



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**

PRISCILA CARVALHO PUPIN

ITAJUBÁ

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

PRISCILA CARVALHO PUPIN

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE PAINÉIS  
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Energia como  
parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente

Orientador: Dr. Roberto Akira Yamachita

Coorientador: Dr. Jamil Haddad

ITAJUBÁ

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

---

Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana – SOESCO

---

Prof. Dr. Jamil Haddad (Coorientador) - UNIFEI

---

Prof. Dr. Mateus Henrique Rocha – UNIFEI

---

Prof. Dr. Roberto Akira Yamachita (Orientador) - UNIFEI

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por atender meus pedidos me dando muito mais força e coragem de persistir do que eu mesma esperava, à família que Ele já havia colocado em meu caminho e à nova família que ganhei por serem presentes e me ajudarem no que foi necessário, ao meu orientador pela paciência e cuidado nestes anos, e ao meu filho por ser a razão da minha dedicação.

## RESUMO

Com a crescente preocupação pela produção e consumo de bens e serviços mais sustentáveis, surge uma preocupação em propagar novos produtos com a imagem destes serem ambientalmente corretos, entretanto, a preocupação ambiental oriunda das indústrias é um fator relativamente recente que muitas vezes mostra-se despreparadas para garantir a confiabilidade e fidedignidade de seus produtos nas esferas ecológicas, pois muitas vezes são analisados indicadores que não são suficientes para comprovar a sustentabilidade de determinados elementos. A geração de energia através de painéis fotovoltaicos é conhecida mundialmente como uma aposta limpa, renovável e com baixos prejuízos ambientais, entretanto, estas características estão relacionadas ao produto em operação após sua instalação nos locais de geração e/ou consumo e não trata das etapas que este produto passa antes e depois de seu uso. Este trabalho busca analisar e quantificar os impactos ambientais que podem ser causados pelo uso de painéis fotovoltaicos em seu ciclo de vida, antes de sua fase de operação, ou seja, durante a extração de recursos naturais, beneficiamento dos materiais, construção e produção de peças e matérias primas utilizadas na produção dos painéis fotovoltaicos, e ainda seu descarte após sua vida útil, levando em consideração o cenário brasileiro em suas aplicações mais utilizadas e viáveis. Para realizar esta análise, utilizou-se de uma ferramenta muito recomendada para este caso, a ACV – Análise de Ciclo de Vida. Ficou esclarecido que a produção de painéis fotovoltaicos tem como ser menos impactante em diversos aspectos ambientais com a mudança em alguns pontos de sua cadeia produtiva, como a obtenção de matéria prima próxima ao local de produção para menores gastos e emissões em transportes, a produção destes painéis em locais onde o mix energético baseia-se em fontes renováveis e limpas, substituição da produção de painéis de silício monocristalino por policristalino e aumento dos incentivos para tornar a produção dos painéis em uma escala maior, barateando e diminuindo os impactos por unidade de produção. Entretanto, mesmo antes destas mudanças ocorrerem, é possível utilizar a fonte de energia fotovoltaica através de painéis cristalinos de acordo com o local de geração de energia e seu potencial solar, mostrando vantagens em seu uso.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, ACV, Impactos Ambientais, Painel Fotovoltaico.

## ABSTRACT

Concerns about the production and consumption of more sustainable goods and services are growing, and there is an idea to propagate new goods with an environmentally correct image, however, the environmental concern from the industries is a relatively recent factor that often appears unprepared to ensure the reliability of their products in the ecological spheres, since often they are analyzed with indicators that are not enough to prove the sustainability of certain products. The energy generation through photovoltaic panels is known worldwide as a clean, renewable and with low environmental damage, however, these characteristics are related to the product in operation after its installation. This work aims to analyze and quantify the environmental impacts that may be caused by the use of photovoltaic panels in their life cycle before their operation phase, it means, during the extraction of natural resources, material processing, construction and production of parts and raw materials used in the production of photovoltaic panels, and also its discard in its end of life, taking into account the Brazilian scenario in its most used and viable applications. To perform this analysis, it was used a highly recommended tool for this case, the LCA - Life Cycle Analysis. It was clarified that the production of photovoltaic panels can be much less impacting in several environmental spheres with the change in some points of its production chain, such as the obtaining of raw material near the place of production for smaller expenses and emissions in transport, the production of these panels in places where the energy mix is based on clean and renewable sources, replacing the production of monocrystalline silicon for multicrystalline silicone panels and increasing incentives to production. However, even before these changes occur, it is possible to use the photovoltaic energy source through crystalline panels according to the site of energy generation and its solar potential, showing advantages in this use.

**Keywords:** Photovoltaic Energy, LCA, Environmental Impacts, Photovoltaic Panels.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Unidades consumidoras com geração fotovoltaica no Brasil
- Figura 2 – Irradiação Horizontal Global
- Figura 3 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício em uma rede de telefonia
- Figura 4 – Evolução da fonte Solar Fotovoltaica em Leilões
- Figura 5 – Oferta Interna de Energia Elétrica
- Figura 6 – a) Célula de Silício Monocristalino  
b) Célula de Silício Policristalino
- Figura 7 – Filme fino
- Figura 8 – Tecnologias de Células Fotovoltaicas existentes
- Figura 9 – Encapsulamento do módulo fotovoltaico
- Figura 10 – Diagrama de um sistema fotovoltaico isolado
- Figura 11 – Diagrama de um sistema híbrido
- Figura 12 – Diagrama de um sistema fotovoltaico ligado à rede de distribuição
- Figura 13 – Distribuição por massa dos constituintes do módulo fotovoltaico
- Figura 14 - Diagrama das rotas de purificação do silício para produção de células fotovoltaicas
- Figura 15 - Reator do tipo U para obtenção do silício policristalino
- Figura 16 – Simulação de uma pesquisa no banco de dados do Ecoinvent.
- Figura 17 – Simulação de uma busca pelo processo de produção de areia de sílica no software Simapro.
- Figura 18 - Diagrama da tecnologia fotovoltaica “do berço ao túmulo”, mostrando as etapas que serão avaliadas
- Figura 19 - Diagrama da extração de sílica
- Figura 20 - Diagrama da produção de silício metalúrgico
- Figura 21 - Diagrama da purificação do silício metalúrgico para produção de silício a grau solar através do processo Siemens modificado
- Figura 22 - Diagrama da purificação do silício grau solar para produção de silício monocristalino através do processo Czochralski
- Figura 23 - Diagrama da produção de wafers de Silício
- Figura 24 - Diagrama da produção da Célula Solar
- Figura 25 - Diagrama da construção do Painel Fotovoltaico

Figura 26 – Diagrama do transporte marítimo da China ao Brasil

Figura 27 – Diagrama do transporte rodoviário de Santos- SP a Itajubá - MG

Figura 28 - Diagrama da produção do Inversor

Figura 29 – Fluxo de referência de cada processo da produção do painel fotovoltaico.

Figura 30 - Gráfico do impacto das etapas de produção de um painel fotovoltaico, seu transporte e um inversor de frequência separados por categorias

Figura 31 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção abiótica de recursos minerais

Figura 32 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção abiótica combustíveis fósseis

Figura 33 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo no aquecimento global

Figura 34 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção de ozônio estratosférico

Figura 35 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na toxicidade humana

Figura 36 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade aquática em água doce

Figura 37 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade aquática em águas marinhas

Figura 38 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade terrestre

Figura 39 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na formação de compostos foto-oxidantes

Figura 40 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na acidificação

Figura 41 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na eutrofização

Figura 42 - Resumo dos resultados de todas as categorias de impacto

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Ranking dos 10 países com maior capacidade instalada em 2017 (GW).
- Tabela 2: Países com maior capacidade fotovoltaica instalada no ano de 2017 (GW).
- Tabela 3: Características dos painéis fotovoltaicos de silício cristalino.
- Tabela 4: Irradiação anual incidente em Itajubá – MG
- Tabela 5: Saídas de elementos do processo de Produção de Silício Metalúrgico.
- Tabela 6: Saídas de elementos do processo de purificação do Silício metalúrgico para produção de Silício a grau Solar através do processo Siemens modificado.
- Tabela 7: Saídas de elementos do processo de purificação do Silício metalúrgico para produção de Silício a grau Solar através do processo Siemens modificado.
- Tabela 8: Saídas de elementos do processo de produção de wafers de Silício.
- Tabela 9: Saídas de elementos do processo de produção da Célula Solar.
- Tabela 10: Saídas de elementos do processo de construção do Painel Fotovoltaico.
- Tabela 11: Saídas de elementos do processo de transporte marítimo para 1 t.km.
- Tabela 12: Saídas de elementos do processo de transporte rodoviário de 1 t.km.
- Tabela 13: Saídas de elementos do processo da produção do Inversor.
- Tabela 14: Valores dos impactos ambientais gerados pela extração de sílica, divididos por categorias.
- Tabela 15: Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de Mg-Si, divididos por categorias.
- Tabela 16: Valores dos impactos ambientais gerados pela purificação de Mg-Si, divididos por categorias.
- Tabela 17: Valores dos impactos ambientais gerados pela purificação do silício solar, divididos por categorias.
- Tabela 18: Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de wafers, divididos por categorias.
- Tabela 19: Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de célula solar, divididos por categorias.
- Tabela 20: Valores dos impactos ambientais gerados pela produção do painel fotovoltaico, divididos por categorias.
- Tabela 21: Valores dos impactos ambientais gerados pelo transporte marítimo, divididos por categorias.

Tabela 22: Valores dos impactos ambientais gerados pelo transporte rodoviário, divididos por categorias.

Tabela 23: Valores dos impactos ambientais gerados pela produção do inversor, divididos por categorias.

Tabela 24: Resultado final da Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de 250 kWh.

## SUMÁRIO

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                      | <b>1</b> |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....                               | 1        |
| 1.2. OBJETIVO.....   | 2        |
| 1.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO.....                                | 3        |
| 1.3. JUSTIFICATIVA.....  | 3        |
| 1.4. LIMITAÇÕES.....   | 4        |
| 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                | 6        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                           | <b>7</b> |
| 2.1. ENERGIA SOLAR .....                                       | 7        |
| 2.2. HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....               | 8        |
| 2.3. COMPONENTES DO SISTENA FOTOVOLTAICO.....                  | 16       |
| 2.3.1. CÉLULA SOLAR.....                                       | 16       |
| 2.3.2. COMPONENTES DO PAINEL.....                              | 20       |
| 2.3.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....                             | 21       |
| 2.3.4. MATÉRIAS PRIMAS E ORIGENS.....                          | 24       |
| 2.4. PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DO PAINEL<br>FOTOVOLTAICO..... | 27       |
| 2.4.1. DESCARTE DOS COMPONENTES.....                           | 31       |
| 2.4.1.1. . RECICLAGEM TOTAL.....                               | 31       |
| 2.4.1.2. DESCARTE COMO LIXO ELETRÔNICO.....                    | 32       |
| 2.4.1.3. ATERRO SANITÁRIO.....                                 | 33       |
| 2.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....                     | 33       |
| 2.5.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO.....                     | 35       |
| 2.5.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO.....                              | 36       |
| 2.5.3. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS.....                             | 36       |
| 2.5.4. INTERPRETAÇÃO.....                                      | 40       |
| 2.6. BASE DE DADOS PARA O INVENTÁRIO.....                      | 40       |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.7. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA.....       | 42        |
| 2.8. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ACV DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS..... | 45        |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>   | <b>48</b> |
| 3.1. OBJETIVOS E ESCOPO.....                                       | 50        |
| 3.2. ANÁLISE DE INVENTÁRIOS.....                                   | 52        |
| 3.2.1. EXTRAÇÃO DE SÍLICA.....                                     | 54        |
| 3.2.2. PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO.....                        | 54        |
| 3.2.3. PRODUÇÃO DO SILÍCIO POLICRISTALINO.....                     | 57        |
| 3.2.4. PRODUÇÃO DO SILÍCIO MONOCRISTALINO.....                     | 58        |
| 3.2.5. PRODUÇÃO DAS BOLACHAS DE SILÍCIO.....                       | 60        |
| 3.2.6. PRODUÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES.....                           | 61        |
| 3.2.7. PRODUÇÃO DO PAINEL SOLAR.....                               | 63        |
| 3.2.8. TRANSPORTE.....   | 66        |
| 3.2.9. PRODUÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....                     | 70        |
| <b>4. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS.....</b>                              | <b>71</b> |
| 4.1. VALORES FORNECIDOS PELO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS.....  | 73        |
| 4.2. EXTRAÇÃO DE SÍLICA.....                                       | 75        |
| 4.3. PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO.....                          | 76        |
| 4.4. PRODUÇÃO DE SILÍCIO POLICRISTALINO.....                       | 77        |
| 4.5. PRODUÇÃO DE SILÍCIO MONOCRISTALINO.....                       | 78        |
| 4.6. PRODUÇÃO DAS BOLACHAS DE SILÍCIO.....                         | 79        |
| 4.7. PRODUÇÃO DA CÉLULA SOLAR.....                                 | 80        |
| 4.8. PRODUÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....                          | 81        |
| 4.9. TRANSPORTE MARÍTIMO.....                                      | 82        |
| 4.10. TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....                                   | 83        |
| 4.11. PRODUÇÃO DO INVERSOR.....                                    | 84        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>5. RESULTADOS.....</b>                             | <b>85</b>  |
| 5.1. DEPLEÇÃO ABIÓTICA.....                           | 85         |
| 5.2. DEPLEÇÃO ABIÓTICA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS.....   | 86         |
| 5.3. AQUECIMENTO GLOBAL.....                          | 87         |
| 5.4. DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO..... | 88         |
| 5.5. TOXICIDADE HUMANA.....                           | 88         |
| 5.6. ECOTOXICIDADE AQUÁTICA (ÁGUA DOCE).....          | 89         |
| 5.7. ECOTOXICIDADE AQUÁTICA (MARINHA).....            | 90         |
| 5.8. ECOTOXICIDADE TERRESTRE.....                     | 91         |
| 5.9. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS FOTO-OXIDANTES.....        | 91         |
| 5.10. ACIDIFICAÇÃO.....                               | 92         |
| 5.11. EUTROFIZAÇÃO.....                               | 93         |
| 5.12. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....                     | 93         |
| 5.13. INTERPRETAÇÃO.....                              | 94         |
| 5.14. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....                   | 96         |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>                              | <b>100</b> |
| 6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....        | 100        |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                               | <b>101</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planeta está presenciando um momento de ápice nos avanços tecnológicos e na velocidade em que se obtém resultados em pesquisas e estudos científicos, o que possibilita obter cada vez mais informações úteis a respeito dos produtos e mecanismos criados para maior comodidade e qualidade de vida da sociedade como um todo.

No cenário energético não é diferente: apesar do forte domínio das fontes não renováveis de energia, há uma busca crescente pelas fontes renováveis devido às crises e limitações ocorridas nas últimas décadas, uma vez que o esgotamento de recursos finitos como o petróleo mostra-se cada vez mais próximo, obrigando o mercado global a reestruturar-se vagarosamente no sentido de aumentar os investimentos e incentivos à produção e comercialização de energia renovável, a qual o cenário brasileiro mostra-se bastante favorável - devido ao seu potencial hidráulico, aos campos de aerogeradores, à biomassa, e por fim, ao seu bom aproveitamento da luz solar devido à sua localização geográfica.

No presente estudo será tratado em específico o aproveitamento da energia solar. Esta fonte de energia, apesar de ser utilizada desde os primórdios como base da sobrevivência humana (para se obter calor, luz, alimentos, entre outros), trata-se de uma alternativa energética recente quando se fala do seu aproveitamento em forma de eletricidade.

O primeiro mecanismo capaz de transformar a radiação solar em energia elétrica foi a célula solar, que quando agrupada forma o painel fotovoltaico, descrito por Cortez (2013) como o conjunto de células fotovoltaicas interligadas entre si, formando os módulos, e por sua vez, o painel. As células solares podem possuir diferentes composições de acordo com cada fabricante, mas em geral, possuem materiais semicondutores para realizar a conversão de energia, somados a uma proteção de caráter condutor, para que o calor acumulado seja dissipado.

Apesar de ser uma fonte promissora para o abastecimento energético global, os painéis solares demandam uma quantidade de energia maior para serem produzidas do que a simples produção de energia convencional através do petróleo, além de maior gasto financeiro, sendo

assim, para garantir a sua viabilidade no mercado, é necessário cada vez mais aumentar a sua eficiência energética, sendo na redução da energia utilizada na sua fabricação, ou na busca por modelos capazes de converter a energia solar com menores perdas, caso contrário esta não será de fato um substituto para o petróleo como fonte de energia (GOODSTEIN, 2004).

A combinação de um baixo custo final do produto, com uma maior eficiência são os objetivos comuns dos desenvolvedores desta tecnologia. Entretanto, estes não são os únicos pontos que necessitam ser avaliados, e um dos fatores mais limitantes da atualidade está ficando de lado: as questões ambientais da produção e destinação das placas fotovoltaicas.

Muito se fala sobre os benefícios do uso da energia solar fotovoltaica nas questões ambientais por ser uma fonte inesgotável e sem emissões de poluentes como os gases estufa, entretanto esta fonte depende dos painéis solares para ser aproveitada, e qualquer tipo de produção pode impactar o meio ambiente de diversas formas e em qualquer etapa de sua cadeia produtiva, desde a obtenção de matéria prima para sua fabricação, até a sua produção, distribuição, consumo, e sua disposição final, abrangendo sua reciclagem e/ou reuso. Uma das técnicas desenvolvidas para avaliar o impacto ambiental, quantitativo e qualitativo, associado à estas etapas de produção é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (ABNT NBR 14040, 2006).

É comum que as grandes empresas e organizações governamentais preocupem-se com o aumento dos fatores econômicos e tecnológicos de seus produtos em desenvolvimento, mas é necessário que haja um equilíbrio entre estes avanços e os impactos ambientais deste produto, pois toda inovação requer tempo para que seus prós e contras sejam realmente identificados e assim uma possível mitigação de impactos pode ser aplicada em tempo suficiente para que não haja transtornos maiores.

As primeiras placas fotovoltaicas criadas já não são tão eficientes quanto as recém desenvolvidas, tornando-as ultrapassadas em um curto espaço de tempo, o que pode torná-las um prejuízo ao invés de um investimento positivo, além de um passivo ambiental quando não há devida destinação de todos os seus componentes.

## **1.2. OBJETIVO**

Este estudo tem por objetivo analisar os impactos causados pela produção dos painéis fotovoltaicos desde a extração de recursos para as suas matérias primas até a sua fase final em seu fim de vida como forma de fomentar a bibliografia acerca desta fonte energética que apesar de ser renovável, necessita de maiores embasamentos científicos acerca de seus processos produtivos além da fase de operação.

### **1.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO**

O objetivo deste trabalho será realizar a Avaliação do Ciclo de Vida dos painéis fotovoltaicos de silício monocristalino a partir da extração de sílica para sua produção, considerando uma situação hipotética em que sua produção final ocorra na China, onde são produzidos a maior parte dos painéis atualmente, sendo transportado para o Brasil onde serão instalados, operados e, futuramente, descartados. Para quantificar os impactos causados, serão utilizados indicadores de impactos divididos por categorias.

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

Uma vez que a demanda por energia da sociedade está crescendo em um ritmo maior do que a capacidade do planeta em suprir e repor suas fontes energéticas a médio e longo prazo, há uma necessidade de substituir as fontes de energia de base fóssil e as que comprometam a qualidade do ambiente a ponto de prejudicar suas atividades normais de regeneração e seus ciclos bióticos e abióticos, fornecendo continuamente recursos a serem consumidos pela sociedade (ROSA, 2008).

A energia solar fotovoltaica é uma fonte promissora de energia para o país e para o mundo, e por tratar-se de uma alternativa recente, ainda há muito o que se descobrir neste campo do conhecimento e sua tendência é que cada vez mais a sociedade possua uma fonte de energia viável e justa para todos, mas para isso é preciso que o desenvolvimento se desloque em todos os sentidos, e não apenas nos interesses das grandes organizações, que são os agentes que dominam em grande parte o mercado dos painéis solares. Este trabalho não busca por limites nesta fonte de energia tão abrangente quanto o Sol é para todo o território brasileiro, que possui níveis de irradiação solar incidente por área maior do que em países desenvolvidos – entre 1500

a 2500 kWh/m<sup>2</sup>, mas sim apontar novas direções para a melhoria e aperfeiçoamento desta tecnologia (PEREIRA, 2006).

O crescimento de unidades consumidoras de energia que já são capazes de gerar energia fotovoltaica própria através da instalação de painéis fotovoltaicos em seus locais de consumo está acelerado, e conforme é mostrado na Figura 1, até fevereiro de 2017 haviam sido instalados uma capacidade de 67 MWp (67 MW em uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> de luz solar à temperatura de 25 °C) em 8.818 unidades consumidoras (Nascimento, 2017).



Figura 1 – Unidades consumidoras com geração fotovoltaica no Brasil (Fonte: Nascimento, 2017).

A título de produzir um material útil para o conhecimento acerca da evolução da energia fotovoltaica no Brasil, este trabalho foi realizado para fornecer informações sobre os painéis fotovoltaicos que são menos difundidas do que outras características de seu mercado e geração que muito já se fala e são de fácil acesso em trabalhos paralelos, podendo assim fornecer ao leitor informações referenciadas sobre todos os aspectos impactantes desta energia.

## 1.4. LIMITAÇÕES

A instalação de painéis fotovoltaicos em empresas ou residências para aproveitamento de energia elétrica produzida por eles em conexão com a rede pública de distribuição é algo relativamente recente quando se trata de fontes renováveis de energia, por isso, muitos dados podem ser limitados ou difíceis de se encontrar, por tempo reduzido de conhecimento prático sobre esta tecnologia.

O cenário político também tem um forte poder sobre as tomadas de decisão dos investimentos no setor de energia. Segundo Ferreira (2016) a recente crise econômica do país impactou fortemente a estrutura do mercado nacional em todos os seus contextos, e devido à instabilidade política que passamos, mesmo notando o crescimento das energias renováveis, não há uma forma totalmente segura de prever o retorno para altos investimentos em novas energias, o que pode retardar o processo de evolução para o ramo solar.

Como o mercado brasileiro ainda se mostra limitado no ramo da produção de energias fotovoltaicas (muitas matérias primas são exportadas), e há um interesse econômico em não disponibilizar informações seguras sobre as inovações tecnológicas de produtos e serviços vantajosos buscando maior domínio mercantil, além do fato de que muitos fatores como a disponibilidade de tecnologias, investimentos, manobras políticas, competitividade energética global, entre outros, sofram fortes variações em curtos espaços de tempo devido aos interesses dos governantes e grandes organizações, este trabalho irá focar isoladamente nas questões ambientais.

Obviamente, não é possível levantar questões relativas ao meio ambiente sem tomar como base o quadro político de cada momento, pois este influencia diretamente na atitude de grandes (e pequenos) consumidores, o que acaba afetando a qualidade ambiental e disponibilidade recursos naturais, entretanto, este estudo irá priorizar os atributos e aspectos do ambiente natural, da saúde humana e dos recursos, tendo ciência dos impactos das limitações que o setor de energia sofre.

Outro fator que compromete a pesquisa e seus resultados é o fato de não existirem avançados bancos de dados para o quadro brasileiro de energia fotovoltaica. Diversos softwares e bibliotecas virtuais de inventários já estão disponibilizados para acesso livre, entretanto são raros os que contam com dados nacionais, portanto existe uma dificuldade em obter dados

muito próximos à realidade local. Para isso serão utilizados os dados mais próximos obtidos em inventários que são considerados válidos mundialmente.

## **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este estudo possui caráter totalmente teórico, com informações obtidas em inventários, empresas do setor, estudos científicos realizados e indicadores estatísticos, e sua apresentação será baseada na demonstração dos resultados presentes e da comparação das consequências avaliadas como significantes das diversas etapas do processo produtivo dos painéis fotovoltaicos.

