 44 apresenta uma comparação dos impactos totais entre cada etapa dos cenários propostos. Verifica-se que os impactos totais dos cenários 1 e 2 são iguais desde o processo de purificação de Si-gM até a produção do *wafers* de silício, porque até esta etapa todos os processos de produção são realizados na China. Situação igual ocorre para os cenários 2 e 3 nas etapas de produção da célula e do painel, visto que, em ambos cenários a fabricação considerada foi no Brasil.

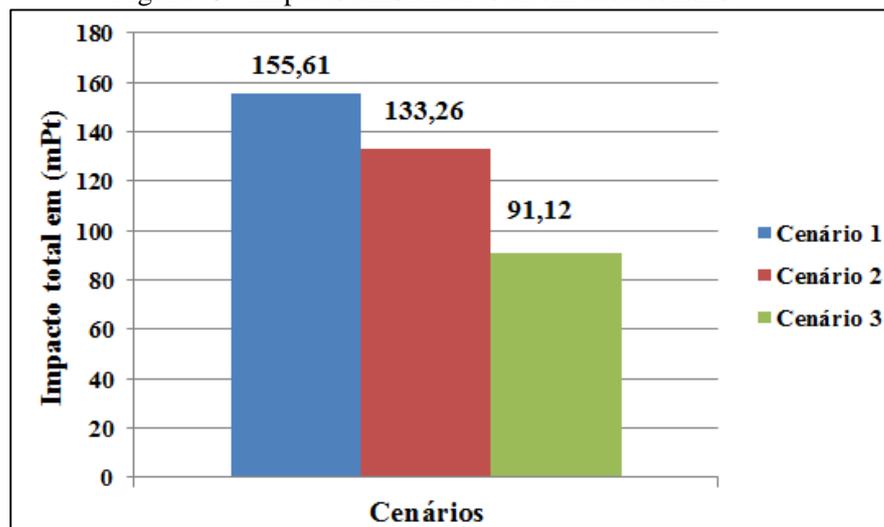
O impacto global total de cada cenário é representado na Figura 45, o cenário 3, que considerou todos os processos de produção do módulo fotovoltaico no Brasil, foi o de menor impacto ao meio ambiente. Possivelmente, isso está relacionado com a origem da energia elétrica utilizada nos processos de produção do painel. Enquanto no Brasil a maior parte da matriz energética é renovável, na China se tem, predominantemente, a utilização de energias não renováveis que, conseqüentemente, aumenta os impactos ambientais associados em cada etapa.

Figura 44 - Impactos totais de cada etapa de produção de cada cenário



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Impacto ambiental total em cada cenário.

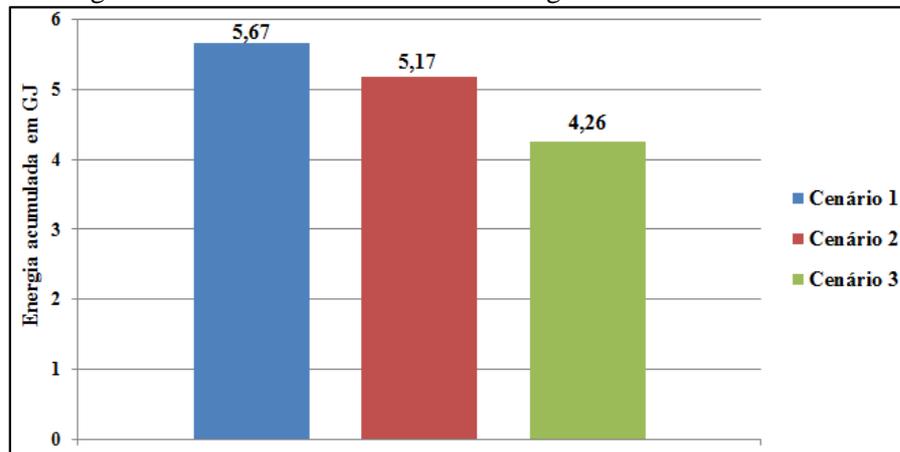


Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 46 e 47 representam uma comparação do total da Demanda Acumulada de Energia e da Emissão de Gases de Efeito Estufa entre os 3 cenários simulados. Em ambos os casos o cenário 3 apresenta menor valor de energia consumida e emissão. Este fato, novamente está associado com as fontes da matriz energética de cada país. Hong et al. (2016) citam que a carga ambiental geral para fabricação de células fotovoltaicas de silício policristalino pode ser reduzida em 25% com melhorias de eficiência energética. Por meio da demanda de energia total de cada cenário, chegou-se aos tempos de retorno de energia, onde o cenário 3 por apresentar menor demanda energética, resultou em um tempo de retorno de

aproximadamente 3 anos, enquanto que para o cenário 1 foi aproximadamente 4 anos e no cenário 2 um pouco mais de 3 anos e meio.