O trabalho escrito está estruturado em seis capítulos, sendo o capítulo 1 a “Introdução”, que está a apresentada a síntese global do trabalho, citando as motivações, justificativas e limitações deste tema, assim como a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é a “Fundamentação Teórica”, contendo comprovação de dados e informações apresentando estudos realizados anteriormente por outros autores, além de termos e definições para melhor compreensão e uma revisão bibliográfica sobre a energia fotovoltaica e sobre a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

No terceiro capítulo, “Metodologia”, está descrito a metodologia adotada, justificando seu uso e os critérios estabelecidos para a escolha dos métodos.

O quarto capítulo, “Avaliação dos Impactos” apresenta o estudo propriamente dito, onde são expostos os valores fornecidos pelo banco de dados consultados.

No quinto capítulo, “Resultados”, estão as amplitudes as somatórias finais dos impactos divididos por categorias e uma análise e discussão dos valores apresentados no capítulo anterior com base em diversas considerações.

Por fim, o sexto capítulo, “Conclusão” consta o fechamento do assunto, abordando algumas considerações finais e mostrando o que foi e o que não foi possível realizar neste trabalho, e também recomendações para trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Serão demonstrados conceitos e definições básicas, além de uma abordagem ampla sobre os principais temas acerca do presente estudo.

### **2.1. ENERGIA SOLAR**

Segundo a ANEEL (2005), todas as fontes de energia, incluindo hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos, são formas indiretas de energia solar. Como forma direta, a energia solar pode ser aproveitada termicamente, para aquecimento de fluidos e ambientes, e eletricamente, devido ao efeito que a radiação é capaz de causar em alguns materiais - estes efeitos podem ser fotovoltaicos, termoelétricos, entre outros.

Para o aproveitamento da energia solar, é necessário que haja radiação disponível nas localidades de consumo. Nas regiões próximas ao equador este aproveitamento é amplo e sofre pequenas variações ao longo do ano, já nos polos terrestres esta sofre bruscas variações de acordo com a inclinação da terra ao longo de seu período de translação. Além do período do ano, a radiação também depende das condições climáticas e atmosféricas locais, pois apenas uma parte da radiação emitida pelo Sol é capaz de atingir a superfície terrestre – o restante é refletido ou absorvido por componentes presentes na atmosfera. Ainda assim, estima-se que a energia que atinge a superfície da Terra seja 10.000 vezes maior que a energia mundial consumida pela sociedade, conforme ilustra a FIGURA 2 (CRESESB, 2000).

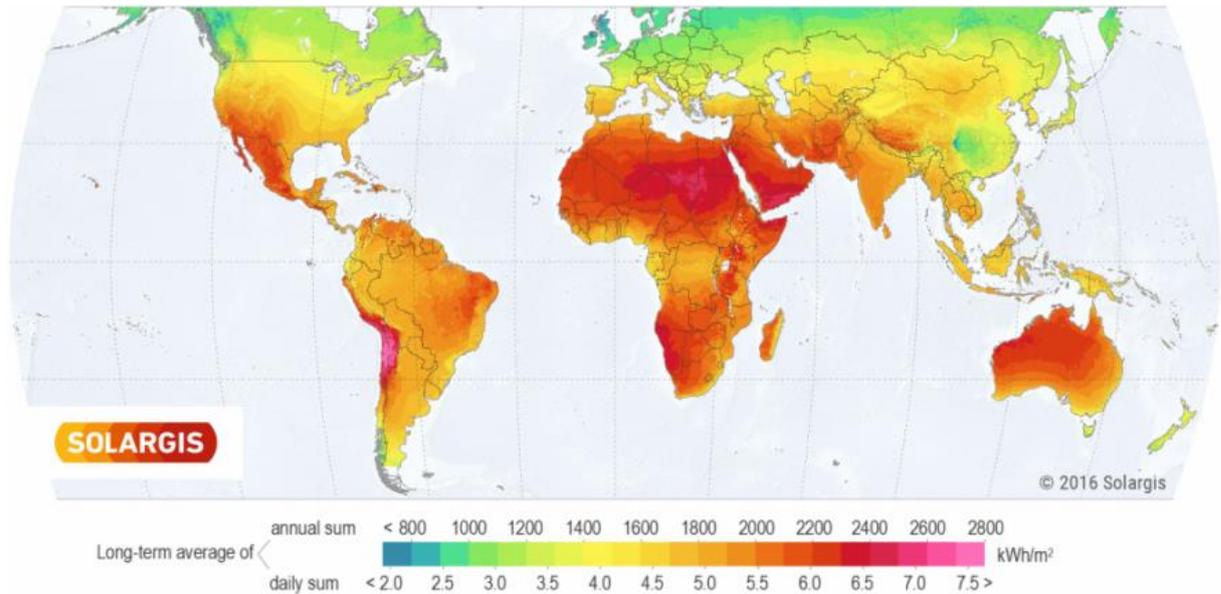


Figura 2 – Irradiação Horizontal Global. Fonte: SolarGIS, 2016

O estudo presente tratará da forma de energia solar aproveitada diretamente como energia elétrica através do efeito fotovoltaico, um fenômeno que ocorre devido à excitação dos elétrons de determinados materiais (em geral nos semicondutores) quando expostos aos fótons contidos nos raios solares (MARTINS, 2012).

## 2.2. HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os primeiros registros que se têm do efeito fotovoltaico são do século XIX. O fenômeno foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, o qual descobriu que era criado uma diferença de potencial em placas metálicas de prata ou platina quando estas estavam mergulhadas num eletrólito e eram expostas à luz. Já o segundo caso foi observado por dois inventores norte-americanos em 1877, William Grylls Adams e Richard Evan Day, os quais desenvolveram o primeiro dispositivo sólido capaz de produzir eletricidade quando expostos à luz – tratava-se da união de dois filmes, um de selênio e ferro e outro de ouro. Apesar da grande descoberta, a eficiência de conversão energética ainda era muito baixa, da ordem de 0,5% (VALLÊRA, 2006).

Levou certo tempo para que surgissem descobertas significativas que viabilizassem a energia fotovoltaica, porém em 1953 iniciou-se uma série de revelações em torno do aumento da eficiência de conversão da célula solar. Estes estudos foram possíveis devido ao avanço da

ciência nas áreas de purificação e dopagem de elementos, os quais possibilitaram manipular as propriedades elétricas de determinados componentes. Outro cientista norte americano, Calvin Fuller, dopou cristais de silício com uma substância de gálio, tornando este material condutor do tipo p (recebe este nome pois as cargas móveis que se criam são cargas positivas), e seguindo este estudo, o físico Gerald Pearson criou uma camada ao redor deste silício dopado com lítio, o qual resultou numa camada tipo n (com cargas móveis negativas), possibilitando que se criasse um campo elétrico permanente devido à junção das camadas p-n. Dando continuidade nestes estudos, junto à Daryl Chapin, um engenheiro e terceiro membro responsável pela publicação do artigo “Uma nova fotocélula de silício de junção p-n para converter radiação solar em energia elétrica” (traduzido), mostraram que devido à limitações que esta célula apresentava de acordo com os testes efetuados, a substituição do gálio e do lítio por arsênio e boro foram capazes de melhorar características como a fixação entre estes elementos e a melhor resistência de contato entre eles, facilitando sua soldagem, além de aumentar significativamente a sua eficiência, alcançando a ordem de conversão de 6% (CHAPIN, 1954).

A primeira aplicação desta célula solar de silício foi numa rede de telefonia local dos Estados Unidos em 1955, como mostra a Figura 3, e em 1958 um marco do seu uso foi no satélite Vanguard I lançado pela NASA, onde a célula solar que gerava cerca de 0,1W como um backup para a pilha convencional superou expectativas após manter o satélite operante por oito anos. Desde então esta tornou-se a fonte de energia utilizada pelos satélites lançados pelos programas espaciais (WOLF, 1960).



Figura 3 – A primeira aplicação de uma célula solar de silício em uma rede de telefonia (NJ, 2010).

O grande interesse em aprimorar as células solares para satélites e veículos espaciais em geral, trouxe grandes descobertas para a energia fotovoltaica nas décadas que se seguiram. Ainda na busca de melhorias para o fornecimento de energia para os satélites, foi desenvolvida a célula violeta pela COMSAT laboratories, a qual atingiu uma eficiência de conversão inédita, por volta de 13,5%. Isto foi possível devido à vários fatores: uma zona tipo n mais fina que as anteriores, reduzindo a zona inativa que mantinha-se na superfície, e uma difusão de alumínio feita na superfície da célula, o que criou um campo elétrico posterior à ela, conhecido como Back Surface Field (BSF), repelindo os portadores da superfície posterior à célula solar, diminuindo efetivamente a sua probabilidade de recombinação, e por último uma texturização feita na parte frontal capaz de reduzir as perdas por reflexão (VALLÊRA, 2006).

A corrida espacial foi a principal motivadora dos avanços tecnológicos que houve nas células solares durante estas décadas, entretanto estes avanços não obtiveram melhorias para a sua viabilidade financeira, já que se mantinham muito altos seus custos de produção e o mercado mundial ainda possuía pouco interesse em investir nesta fonte energética. Apenas em 1973 com a crise petrolífera desencadeada após decisões tomadas pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), que estabeleceu um ritmo de produção mais lento fazendo com que os preços passassem a ser fixados pela oferta e assim, o preço do petróleo subiu notavelmente, foi que o governo dos Estados Unidos iniciou grandes programas para incentivar o uso da energia fotovoltaica no país. (GREEN, 2005).

Houve uma nova consciência em relação à produção de células solares, onde percebeu-se que não apenas o investimento tecnológico para atingir métodos mais baratos de produção seria suficiente, mas também o aumento da produção destas células, pois seu preço unitário decairia com a produção em massa e assim esta fonte de energia poderia tornar-se competitiva. Além disso, foi neste período que se iniciou a produção das células com o silício monocristalino, material mais utilizado nas produções de painéis solares atuais e que possui um custo de produção muito menor em relação aos cristais de silício das primeiras células (GREEN, 2005).

Pouco depois foi desenvolvida a tecnologia de produção de painéis solares em filme fino, uma metodologia que tem resultado em produtos de menor eficiência em relação aos painéis de silício monocristalinos (cerca de 14% a 15% para filmes finos produzidos com silício

amorfo contra a faixa de 20% para painéis de silício monocristalino) porém com um custo de produção muito menor devido a sua menor complexidade (SANTANA, 2011).

Em 1993 a Agência Nacional de Energia (IEA) criou o programa IEA PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme), o Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica, com o intuito de criar programas conjuntos para o avanço da energia fotovoltaica mundial, contando com a união de 32 países: Alemanha, África do Sul, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, China, Coreia, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos da América, Finlândia, França, Israel, Itália, Japão, Malásia, México, Marrocos, Holanda, Noruega, Portugal, Suíça, Suécia, Tailândia e Turquia, o qual anualmente publica relatórios e dados estatísticos sobre os avanços da energia fotovoltaica no planeta. No último relatório publicado pelo IEA-PVPS (2018), foi divulgado o ranking dos países com maior instalação fotovoltaica e capacidade de instalação os quais estão descritos na Tabela 1. Já os países que tiveram a maior instalação em 2017 estão descritos na Tabela 2, onde o Brasil surge com a décima posição. China lidera os dois rankings com uma capacidade destacável de 53 GW instalados apenas no ano de 2017, totalizando uma capacidade de 131 GW instalados no país.

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

|    | PAÍSES      | CAPACIDADE<br>INSTALADA (GW) |
|----|-------------|------------------------------|
| 1  | China       | 131                          |
| 2  | EUA         | 51                           |
| 3  | Japão       | 49                           |
| 4  | Alemanha    | 42                           |
| 5  | Itália      | 19,7                         |
| 6  | Índia       | 18,3                         |
| 7  | Reino Unido | 12,7                         |
| 8  | França      | 8                            |
| 9  | Austrália   | 7,2                          |
| 10 | Espanha     | 5,6                          |

Tabela 2: Países com maior capacidade fotovoltaica instalada no ano de 2017. (IEA-PVPS, 2018)

|    | PAÍSES      | CAPACIDADE<br>INSTALADA (GW) |
|----|-------------|------------------------------|
| 1  | China       | 53                           |
| 2  | EUA         | 10,6                         |
| 3  | Índia       | 9,1                          |
| 4  | Japão       | 7                            |
| 5  | Turquia     | 2,6                          |
| 6  | Alemanha    | 1,8                          |
| 7  | Austrália   | 1,25                         |
| 8  | Coréia      | 1,2                          |
| 9  | Reino Unido | 0,9                          |
| 10 | Brasil      | 0,9                          |

Para que estes países alcançassem tais valores expressivos, foram tomadas algumas providências em cada um deles. Na China, por exemplo, vem sendo crescente os incentivos em energias renováveis desde 2005, com o intuito de mudar sua matriz energética que ainda é fortemente dependente de combustíveis fósseis, onde as principais razões para que esses investimentos tenham sido tão significativos são a necessidade do país em manter uma energia duradoura, que não se limite com o passar do tempo, também aos acordos internacionais para a redução de gases de efeito estufa, já que o país é um dos grandes emissores de poluentes atmosféricos devido à queima de carvão, melhorando assim sua qualidade interna do ar e de outros parâmetros ambientais, e também ao interesse de manter a competitividade da crescente economia chinesa, a qual aposta nas fontes renováveis de energia como uma oportunidade de avanço e crescimento econômico devido ao seu grande potencial de evolução devido a progressiva preocupação com o aquecimento global e limitações das reservas de fontes de energia não renováveis (LO, 2014).

Devido à todas estas preocupações, houve um investimento de mais de 80 bilhões de dólares em energia solar na China apenas no ano de 2017, o que justifica o forte crescimento de sua capacidade instalada (PAIXÃO, 2018).

Na Alemanha, destaca-se um incentivo criado na década de 90, quando instalações de painéis fotovoltaicos conectados à rede em telhados residenciais foram promovidas pelo governo, cuja meta passou de 1.000 instalações para 100.000, além da criação de um programa de empréstimos para novas instalações devido ao sucesso do programa. Em 2000 foi criado o código de fontes renováveis de energia (EEG) e este é atualizado anualmente de acordo com as novas tendências e exigências do mercado, garantindo segurança no investimento de pequeno e médio porte e reduzindo tarifas para novos investidores (IEA-PVPS, 2018).

Segundo Nascimento (2015), os principais programas nacionais de incentivo às energias alternativas são os programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os financiamentos feitos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa), entretanto, este último não contempla a energia fotovoltaica em seus projetos e ações, focando apenas nas pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e empreendimentos termelétricos movidos a biomassa.

As resoluções normativas da ANEEL nº 482 de 2012, e a nº 687 de 2015 que atualiza e altera algumas de suas definições, também delibera novas formas de participação da energia fotovoltaica para os consumidores brasileiros, na forma de geração compartilhada, que é definida pela norma como a “reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão (...) por meio de consórcio ou cooperativa, que possua unidade consumidora com geração de energia em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada”, sendo que o titular da unidade consumidora onde se encontra instalada a microgeração ou minigeração distribuída deve definir o percentual da energia excedente que será destinado a cada unidade consumidora participante do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2015).

Em 1994, foi instituído o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), um programa do governo federal criado para suprir através de energias renováveis localidades isoladas do país que não são abastecidas por energia elétrica da rede convencional, um grande estímulo à energia fotovoltaica, pois gerou a instalação de aproximadamente nove mil sistemas fotovoltaicos. Os sistemas foram instalados de junho de 1996 a dezembro de 2001 e implantados em todos os 26 estados brasileiros, especialmente nas regiões Nordeste (semiárido) e Norte (Amazônia), o que poderia ser um grande marco para as

indústrias nacionais avançarem na produção de painéis fotovoltaicos, entretanto nesta época a escolha dos responsáveis foi de importar praticamente todos os equipamentos utilizados, o que não gerou estímulo suficiente para as indústrias brasileiras tornarem-se independentes neste mercado (VARELLA, 2011).

O atual modelo de distribuição de energia instituído pela Constituição de 1988 e regulado em 2004 fazendo com que os leilões de energia, que possuem o objetivo de contratar energia pelo menor preço possível (modicidade tarifária), sejam a única forma de aquisição de energia das grandes companhias de distribuição de energia através de cinco tipos:

- Leilões de Energias Novas: são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas;
- Leilões de Energia Existente: na qual contrata-se energia de usinas já construídas;
- Leilões de Energia de Reserva: na qual busca-se dar segurança ao fornecimento de eletricidade ao Sistema Interligado Nacional (SIN);
- Leilões de Fontes Alternativas: visa a inclusão e expansão de energias renováveis no cenário nacional;
- Leilões estruturantes: são comercializados projetos de geração de energia de acordo com interesses públicos ou manobras estratégicas previstas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

Observa-se pelo modelo regulatório e pelos registros que a participação da energia solar há um tempo esteve limitada, e sua inclusão somente foi possível em 2013, devido à inscrição de 109 projetos fotovoltaicos, entretanto, nenhum deles obteve sucesso no leilão, pois estes projetos não foram economicamente competitivos com as outras fontes. Apenas em 2014, num Leilão de Energia de Reserva exclusivo para energias alternativas, contratou-se um projeto de geração de energia solar resultando em 1.048 MWp de capacidade instalada, ou seja, é gerado 1.048 MW de potência em condições ótimas de irradiação (1000 W/m<sup>2</sup> de luz solar à temperatura de 25 °C) (MIAN, 2015).

Porém em 2015, também foi contratada praticamente a mesma quantidade de energia da contratação anterior, que apesar de não ter tido crescimento significativo (apenas 2,9%), o preço da energia no leilão foi uma das cotações mais baixas já realizadas, de 78 US\$/MWh, conforme mostra o gráfico da Figura 4 (ABSOLAR, 2017).

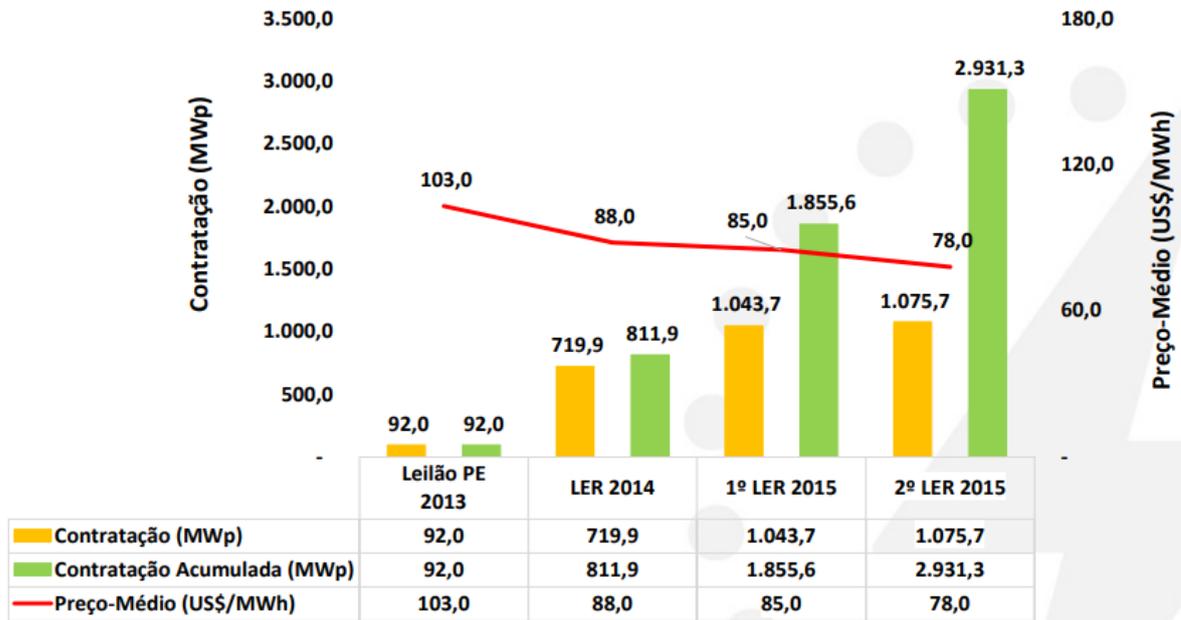


Figura 4 – Evolução da fonte Solar Fotovoltaica em Leilões (ABSOLAR, 2017).

O último relatório publicado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), mostra que o valor atual da oferta interna de energia oriunda de energia solar não alcança patamares satisfatórios (0,01%) e ainda depende de evolução e investimento para que esta fonte de energia faça parte significativamente da matriz energética nacional (Figura 5).

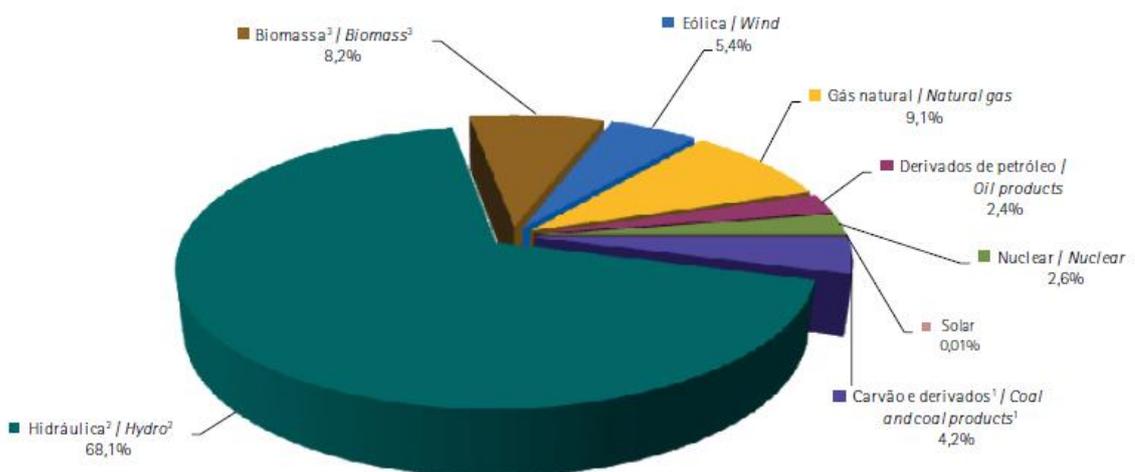


Figura 5 – Oferta Interna de Energia Elétrica (EPE, 2017).

## **2.3. COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Uma única célula solar não é capaz de converter energia suficiente para as aplicações reais, por isso é necessário que haja um arranjo entre várias células (em série, paralelo ou misto), formando os módulos solares. Estes módulos possuem um encapsulamento que lhes confere propriedades necessárias para suportar o ambiente externo e eventuais esforços nos quais ele pode ser submetido. Por sua vez, os módulos podem ser agrupados em determinados arranjos, o que irá resultar no painel fotovoltaico. Este último, em união a outros componentes (baterias elétricas, inversores de corrente, cabeamento elétrico, controladores de carga, etc.) são instalados no local desejado para a geração de energia elétrica, sendo que a necessidade ou não destes itens irá variar de acordo com alguns fatores, como: o tipo de sistema de geração, localidade de consumo da energia, dentre outros.

### **2.3.1. CÉLULA SOLAR**

Os painéis fotovoltaicos comercializados atualmente podem ser compostos por diferentes tipos de células solares, entretanto, há dois tipos principais que compõem grande percentual do mercado: as células de silício monocristalino e policristalino.

As células feitas a partir de silício monocristalino foram desenvolvidas primeiro, sendo um processo um pouco mais lento se comparado à produção das policristalinas. Neste processo, que ocorre normalmente pelo método Czochralski, são formados lingotes cilíndricos de silício a partir da fusão de cristais altamente puros a mais de 2000 °C, onde uma haste é rotacionada lentamente em um tanque com este material liquefeito, levando cerca de 48 horas para a produção de cada lingote, que tem suas bordas chanfradas (Figura 6.a). Após a produção dos lingotes, os mesmos são fatiados em finas camadas de lâminas formando as células. Devido ao formato chanfrado, há um maior desperdício de material, além desta produção ser mais cara devido à necessidade de ultra purificação do cristal de silício, entretanto, resulta em uma eficiência por volta de 2% mais alta de conversão da luz solar (ROCHA, 2017).