Figura 46 - Demanda acumulada de energia total em cada cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Total de CO<sub>2</sub> emitido em cada cenário.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

Evidenciou-se por meio das avaliações que na etapa de fabricação do painel fotovoltaico, tem-se a entrada de uma grande quantidade de materiais como o vidro e o alumínio, que somados representam em torno de 85% do peso total do painel. Este fator faz com que este processo seja o mais impactante no cenário 3, porém isso não se aplica para os cenários 1 e 2. Devido a alta demanda de energia na etapa de purificação do Silício Grau Solar (Si-gS), nos cenários 1 e 2, este processo provoca o maior impacto em virtude da matriz energética chinesa usufruir de fontes de energia não renováveis.

Para as etapas de extração de matéria prima até a produção do *wafers* nos cenários 1 e 2 obteve-se valores de impacto iguais, pois considerou-se a realização destes processos na China. Porém, na etapa de fabricação da célula e do painel no cenário 2, onde se diferencia o país de produção, verificou-se uma redução nos valores do impacto do cenário 2 em relação ao cenário 1. Constatou-se, novamente, que a redução destes valores está relacionada com a matriz energética de cada país, pois para a fabricação da célula e do painel no cenário 2, o mix de energia utilizado foi o brasileiro.

Ao analisar o cenário 3 e compará-lo aos demais, com exceção dos processos de fabricação da célula e do painel que são iguais aos do cenário 2, novamente verifica-se uma redução em todas as categorias de impacto avaliadas e comprova-se que a matriz energética do país onde se produz o painel, influência significativamente nos impactos obtidos. Por este motivo, e também por não haver o transporte marítimo no cenário 3, tem-se uma grande redução na quantidade de dióxido de carbono emitida, onde a emissão total do cenário 3 foi 50,95% inferior ao cenário 1 e 40,67% menor que do cenário 2. Ainda por estes mesmos motivos, em relação a demanda de energia acumulada, o cenário 3 apresenta uma redução de 24,86% em comparação ao cenário 1 e 17,6% ao cenário 2. Consequentemente, o tempo de retorno de energia calculado para o cenário 3 foi de 2,95 anos, enquanto que para o cenário 2 foi de 3,58 anos e para o cenário 1 foi de 3,92 anos.

Por meio da avaliação dos indicadores de ponto médio, foi possível identificar alguns processos de produção agentes contaminantes que provocam maior impacto ao meio ambiente, como a Prata (Ag) que é utilizada em uma pasta no processo de metalização da célula fotovoltaica, o filme de revestimento do painel que possui em sua composição tetrafluoretileno e a utilização de ligas de alumínio-magnésio na fabricação da moldura dos painéis fotovoltaicos.

Quanto aos indicadores de ponto final que são classificados em 4 categorias de impacto, identificou-se que para os cenários 1 e 2 o processo de purificação do Si-gS só não possui maior impacto na categoria de saúde humana do cenário 1 e na qualidade dos ecossistemas destes cenários. No cenário 3, as etapas de fabricação da célula e do painel provocam os maiores impactos nas categorias de dano.

Portanto, a ACV evidenciou que a produção do painel fotovoltaico adotada no cenário 3, que refere-se a fabricação de todas as etapas no Brasil, provoca menor impacto ao meio ambiente em relação ao cenário 1, que considera a produção de todo o painel na China e seu respectivo transporte ao Brasil, e ao cenário 2 que considera a produção de algumas etapas na China e o transporte ao Brasil para fabricação do painel.

Como trabalho futuro, sugere-se a aplicação da ACV em um sistema fotovoltaico considerando os componentes necessários ao funcionamento do mesmo, como os inversores, dispositivos de proteção, condutores e trilhos para fixação dos painéis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044:** Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:** Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: 2009b.