Já na produção das células de silício policristalino, as rochas de silício são aquecidas em formas por cerca de 20 horas a 2000°C, e posteriormente resfriadas lentamente durante cerca

de três dias. Apesar desta longa duração, é possível formar uma quantidade muito maior destes blocos (que serão os lingotes após o resfriamento) porque esse processo gasta menos energia. Em seguida, o lingote de seção quadrada é cortado em lâminas finas, gerando as células (Figura 6.b). Apesar da sua eficiência de conversão energética ser ligeiramente inferior às células de silício monocristalino, pesquisas recentes mostram que a relação entre o custo de produção e a eficiência das duas células pode equiparar-se, devido ao desenvolvimento e aprimoramento das tecnologias de produção destas células, que diferem entre si basicamente no processo de purificação do silício e na fundição do mesmo (ROCHA, 2015).

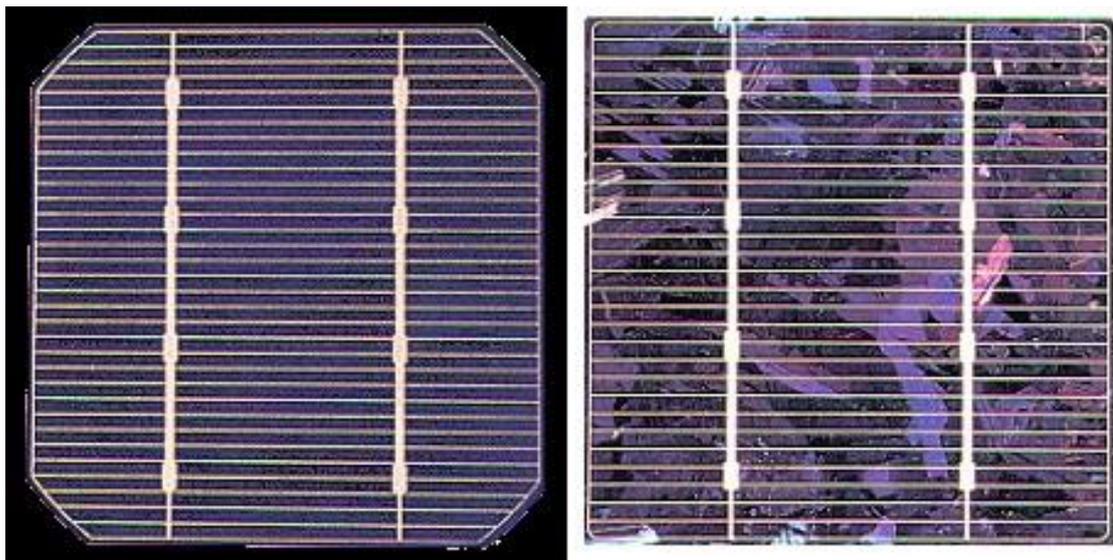


Figura 6 – a) Célula de Silício Monocristalino; b) Célula de Silício Policristalino (CRESESB, 2008)

A fim de ilustrar as principais diferenças entre os dois tipos de painéis fotovoltaicos cristalinos, que são o tipo de tecnologia mais vendida do mercado atualmente, a Tabela 3 está demonstrando algumas das principais características de cada um.

Tabela 3: Características dos painéis fotovoltaicos de silício cristalino.

|                           | SILÍCIO<br>MONOCRISTALINO  | SILÍCIO<br>POLICRISTALINO  | REFERÊNCIAS          |
|---------------------------|--|--|----------------------|
| Custo (R\$/W)             | 1,010 a 1,734  | 0,831 a 1,105  | (ENKHARDT, 2018)     |
| Eficiência (%)            | 14 a 21  | 13 a 17,5  | (MAIA, 2016)         |
| Técnica de purificação    | Czochralski  | Siemens  | (ROCHA, 2017)        |
| Formato da seção          | Circular   | Quadrado   | (PORTAL SOLAR, 2018) |
| Tempo de vida útil (anos) | 20 a 30  | 20 a 30  | (GARCIA, 2014)       |
| Outras vantagens          | Necessita menor área para produzir mesma energia, em relação ao policristalino. Seu desgaste é mais lento em altas temperaturas. | Processo mais simples de produção. Menor perda de material no processo industrial. | (SENDY, 2017)        |

Após o desenvolvimento das células de silício monocristalino e policristalino citadas anteriormente, conhecidas também como células de primeira geração, surgiram as chamadas células de segunda geração, as quais foram desenvolvidas na intenção de reduzir o consumo de silício por produção, devido à sua necessidade de alta purificação envolvendo altos gastos de energia, insumos e tempo. Estas células são denominadas “filme fino”. Dentre as tecnologias criadas para a produção destes filmes, destacam-se a de Silício Amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre e Índio (CIS), Telurieto de Cádmiio (CdTe) e Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS). O primeiro e mais comum desta geração, a-Si, é capaz de absorver e converter iluminação difusa, sendo muito utilizado na eletrônica profissional, aplicado em produtos como calculadoras, relógios, dentre outros, os quais podem funcionar em interiores, sem a necessidade de exposição direta à luz solar. O silício amorfo possui uma eficiência de conversão por volta de 5% a menos que as faixas de eficiência alcançadas pelas células de primeira geração, entretanto seu custo de produção é muito mais baixo. Existem registros de que em

menos de uma década a partir do surgimento destas células houve uma queda de 80 \$/Wp (dólares por Watt pico) para cerca de 12 \$/Wp. Esta classe de filmes finos possuem a vantagem de ser maleáveis e leves (Figura 7), podendo ser construídas com uma gama variável de formas e áreas. As outras formas de filme fino citadas podem apresentar eficiências melhores para o mesmo custo de produção, entretanto estas contam com a desvantagem de utilizarem metais pesados em sua composição (como o Cádmio), e por isso possuem produção limitada (PROENÇA, 2007).

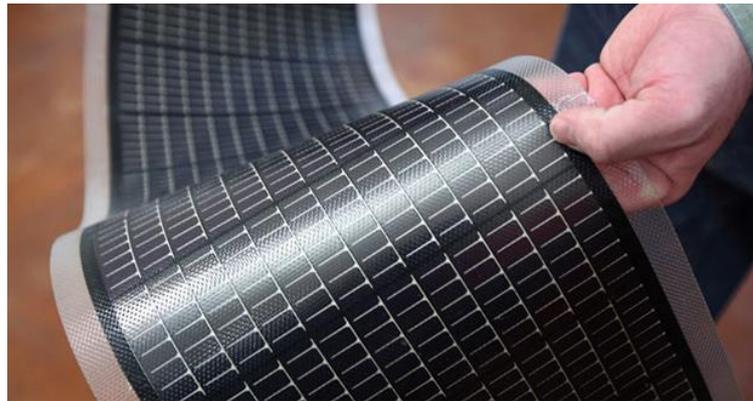


Figura 7 – Filme fino (Solar Tribune, 2015).

Existe ainda a terceira geração de células solares. Estas podem ser conceituadas como as novas tecnologias desenvolvidas buscando eficiências similares às de primeira geração, com um custo tecnológico de produção equivalente ou inferior quando relacionadas à capacidade de conversão de energia, e que ainda busque a utilização de matérias-primas abundantes no planeta e de baixa toxicidade. Ainda há muito que se descobrir e aprimorar nesta área, e grandes eficiências são esperadas para estas novas células, entretanto sua produção ainda é considerada inviável para a atual condição de comercialização das células, sendo suas aplicações possíveis apenas em satélites ou com o uso de concentradores (PROENÇA, 2007).

Uma tecnologia interessante desta geração são as Organic Photovoltaics (OPVs), que são feitas utilizando um processo industrial (roll to roll) de impressão de células fotovoltaicas orgânicas em substrato leve, flexível e transparente através de máquinas simples e materiais abundantes. Hoje são poucas as empresas que conseguiram levar a produção de células fotovoltaicas (OPV) para uma escala industrial no Brasil, e a disponibilidade de informações ainda é muito limitada. Sabe-se que esta é uma tecnologia que usa a eletrônica orgânica, um ramo da eletrônica que lida com polímeros orgânicos condutores ou pequenas moléculas

orgânicas, para absorção de luz e transporte de carga para a produção de eletricidade a partir da luz solar (MATSUMOTO, 2013)

As principais placas solares, divididas de acordo com seu material de composição, estão descritos na Figura 8, o qual foi feito um diagrama mostrando também qual o nível de escala de sua respectiva produção, mostrando que as placas mencionadas de silício cristalino (tanto de um único cristal quanto de vários) são os únicos produtos comercializados em larga escala (RTS, 2006).

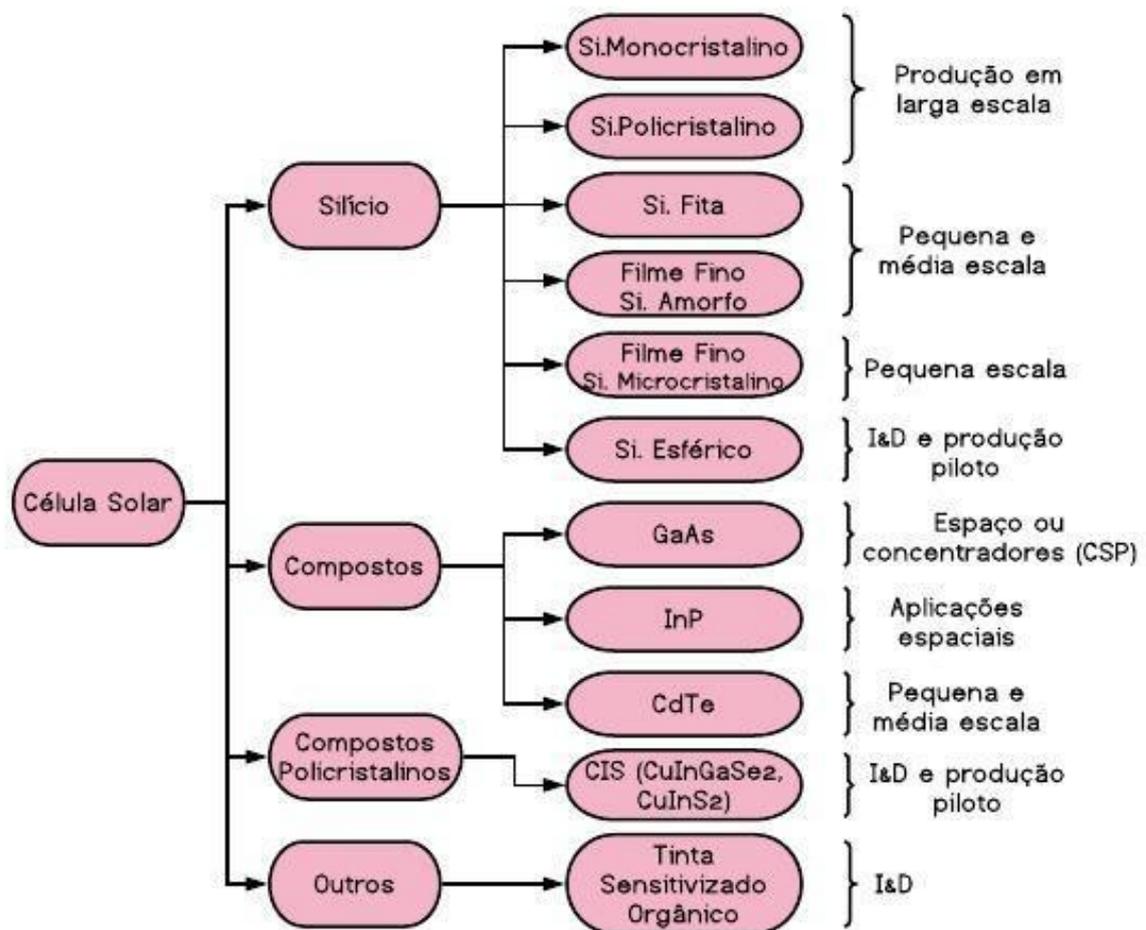


Figura 8 – Tecnologias de Células Fotovoltaicas existentes (RTS, 2006).

### 2.3.2. COMPONENTES DO PAINEL

Devido à exposição ambiental do painel solar, o módulo solar está sujeito a diversos desgastes e deteriorações que reduziriam seu tempo de vida ou torná-lo-iam danificado, não operando nas condições desejadas. Para isto, os módulos são encapsulados em uma estrutura

mecânica, que pode ser basicamente demonstrado pela Figura 9. As células solares estão protegidas com uma camada anterior e posterior de Acetato Vinil Etileno (EVA), um polímero responsável pelo isolamento das células, o qual não deve refletir a energia solar e possui boa tolerância a temperaturas extremas, umidade e choques mecânicos, protegendo as conexões das células em caso de vibrações ou impactos. Sobre este conjunto, encontra-se uma camada de vidro temperado. Este deve ser resistente à choques mecânicos (como por exemplo impactos de granizo e outros detritos) para maior durabilidade do painel, além de possuir propriedades antirreflexo para que toda luz solar incidente alcance as células. Na parte inferior está o chamado *Backsheet*, este é um isolante elétrico que protege a parte posterior do módulo e protege-o contra umidade e entrada de gases. Este material pode ser constituído por vários polímeros ou plásticos. Ao redor de toda essa estrutura, demonstrado pelo primeiro item da figura, está o quadro ou armação do módulo, uma estrutura de alumínio que protege e confere rigidez mecânica ao produto final. Por fim, está a caixa de junção, componente responsável por conectar todas as células e liga-las às células do próximo módulo, por isso esta deve ser protegida e resistente às intempéries (CARNEIRO, 2010).

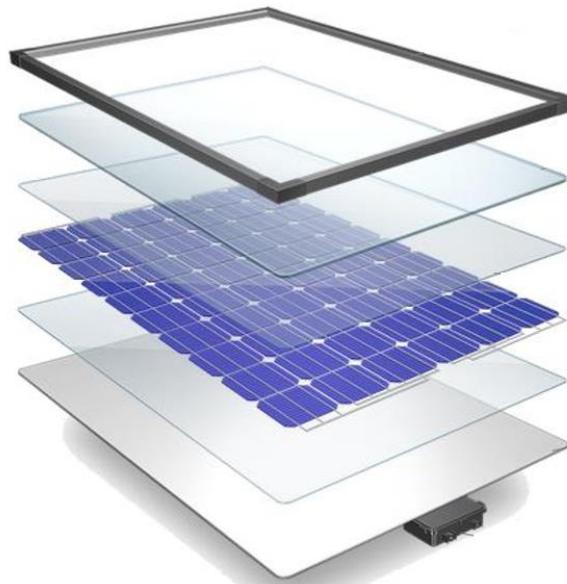


Figura 9 – Encapsulamento do módulo fotovoltaico (Clean Energy Reviews, 2018).

### 2.3.3. SISTEMAS FOTOVOLTAICO

O sistema de geração de energia fotovoltaica pode ser dividido em três tipos:

- Sistemas isolados.
- Sistemas híbridos.
- Sistemas conectados à rede.

O primeiro tipo, conhecido também como sistema autônomo de geração de energia fotovoltaica, ou então “*Off-grid*”, é um sistema recomendado para áreas remotas onde haja dificuldade de acesso da energia fornecida pela rede elétrica. Como este sistema não está conectado à rede elétrica, é necessário que seja instalado componentes para armazenamento de energia onde esta será utilizada em momentos onde não há produção da energia solar, como à noite ou em dias nublados e com pouca incidência da luz solar.

Como forma de armazenamento de energia, é recomendado o uso de baterias, e os demais componentes que irão compor este sistema podem variar de acordo com as necessidades exigidas. Um controlador de carga é recomendado para evitar descargas e sobrecargas intensas na bateria, para não comprometer o tempo de vida útil da bateria. Por fim, também podem ser utilizados inversores de frequência, para que seu uso possa ser destinado à produtos que utilizem Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA), conforme a Figura 10 (CASTRO, 2002).

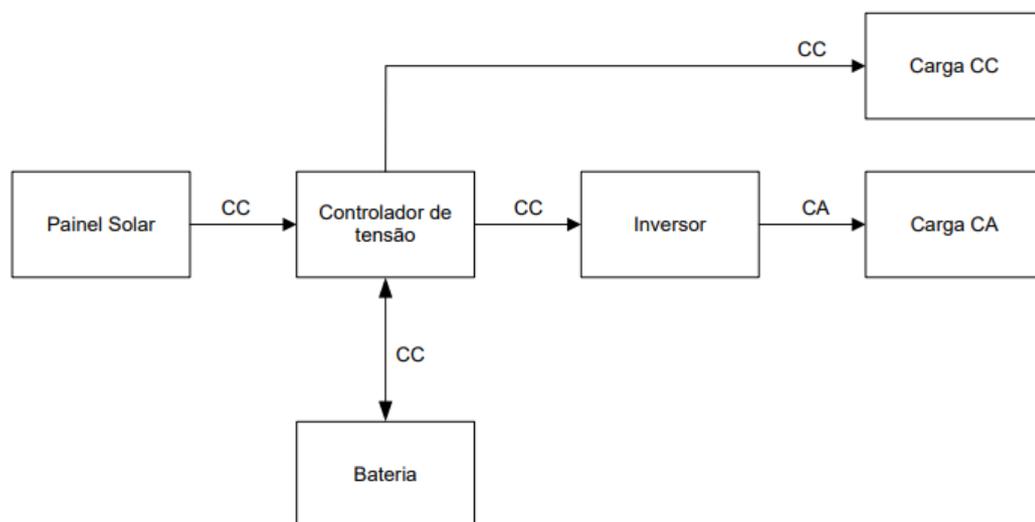


Figura 10 – Diagrama de um sistema fotovoltaico isolado (ARAMIZU, 2010.)

Os sistemas híbridos são caracterizados pela operação em conjunto da geração solar com outros tipos de geradores, como por exemplo eólicos, térmicos, hídricos, etc. como mostra a Figura 11. Os sistemas híbridos são utilizados em situações em que se tornam mais vantajosos

financeiramente se comparados aos sistemas isolados apenas com painéis solares, pois diminuem a necessidade de potência instalada, podendo também ser melhores para adequar o sistema como um todo em todas as épocas do ano (SILVA, 2011).

No Brasil existe uma arrecadação feita pelos consumidores de energia elétrica através das distribuidoras denominada Conta do Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC), cuja finalidade é cobrir os custos do uso de combustíveis fósseis, em grande parte o diesel, para o fornecimento de energia em sistemas isolados do país, que apesar de atenderem uma pequena parcela da população (por volta de 3%), este representa quase metade do território nacional. Nestes casos, seria interessante a implantação de um sistema híbrido instalando painéis fotovoltaicos, pois baratearia para as distribuidoras e seus consumidores, além de reduzir o consumo de fontes não renováveis (ANEEL, 2014).

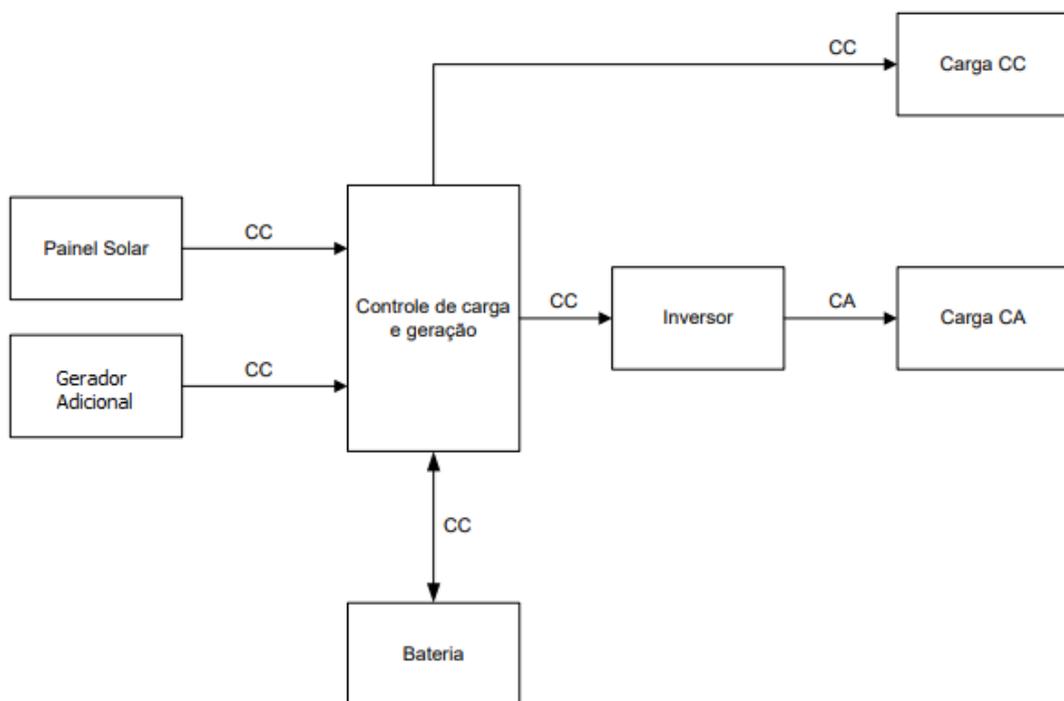


Figura 11 – Diagrama de um sistema híbrido. Fonte: Adaptado de Aramizu, 2010.

Outro modelo de sistema fotovoltaico é o conectado à rede elétrica, ou, “*On-grid*”, representado pela Figura 12. Neste caso, toda energia gerada é aproveitada, pois a rede opera como um armazenador infinito de energia, sendo que a energia que não é utilizada no seu momento de geração passa para o sistema interligado, e os momentos que o painel não produz energia, a rede de distribuição fornece energia complementando a necessidade de acordo com

cada aplicação. Sendo assim, os sistemas conectados à rede não exigem um componente para armazenar energia, como as baterias, reduzindo notavelmente seu custo (CASTRO, 2002).

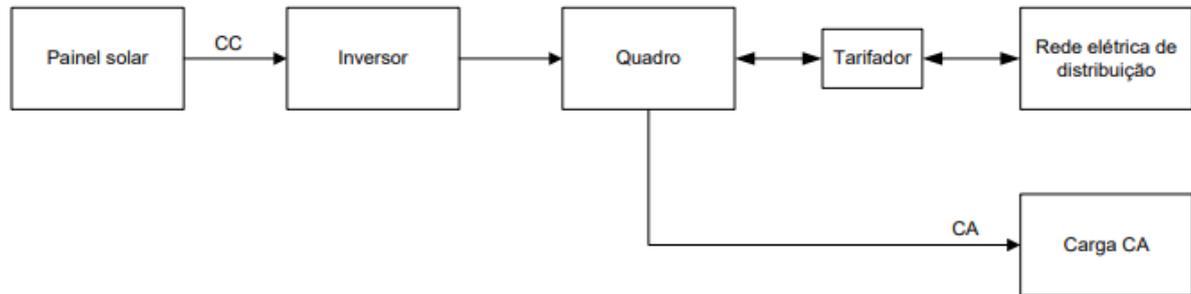


Figura 12 – Diagrama de um sistema fotovoltaico ligado à rede de distribuição (ARAMIZU, 2010).

### 2.3.4. MATÉRIAS PRIMAS E ORIGENS

Através de uma revisão de literatura acerca dos produtos fotovoltaicos desenvolvidos atualmente, constatou-se que há uma vasta gama de opções que podem ser utilizadas para a construção e produção de painéis fotovoltaicos, de acordo com diversos fatores como país de produção, visão da empresa e seu processo produtivo, disposição de recursos financeiros, incentivos, entre outros. Sendo assim, serão tratados aqui somente as principais matérias-primas citadas em outros trabalhos e fontes consultadas para os painéis fotovoltaicos exclusivamente de silício monocristalino e policristalino, por que possuem o maior percentual de representatividade do mercado, e de seus complementos para o funcionamento ligado à rede pública de energia, neste caso, um inversor de frequência.