ADRIANO, G. L. M. **Análise de ciclo de vida da energia fotovoltaica em Portugal.** 2015. 79f. Dissertação (Mestrado em energias renováveis, conversão elétrica e utilização sustentável), Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

ANTAQ. Agência Nacional dos Transportes Aquáticos. Observatório dos transportes aquaviários. Disponível em <<http://observatorioantaq.info/index.php/category/portos-brasileiros/>> Acesso em 30 dez 2019.

ALSEMA, E. A. et al. Energy payback time of photovoltaic energy systems: presente status and prospects. In: Proceedings of the 2nd world conference on photovoltaic solar energy conversion, Vienna, Austria; 1998. p. 1–6.

ALSEMA, E. A. Energy pay-back time and CO<sub>2</sub> emissions of PV systems. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 8, p.17–25, 2000.

ALSEMA, E. A.; FTHENAKIS, V. Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004-early 2005 status. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 14, p.275–280, 2006.

ALSEMA, E. A.; NIEUWLAAR, E. Energy viability of photovoltaic systems. **Energy Policy**, v 28, p.999–1010, 2000.

ALSEMA, E. A.; WILD-SCHOLTEN, M. J. Environmental impacts of crystalline silicone photovoltaic module production. In: Proceedings of 13th CIRP intern conference on life cycle engineering, Leuven, 2006, p. 1–10.

ALSEMA, E. A et al. Presented at the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden. Germany; 4–8 September 2006.

ALVARENGA, R. A. F. Avaliação de AICV: **Um estudo de caso de quatro cenários de ração para frangos de corte.** 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado em engenharia ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

APUL, D. S. et al. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 47, p.133-141, 2015.

ABINEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** Brasil, São Paulo, 2012. 176 f.

ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. **Renováveis no Brasil: Maturidades diferentes para cada fonte exigem cuidados especiais.** Brasil, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/renovaveis-no-brasil-maturidades-diferentes-para-cada-fonte-exigem-cuidados-especiais.html>> Acesso em 04 out. 2018.

ABSOLAR - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. **Infográfico ABSOLAR.** Brasil, São Paulo, 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>> Acesso em 21 mai. 2020

ASSUNÇÃO, H. D. **Degradação de módulos fotovoltaicos de silício cristalino instalados no DEE – UFC.** 2014. 62f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAIRD, C. **Química ambiental.** (Trad. Maria Angeles Lobo Recio; Luiz Carlos Marques Carrera). 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BARBOSA JÚNIOR, A. F. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**, São Paulo, v7, n. 1, p. 39-44, 2008

BATTISTI, R.; CORRADO, A. Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. **Energy**, v 30, p.952-967, 2005.

BAXTER, J. B. Commercialization of dye sensitized solar cells: Present status and future research needs to improve efficiency, stability and manufacturing. **Journal of Vacuum Science & Technology A**, v 30, 2012.

BERNARDES, L. M. C. **Células solares sensibilizadas por pontos quânticos.** 2015. 31f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química), Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2015.

BEZERRA, J. L. et al. Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 17 a 20 de abril, 2018, Gramado. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.**

BHANDARI, K. P. et al. Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 47, p. 133 – 141, 2015.

BILICH, A. et al. Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Microgrid Systems in Off-Grid Communities. **Environmental Science & Technology**, v 51, p.1043-1052, 2017.

BLUMENSCHNEIN, R. N.; MILLER, K. B. Inmetro. Fonte: Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função: Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade\\_social/apresentações/3.pdf](http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentações/3.pdf)>. Acesso em: 14 de out. 2018.

BRASIL. **Documento base para discussão da estratégia do Brasil para o fundo verde do clima**. Secretaria de assuntos internacionais – SAIN. Brasília, 08 nov. 2017. Disponível em: < [http://www.fazenda.gov.br/assuntos/atuacao-internacional/fundo-verde-do-clima/arquivos/documento-base-para-discussao\\_estrategia-do-brasil-para-o-gcf\\_08\\_11.pdf](http://www.fazenda.gov.br/assuntos/atuacao-internacional/fundo-verde-do-clima/arquivos/documento-base-para-discussao_estrategia-do-brasil-para-o-gcf_08_11.pdf)> Acesso em 23 fev. 2019.

CAMPOLINA, J. M. et al. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudo sobre avaliação do ciclo de vida. **Revista eletrônica sobre gestão, educação e tecnologia ambiental**, v. 19, p. 735 – 750, 2015.