O componente mais utilizado na produção da célula solar é o Silício, um elemento químico de símbolo “Si”. A temperatura ambiente o silício apresenta-se no estado sólido, sendo o segundo elemento mais abundante da face da terra (estima-se que represente quase 30% de seu peso). Este elemento é encontrado na argila, feldspato, granito, quartzo e areia, normalmente na forma de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), o qual é conhecido como sílica, e na forma de silicatos (silício, oxigênio e metais). Sua importância comercial é de grande valor, pois ele está presente como principal constituinte de diversos produtos, como vidro, cimento, cerâmica, e alguns semicondutores e silicones (RSC, 2014).

Para a produção de 1 m<sup>2</sup> de painel fotovoltaico, é necessário 3,886 kg de sílica. Devido à sua abrangência, o silício mostra-se uma matéria-prima atraente para a construção de painéis solares do ponto de vista ambiental, por não comprometer as reservas naturais deste elemento com sua exploração, entretanto, desde a forma que este se apresenta em sua extração, até a composição química final de sua utilização nas células solares, há um grande e custoso beneficiamento que necessita ser realizado. O Brasil conta com a maior parte das reservas de quartzo e de areia do planeta, e por isso destaca-se como um grande explorador, entretanto, não há um grande desenvolvimento no ramo tecnológico de produção e purificação do silício para fins comerciais, portanto grande parte do garimpo é inclusive influenciada ou gerada por empresas estrangeiras, que exportam a matéria prima obtida aqui e depois vendem com alto valor os produtos modificados (MME, 2009).

Para o módulo fotovoltaico, há uma estrutura de encapsulamento que é feita ao redor das células arranjadas. Esta estrutura conta com materiais de alumínio, cobre, vidro, papelão, plástico e silicone.

O alumínio é o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre e o elemento metálico de maior abundância. Possui propriedades que permitem que ele seja utilizado extensivamente para ligas metálicas, laminados e extrudados, como leveza, alta condutividade, resistência a corrosão e baixo ponto de fusão. Também é utilizado em larga escala no tratamento de água e no mercado aeronáutico, alimentar, farmacêutico e metalúrgico. Sua exploração se dá basicamente pela mineração de bauxita, um mineral com grandes reservas no planeta, onde cerca de 7% encontra-se no Brasil, e apesar deste ser um grande produtor e também beneficiador da bauxita, o principal produtor mundial do alumínio primário (um produto obtido do beneficiamento da bauxita) é a China (BNDES, 2010). Também está presente em grande proporção no painel fotovoltaico, sendo que para 1m<sup>2</sup> de painel, utiliza-se 2,63 kg de alumínio.

Após o alumínio, o metal não-ferroso mais utilizado é o cobre (Cu), que possui propriedades similares e tem seu uso principalmente na indústria de cabos e fios elétricos. Para o mesmo painel fotovoltaico, é utilizado diretamente 0,12 kg de cobre diretamente, sem considerar as fiações para a instalação do sistema. As reservas mundiais de cobre são estimadas em 607 milhões de toneladas, sendo que o Chile representa o país com a maior reserva, cerca

de 27% do total mundial. As reservas brasileiras representam 1,9% deste total, estando entre os dez principais países exploradores (BNDES, 1997).

O material que fica diretamente exposto ao ambiente do painel fotovoltaico é o vidro, que pode ser definido como um produto amorfo da fusão e solidificação de alguns componentes inorgânicos, podendo citar como mais comum a sílica, barrilha, calcário e alumina. O vidro, ao contrário dos sólidos, não possui uma estrutura cristalina, por isso, pode ser considerado mais semelhante aos líquidos. A indústria brasileira de vidro é a mais representativa da América Latina, além de aparecer entre os principais produtores do mundo, uma interessante referência para a produção de painel, a qual gasta 10,08 kg de vidro solar somente na última etapa de produção, para aproximadamente 1 m<sup>2</sup> de painel (BNDES, 2007).

Tanto as camadas anterior e posterior às células, quanto o backsheet do painel, são constituídos por polímeros (plásticos, EVA, etc). Este produto, principal resultado do setor petroquímico, tem ampla aplicação em diversos fins, e também é altamente influenciado pelas indústrias de beneficiamento brasileiras por tratar-se de subprodutos e resíduos de diversos ramos do mercado. É necessário que haja certa estratégia tecnológica nesta área por estar fortemente vinculada ao resultado de outros processos industriais, entretanto, no Brasil, a maior parte dos bens produzidos pela indústria de polímeros tem como destino o mercado interno, o que resulta em todo custeio dos gastos além de uma segura margem de lucro (HERNAIS, 2000) Quase 2 kg da massa total de 1 m<sup>2</sup> de painel fotovoltaico são representados pelos polímeros.

Outros materiais utilizados na produção de todos os componentes necessários na indústria de painéis fotovoltaicos são: cal, coque, carvão, grafite, madeira, água, cerâmica, aço, óleo lubrificante, lã de vidro, latão, pasta de metalização e papel, os quais podem ser brevemente encontrados em produção nacional através de uma busca em sítios subsidiados pelo governo como forma de incentivo à produção, e além destes, inúmeros compostos químicos (acetona, acetato de vinilo, acetato de vinil, ácido acético, ácido clorídrico, ácido fosfórico, ácido nítrico, aglutinante acrílico, alquibenzeno sulfonato, amoníaco, argônio, cloreto de cálcio, cloreto de fosforilo, dióxido de titânio, éter monometílico de dipropileno glicol, fluoreto de hidrogênio, hidrogênio, hidróxido de sódio, oxigênio, polietileno, poliestireno, trietileno glicol, isopropanol, nitrogênio, solvente orgânico, silicato de sódio, tetrafluoroetileno, tereftalato de polietileno, metanol, níquel, polivinilfluoreto, e zinco).

Segundo Olson (2013) o peso total de um módulo fotovoltaico pode ser dividido da maneira mostrada no diagrama da Figura 13:

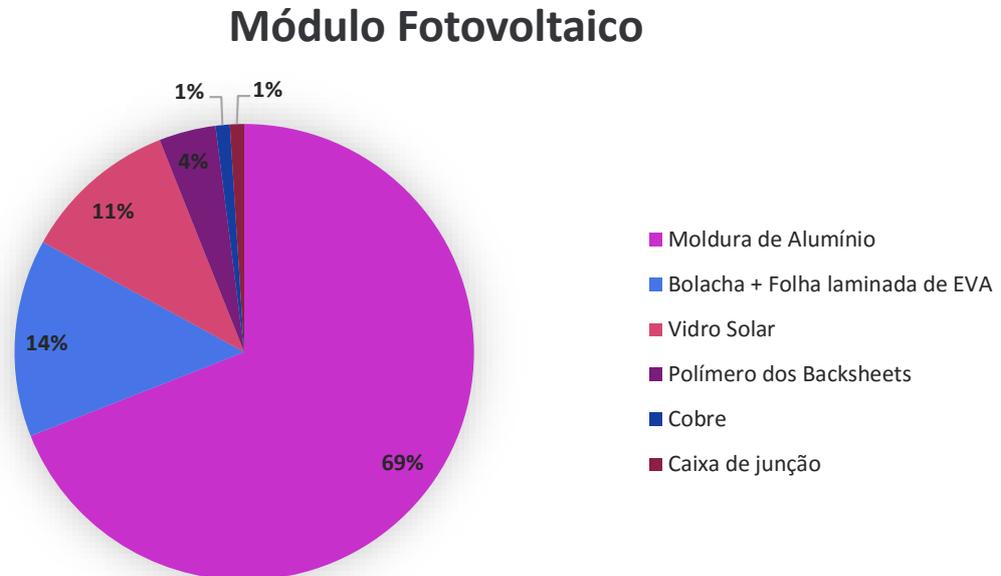


Figura 13 – Distribuição por massa dos constituintes do módulo fotovoltaico (OLSON, 2013).

## 2.4. PROCESSOS DO CICLO DE VIDA DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Para a construção das células solares deste estudo, são utilizados cristais de silício. Estes são obtidos principalmente através de minerais de quartzo, um mineral extremamente abundante na terra, responsável por compor grande parte da crosta terrestre, estando presente nos três tipos de rochas – Sedimentares, ígneas e metamórficas. As maiores reservas mundiais de quartzo estão localizadas no Brasil, entretanto, o mesmo não domina o ciclo tecnológico de beneficiamento deste produto nas qualidades e purezas exigidas por grande parte do mercado, por isso é um dos maiores produtores de silício metalúrgico, porém importa praticamente todo silício de grau eletrônico que consome (MME, 2009).

Segundo Jungbluth (2010), apenas uma pequena parte do mercado de sílica é voltado para a produção fotovoltaica. Esta matéria prima é destinada para outros diversos fins, como a fabricação de aço e de alumínio, principalmente no ramo eletrônico. Para o mercado

fotovoltaico, esta sílica ainda precisa alcançar o grau de Silício Metalúrgico (Mg-Si), o qual corresponde a uma pureza de 99%, para então ser purificado aos níveis exigidos pela indústria solar.

As células fotovoltaicas de silício monocristalino e policristalino são derivadas da purificação do silício metalúrgico, em graus de purificação diferentes, onde o primeiro exige uma pureza maior, resultando numa maior eficiência de conversão energética, já em contrapartida, as células de silício policristalino exigem menos energia para serem produzidas e por isso resultam num processo economicamente mais viável. Os monocristais dependem de uma rota química de purificação, já os multicristais (que produzem as células policristalinas) podem ser obtidas através de rotas metalúrgicas. A Figura 14 esquematiza estas rotas (SAGA, 2010).

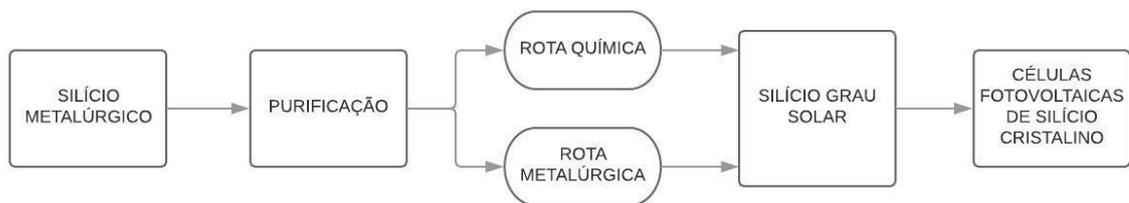


Figura 14 - Diagrama das rotas de purificação do silício para produção de células fotovoltaicas.

A produção do silício a grau solar policristalino, que é utilizado para os painéis de silício policristalino, é comumente feita pelo processo Siemens. Neste é feita a deposição química do triclosilano com hidrogênio em um reator e nele são depositados filamentos de silício aquecidos a 1000 °C por corrente elétrica, obtendo o silício policristalino em finas barras. O reator utilizado neste processo é em formato de U e está esquematizado na Figura 15. O processo Siemens é responsável por produzir 80% de todos os produtos de silício a grau eletrônico comercializados no mundo (MORI, 2007).

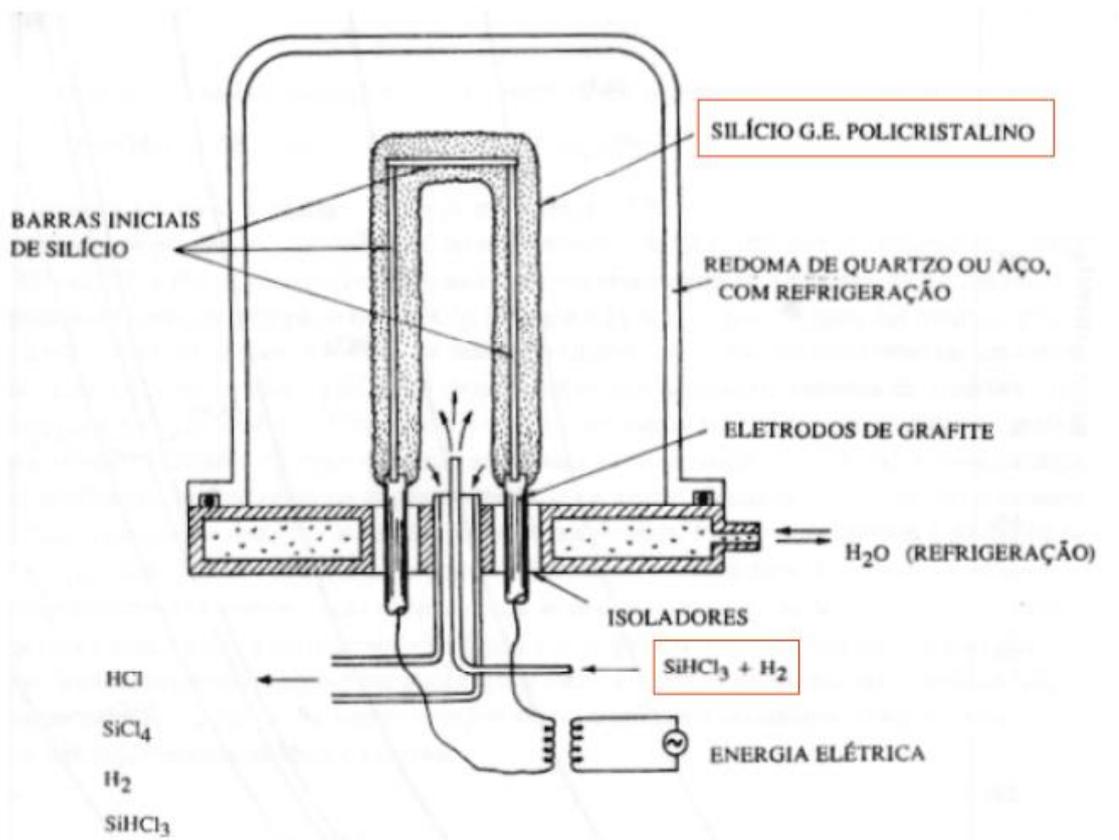


Figura 15 - Reator do tipo U para obtenção do silício policristalino (MORI, 2007).

Para ser denominado de silício policristalino, as suas impurezas devem ser da ordem de 0,001 ppm, já o silício monocristalino deve ter uma pureza ainda maior. Uma vez obtido o cristal ultrapuro, é necessário obter o monocristal, sendo o método Czochralski responsável por 80% dos monocristais de silício obtidos no mundo. Este consiste na introdução de um pedaço de cristal em silício fundido, baixando lentamente a temperatura, e assim forma-se o cristal, num processo mais complexo e mais lento que o anterior (MORI, 2007).

Para a produção das bolachas de silício monocristalino (conhecidas como *wafers*), Jungbluth (2010) cita que o processo de serrar os lingotes é realizado em conjunto para as bolachas de Si-c mono e Si-c poli uma vez que as diferenças no processo de produção são consideradas irrelevantes. A maioria dos produtores usa hoje uma tecnologia de fatiamento multi-fio, fornecendo a vantagem de altos rendimentos de bolachas por dia em comparação com as serras de diâmetros separados para cada tipo de produção.

As etapas da produção destas células que diferenciam entre o Si-c mono e Si-c poli são basicamente as fases de purificação do silício, a partir daí o processo passa a ser equivalente.

Segundo Jungbluth (2010), apenas a texturização destas células é realizada com componentes químicos de diferentes (para a Si-c mono é utilizado um meio alcalino e para a Si-c poli um meio ácido).

A construção do painel solar conta com elementos diversos devido à estrutura de encapsulamento que este é colocado. As atividades incluídas no processo são produção da matriz celular, corte de folhas e lavagem de vidro, produção de laminado, isolamento e produção da moldura de alumínio do painel.

Como o tipo do sistema que será utilizado é *on-grid*, há a necessidade de instalação de um inversor ao sistema. Este consiste em alguns componentes eletrônicos como unidades de controle, uma caixa protetora e conectores. Este inversor também está suscetível a variações de acordo com alguns parâmetros, como por exemplo sua massa que tende a ser menor quanto maior for a potência nominal da corrente alternada. A sua eficiência também dependerá de alguns fatores, como as condições meteorológicas, diferença de tensão, entre outros.

Esta fase pode ser feita em quatro maneiras diferentes de configuração e tipo dos inversores: o inversor *string*, onde cada módulo está conectado ao inversor para melhor aproveitamento e seus momentos de pico e maior confiabilidade no caso de defeito em algum dos outros inversores. O inversor *multi-string* que permite a conexão de vários módulos ou painéis interligados aos inversores, por meio de um inversor de corrente contínua em corrente alternada conectado a rede elétrica a qual funciona com um ótimo rendimento energético. O inversor de módulo integrado, onde cada módulo está conectado ao seu próprio inversor, o que resulta em nenhuma perda devido a adaptação de módulos entre si, entretanto há um maior gasto para suprir todos os cabamentos e inversores necessários. E por fim o modelo que será considerado neste estudo, o inversor central, onde um único inversor é responsável por receber todos os módulos adaptados entre si e inverter a frequência, formando um gerador de alta potência (SMA Technologie, 2005).

Após o tempo de vida útil dos painéis, é necessário realizar o seu devido descarte. Para este, existem algumas opções: descarte como lixo eletrônico, incineração, reuso dos componentes, reciclagem ou destinação em aterro. Cada alternativa é mais adequada de acordo com vários fatores de cada situação, como a distância do local de uso até o local de descarte, a disponibilidade de cada cidade/ país para estas atividades de descarte e reuso, o menor custo e

menor necessidade técnica para a reciclagem de cada componente e a existência de mercados que utilizem os produtos usados (LUNARDI, 2018).

De acordo com um trabalho feito por Dias (2015), a reciclagem no Brasil ainda está em atraso com relação a outros países, e muito lixo é descartado indevidamente, além de que não há aproveitamento técnico nem financeiro destes produtos. Apesar disso, ele mostra que os painéis de silício cristalino podem ser praticamente todo reciclados, ao invés de serem descartados como lixo eletrônico. Como esta é uma tecnologia recente e os painéis tem um tempo de vida útil de aproximadamente 25 anos, a maioria deles ainda está dentro de seu tempo de uso e poucos já devem ter sido descartados no planeta, por isso é tão importante estimular a reciclagem destes produtos. Devido a estes fatores, a destinação final do painel não será abordada para os cálculos da ACV, entretanto no ítem 2.4.1 estão descritos possíveis descartes de acordo com a literatura.

#### **2.4.1. DESCARTE DOS COMPONENTES**

Para o processo de descarte dos componentes, foram avaliadas diversas bibliografias, onde não se constatou registros de métodos de descartes de painéis já realizados. Isso se deve ao fato da energia fotovoltaica através de painéis não ser amplamente utilizada há 25 ou 30 anos atrás, que representa o tempo de sua vida útil, portanto, a quase totalidade dos painéis instalados estão ainda em operação. Entretanto, existem estudos que criam suposições para o descarte destes produtos, cujo os resultados considerados mais relevantes serão demonstrados a seguir. Já os cálculos para este descarte não serão mencionados neste trabalho devido à falta de informações reais devido às razões explicadas.

##### **2.4.1.1. RECICLAGEM TOTAL**

A reciclagem dos módulos fotovoltaicos pode ser realizada por 4 métodos, de acordo com Radziemska (2010): por processo químico, mecânico, térmico ou através de laser. Apesar da grande variedade de opções, um conjunto dos métodos seria o ideal para cada etapa de separação dos materiais, como o processo térmico para separar os componentes dos módulos devido ao seu custo mais viável e por não gerar efluentes que necessitem de tratamento, porém para a etapa de purificação da célula seria adequado o uso de laser ou um tratamento químico a

fim de retirar a camada anti-reflexo e as junções metálicas que são empregadas ao material com a finalidade de transmitir o fluxo de elétrons (corrente elétrica). Essas junções podem ter grande valor econômico, como por exemplo quando são utilizados cobre ou prata.

Dentre os tratamentos químicos para a remoção dos componentes que não fazem parte da célula, existem registros de lixiviação e pirólise. Cada um é recomendado de acordo com as etapas que procedem a recuperação dos materiais, como por exemplo a remoção do vidro através de processos químicos impede o reaproveitamento direto das células por pirólise devido à sua mudança de características químicas para este processo (ZENG, 2004).

Assim que o silício se separa do restante, este pode ser reaproveitado e compor um novo módulo fotovoltaico através dos processos de cristalização por Siemens ou Czochralski de acordo com o painel desejado (BROWER, 2011).

Spinacé (2005) e Cardoso (2010) discorrem sobre a reciclagem de alumínio, polímeros e vidro, e estes, já desenvolvidos no Brasil, mostram-se materiais viáveis financeiramente e tecnicamente de serem reciclados, diferente do restante dos materiais que compõem os módulos. Portanto, após a separação dos materiais, é importante a destinação deles para a reciclagem para que ocorra um aproveitamento de materiais e energias sem a necessidade de extrair recursos primários.

#### **2.4.1.2. DESCARTE COMO LIXO ELETRÔNICO**

O Brasil assume a primeira posição da América Latina em produção de resíduos eletrônicos, ficando em sétimo lugar no ranking mundial. Apesar disto, estudos mostram que não existem hábitos ou legislações que favoreçam o seu devido descarte, podendo causar diversos prejuízos ambientais, infertilizando solos e tornando ambientes aquáticos indevidos para uso humano. Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual incita as empresas do ramo tecnológico a serem responsáveis pelo alto número de resíduos que estas causam, onde várias indústrias já se posicionaram e criaram postos de coleta destes lixos, a chamada logística reversa, entretanto, nem sempre o consumidor se vê responsável por procurar estes postos e o número de descartes indevidos continuam altos (CELINSKI, 2017).

Segundo Calili (2017), na Europa foi instituída uma norma que responsabiliza os fabricantes a pagarem pelas operações de eliminação e a arcarem com toda a gestão destes resíduos, além de informar ao consumidor sobre o seu devido descarte.

Desta maneira, acompanhando as crescentes preocupações no Brasil pelo devido descarte dos painéis fotovoltaicos e analisando o comportamento de países que já estão mais avançados nesta tecnologia, o descarte dos painéis como resíduo eletrônico no país deve ocorrer contando que o usuário se responsabilize por levar seus painéis fora de uso para seu distribuidor ou fabricante, e este então terá maiores capacidades tecnológicas de reciclar ou reutilizar estes componentes. É importante que o usuário não descarte de maneira convencional, pois segundo Widmer (2005), existem mais de mil substâncias diferentes nos resíduos eletrônicos, dentre eles componentes tóxicos como chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, selênio, cromo hexavalente e retardantes de chama.

#### **2.4.1.3. ATERRO SANITÁRIO**

Segundo um estudo de McDonald (2010), que analisou cinco tipos de módulos utilizados quantificando o lucro real e potencial de seus descartes em aterros sanitários comparado a reciclagem dos mesmos, e percebeu que a reciclagem não é vantajosa de um ponto de vista econômico.

Apesar deste estudo, a opção financeira não deveria ser ponto decisivo para optar por um descarte de um resíduo de natureza eletrônica em nenhuma hipótese, quando analisadas suas consequências. Essas substâncias, quando liberadas no meio ambiente, podem contaminar o solo, poluir lençóis freáticos, além de colocar em risco a saúde pública. Dentre muitos efeitos nocivos dos metais pesados descartados de forma incorreta, existem estudos que relacionam a contaminação destes poluentes com tumores, distúrbios renais, infertilidade, entre outros (SOUZA, 2005).

### **2.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**

Tendo em vista a degradação ao meio ambiente que vem sendo percebida e sentida cada vez com mais intensidade, foram criados diversos estudos na tentativa de mensurar os danos

causados por processos e ações em diversos cenários. Sabe-se que quantificar um dado ambiental é de extrema complexidade, pois ainda inexistem dados suficientes e amplamente comprovados que possam dar uma medida exata sobre o quanto determinada atividade afeta direta e indiretamente na saúde e bem-estar das pessoas e animais e aos recursos e ambientes, além da imensa dificuldade de reparar de forma justa o dano causado e de avaliar as questões econômicas envolvidas, uma vez que um prejuízo ambiental pode afetar a sociedade, a cultura, a economia, empresas e não apenas o ambiente natural por si só.