CAMPOS, M. G. **Abordagem de ciclo de vida na avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore**. 2012. 142 f. Projeto de graduação (Curso de engenharia ambiental). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos – ferramenta gerencial da ISO 14.000**. Rio de Janeiro: Qualitymark. 1998.

CHEN, W. et al. Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: a case study in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1025-1032, 2016.

China Energy Portal. Tracking China's transition to sustainable energy. 2017. Disponível em: < <https://chinaenergyportal.org/en/2017-electricity-energy-statistics/>> Acesso em 16 mar. 2020.

CONTRERAS-LISPERGUER, R. et al. Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels. **Journal of Cleaner Production**, v 168, p. 51 – 59, 2017.

COLTRO, L. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. Disponível em: <[http://cetea.ital.sp.gov.br/publicacoes/adi\\_25/files/assets/basic-html/index.html#page3](http://cetea.ital.sp.gov.br/publicacoes/adi_25/files/assets/basic-html/index.html#page3)> Acesso em: 01 mar. 2019.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA DE SALVO BRITO. **Energia solar fotovoltaica**. 2018. Disponível em: < [http://www.cresesb.cepel.br/indexsection=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/indexsection=com_content&lang=pt&cid=321)> Acesso em 20 nov. 2018.

DESIDERI, U. et al. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. **Applied Energy**, v 97, p.930-943, 2012.

DJURISIC, A. B. et al. Perovskite solar cells – An overview of critical issues. **Progress in Quantum Electronics**, v 53, p. 1-37, 2017.

DONES, R.; FRISCHKNECHT, R. Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of Swiss studies on energy chains. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 6, p.117–125, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2018**. Brasil, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018> > Acesso em 04 set. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz energética e elétrica. Brasil, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> > Acesso em 18 mai. 2020.

EC-JRC-JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION. Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment – background document. **ILCD Handbook – International Reference Life Cycle Data System**, European Union. 2010 a.

ENVIRONMENT CANADA. Assessment of the environmental performance of solar photovoltaic, 2012.

ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES)**, v 40, p. 85-114, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook: International reference life cycle data system: general guide for life cycle assessment**. 1 ed. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010 a, 417p.

FARAGÒ, M. et al. National inventories of land occupation and transformation flows in the world for land use impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v, 24, p. 1333-1347, 2019.

FERREIRA, J. V. R. **Análise do ciclo de vida de produtos**. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

FIORI, S. et al. Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.4, p. 186-194, 2014.

FRISCHKNECHT, R. et al. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Repost T12, v 5, 2015.

FTHENAKIS, V. M. Life cycle assessment of photovoltaics. In: REINDERS, A. et al. (Orgs.). Photovoltaic solar energy: from fundamentals to applications. 1.ed. USA: John Wiley, 2017. cap. 13, p.647-657.

FTHENAKIS, V. M. et al. Emissions from photovoltaics life cycles. **Environmental Science and Technology**, v 42, p 2168 – 2174, 2008.

FTHENAKIS, V. M. et al. Life cycle analysis of high-performance monocrystalline silicon photovoltaic systems: Energy payback times and net energy production value. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, p.4667–4672, 2012.

FTHENAKIS, V.M.; KIM, H.C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. **Solar energy**, v 85, p.1609-1628, 2011.

FU, Y. et al. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. **Journal of Cleaner Production**, v 86, p.180-190, 2014.

FUNDAÇÃO ALEXANDRE DE GUSMÃO – FUNAG. “O Brasil no mundo que vem aí”. In: IV Conferência Nacional de política Externa e política internacional – IV CNPEPI, 2009, Rio de Janeiro. **Seminário mudanças climáticas**, Brasília, 2010. 168 p.

GARCÍA-VALVERDE, R. et al. Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system. **Solar Energy**, v.8, p.1434-1445, 2009.

GHENSEV, A. **Materias e processos de fabricação de Células Fotovoltaicas**. Monografia de pós-graduação Latu Sensu, Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG, Brasil, 2006.

GERBINET, S. et al. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 747-753, 2014.

GLOBO BRASIL. **Indústria de painéis solares Globo Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://www.paineisglobobrasil.com.br/globobrasil>>. Acesso em: 23 out. 2018.