Entretanto, são convencionados alguns métodos para tratar da quantificação de deterioração que o meio ambiente sofre por determinados processos produtivos. Um deles é a Avaliação do Ciclo De Vida (ACV), um método padronizado internacionalmente capaz de identificar todas as emissões e recursos consumidos, além dos impactos no meio ambiente relacionados a quaisquer bens e serviços. A ACV, trata de todos os fluxos de entrada e saída do processo de produção completo, desde a extração dos recursos naturais, fabricação, consumo e destinação final de seus componentes, esta abordagem é conhecida como “do berço ao túmulo” (Manual do Sistema ILCD, 2014).

Além da análise mais completa, citada acima como “do berço ao túmulo”, que é responsável por avaliar todo o processo produtivo, a ACV também fornece outras três possibilidades de análise. Uma delas é “do berço ao portão”, que analisa o início do processo produtivo, como a extração de matéria-prima, até o produto que chega no portão da fábrica a qual produzirá o produto foco de estudo. A outra é conhecida como do “portão ao portão”, utilizada quando a intenção é avaliar as fases de produção que ocorrem dentro do portão da fábrica, analisando processos unitários ou determinadas etapas dentro da fase produtiva. Por último, existe o modelo “do portão ao túmulo”, que é uma análise feita quando pretende-se avaliar os impactos do produto desde que esse sai da sua produção até sua fase final, é também um estudo que determina impactos ambientais acerca da vida útil do produto (CAMPOS, 2012).

Este método tem suma importância para avaliar melhorias ou analisar “rótulos” em produtos sustentáveis, pois muitas vezes percebe-se, como um exemplo prático, que determinado bem passa por uma alteração no seu método de produção utilizando uma nova matéria prima que pode ser considerada “mais sustentável” que a utilizada comumente, mas em contrapartida percebe-se que o gasto gerado para fabricar este bem com esta nova matéria prima demanda uma energia por vezes muito maior que o processo anterior gastava, logo, toda

produção que busque uma maneira ecologicamente compatível de ser realizada, deve passar por uma avaliação completa de toda sua cadeia de geração. Para facilitar a comunicação entre produtor e consumidor, a fim de mostrar que um produto ou serviço respeita determinados processos ou o uso de insumos com menor impacto previamente estipulados, surgiu a rotulagem ambiental, que está regulamentada pela ISO 14020 (KOHLRAUSCH, 2003).

O Manual do Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Processos e Produtos criado pela União Europeia em 2014 cita que os estudos de ACV “ajudam a evitar que a solução de um problema ambiental acabe criando outros problemas: essa “transferência de ônus” indesejada caracteriza-se pela redução de um impacto ambiental em um ponto do ciclo de vida de um produto apenas para aumentar seus efeitos em outro ponto. Portanto, a ACV ajuda a evitar, por exemplo, que melhores tecnologias de produção gerem problemas relacionados a resíduos, que medidas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa aumentem o uso da terra ou provoquem mais chuva ácida e que gases de efeito estufa sejam reduzidos em um país à custa de mais emissões em outro”.

Segundo a Norma ISO 14040, que dispõe sobre os princípios e a estrutura da ACV, não há uma única maneira de conduzir o estudo de ciclo de vida de determinado produto, mas sim o método mais indicado de acordo com a intenção e público que se deseja atender, por isso a ACV é flexível e pode buscar complementação em diversos manuais ou documentos de instrução. Esta avaliação está dividida em quatro etapas, sendo as seguintes:

### **2.5.1. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO**

Nesta etapa, são determinadas as fronteiras temporais e geográficas do estudo, o público alvo para qual se deseja divulgar os resultados, a aplicação pretendida pelo estudo e suas razões, além de expressar bem definidamente as categorias de impacto que devem ser consideradas, assim como seus cortes e critérios de qualidade (ou seja, o nível de precisão e consistência dos dados).

Nesta fase também é importante que se esclareça as dimensões da ACV, como as fases em que este estudo irá iniciar e onde ele deve ser finalizado, também os seus subsistemas que devem ou não ser incluídos nesta fase, como processos paralelos ou que atuam juntamente com

os processos principais do sistema, e também a profundidade deste estudo, ou seja, o nível de dados e detalhes a serem coletados no mesmo (LUZ, 2011).

### **2.5.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO**

Neste momento, são coletados dados quantitativos e qualitativos que representam os fluxos de massa e energia que entram e saem das diversas etapas do ciclo de vida do produto, respeitando as fronteiras já estabelecidas. Esta etapa pode ser modificada de acordo com o desenvolvimento do estudo, pois pode ocorrer a identificação de novos limites ou requisitos para os dados que ocasionarão mudanças nos procedimentos de coletas e cálculos.

Os dados podem ser coletados de diversas maneiras, respeitando as possibilidades de cada estudo e situação. Pode ser feita através de questionários enviados a empresas e indústrias envolvidas, ou através de dados obtidos em estudos confiáveis previamente realizados, ou ainda, pela obtenção de informações através de softwares que disponibilizam quantidades de entradas e saídas de determinados processos, entre outras maneiras. Para o cálculo desses dados, é necessário adequar as informações adequadas ao sistema delimitado para o estudo em questão já definido na etapa anterior da ACV (CHEHEBE, 1997).

### **2.5.3. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS**

Aqui, os resultados da fase do inventário são trabalhados em conjunto para que se obtenha um valor comum em unidade de todo impacto causado pela atividade em questão. A norma aponta o fato de não existir uma metodologia geral para associar vários dados em um mesmo impacto, por isso é necessário a máxima transparência dos dados, evitando suposições particulares que equivoquem o resultado do estudo, porém, ainda assim, este resultado pode ser flexível de acordo com o objetivo e o escopo determinados.

Impacto ambiental é definido como o resultado de qualquer atividade humana que altere as condições naturais da saúde, segurança e bem-estar da população, das atividades sociais e econômicas, da biota, das condições estéticas e sanitárias ambientais e da qualidade dos recursos ambientais, podendo ser positiva ou negativa (CONAMA, 1986).

Os impactos ambientais podem ser classificados em diversas categorias e classificações de acordo com seu uso, intenção e público a que se deseja divulgar informações. Neste trabalho, optou-se por analisar os impactos que são causados devido à uma atividade industrial, que foram padronizadas e categorizadas a fim de obter uma ferramenta útil para comparação entre outros produtos ou ainda análise deste mesmo em relação à alteração sobre quaisquer fatores de sua cadeia produtiva.

Não existe uma regra ou padronização que determine as categorias de impacto que devem ser utilizadas, portanto cada ACV tem suas próprias classes de categorias de acordo com suas particularidades, no qual os valores obtidos na ICV são traduzidos na forma de indicadores, que podem ser de cunho local, regional ou mundial, e por fim estes são escolhidos com base em julgamentos subjetivos (ROCHA, 2009)

As categorias de impactos consideradas no método de avaliação de impacto utilizada neste trabalho juntamente com suas unidades empregadas neste, são os seguintes:

- Acidificação

A acidificação nos ambientes pode ser causada pela emissão de diversos componentes, gerando impactos no solo, nas águas subterrâneas e superficiais, nos organismos, nos ecossistemas e em edifícios (através dos danos em seus materiais). O resultado da acidificação já vem sendo sentida nos oceanos nas últimas décadas, decorrente das atividades industriais, provocando redução na biodiversidade marinha, prejudicando o desenvolvimento de organismos calcificadores, tornando os organismos mais sensíveis e comprometendo suas reações naturais e aumentando a quantidade de espécies invasoras. Nos solos, a acidificação pode tornar o ambiente menos propenso à fertilidade agrícola prejudicando o desenvolvimento e atividades vitais das raízes. Quando elementos acidificantes ficam disponíveis no solo, estes podem ser carregados para as águas subterrâneas prejudicando toda a cadeia que se segue dependente do curso destas águas. A unidade deste indicador é dada em kg SO<sub>2</sub> eq (equivalentes).

- Depleção de recursos abióticos

Este indicador de impacto mostra o consumo de recursos naturais abióticos. Neste caso, ele está relacionado à extração de minerais e combustíveis fósseis que ocorre devido às entradas no sistema. É um impacto que compromete a proteção o ecossistema em todas as suas esferas

indiretamente. Além das consequências à curto prazo, existe o fato de que a diminuição das reservas ao longo do tempo pela atividade humana, reduzem a oportunidade de acesso a este pelas futuras gerações. Existe o indicador de depleção de recursos abióticos que corresponde ao consumo de minerais, dado em kg Sb eq, e uma outra categoria que corresponde apenas aos combustíveis fósseis, este último é dado em unidades de MJ (SILVA, 2010).

- Depleção do ozônio estratosférico

Este indicador mostra a redução da camada de ozônio reduzindo os níveis de proteção terrestre contra os raios solares, fazendo com que os níveis de radiações UV-B atinjam a superfície terrestre, comprometendo a saúde de diversos organismos, inclusive das atividades humanas. Além disso, os efeitos nocivos também atingem os ecossistemas terrestres e aquáticos, os ciclos bioquímicos e os materiais. Este indicador de impacto é expresso na unidade kg CFC-11 eq, e é considerado um impacto de escala a nível global (BAIRD, 2002).

- Ecotoxicidade aquática (doce e marinha)

A exposição de ambientes aquáticos a contaminantes pode causar a absorção por organismos causando efeitos nocivos de acordo com os níveis de retenção, devido à bioacumulação, bioconcentração e biomagnificação, que geram uma cascata de prejuízos. Este tipo de contaminação pode alcançar tanto as águas doces quanto águas marinhas, mas não necessariamente os contaminantes precisam ser lançados nos corpos d'água. Esse impacto pode ocorrer também por emissões atmosféricas ou do solo, e é expresso em kg 1,4-DB eq.

- Ecotoxicidade terrestre

Este impacto analisa a capacidade de prejudicar os organismos terrestres e que dependem das atividades que ocorrem nos solos, sendo que alguns desses prejuízos podem ser o acúmulo de substâncias nocivas no tecido de organismos vivos causando disfunções metabólicas e até mesmo má formações, desregulações endócrinas com consequências no crescimento, no desenvolvimento e na reprodução, além de substâncias carcinogênicas. Assim como a ecotoxicidade aquática, esta é definida em unidades de kg 1,4-DB eq (MARIANI, 2006).

- Eutrofização

Este indicador inclui todos os impactos devido a níveis excessivos de macronutrientes no ambiente causados pelas emissões de nutrientes para o ar, a água e o solo. A eutrofização é resultado principalmente do aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo, onde pode haver rápido desenvolvimento de algas e crescimento excessivo de plantas aquáticas, alterando o ecossistema aquático. Os nutrientes, ao serem lançados na água, contribuem para aumento da produção orgânica do sistema, com elevação da biomassa fitoplanctônica e consequente diminuição na penetração de luz, comprometendo a qualidade e o desenvolvimento dos organismos que sobrevivem sob esta camada (ESTEVEES, 1998). A eutrofização é medida em kg PO<sub>4</sub>- eq.

- Formação de compostos foto-oxidantes

Este impacto pode ser caracterizado como a geração de elementos reativos prejudiciais aos ecossistemas e à saúde humana. O principal causador deste problema é o ozônio, o qual é uma substância natural e necessária quando formado na camada da troposfera, entretanto o ozônio formado a baixa altitude pode afetar os seres humanos, penetrando profundamente nas vias respiratórias, afetando os brônquios e os alvéolos pulmonares, reduzindo a capacidade pulmonar e agravando algumas doenças respiratórias. O reino vegetal também é afetado, sendo que o ozônio e os produtos secundários resultantes da sua oxidação são capazes de se infiltrarem nos estômatos das plantas provocando inúmeras consequências, inclusive a morte de diversas culturas agrícolas. Este indicador utiliza a unidade kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq.(US EPA, 1997).

- Mudança climática

Esta categoria de impacto pode ser considerada a mais utilizada em todo o mundo. Neste caso, será quantificado a capacidade de alterações nas condições do clima a nível global provocada pela emissão de gases de efeito estufa. Estas mudanças no clima estão relacionadas a problemas causados pelo aumento destes gases, como sua influência nas alterações de níveis de precipitação pluviométrica e quanto às modificações na frequência de extremos climáticos como secas, inundações, geadas, tempestades severas, vendavais e granizo, além de aumentar a probabilidade de desmatamento por incêndios e secas, atingindo direta e indiretamente toda a biota. Sua unidade de medida é kg CO<sub>2</sub> eq. (NOBRE, 2001).

- Toxicidade humana

Este indicador ocorre quando substâncias de propriedades tóxicas, não biodegradáveis e acumulativas em organismos vivos, são expostas aos seres humanos devido a atividades

antrópicas. Estas atividades podem emitir substâncias químicas tóxicas as quais atingem os seres humanos através da respiração ou por alimentos ingeridos. Como consequência, esta toxicidade pode gerar desde leves sintomas até problemas fatais para a saúde da população, de acordo com sua concentração e tempo de exposição. Este impacto afeta os seres humanos em todas as escalas: local, regional e global (WENZEL, 1997). Este é demonstrado em kg 1,4-DB eq.

#### **2.5.4. INTERPRETAÇÃO**

A última etapa da ACV consiste em uma análise crítica sobre os resultados obtidos no inventário e na avaliação de impactos de acordo com as questões significativas definidas no objetivo e escopo do estudo, observando a integridade e sensibilidade dos resultados, fornecendo aos leitores aos quais são destinados o estudo, recomendações e conclusões para orientá-los em tomadas de decisão. Esta etapa compreende três passos: a identificação das questões ambientais que foram mais significativas neste estudo baseado nos resultados encontrados; a análise da confiabilidade e sensibilidade das informações; e o fechamento referente aos impactos mais significativos (CHEHEBE, 1997).

A ACV mostra-se um método de análise de desempenho ambiental extremamente abrangente e válido para muitas situações desejadas, entretanto é necessário que haja um direcionamento mais refinado a fim de melhorar as condições dos procedimentos para a obtenção de dados e conclusões confiáveis. Para isto, foi utilizado em conjunto o manual fornecido pela PRE-sustainability (2018) que oferece orientações técnicas para o desenvolvimento de estudos detalhados de ACV e uma base técnica específica de critérios, guias e ferramentas simplificadas para o propósito desejado.

#### **2.6. BANCO DE DADOS PARA O INVENTÁRIO**

Para realizar o inventário da ACV é necessário coletar diversas informações sobre todos os processos que envolvem o ciclo de vida de determinado produto ou serviço. Para auxiliar nesta coleta, existem bancos de dados que já estão cadastrados em diversas bibliotecas virtuais com valores locais, regionais e globais de entradas e saídas de produtos, energia, recursos, entre outros.

Cada banco de dados está inserido em um ou mais softwares de ACV (estes são explicados no tópico 2.7), e devem possuir a capacidade de serem editados e também de facilitarem a análise de impactos causados por cada um dos dados inseridos em seus processos (FRISCHKNECHT, 2005).

Existem inúmeros bancos de dados disponíveis para acesso, dentre eles é possível citar: Australian LCI Data Project, BUWAL 250, Canadian Raw Materials Database, Dutch Input Output, Ecoinvent, EDIP, Franklin US LCI, GaBi, German Network on LCI Data, IVAM LCA Data, Japan National LCA Project, LCA Food, SPINE@CPM e US LCI Database Project (CAMPOLINA, 2015).

O Ecoinvent é um software que conta com uma ampla biblioteca de inventários de ciclo de vida para inúmeros produtos, desenvolvido em 2003 pelo Instituto Federal Suíço para Pesquisa e Testes de Materiais (EMPA), com o objetivo de fornecer informações sólidas e seguras a nível global. Hoje, já na sua terceira versão, conta com mais de 10.000 inventários os quais detalham todas as informações disponíveis sobre entradas e saídas de materiais, substâncias e energia de diversos processos (ACV Brasil, 2018).

O Ecoinvent disponibiliza seu acesso online em uma plataforma onde o usuário pode buscar o processo de interesse nos campos de pesquisa e analisar diversos processos fornecidos, como está demonstrado na Figura 16 abaixo, em uma simulação para facilitar a sua compreensão.

an association formed by Agroscope ETH Empa

Welcome priipupin!

Current Licence: Guest v3  
Selected Database: version 3.04 (2013)  
[ Account Settings | Switch Database | Log out ]  
Please order a licence to access all features of the ecoinvent database.

Home | Database Search | Download Basket | Files | Reports

**Information**

Here you have access to the version 3 database. Select a System Model to display a short description. In the "Undefined System Model" you will find the unlinked and Multi-output Unit Processes (UPR). In the System Models "Substitution, consequential, long-term", "Allocation at the point of substitution" and "Allocation, cut-off", the datasets are linked, following the rules specific to each System Model.

Click on "UPR" at the far right of the search results to see the Unit Process. When a system model has been selected, cumulative inventories (LCI) and cumulative impact assessment results (LCIA) are also available. UPR, LCI and LCIA are different from one System Model to the Other.

Search in Activity Name, Reference Product Names and Synonyms

photovoltaic

**System Model**

- Undefined  
These are the unlinked, multi-product activity datasets that form the basis for all the other system models. This is the way the datasets are obtained and entered by the data providers. These activity datasets are useful for investigating the environmental impacts of a specific activity (gate-to-gate), without regard to its upstream or downstream impacts.
- Allocation, cut-off by classification
- Allocation at the point of substitution
- Substitution, consequential, long-term

Filter: cell

| #   | Name  | Reference Product                       | Loc. | Time Period             | Synonyms                                      | UPR |
|-----|---|---|------|-------------------------|---|-----|
| 254 | market for photovoltaic cell factory          | photovoltaic cell factory [unit]        | GLO  | 01.01.2011 - 31.12.2011 |   | UPR |
| 255 | market for photovoltaic cell, multi-Si wafer  | photovoltaic cell, multi-Si wafer [m2]  | GLO  | 01.01.2011 - 31.12.2011 |   | UPR |
| 256 | market for photovoltaic cell, ribbon-Si       | photovoltaic cell, ribbon-Si [m2]       | GLO  | 01.01.2011 - 31.12.2011 |   | UPR |
| 257 | market for photovoltaic cell, single-Si wafer | photovoltaic cell, single-Si wafer [m2] | GLO  | 01.01.2011 - 31.12.2011 |   | UPR |
| 297 | photovoltaic cell factory construction        | photovoltaic cell factory [unit]        | DE   | 01.01.2000 - 31.12.2008 |   | UPR |
| 298 | photovoltaic cell factory construction        | photovoltaic cell factory [unit]        | GLO  | 01.01.2000 - 31.12.2008 |   | UPR |
| 299 | photovoltaic cell production, multi-Si wafer  | photovoltaic cell, multi-Si wafer [m2]  | GLO  | 01.01.2004 - 31.12.2005 | polycrystalline / multi-crystalline / silicon | UPR |
| 300 | photovoltaic cell production, multi-Si wafer  | photovoltaic cell, multi-Si wafer [m2]  | RER  | 01.01.2004 - 31.12.2008 | silicon / polycrystalline / multi-crystalline | UPR |
| 301 | photovoltaic cell production, ribbon-Si       | photovoltaic cell, ribbon-Si [m2]       | GLO  | 01.01.2004 - 31.12.2005 | multi-crystalline / polycrystalline / silicon | UPR |
| 302 | photovoltaic cell production, ribbon-Si       | photovoltaic cell, ribbon-Si [m2]       | RER  | 01.01.2004 - 31.12.2005 | multi-crystalline / silicon / polycrystalline | UPR |

Showing 1 to 10 of 16 entries (filtered from 383 total entries)

Guest users are not allowed to download datasets. Please order a licence to access all features of the ecoinvent database.

Figura 16 – Simulação de uma pesquisa no banco de dados do Ecoinvent.

Além destas vantagens, é possível encontrar no Ecoinvent a disponibilidade de processos unitários e de sistema, um editor associado ao Excel, atualização periodicamente, aplicações coerentes de alocações e fronteiras do sistema e um alcance internacional (GOEDKOOP, 2010).

## 2.7. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

Como uma maneira de auxiliar na avaliação do ciclo de vida de diversos processos existentes, foram criados softwares que integram todas as informações disponibilizadas pelos conjuntos de dados dos inventários e fornecem os resultados dos impactos através de gráficos, fluxogramas e tabelas, possibilitando também a comparação entre diferentes cenários. Todos os softwares contam com uma biblioteca de dados para facilitar a coleta de informações, entretanto, é necessária cautela ao se manusear estas informações dependendo dos limites e fronteiras delimitadas por cada estudo, pois as disponibilizadas pelos inventários podem ou não corresponder aos objetivos de cada ACV (CAMPOLINA, 2015).

Alguns dos softwares existentes estão listados abaixo e brevemente comentados segundo Campolina (2015):

BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) é um software de origem dos Estados Unidos, desenvolvido pelo “National Institute for Standards and Technology”, sendo aconselhado para ACVs do ramo civil, o qual avalia desempenhos econômicos e ambientais de 65 diferentes produtos.

Também norteamericano, o software LCAPIX foi desenvolvido pelo KM limited, é um software capaz de relacionar a rentabilidade ambiental e econômica de produtos.

Outro software desenvolvido nos Estados Unidos é o GREET Model, criado pelo “U.S Department of Energy’s Office of Transportation Technologies”, permite comparar diversos motores e combustíveis enfatizando os impactos causados como gases estufa, emissões regulamentadas e energia gasta em transportes.

O ECO-it foi desenvolvido na Holanda, criado pela Pré Consultants. Ele contém dados ambientais para diversos materiais: metais, plásticos, papéis e vidros, além de possuir informações acerca da produção destes, atividades de transporte, energia e tratamento dos mesmos.

O IDEMAT 2005 também holandês, elaborado pela Delft University of Technology, também possui ampla biblioteca e é indicado para estudos da área de design, possuindo informações técnicas sobre materiais e serviços deste ramo.

O SimaPRO 7 também foi desenvolvido pela Pré Consultants da Holanda e conta com uma grande gama de métodos de avaliação de impactos e de banco de dados, não sendo recomendado para apenas uma área do conhecimento, mas sim todos os produtos e serviços em geral devido à sua grande biblioteca e à sua capacidade de relacionar diversos processos complexos com entradas e saídas variadas. É o software mais utilizado para estudos de ACV. Abaixo na Figura 17 é mostrado um exemplo de processo o qual foi pesquisado e suas diversas opções, além da explicação detalhada de alguns dos parâmetros do processo selecionado, a fim de facilitar a compreensão:

The screenshot shows the Simapro software interface. On the left, a sidebar contains a tree view of categories, with 'Transformation' selected under 'Inorganic'. The main window displays a list of processes, with 'Silica sand (RoW) production | APOS, S' selected. Below the list, detailed information is provided, including a description, references, and production volume.

| Nome  | Unidade   | Tipo de resíduo     |
|---|-----------|---------------------|
| Silica sand (DE) production   Cut-off, S                                  | kg        | não definido        |
| Silica sand (DE) production   Cut-off, U                                  | kg        | não definido        |
| Silica sand (GLO) cryolite production, from fluosilicic acid   APOS, S    | kg        | não definido        |
| Silica sand (GLO) cryolite production, from fluosilicic acid   APOS, U    | kg        | não definido        |
| Silica sand (GLO) cryolite production, from fluosilicic acid   Cut-off, S | kg        | não definido        |
| Silica sand (GLO) cryolite production, from fluosilicic acid   Cut-off, U | kg        | não definido        |
| <b>Silica sand (RoW) production   APOS, S</b>                             | <b>kg</b> | <b>não definido</b> |
| Silica sand (RoW) production   APOS, U                                    | kg        | não definido        |
| Silica sand (RoW) production   Conseq, S                                  | kg        | não definido        |
| Silica sand (RoW) production   Conseq, U                                  | kg        | não definido        |
| Silica sand (RoW) production   Cut-off, S                                 | kg        | não definido        |
| Silica sand (RoW) production   Cut-off, U                                 | kg        | não definido        |
| Silicon carbide (RER) production   APOS, S                                | kg        | não definido        |

Apart from the use in the building sector, silica sand is also used in the beverage industry, as a raw material for the chemical industry, for the production of refractories, as filling material or for the covering of playing fields.  
 Kellenberger D, Althaus H.-J., Jungbluth N., Künniger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.  
 2. Industrial sand: glass-, grinding-, enamel-, oil-, moulding- and filter sand  
 References:  
 The use of silica sand is subdivided in two categories (Bach et al. (1999)):  
 Bach M., Rohlf U. and Frunder B. (1999) Römpf Lexikon Chemie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.  
 1. Building sand: used as aggregate for concrete, mortar, plaster, dumping, non-freezing, used for the production of sand-lime bricks and as paving and brake sand.  
 This dataset represents the production of 1 kg of silica sand obtained by the drying of sand. Silica sand is a special sand with a SiO<sub>2</sub> (Quartz)-content of more than 85% (w/w). If the SiO<sub>2</sub>-content is higher than 98%, the silica sand is called pure silica sand or industrial sand. Pure silica sand with a SiO<sub>2</sub>-content over 99% and heavy metal content (especially iron compounds) under 0.05% is called "vitreous" sand. Important silica sand deposits are found in Germany: Niedersachsen, Westfalen and Niederrhein (Bach et al. (1999)).  
 Production volume: 18955825000 kg  
 Included activities start: From the reception of sand.  
 Included activities end: This activity ends with the processing of sand, resulting in silica sand. Only the energy demand is included, no

Figura 17 – Simulação de uma busca pelo processo de produção de areia de sílica no software Simapro.