GLOCKER, R.; WILD-SCHOLTEN, M. Energy payback time and carbon footprint of Elkem Solar Silicon. In: Proceedings of the 27th European photovoltaic solar energy conference and exhibition; 2008. p. 4661–4666.

GO SOLAR. **Solar rooftop system**. 2018. Disponível em: <<http://www.go-solar.co/solar/ongrid-solar-system.html>>. Acesso em: 14 out. 2018.

GRATZEL, M.; O'REGAN, B. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. **Nature**, v 353, p. 737-740, 1991.

HAGFELDT, A. et al. Dye sensitized solar cells. **Chemical Reviews**, v 110, p. 6595-6663, 2010.

HANNAN, K. D.; RUMMER, J. L. Aquatic acidification: a mechanism underpinning maintained oxygen transport and performance in fish experiencing elevated carbon dioxide conditions. **Journal of Experimental Biology**, v 221, p. 1-8, 2018.

HEIJUNGS, R. et al. Environmental life cycle assessment of products. I: guide October 1992. II: Backgrounds October 1992. CML. Leiden. (NOH report 9266 + 9267; ISBN 90-5191-064-9).

HONG, J. et al. Life cycle assessment of multicrystalline silicon photovoltaic cell production in China. **Solar Energy**, v.133, p. 283-293, 2016.

HOU, G. et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, v 164, p. 882-890, 2015.

IEA - International Energy Agency. **End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling Technologies**. Photovoltaic Power System Program. Report IEA-PVPS T12-10:2018.

IEA - International Energy Agency. **Life cycle inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe**. Photovoltaic Power System Program. Report IEA-PVPS T12-12:2017.

IEA - International Energy Agency. **Market report series: Renewables 2017**. France, 2017. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/market-report-series-renewables-2017>> Acesso em 04 set. 2018.

IEA-PVPS. International Energy Agency - Photovoltaic Power System Program. Snapshot of global photovoltaic markets. Report IEA PVPS T1-33:2018.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2007. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

INFINITI RESEARCH – Top 5 solar panel manufactures from around the globe. Estados Unidos, 2019. Disponível em: <<https://www.infinitiresearch.com/thoughts/top-5-solar-panel-manufacturers>> Acesso em 30 dez. 2019.

INTERNACIONAL ELETRONIC COMISSION. IEC 60300-3-3:2004. **Dependability Management - Part 3-3: Application Guide - Life Cycle Costing**. 2004. Disponível em:> [https://webstore.iec.ch/p-preview/info\\_iec60300-3-3%7Bed2.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec60300-3-3%7Bed2.0%7Den.pdf)<. Acesso em mar. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY INITIATIVE. Sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica no Brasil: Panorama da atual legislação. Brasil, 2009. Disponível em: <[http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO\\_PROJETO\\_2\\_FINAL.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/RELATORIO_PROJETO_2_FINAL.pdf)> Acesso em 02 out. 2018.

ITO, M. et al. A comparative study on cost and life cycle analysis for 100 MW very large scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 16, p.17-30, 2008.

ITO, M. et al. A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 19, p.429-446, 2011.

ITO, M. et al. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules. **Current Applied Physics**, v. 10, p. 271-273, 2010.

JENSEN, A. A. et al. **Life cycle assessment (LCA) – a guide to approaches, experiences and information sources**. Copenhagen: European Environmental Agency, 1997.

JIANG, M. et al. Enhancing the performance of planar organo-lead halide perovskite solar cells by using a mixed halide source. **Journal of Materials Chemistry A**, v 3, p. 963-967, 2015.

- JOLLIET, O. et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p.324-330, 2003.
- JUNGBLUTH, N. et al. Life cycle assessment of photovoltaics; update of the ecoinvent database. Ecoinvent Center, Suíça, 2007.
- JUNGBLUTH, N. Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss ecoinvent database. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 13, p.429-446, 2005.
- JUNGBLUTH, N. et al. Life cycle assessment of photovoltaics: update of ecoinvent data V2.0. Energy Research Centre of the Netherlands, 2008.
- JUNGBLUTH, N. et al. Life cycle inventories of photovoltaics. Swiss Federal Office of Energy, version 2012.
- JUNGBLUTH N. et al. **PHOTOVOLTAICS**. In Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. ecoinvent report No. 6 -XII, ESU-services Ltd, Uster, CH, 2010.
- JUNQUEIRA, R. C.; UTURBEY, W. Valoração econômica de impactos ambientais da energia solar fotovoltaica: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v 8, p. 50-58, 2017.
- KANNAN, R. et al. Life cycle assessment study of solar PV systems: an example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. **Solar Energy**, v. 80, p.555–563, 2006.
- KATO, K. et al. Energy pay-back time and life-cycle CO<sub>2</sub> emission of residential PV power system with silicon PV module. **Progress Photovoltaic: Research Applications**, v 6, p.105–115, 1998.
- KIM, B. et al. Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea. **Solar Energy**, v. 99, p.100-114, 2014.
- KOUHNAVARD, M. et al. A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 37, p. 397-407, 2014.
- KREITH, F. et al. CO<sub>2</sub> emissions from coal-fired and solar electric power plants. Solar Energy Research Institute. Estados Unidos, 1990.
- LALEMAN, R. et al. Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 267 – 281, 2011.
- LASSIO, J. G. G.. **Aplicação do programa SimaPro na avaliação dos ciclos de vida dos materiais da construção civil, estudo de caso para um conjunto habitacional**. 2013. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

LEICESTER, P. A. et al. Probabilistic evaluation of solar photovoltaics systems using Bayesian networks: a discounted cash flow assessment. **Progress in Photovoltaics**, v 24, p. 1592 – 1605, 2016.

LEITE, A. et. al. Aplicação de um caso prático de doenças ocupacionais: relevância médico-legal metais pesados e carcinogênese. **Scielo Portugal**, v 29, p. 93-97, 2015.

LI, T. et al. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. **Applied Energy**, v 227, p. 465-479, 2017.

LIMA, R. M. C. et al. Caracterização de células solares de filmes finos de CIGS. **Revista Matéria**, v 22, 2017.

LU, H. R. et al. A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. **Journal Of Cleaner Production**, v 166, p.458-473, 2017.

LU, L. et al. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 255-274, 2013.

LU, L.; YANG, H. X. Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. **Applied Energy**, v 87, p. 3625-3631, 2010.

LUO, W. et al. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v 174, p. 157-162, 2018.

LUDKE, M. C. A rota metalúrgica do silício: Da extração do quartzo à obtenção do silício de grau fotovoltaico. 2018. 77f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Energia), Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2018.

LUDIN, N. A. et al. Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p.11-28, 2018.

MA, X. et al. Review on life cycle assessment of energy payback of solar photovoltaic systems and a case study. **Energy Procedia**, v. 105, p. 68-74, 2017.

MARQUES, F. C. Minicurso de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos. 2014. 61 f. Instituto de Física Gleb Wathagin – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2014.

MARQUES, P. S.G. **Caracterização e purificação de quartzo para indústria fotovoltaica**. 2013. 50f. Projeto de graduação (Curso de engenharia metalúrgica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MENDES, N. C. et al. Avaliação de impacto do ciclo de vida: revisão dos principais métodos. **Produção**, v. 26, p. 160-175, 2016.

MENDES, N. C. **Métodos e modelos de caracterização para a avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para aplicação no Brasil**. 2013. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MENOUIFI, K. A. I. Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: A state of the art. 2011. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas e Engenharia), Universitat de Lleida, Lleida, 2011.

MORAIS, L. C. **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. 2015. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de São Paulo, Bauru, 2015.

MOREIRA, S. P. **Purificação de silício metalúrgico por fusão zonal horizontal em forno de feixe de elétrons**. 2009. 325f. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MORI, V. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. Série Tecnologia Mineral, 41, CETEM/MCT, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2007.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Câmara dos deputados, consultoria legislativa. Brasília, DF. 2017. 46f.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Solar photovoltaic technology basics. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/workingwithus/re-photovoltaics.html> > Acesso em: 12 de out. 2018.

NIAN, V. Impacts of changing design considerations on the life cycle carbon emissions of solar photovoltaic systems. **Applied Energy**, v 183, p. 1471-1487, 2016.

NISHIMURA, Y. et al. Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system. **Applied Energy**, v 87, p.2797-2807, 2010.

OGBOMO, O. O. et al. A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 75, p. 1225-1238, 2016.