O software GaBi 4 foi criado na Alemanha pelo PE Europe GmbH e é outro software indicado para diversas áreas, possuindo em sua biblioteca os inventários mundiais Gabi e Ecoinvent e também amplamente utilizado por suportar manuseios de grande quantidade de informações como balanço de massa e energia de produtos de entrada e saída.

Outro software alemão é o Umberto, desenvolvido pelo “Institute for Environmental Informatics”, é indicado para otimizar processos podendo analisar pontos estratégicos para redução com consumo de recursos ou gastos energéticos.

O KCL-ECO 4.0 é um programa finlandês criado pelo KCL que conta com diversos recursos gráficos facilitando a compreensão e também métodos para alocações.

REGIS, criado na Suíça pelo Sinum é um software que auxilia a melhoria dos desempenhos ambientais por produtos prestados em indústrias de acordo com a norma de gestão ambiental ISO14031.

Por fim, o software SPOLD Data Exchange foi desenvolvido pela “Society for Promotion of Life Cycle Assessment” na Dinamarca e é aconselhado quando necessita-se criar, editar, importar e exportar dados no formato SPOLD’99, que é um formato de dados eletrônicos para troca de dados de ICV.

## **2.8. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ACV DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Adriano (2015) realizou um estudo de ACV relacionando o desempenho ambiental da tecnologia fotovoltaica em Portugal com outras fontes de energia, como eólica, hídrica e o gás natural. Adriano utiliza sete indicadores ambientais para comparar os diferentes cenários, são eles: uso da água, extração de recursos, uso do solo, emissão de gases de efeito estufa, poluição do ar, emissão de dioxinas e furanos e a poluição da água e solos. Ele também considera os dois tipos de painéis cristalinos: Si-c Mono e Si-c Poli, e considera apenas algumas fases de todo o ciclo de vida: extração de recursos, produção da célula, produção dos componentes de suporte, montagem e instalação do sistema e desmantelamento. Dentre as diferentes fontes de energia, a eólica é considerada a de menor impacto.

Para os processos considerados, Adriano (2015) conclui que a produção das células e dos componentes do sistema são os mais impactantes ao meio ambiente, e também cita que o processo Czochralski por ser lento e com grande consumo de energia, torna o painel de Si-c Mono maior causador de impactos em relação ao painel policristalino. O autor também diz que o processo de reciclagem das bolachas está em desenvolvimento e ainda necessita de maior aprimoramento para aproveitar de melhor maneira este material e se tornar economicamente mais viável, entretanto, ele afirma que não foi possível encontrar informações suficientes para o desmantelamento do painel e considerou que apenas o plástico vai para aterro ou incineração e o restante do painel é reciclado, e portanto não fazem mais parte do ciclo de vida do painel pois estes farão parte do ciclo de vida de outros produtos.

Oliveira (2017) realiza a ACV dos painéis fotovoltaicos modelando uma situação no Brasil e na China e outra exclusivamente na China, pois mostra que não existem indústrias brasileiras que realizam o processo de purificação do silício a grau solar. Ela também não realiza

uma ACV com todos os processos envolvidos, analisando desde a extração de recursos até a produção dos painéis. Seus resultados comprovam que o cenário que envolve parte da produção no Brasil gera menos impactos devido a matriz energética do país ser mais limpa que a matriz chinesa. Oliveira conclui também que a modelagem dos transportes não se mostrou relevante para uma tomada de decisão entre os cenários mais impactantes. Por fim ela percebe que o vidro, o silício e o alumínio são os principais responsáveis para os impactos causados no ciclo de vida e que estes estão presentes principalmente na construção do módulo, que representa o processo mais impactante.

Gerbinet (2014) realiza uma revisão sobre os painéis fotovoltaicos, e diz que apesar de existir uma grande bibliografia acerca deste tema, a maioria dos estudos estão incompletos e com falta de detalhes sobre o sistema e a metodologia e por isso há uma dificuldade em comparar os resultados. Ele elucida a importância de integrar a construção dos componentes que fazem parte do sistema fotovoltaico e do destino final dos painéis devido à sua influência nos resultados. Por fim, é mostrado que a maioria dos estudos aferidos por ele avaliam apenas impactos relacionados à energia e ao potencial de aquecimento global, e portanto, outros impactos devem ser analisados em novos estudos.

Outro estudo de ACV de painéis fotovoltaicos foi realizado por Bezerra (2018), o qual considera desde a produção de silício metalúrgico até a montagem do painel de silício policristalino, e ainda calcula o seu tempo de retorno energético, o qual chega a conclusão de 2,94 anos para o total retorno. Considerando um tempo de vida útil de 25 anos, o painel mostra-se promissor. Para os impactos causados nas fases consideradas, Bezerra constatou que a matriz energética utilizada (a chinesa) teve forte influência nos impactos por tratar-se de uma energia essencialmente fóssil. Dentre as categorias de impacto consideradas, as que demonstraram maiores prejuízos ambientais foram ecotoxicidade, eutrofização de água doce e toxicidade humana.

Garcia (2014) analisou os tipos mais comuns de células fotovoltaicas (Silício monocristalino, policristalino, amorfo, CdTe, CIS) em relação à sua emissão de gases efeito estufa e o conteúdo energético dos sistemas através de dados da América Latina. Ela observou que para a maioria dos painéis a recuperação da energia gasta em seus ciclos de vida acontece em cerca de 10 a 15% do seu tempo de vida, porém para alguns painéis de silício monocristalino isso pode acontecer em até 50% de sua vida útil. Garcia também defende que o descarte está

em fase de teste e ainda não acontece devidamente, portanto não há informações suficientes para analisar as emissões geradas, e que em média a energia produzida pelos painéis na América Latina é suficiente para ter um bom retorno, entretanto esta informação não pode ser aplicada em todo o território pois existem regiões de menor irradiação. Já a emissão dos gases de efeito estufa em sua fase de operação são insignificantes.

Rosa (2008) realizou um estudo que analisou os passivos ambientais causados pelo ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, e buscou avaliar se esta fonte energética poderia de fato ser considerada menos poluente, uma vez que defende que uma fonte de energia apenas pode ser chamada de “limpa” se o seu gasto energético durante todo processo de ciclo de vida seja compensado pela sua produção energética durante seu tempo de vida útil e também se este gasto compensa quando comparado ao que produziria a geração de energia a partir da matriz energética de cada localidade, além de comparar as emissões de CO<sub>2</sub> de seu ciclo produtivo com as emissões também das fontes mais utilizadas em cada país.

Ao fim, Rosa (2008) conclui que em relação à amortização dos gastos energéticos, as placas fotovoltaicas são realmente compensadoras, pois costumam possuir um retorno energético aos 8 anos de geração, enquanto seu tempo de vida é de 25 anos, já a emissão de CO<sub>2</sub> deve ser mitigada e dependendo da localidade em que é instalado ou produzido o painel, há um custo ambiental bem alto e este não compensa comparado às fontes de energia existentes em alguns países. O autor também não considera os processos que ocorrem após sua operação, ou seja, seu descarte.

### 3. METODOLOGIA

Após o conhecimento teórico sobre a tecnologia fotovoltaica e sua cadeia de produção, foi necessário definir um indicador de desempenho ambiental para avaliar as questões da consequência de toda cadeia de produção dos painéis fotovoltaicos. Para este caso, o método optado como o mais adequado foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), e aí novamente foram reunidas bibliografias e normas importantes para a aplicação deste método. Em seguida, foi a etapa de reunir todas as informações coletadas e adequá-las a mesma unidade funcional, ou seja, todos os impactos ambientais detectados pelo método ACV foram somados, e para isso foi necessário que estes estivessem em uma mesma unidade funcional. Sendo assim, coube a esta etapa a escolha de um método eficiente para a manipulação dos resultados. Através das referências em outros trabalhos já realizados, foi escolhido o programa SimaPro, e também um método de avaliação de impacto. Dentre os métodos disponíveis para a técnica em questão, foi selecionado o CML IA, e através dele, chegou-se aos resultados finais.

A ACV possui inúmeras vantagens na identificação de impactos através da avaliação dos estágios de ciclo de vida de um produto, além de possuir diversas aplicações teóricas e práticas. Entre suas vantagens, é possível destacar a identificação de impactos em mais de uma área específica, a comparação entre dois ou mais produtos ou processos, o balanço definido de entradas e saídas de um sistema de produção, identifica os processos que causam maior descarga ambiental em um ciclo de geração de um produto, além de avaliar as consequências de alguma atividade sobre a saúde humana e do ambiente em níveis locais até globais (ADRIANO, 2015).

Levando em consideração outras bibliografias e resultados obtidos por outros estudos acerca dos impactos do ramo fotovoltaico, optou-se por utilizar a metodologia da ACV que avalia os impactos “do berço ao portão”, pois verificou-se que os principais impactos de toda sua cadeia estão concentrados nas fases iniciais de produção dos painéis. Já o impacto de sua destinação final (incluindo descarte e/ou reciclagem) pode conter maiores prejuízos ambientais, entretanto trata-se de um conceito ainda muito recente devido ao tempo de vida que costumam durar os painéis (em sua grande maioria 30 anos de vida útil), e por tratar-se de uma tecnologia recente e ainda não totalmente explorada, é necessário que se ampliem os estudos e manobras para reduzir os impactos do descarte indevido destes componentes, ainda mais se tratando do

cenário nacional, uma vez que os países que possuem maior quantidade de pesquisas acerca desta tecnologia já estão mais estruturados quanto aos processos de reciclagem e reaproveitamento de materiais em relação ao Brasil (WALDMAN, 2016).

Como há um interesse estratégico entre as empresas em não fornecerem seus dados fidedignos de fluxo de produção, além dos acordos de confidencialidade a longo prazo que se estabelecem entre companhias, fornecedores e vendedores, um obstáculo surge na capacidade ao acesso de dados específicos, e devido à isso e à falta de confiabilidade nos dados expostos por empresas do ramo, foi necessário utilizar uma união de dados encontrados em bibliografias e estudos realizados por outros autores para se coletar informações suficientes para o cálculo de todo impacto gerado na produção, o que pode acarretar em resultados mais subjetivos pois estes dependeram da manipulação e juízo de vários autores e modeladores dos estudos consultados, entretanto, para que houvesse o menor prejuízo possível na interpretação final, foram selecionadas bibliografias confiáveis e de valores considerados justos ao processos e etapas pertencentes, além de uma criteriosa seleção das etapas envolvidas no processo do ciclo de vida estudado, para que este em questão trabalhasse apenas com aspectos ambientais considerados mais relevantes, ou dos quais existissem mais dados disponíveis e quantificáveis, e para este fim, de acordo com profissionais da área e embasado em outras bibliografias, optou-se por utilizar o conjunto de inventários do “Ecoinvent” para o desenvolvimento deste trabalho que mostrou-se muito eficiente.

Juntamente com esta base de dados, são analisadas outras bibliografias semelhantes a fim de avaliar os valores de entradas e saída, assim como seus produtos e subprodutos, se estão em conformidade, e caso necessário, haverá adequações para o tempo e espaço adequados.

Para a quantificação final dos impactos ambientais, o SimaPro é um programa altamente recomendado pois há uma uniformidade na manipulação de informações e ainda agrega diferentes valores de recursos e produtos resultando em um único conjunto de impactos que pode ser definido pelo usuário como o seu ponto de estudo de interesse. Ele é capaz de coletar dados e analisar os impactos ambientais em diversas categorias para vários produtos e serviços. Esta ferramenta foi escolhida por ser uma opção confiável e flexível e ser disponibilizada pelo laboratório de Engenharia Mecânica da UNIFEI para fins acadêmicos. Neste software, é necessário incluir os valores de cada um dos elementos de entrada e saída de cada processo de todo fluxo analisado em questão, e posteriormente, este resultará em um valor final, produto de

um fator equivalente para cada categoria escolhida com o valor inserido para cada elemento, fornecendo uma valoração para o indicador dentro de um método de avaliação de impactos ambientais. Para isto, é necessário escolher o método que mais se adeque a intenção do usuário.

### **3.1. OBJETIVOS E ESCOPO**

O objetivo desta avaliação é considerar uma situação que englobe todas as atividades impactantes do meio ambiente durante a cadeia produtiva do painel fotovoltaico desde a extração da matéria prima até a produção dos produtos de interesse final (painel e inversor). Para isso será considerado o processo de extração da sílica, o seu beneficiamento produzindo o silício metalúrgico, passando por uma purificação a fim de atingir o silício a grau solar (matéria prima das bolachas de silício policristalino) e uma segunda purificação para atingir o silício mais puro (matéria prima das bolachas de silício monocristalino), seguindo para a produção das wafers de silício, que por sua vez irão produzir a célula solar, em seguida produzindo o painel fotovoltaico, de potência de 224 Wp e eficiência de 15,4%. Até este momento, será considerado que o local de produção do painel foi na China, atual líder da tecnologia fotovoltaica mundial. Este painel será transportado para o Brasil através de um navio de grande porte para navegações acima de 10.000 km de distância, que chegará ao porto de Santos – SP e irá ser transportado por um caminhão até a cidade de Itajubá – MG. Em paralelo será construído um inversor de frequência de 500W com uma eficiência de 93,5% e seus componentes elétricos para uso em um sistema conectado à rede. O uso durante a operação do painel não será tratado neste estudo pois considera-se que seu impacto ambiental seja desprezível.

A unidade funcional de todo sistema será a unidade de energia kWh. Para referir-se a uma situação usual, será tratado o gasto energético mensal de uma residência familiar média, de 250 kWh.

Para definir a unidade de referência para realização dos cálculos, diversos softwares online disponibilizam simuladores que funcionam como uma calculadora automática para estimar a quantidade de painéis que será necessário para a obtenção de um valor definido de energia a ser produzida durante um mês em determinadas localidades, com valores de irradiância fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para todo território da América do Sul. Para a localização da cidade de Itajubá em Minas Gerais, com as

coordenadas “-22.4237, -45.4524”, foram fornecidos os seguintes dados de irradiação da Tabela 4:

Tabela 4 – Irradiação anual incidente em Itajubá – MG (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2019)

| Irradiação anual da localidade |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Global                         | 1.885,96 kWh/m <sup>2</sup> |
| Inclinada                      | 2.052,76 kWh/m <sup>2</sup> |
| Direta                         | 1.942,17 kWh/m <sup>2</sup> |

Com estas informações, a simulação considera que os módulos fotovoltaicos instalados estariam voltados para o Norte e com uma inclinação ótima, a qual corresponde à latitude da localização escolhida, então optando por um gasto médio mensal de 250 kWh, o simulador utilizado fornecido pelo Instituto Ideal demonstrou que será necessário um sistema de 1,5 kWp de potência para fornecer energia para esta residência, ou seja, 7 painéis de 224Wp deverão ser instalados, resultando numa potência aproximada (1,568 kWp).

Este cálculo não envolve eventuais adversidades como por exemplo sombreamento próximo, postes, árvores ou imperfeições do telhado, ou então prédios, construções e outros tipos de imprevistos que possam vir a ocorrer pois este não é o foco deste estudo, por isso está sendo considerada uma situação ideal.

Um fator importante é que esses painéis não irão produzir energia suficiente para suprir 100% dos gastos realizados pela residência durante o ano, sua instalação é feita de forma complementar para que juntamente à rede pública esta residência possua seu fornecimento de energia. Entretanto, em média, busca-se suprir cerca de 70% do gasto.

O público que se aplica o presente estudo são demais pesquisadores e interessados nos efeitos e causas dos impactos da geração de energia através de painéis fotovoltaicos de silício cristalino.

Todo o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica gera impactos ambientais nos mais diversos contextos, entretanto, segundo Choi (2012), os principais impactos (como os que geram elevações no aquecimento global) estão nas primeiras fases do ciclo, como a produção do silício e dos módulos.

O escopo desta avaliação será analisar os impactos gerados em relação à emissão de gases de efeito estufa, o consumo de recursos abióticos, a depleção do ozônio estratosférico, toxicidade humana, a ecotoxicidade de ambientes aquáticos e terrestres, a poluição foto-oxidante, a acidificação de ambientes e a eutrofização.

Os dados coletados deverão atender aos requisitos do estudo, que por questões de disponibilidade de informações, irá utilizar referências de validade global, ou seja, são estipulados valores de entrada e saída para cada processo unitário de acordo com valores mundiais e não locais/ regionais.

O método CML foi escolhido devido à sua abrangência global de todos os seus indicadores de impactos ambientais, além de simples manipulação dos dados para adequação ao fluxo de estudo. Suas categorias de impacto ambiental são abrangentes e analisam importantes áreas de foco ambiental, como disponibilidade de recursos minerais, qualidade e quantidade da biodiversidade, saúde e bem-estar humano, entre outros.

As fronteiras do sistema foram definidas considerando a situação que mais se observa no cenário nacional, sendo que a produção do painel ocorreu na China, e este foi transportado ao Brasil através de transporte marítimo e no Brasil percorreu até seu local de instalação e uso através de transporte rodoviário. O destino final definido foi a cidade de Itajubá – MG.

## **3.2. ANÁLISE DE INVENTÁRIOS**

A seguir, na Figura 18, está demonstrado em um diagrama de fluxos simplificado, todos os processos que serão analisados nesta ACV, e posteriormente estão descritas as entradas detalhadamente por meio de diagramas e as saídas respectivas por tabelas, para cada processo isoladamente. Os diagramas foram feitos por elaboração própria através do programa online *Lucid Chart*.

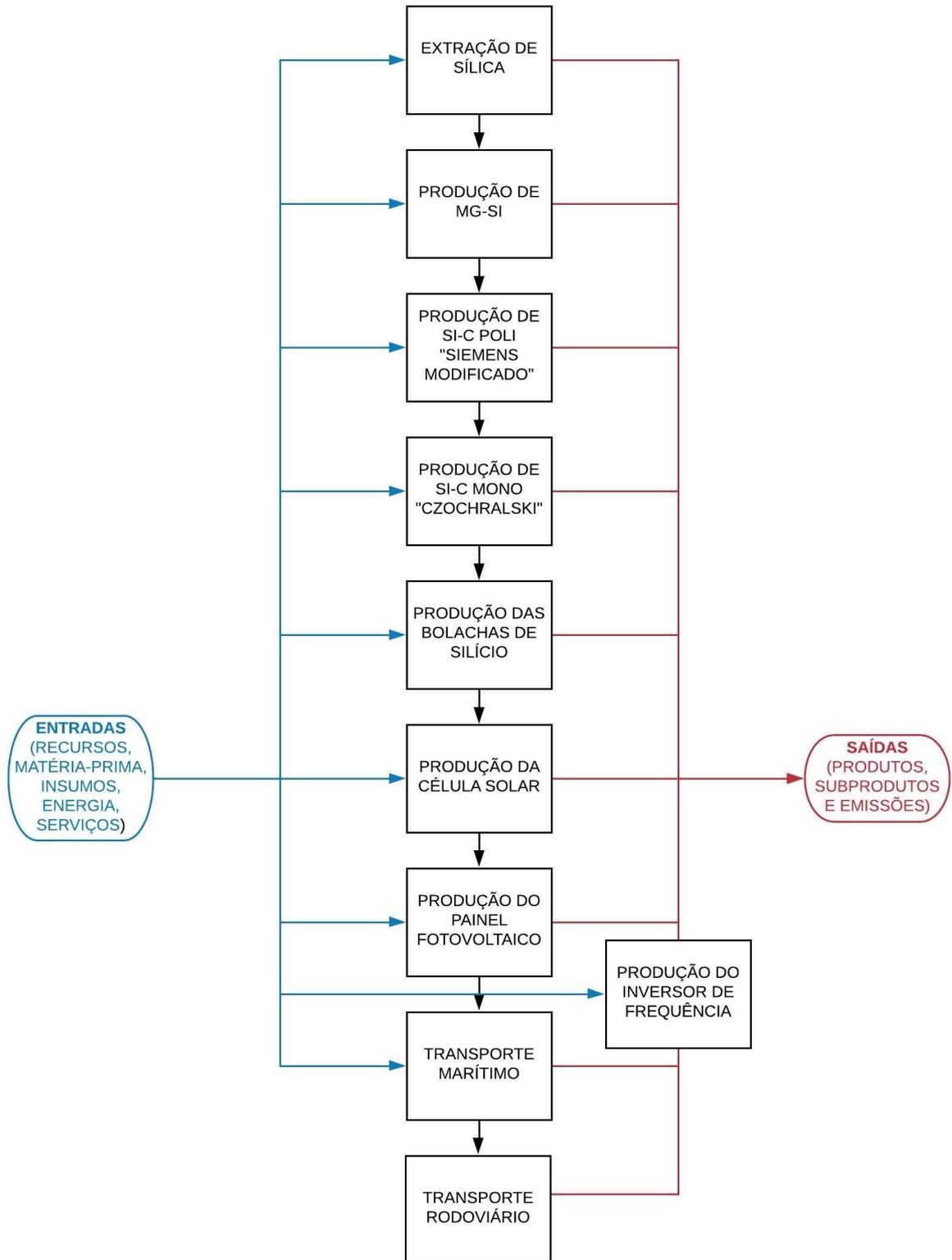


Figura 18 - Diagrama da tecnologia fotovoltaica “do berço ao portão”, mostrando as etapas que serão avaliadas.

Os impactos que serão descritos nos diagramas de processos unitários a seguir, não constam suas saídas detalhadamente, apenas o âmbito de suas emissões. Para tal, será descrito detalhadamente nas tabelas em conjunto.

### 3.2.1. EXTRAÇÃO DE SÍLICA

Para a modelagem de entradas e saídas do processo de extração da sílica, foi utilizado a base de dados do Ecoinvent “sílica sand, production”, onde a unidade funcional é de 1 kg de sílica. Esta atividade termina com a areia de sílica produzida e seca na fábrica. O conjunto de dados inclui a matéria-prima e soma uma certa quantidade de energia para a correia transportadora da sílica e a energia para secar a areia. O conjunto de dados não inclui os requisitos para administração. De acordo com o inventário do Ecoinvent, este processo não envolve emissões, apenas consumo de recursos, conforme Figura 19.

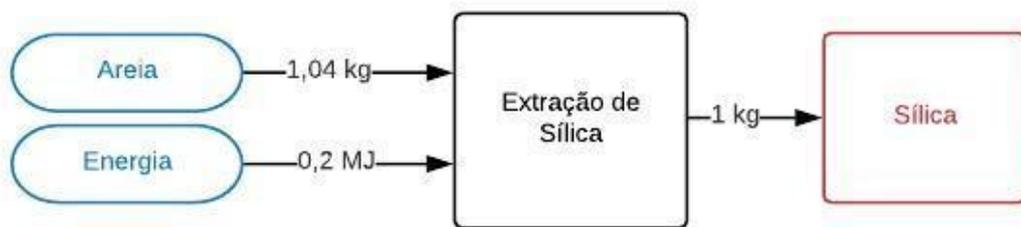


Figura 19 - Diagrama da extração de sílica.