OLIVEIRA, A. S. **Avaliação de impactos ambientais do módulo fotovoltaico: produção e uso como fonte de energia elétrica**. 2017. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas), Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PACCA, S. et al. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. **Energy Policy**, v 35, p. 3316-3326, 2007.

PARK, N. Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. **Materials Today**, v 18, p. 65-72, 2015.

PAUTASSO, D; OLIVEIRA, L.K. A segurança energética da China e as reações dos EUA. **Contexto Internacional**, v 30, p. 361-398, 2008.

PENG, J. et al. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 19, p. 255-274, 2013.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2 ed. São José dos Campos - SP. INPE, 2017.

PHYLIPSEN, G.J.M.; ALSEMA, E.A. **Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules**. Departament of Science, Technology and Society, Utrecht University. The Netherland, 1995.

PIEKARSKI, M. et al. Aplicação da ACV na matriz elétrica brasileira: Uma análise multi cenários em termos de mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos. **Revista Espacios**, v 34, p. 8-20, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Centro de pesquisas em energia elétrica – CEPEL. Rio de Janeiro, 2014.

PRÉ CONSULTANTS B.V. **Software SimaPro**. 2018. Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Acesso em: 23 out. 2018.

RAUGEI, M. et al. Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si. **Energy**, v 32, p.1310-1318, 2007.

REN 21. Renewable energy policy network for the 21 century. Global status report. França, 2016.

REVISTA JINKO SOLAR. Jinko solar holding Co LTD, v 2, p. 1 – 16, 2016.

RUHLE, S. et al. Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells. **Chemphyschem**, v 11, p. 2290-2304, 2010.

RUTHER, R. Edifícios Solares Fotovoltaicos – O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Editora UFSC/LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

S4 SOLAR DO BRASIL. **S4 Solar do Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://s4solar.com.br/>>. Acesso em 23 out. 2018.

SAFARIAN, J. et al. Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicone. **Energy Procedia**, v 20, p. 88-97, 2012.

SEARATES. World sea ports. Disponível em: < <https://www.searates.com/maritime/>>. Acesso em 11 nov. 2019

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

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira no Brasil**. 2012. 207 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, M. N. **Células Solares de Perovskita: Uma nova tecnologia emergente**. 2016. 34f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química), Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2016.

SIQUEIRA, L. M. P. **Viabilidade da microgeração de energia elétrica de uma residência por um sistema composto por painéis fotovoltaicos conectados a rede**. 2013. 71f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

STOPPATO, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. **Energy**, v 33, p.224-232, 2008.

SUELA, J. **Caracterização estrutural de pontos quânticos e filmes ultrafinos de CdTe/Si(111)**. 2007. 77f. Dissertação (Mestrado em física aplicada), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

SUM, T. C.; MATHEWS, N. Advancements in perovskite solar cells: photophysics behind the photovoltaics. **Energy & Environmental Science**, v 7, p.2518-2534, 2014.

SWART, J. W. **Semicondutores – Fundamentos, técnicas e aplicações**. 1ª Ed. Campinas – SP: UNICAMP, 2008.

TIBOR, T.; FELDMAN, I. **ISO 14000: a guide to the new environmental management standards**. USA: Times Mirror Higher Education Group. 1996.

UDO DE HAES, H.A. et al. Three strategies to overcome the limitations of life-cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v 8, p.19-32, 2004.

VARUN, I.K. et al. LCA of renewable energy for electricity generation systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 13, p. 1067-1073, 2009.

WENZEL. H.; HAUSCHILD, M.; ALTING L. **Environmental assessment of products**. Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publisehrs. v.1 e 2. 1997.

WILSON, R.; YOUNG, ALAN. The embodied energy payback period of photovoltaic installations applied to buildings in the U.K. **Building and Environmental**, v 31, p.299-305, 1996.

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

YU, M; HALOG, A. Solar Photovoltaic Development in Australia — A Life Cycle Sustainability Assessment Study. **Sustainability**, v 7, p.1213-1247, 2015.

YUAN, Z. et al. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. **Journal of Cleaner Production**, v 86, p.180-190, 2014.

YUE, D. et al. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. **Solar Energy**, v 105, p. 669-678, 2014.

ZHANG, S. 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.

ZHONG, Z. W. LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2227- 2237, 2011.

ZULEHNER, W. Historical overview of silicon crystal pulling development. **Materials Science and Engineering B**, v 73, p. 7-15, 2000.



**UPF**

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)