### 3.2.2. PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO

Para a representação da produção de Mg-Si foi utilizado os dados do Ecoinvent da planilha “ silicon production, metallurgical grade”, tomando como base 1 kg de Mg-Si, apresentado na Figura 20.

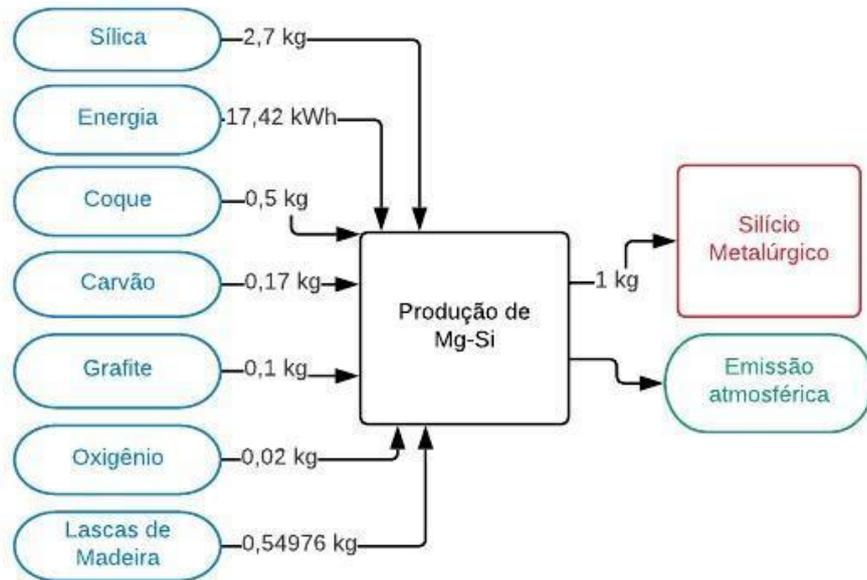


Figura 20 - Diagrama da produção de silício metalúrgico.

As saídas referentes ao processo de produção do Mg-Si estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Saídas de elementos do processo de produção de 1 kg de silício metálico.

| SAÍDA   | VALOR    | UNIDADE |
|---|----------|---------|
| <b>Subproduto/ Resíduos</b>   |          |         |
| Escória da produção de silício de grau metálico                               | 0,025    | kg      |
| Para o meio ambiente  |          |         |
| <b>Emissões para o ar</b>   |          |         |
| Alumínio  | 1,55E-02 | kg      |
| Antimônio   | 7,85E-05 | kg      |
| Arsênico  | 9,42E-05 | kg      |
| Boro  | 2,79E-03 | kg      |
| Cádmio  | 3,14E-06 | kg      |
| Cálcio  | 7,75E-03 | kg      |
| Dióxido de carbono, fóssil <sup>1</sup>                                       | 3,58E+00 | kg      |
| Dióxido de carbono não fóssil <sup>2</sup>                                    | 1,61E+00 | kg      |
| Monóxido de carbono, fóssil <sup>1</sup>                                      | 1,38E-03 | kg      |
| Monóxido de carbono não fóssil <sup>2</sup>                                   | 6,20E-04 | kg      |
| Cloro   | 7,85E-04 | kg      |
| Cromo   | 7,85E-05 | kg      |
| Cianeto   | 6,87E-02 | kg      |
| Flúor   | 3,88E-04 | kg      |
| Fluoreto de hidrogênio  | 5,00E-04 | kg      |
| Sulfato de hidrogênio   | 5,00E-04 | kg      |
| Ferro   | 3,88E-02 | kg      |
| Chumbo  | 3,44E-03 | kg      |
| Mercúrio  | 7,85E-05 | kg      |
| Óxidos de nitrogênio  | 9,74E-03 | kg      |
| NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, de origem não especificada | 9,6E-05  | kg      |
| Partículas,> 10 µm  | 7,75E-03 | kg      |
| Potássio  | 6,20E-02 | kg      |
| Silício   | 7,51E-03 | kg      |
| Sódio   | 7,75E-03 | kg      |
| Dióxido de enxofre  | 1,22E-02 | kg      |
| <b>Emissões para o solo</b>   |          |         |
| Resíduos sólidos  | 7,85E-05 | kg      |

<sup>1</sup> Emissão de componentes de origem fóssil. <sup>2</sup> Emissão de componentes de origem não fóssil.

### 3.2.3. PRODUÇÃO DO SILÍCIO POLICRISTALINO

Para executar a modelagem da purificação do Mg-Si a fim de produzir as células solares, foi necessário utilizar dois inventários do banco de dados do Ecoinvent, um para a purificação ao grau necessário para produção de células de silício policristalinas (Si-c poli), que é obtido através do processo denominado “Siemens modificado”, e outro para atingir a purificação das células de silício monocristalino (Si-c mono), através do método Czochralski. Os dados da produção de silício a grau solar para Si-c poli foram obtidos pelo inventário “silicon production, solar grade, modified Siemens process”, e para Si-c mono pela “silicon production, single crystal, Czochralski process, electronics”. Ambos consideraram a produção de 1 kg de silício grau solar como produto.

Os dados da purificação do Mg-Si através do método Siemens modificado utilizou os valores comprovados de entradas e saídas de energia, produtos químicos e eficiências, já os valores para emissões nos corpos d’água foram obtidos estimativamente através dos resultados pelo processo Siemens tradicional, e estão demonstrados na Figura 21 e Tabela 6.

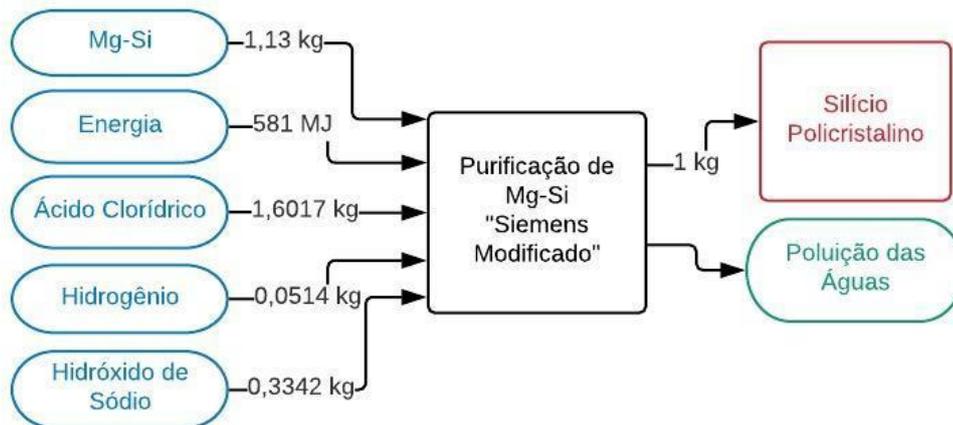


Figura 21 - Diagrama da purificação do silício metalúrgico para produção de silício a grau solar através do processo Siemens modificado.

A seguir na Tabela 6 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 6. Saídas de elementos do processo de purificação do silício metalúrgico para produção de 1 kg de silício a grau solar através do processo Siemens modificado.

| SAÍDA  | VALOR    | UNIDADE |
|--|----------|---------|
| <b>Emissões para a água</b>                    |          |         |
| Compostos organo-halogenados adsorvíveis (AOX) | 1,26E-01 | kg      |
| DBO5, Demanda Biológica de Oxigênio            | 2,05E-04 | kg      |
| Cloreto  | 3,60E-02 | kg      |
| COD, Demanda Química de Oxigênio               | 2,02E-03 | kg      |
| Cobre, íon                                     | 1,02E-03 | kg      |
| DOC, Carbono Orgânico Dissolvido               | 9,10E-04 | kg      |
| Ferro, íon                                     | 5,61E-02 | kg      |
| Nitrogênio                                     | 2,08E-04 | kg      |
| Fosfato  | 2,80E-02 | kg      |
| Sódio, íon                                     | 3,38E-02 | kg      |
| TOC, Carbono Orgânico Total                    | 9,10E-04 | kg      |
| Zinco, íon                                     | 1,96E-03 | kg      |

### 3.2.4. PRODUÇÃO DO SILÍCIO MONOCRISTALINO

O método de purificação através do processo Czochralski inclui as perdas de material devido ao corte feito no bloco monocristalino, uma vez que a seção do monocristal é circular e está é mantida em formato quadrado para maior aproveitamento para arranjá-las no painel. Para as emissões atmosféricas, os valores não estão incluídos pois segundo o inventário existem falta de dados suficientes para fornecê-las. Os dados que estão disponíveis através do banco de dados estão na Figura 22.

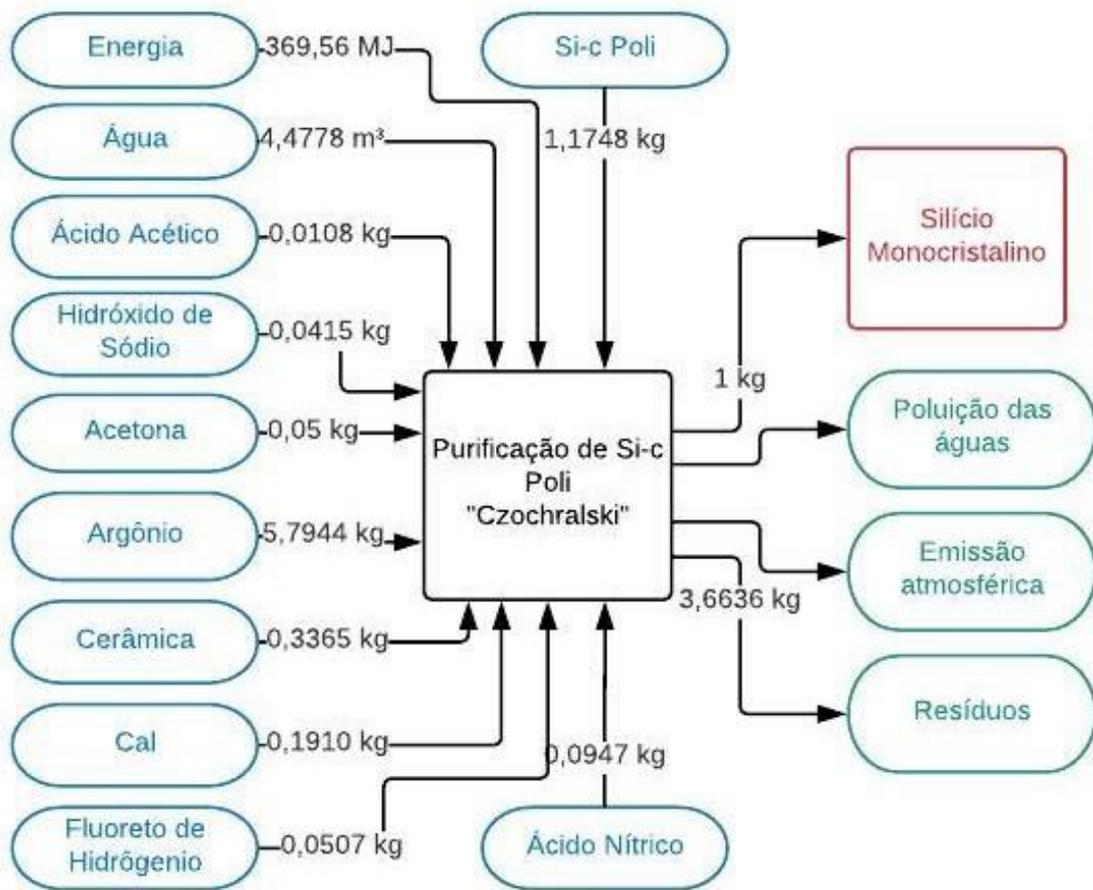


Figura 22 - Diagrama da purificação do silício grau solar para produção de silício monocristalino através do processo Czochralski.

A seguir na Tabela 7 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 7. Saídas de elementos do processo de purificação do Silício metalúrgico para produção de 1kg Silício a grau Solar através do processo Siemens modificado.

| SAÍDA   | VALOR    | UNIDADE        |
|---|----------|----------------|
| <b>Subproduto / Resíduos</b>                          |          |                |
| Resíduos, da produção de wafer de silício, inorgânico | 3,66364  | kg             |
| <b>Emissões para o ar</b>                             |          |                |
| Vapor de água   | 1,23E+00 | m <sup>3</sup> |
| <b>Emissões para a água</b>                           |          |                |
| Ácido Acético   | 5,40E-02 | kg             |
| DBO5, Demanda Biológica De Oxigênio                   | 1,30E-01 | kg             |
| DOC, Demanda Química De Oxigênio                      | 1,30E-01 | kg             |
| Doc, Carbono Orgânico Dissolvido                      | 4,05E-02 | kg             |
| Fluoreto  | 2,37E-03 | kg             |
| Hidrocarbonetos, Não Especificados                    | 2,28E-02 | kg             |
| Hidróxido   | 7,42E-03 | kg             |
| Nitrogênio  | 9,10E-03 | kg             |
| TOC, Carbono Orgânico Total                           | 4,05E-02 | kg             |
| Água  | 3,25E+00 | m <sup>3</sup> |

### 3.2.5. PRODUÇÃO DAS BOLACHAS DE SILÍCIO

Serão considerados os dados fornecidos pelo Ecoinvent “single-Si wafer production, photovoltaic” para a produção das bolachas, apresentadas na Figura 23. São consideradas bolachas de 156 mm por 156 mm (0,0243 m<sup>2</sup>).

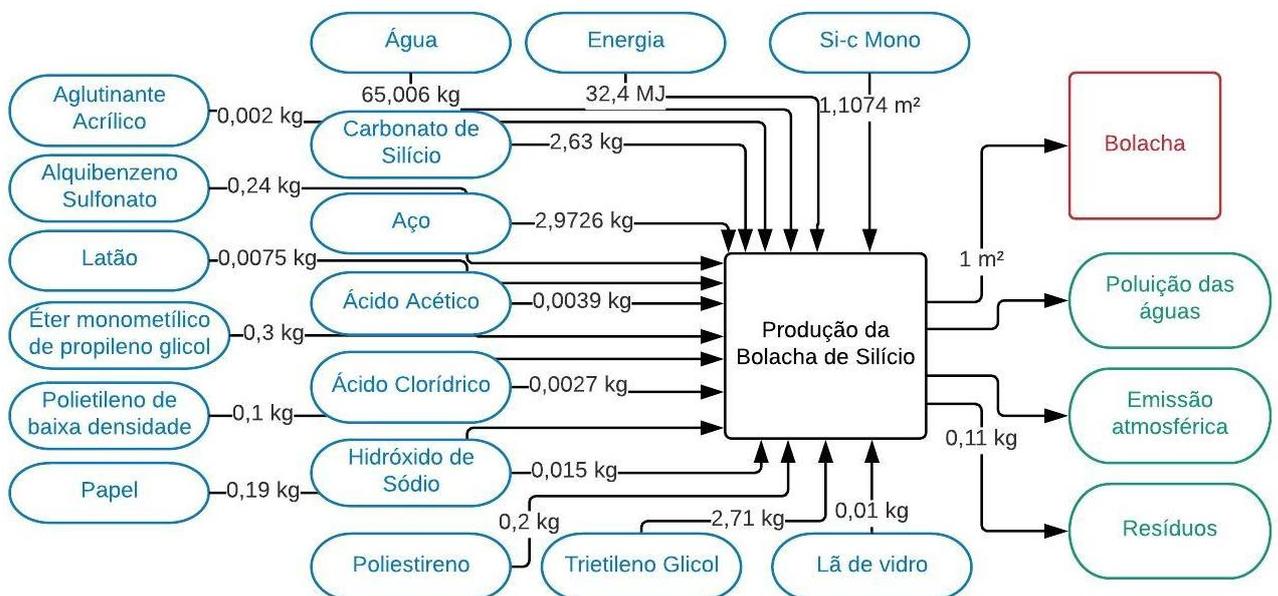


Figura 23 - Diagrama da produção de wafers de Silício.

A seguir na Tabela 8 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 8. Saídas de elementos do processo de produção de 1 m<sup>3</sup> wafers de Silício.

| SAÍDA  | VALOR    | UNIDADE        |
|--|----------|----------------|
| <b>Subproduto / Resíduos</b>                   |          |                |
| Resíduos da produção de wafer de silício       | 0,11     | kg             |
| <b>Emissões para o ar</b>                      |          |                |
| Vapor de água                                  | 9,75E-03 | m <sup>3</sup> |
| <b>Emissões para a água</b>                    |          |                |
| Compostos organo-halogenados adsorvíveis (AOX) | 5,01E-04 | kg             |
| DBO5, Demanda Biológica De Oxigênio            | 2,96E-02 | kg             |
| Cádmio, Íon                                    | 6,05E-02 | kg             |
| Cromo, Íon                                     | 3,03E-01 | kg             |
| COD, Demanda Química De Oxigênio               | 2,96E-02 | kg             |
| Cobre, Íon                                     | 6,05E-01 | Kg             |
| DOC, Carbono Orgânico Dissolvido               | 1,11E-02 | Kg             |
| Chumbo   | 3,03E-01 | Kg             |
| Merúrio  | 6,05E-02 | Kg             |
| Níquel, Íon                                    | 6,05E-01 | Kg             |
| Nitrogênio                                     | 9,95E-03 | Kg             |
| Fosfato  | 5,01E-04 | Kg             |
| TOC, Carbono Orgânico Total                    | 1,11E-02 | Kg             |
| Água   | 5,53E-02 | m <sup>3</sup> |

### 3.2.6. PRODUÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES

Utilizou-se os dados “photovoltaic cell production, single-Si wafer, GLO” para a modelagem desta etapa. Neste processo estão inclusas as etapas de limpeza, gravação de danos, gravação de textura, cobertura de *backside*, fosforescência, gravação de fósforo, impressão de contatos e testes de qualidade. O fluxograma da Figura 24 está demonstrando suas entradas e saídas resumidas.

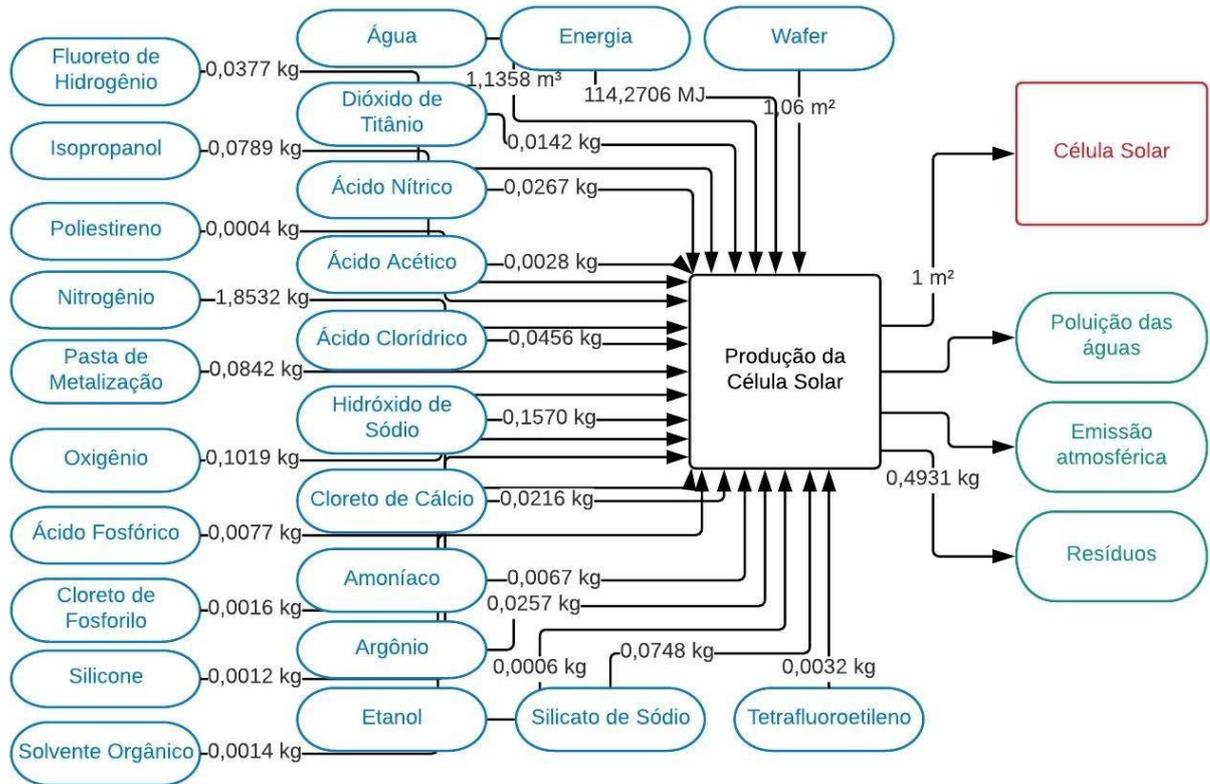


Figura 24 - Diagrama da produção da Célula Solar.

A seguir na Tabela 9 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 9. Saídas de elementos do processo de produção de 1 m<sup>2</sup> de Célula Solar.

| SAÍDA  | VALOR    | UNIDADE        |
|--|----------|----------------|
| <b>Subproduto / Resíduos</b>   |          |                |
| Resíduos, da produção de wafer de silício, inorgânico                          | 2,76E-01 | kg             |
| Águas residuais da produção de células fotovoltaicas                           | 2,17E-01 | m <sup>3</sup> |
| <b>Emissões para o ar</b>  |          |                |
| Alumínio   | 7,73E-04 | kg             |
| Etano, hexafluoro-, HFC-116  | 1,19E-04 | kg             |
| Cloreto de hidrogênio  | 2,66E-04 | kg             |
| Fluoreto de hidrogênio   | 4,85E-02 | kg             |
| Chumbo   | 7,73E-04 | kg             |
| Metano, tetrafluoro-, R-14   | 2,48E-04 | kg             |
| Óxidos de nitrogênio   | 5,00E-05 | kg             |
| NMVOOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, de origem não especificada | 1,94E-01 | kg             |
| Partículas, <2,5 µm  | 2,66E-03 | kg             |
| Silício  | 7,27E-01 | kg             |
| Prata  | 7,73E-04 | kg             |
| Sódio  | 4,85E-01 | kg             |
| Lata   | 7,73E-04 | kg             |
| Água   | 4,08E-01 | m <sup>3</sup> |
| <b>Emissões para a água</b>  |          |                |
| Água   | 5,11E-01 | m <sup>3</sup> |

### 3.2.7. PRODUÇÃO DO PAINEL SOLAR

Os dados de entrada do Ecoinvent utilizados para a construção do painel solar de silício monocristalino estão em “photovoltaic panel production, single-Si wafer, GLO”, esquematizadas na Figura 25.

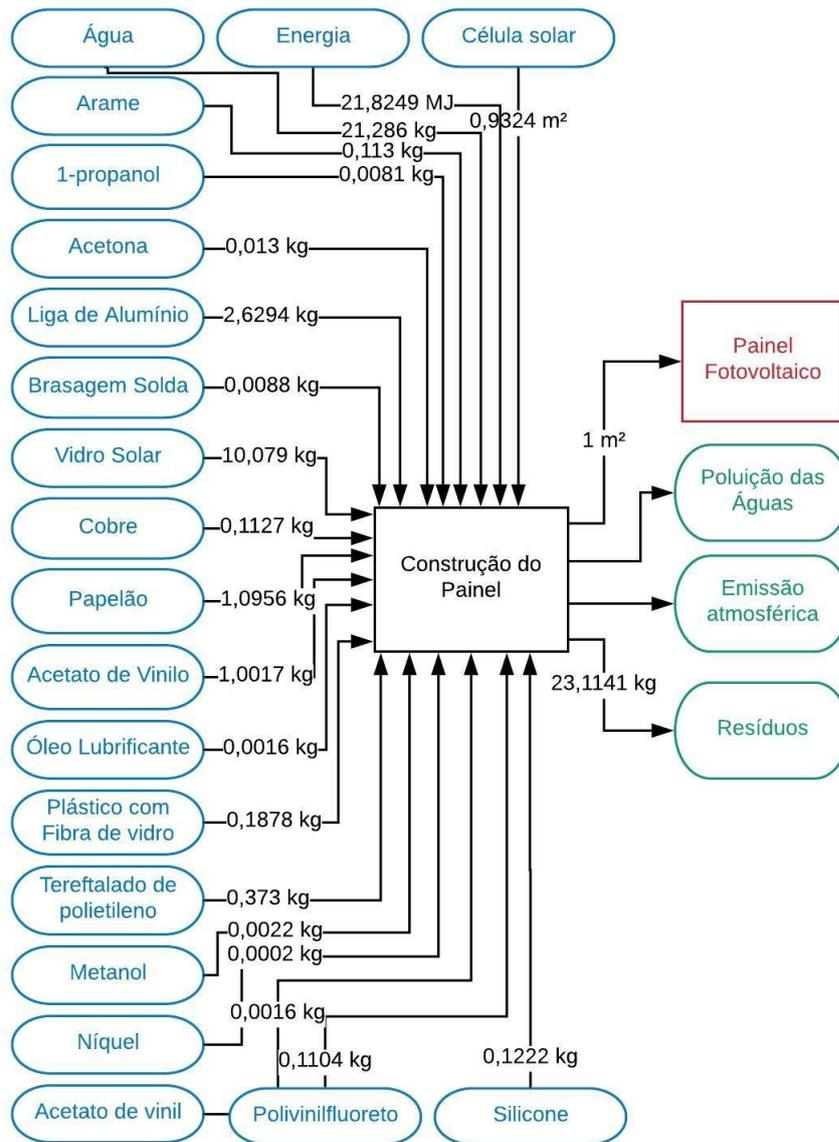


Figura 25 - Diagrama da construção do Painel Fotovoltaico.

Na Tabela 10 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 10. Saídas de elementos do processo de construção de 1 m<sup>2</sup> de painel fotovoltaico.

| SAÍDA                          | VALOR    | UNIDADE        |
|--------------------------------|----------|----------------|
| Subproduto / Resíduos          |          |                |
| Resíduos sólidos municipais    | 3,00E-02 | kg             |
| Óleo mineral usado             | 1,61E-03 | kg             |
| Resíduos de plástico, mistura  | 1,69E+00 | kg             |
| Resíduos de polivinilfluoreto  | 1,10E-01 | kg             |
| Águas residuais, da residência | 2,13E-02 | m <sup>3</sup> |
| Emissões para o ar             |          |                |
| Água                           | 3,19E-03 | m <sup>3</sup> |
| Emissões para a água           |          |                |
| Água                           | 1,81E-02 | m <sup>3</sup> |

### 3.2.8. TRANSPORTE

Para transportar o painel produzido, será considerada a situação de que ele sairá da China (não serão tratados fretes e transportes internos dentro do território chinês), através de um navio de 50.000 toneladas de peso bruto, com 100% de sua carga ocupada, por uma distância de 16.632 km, chegando ao porto de Santos – SP, conforme mostra o diagrama da Figura 26, onde estão demonstradas suas entradas de acordo com 1 t.km de unidade. De lá, este painel será levado para a cidade de Itajubá – MG através de um caminhão médio (de 10 a 20 toneladas), classificado no “Padrão Europeu de Emissão” na classe EURO 3, que representa uma emissão média de poluentes para ônibus e caminhões, considerando sua carga totalmente ocupada, por uma distância de 330 km. As entradas e saídas estão esquematizadas conforme mostra a Figura 27, onde está calculado as entradas para um sistema que gerou 1 t.km de resultado. Os inventários do Ecoinvent utilizado respectivamente para os dois transportes citados acima foram “Transport, freight, transoceanic ship” e “Transport, truck 10-20t, EURO3, 100% LF, default, GLO Economic”.

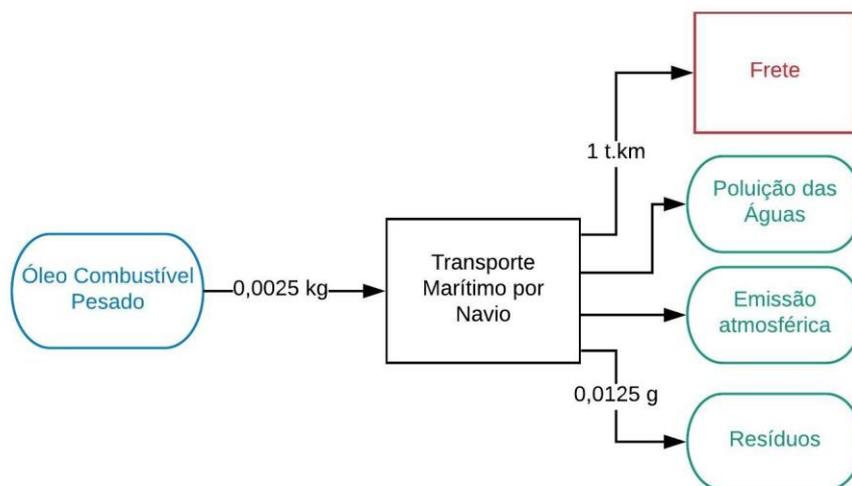


Figura 26 – Diagrama do transporte marítimo da China ao Brasil

Na Tabela 11 estão demonstradas as saídas do processo de transporte por navio.

Tabela 11. Saídas de elementos do processo de transporte marítimo para 1 t.km.

| SAÍDA  | VALOR    | UNIDADE |
|--|----------|---------|
| <b>Subproduto / Resíduos</b>   |          |         |
| Óleo de esgoto   | 1,25E-05 | kg      |
| <b>Emissões para o ar</b>  |          |         |
| Amônia   | 1,00E-06 | kg      |
| Arsênico   | 9,40E-10 | kg      |
| Benzeno  | 1,22E-07 | kg      |
| Cádmio   | 6,00E-11 | kg      |
| Dióxido de carbono, fóssil   | 7,79E-03 | kg      |
| Monóxido de carbono, fóssil  | 1,76E-05 | kg      |
| Cromo  | 3,90E-10 | kg      |
| Cobre  | 9,40E-10 | kg      |
| Monóxido de dinitrogênio   | 2,00E-07 | kg      |
| Dioxinas, medidas como<br>2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-<br>dioxina                    | 2,50E-15 | kg      |
| Cloreto de hidrogênio  | 1,44E-07 | kg      |
| Fluoreto de hidrogênio   | 1,44E-08 | kg      |
| Chumbo   | 4,30E-10 | kg      |
| Mercúrio   | 7,00E-11 | kg      |
| Metano   | 1,55E-07 | kg      |
| Níquel   | 5,44E-08 | kg      |
| Óxidos de nitrogênio   | 1,36E-04 | kg      |
| NMVOOC, compostos orgânicos<br>voláteis não metânicos, de<br>origem não especificada | 6,44E-06 | kg      |
| HAP, hidrocarbonetos<br>aromáticos policíclicos                                      | 5,00E-09 | kg      |
| Partículas, <2,5 um  | 3,50E-06 | kg      |
| Partículas, > 10 um  | 5,00E-06 | kg      |
| Partículas, > 2,5 um e <10um   | 4,00E-06 | kg      |
| Selênio  | 8,60E-10 | kg      |
| Dióxido de enxofre   | 1,20E-04 | kg      |
| Tolueno  | 5,15E-08 | kg      |
| Xileno   | 5,15E-08 | kg      |
| Zinco  | 1,97E-09 | kg      |
| <b>Emissões para a água</b>  |          |         |
| Compostos de tributilestanho   | 1,00E-08 | kg      |

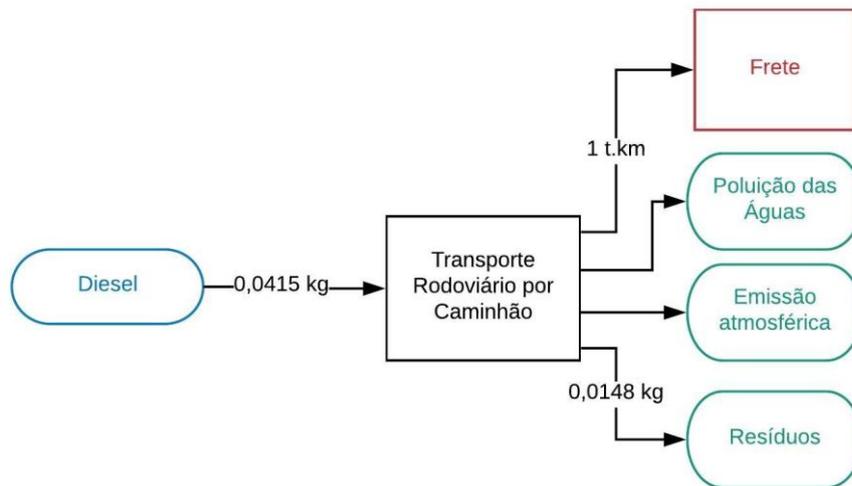


Figura 27 – Diagrama do transporte rodoviário de Santos- SP a Itajubá - MG

Na Tabela 12 estão descritas as saídas do transporte rodoviário utilizado, considerando 1 t.km de unidade.

Tabela 12. Saídas de elementos do processo de transporte rodoviário de 1 t.km.

| SAÍDA   | VALOR    | UNIDADE |
|---|----------|---------|
| <b>Emissões para o ar</b>   |          |         |
| Amônia  | 8,60E-07 | Kg      |
| Benzeno   | 2,00E-03 | kg      |
| Cádmio  | 7,24E-06 | kg      |
| Dióxido de carbono, fóssil  | 6,83E-03 | kg      |
| Dióxido de carbono não fóssil   | 1,23E-01 | kg      |
| Monóxido de carbono, fóssil   | 8,59E-06 | kg      |
| Monóxido de carbono não fóssil  | 1,55E-04 | kg      |
| Cromo   | 7,00E-09 | kg      |
| Cobre   | 1,09E-04 | kg      |
| Monóxido de dinitrogênio  | 1,21E-02 | kg      |
| Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a   | 3,94E-07 | kg      |
| Chumbo  | 3,61E-06 | kg      |
| Metano, fóssil  | 3,60E-08 | kg      |
| Metano não fóssil   | 6,56E-04 | kg      |
| Níquel  | 5,80E-05 | kg      |
| Óxidos de nitrogênio  | 1,20E-03 | kg      |
| NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metânicos, de origem não especificada | 2,80E-01 | kg      |
| Partículas, <2,5 um   | 2,30E-01 | kg      |
| Partículas,> 10 um  | 7,36E-01 | kg      |
| Partículas,> 2,5 um e <10um   | 1,37E-01 | kg      |
| Zinco   | 5,81E-03 | kg      |
| <b>Emissões para o solo</b>   |          |         |
| Cádmio  | 1,79E-05 | kg      |
| Cromo   | 1,61E-04 | kg      |
| Cobre   | 2,68E-04 | kg      |
| Conduzir  | 8,94E-06 | kg      |
| Níquel  | 1,43E-05 | kg      |
| Zinco   | 1,44E-02 | kg      |
| <b>Emissões para a água</b>   |          |         |
| Cádmio, íon   | 1,79E-05 | kg      |
| Cromo, íon  | 1,61E-04 | kg      |
| Cobre, íon  | 2,68E-04 | kg      |
| Chumbo  | 8,94E-06 | kg      |
| Níquel, íon   | 1,43E-05 | kg      |
| Zinco, íon  | 1,44E-02 | kg      |

### 3.2.9. PRODUÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Como o foco deste estudo não está no tipo do inversor, será utilizado dados do conjunto “inverter production, 0,5 kW, GLO”, que utiliza um inversor de potência nominal igual a 500 W, similar a muitos estudos utilizados para a produção deste, sendo que suas entradas serão resumidas no diagrama da Figura 28 pois não serão enfatizado a composição dos componentes eletrônicos do inversor, mas os dados podem ser analisados acessando este processo do Ecoinvent.

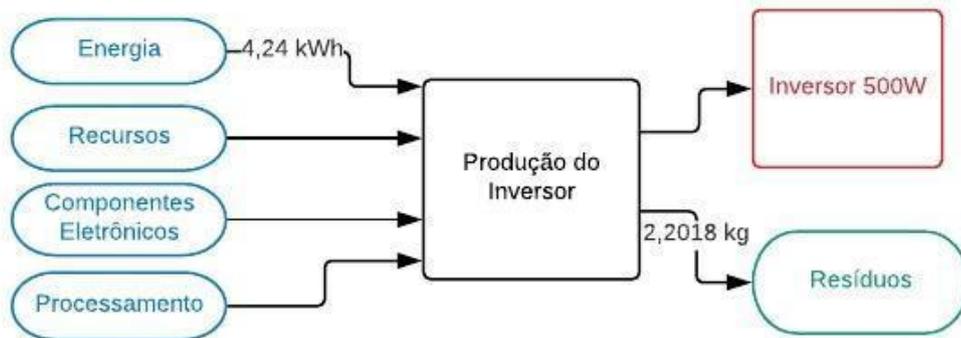


Figura 28 - Diagrama da produção do Inversor.

A seguir na Tabela 13 estão descritas as saídas deste processo:

Tabela 13. Saídas de elementos do processo da produção do Inversor.

| SAÍDA                                       | VALOR    | UNIDADE |
|---|----------|---------|
| Subproduto / Resíduos                       |          |         |
| Placas de fiação impressas usadas           | 6,90E-01 | kg      |
| Cartão de resíduos                          | 1,12E+00 | kg      |
| Resíduos de plástico, eletrônica industrial | 2,30E-01 | kg      |
| Polietileno de resíduos                     | 3,00E-02 | kg      |
| Poliestireno residual                       | 1,32E-01 | kg      |

## 4. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS

Para este trabalho foram estudados muitos métodos dentre os disponibilizados pelo SimaPro analisando a viabilidade de cada um, as aplicações encontradas para analisar questões do mesmo ramo (bibliografias que já houvessem analisado o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica com estes métodos) e quais indicadores de impacto ambiental cada método fornecia, para assim optar pelo que mais se adequasse a esta situação. Segundo um trabalho publicado por Mendes (2013) que analisou qualitativamente os dez métodos mais utilizados para avaliar suas aplicações no Brasil, demonstrando todas as categorias de impacto e indicadores utilizados por cada um deles, foi possível identificar que o método CML, desenvolvido na Holanda, objetiva interligar fatores de avaliação de impacto propostos por dados do Ecoinvent, o mesmo conjunto de dados utilizado neste trabalho, e também foi um dos únicos métodos que considerava uma abrangência global para todas as categorias de indicadores – alguns abrangiam apenas impactos regionais ou locais, e sendo que a maioria deles foi desenvolvida na Europa ou na América do Norte, poderiam não ter resultados válidos para o Brasil.

Para obter os resultados através deste método, uma emissão ou entrada identificada no inventário do ciclo de vida é convertida numa contribuição para o efeito de um problema ambiental multiplicando-a por um fator equivalente. O cálculo do fator final para quantificação de determinada categoria de impacto é obtido através da soma dos produtos gerados pela multiplicação de todos os fatores por suas respectivas entradas/ saídas (GUINÉE, 2002).

O CML conta com categorias de impacto obrigatórias, adicionais e ainda uma terceira opção. As obrigatórias são as categorias utilizadas na maioria das ACVs, sendo elas: depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção da camada de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, formação de compostos foto-oxidantes, acidificação e eutrofização. Entretanto, dependendo dos requisitos de cada estudo particularmente analisados, podem ser adicionadas algumas categorias de impacto opcionais, como: perda de função de suporte à vida, perda de biodiversidade, ecotoxicidade de sedimentos aquática, impactos da radiação ionizante, calor residual, ruído, acidentes letais, acidentes não letais, depleção de recursos bióticos, etc. E se ainda assim desejar-se optar por indicadores que não estão contidos nestas duas categorias, é possível inclui-

los em um campo do software desde que quantifique-os e exerça a programação dos seus fatores equivalentes para a devida soma final dos impactos totais (GUINÉE, 2002).

Para seu uso no software SimaPro, é possível que o usuário já possua os valores de entradas e saídas dos processos e fluxos e insira-os nos processos, criando as fases dos produtos e toda carga de impactos que estes já vêm carregando de processos anteriores, podendo optar também pela entrada de elementos que sejam encontrados diretamente na natureza, ou seja, sem histórico de impactos por processos anteriores, ou ainda, é possível utilizar a biblioteca de dados já existentes no programa. Dentre as bibliotecas que o programa disponibiliza para uso de dados, estão os inventários Agri-footprint, ELCD, EU&DK Input Output Database, Industry data, Methods, Swiss Input Output Database, USLCI e Ecoinvent 3.0, o qual foi utilizado para a coleta de dados deste trabalho.

Após a definição da biblioteca que será utilizada (ou dos dados que serão criados), é disponibilizado a fase de avaliação dos processos e as fases dos produtos. Nela podem ser acessados as descrições do sistema, onde cada biblioteca tem suas particularidades. O programa conta ainda com a descrição dos tipos de desperdício existentes para cada elemento cadastrado nas bibliotecas. Ou seja, todos os tipos de materiais, processos, energias, transportes, processamentos, serviços e tratamentos são especificados, tendo seus elementos de entradas distinguidos um a um até que estes alcancem a forma de “recurso conhecido da natureza”, o qual não é processado e nem passa por etapas anteriores de qualquer tipo de transformação, sendo a sua forma a utilizada para caracterizar diversos tipos de impactos de acordo com seu surgimento no processo.

Assim que todas as entradas e saídas de todos os processos foram delimitadas e definidas, é necessário definir o método de avaliação de impactos que será utilizado para realizar a avaliação. Neste caso, foi escolhido o método europeu CML IA, entretanto, o SimaPro disponibiliza diversos outros métodos, que são separados pela sua criação que pode ser europeia, global, norte americana, ou de acordo com suas características, como resultadas em um problema único, suplantada ou métodos de avaliação de pegada hídrica.

Por fim, após tendo selecionado e inserido todos estes dados citados, o programa calcula o impacto gerado por todas as categorias e indicadores em questão, e para realizar a sua interpretação é possível analisar quais substâncias foram as principais contribuintes para cada

tipo de indicador. Em uma aba do programa é disponibilizado todas as substâncias unitárias e a que classe elas pertencem, como matérias primas, emissões atmosféricas, emissões em meio hídrico, fluxos finais de resíduos, emissões para o solo, emissões não materiais, questões sociais e questões econômicas.

#### 4.1. VALORES FORNECIDOS PELO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS

Como o objeto final de estudo é a produção de 250 kWh de energia elétrica, conforme o diagrama da Figura 18, é necessário que haja um rearranjo dos valores nas unidades de entradas e saídas dos elementos proporcionalmente à unidade do produto gerado na fase anterior, multiplicando-os por um fator que pode ser facilmente obtido. Para o cálculo deste fator de multiplicação (FM), será feito um cálculo do final ao início do fluxograma considerando o valor de entrada do último produto demonstrado no processo atual, e assim por diante, como demonstrado no exemplo abaixo:

1m<sup>2</sup> de painel utiliza 0,9324m<sup>2</sup> de célula, logo, todos os elementos de entrada e saída do processo “Produção da célula solar” será multiplicado por 0,9324 (esse é seu FM), pois sua saída atual é de 1m<sup>2</sup> de célula.

Entretanto, há uma exceção para o cálculo desses fatores para alguns processos. São eles: o transporte marítimo e rodoviário, que irá ser o produto da distância percorrida pela massa total dos 7 painéis, em que foi utilizado um modelo da marca *Risen Solar*, que possui 20 kg; o processo de produção do inversor que será utilizado uma unidade; e a construção painel que terá a área dos 7 painéis, onde sua dimensão também está especificada pelo fabricante como sendo 1650 mm por 992 mm.

$$FM(n) = FM(n + 1) \times MP(n - 1)$$

Onde:

FM(n) é o Fator de Multiplicação da etapa do processo que se deseja descobrir;

FM(n+1) é o Fator de Multiplicação da etapa posterior à este processo;

MP(n-1) é a quantidade de matéria prima, a qual foi o produto do processo anterior, que é utilizada neste processo.

- Cálculo dos FM de cada etapa:

FM Produção do inversor = 1 unidade

FM Transporte rodoviário =  $330 \text{ km} \times 7 \times 20 \text{ kg} = 46.200 \text{ kg.km} = 46,2 \text{ t.km}$

FM Transporte marítimo =  $16.632 \text{ km} \times 7 \times 20 \text{ kg} = 2.328.480 \text{ kg.km} = 2.328,48 \text{ t.km}$

FM Produção do painel =  $7 \times 1,65 \text{ m} \times 0,992 \text{ m} = 11,4576 \text{ m}^2$

FM Produção de célula =  $11,4576 \text{ m}^2 \times 0,9324 = 10,683 \text{ m}^2$

FM Produção de wafer =  $10,683 \text{ m}^2 \times 1,05 = 11,217 \text{ m}^2$

FM Produção de Si-c Mono =  $11,217 \times 1,1074 \text{ kg} = 12,4073 \text{ kg}$

FM Produção de Si-c Poli =  $12,4073 \text{ kg} \times 1,1748 = 14,532 \text{ kg}$

FM Produção de Mg-Si =  $14,532 \text{ kg} \times 1,13 = 16,4211 \text{ kg}$

FM Extração de sílica =  $16,4211 \text{ kg} \times 2,7 = 44,337 \text{ kg}$

A produção do inversor não deve ser multiplicada por nenhuma constante pois este processo ocorre paralelo ao restante do fluxograma, pois independentemente do tamanho final do painel produzido, deverá ser utilizado uma unidade de inversor.

Resumindo, os fluxos de referência utilizados estão ilustrados na Figura 29, onde o valor indicado após o processo significa a quantidade da principal matéria prima utilizada no mesmo.

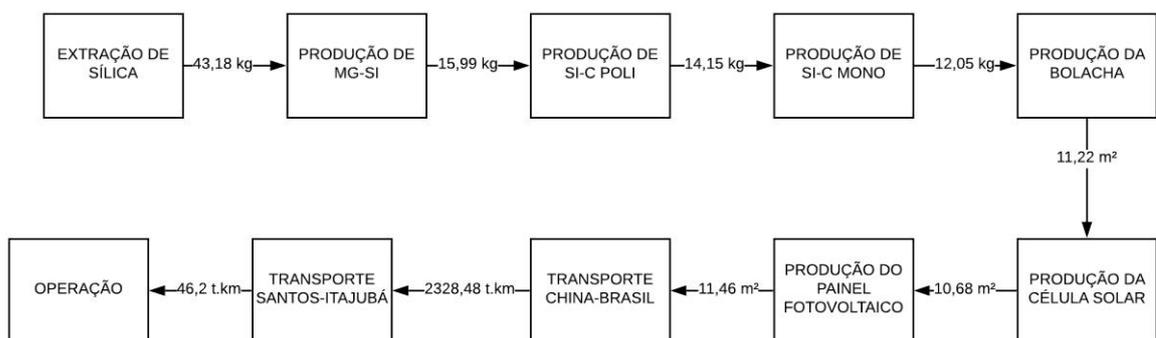


Figura 29 – Fluxo de referência de cada processo da produção do painel fotovoltaico.

As devidas etapas foram calculadas no SimaPro e tiveram suas análises informadas de acordo com o método CML. Abaixo estão as tabelas demonstrando os resultados fornecidos pelo programa. É importante observar que os impactos dos processos possuem valores

acumulativos, ou seja, os processos vão acumulando impacto ao longo da cadeia produtiva do painel, a não ser para o caso da produção do inversor, que ocorre paralelo à produção do painel.

## 4.2. EXTRAÇÃO DE SÍLICA

Na Tabela 14 estão descritos os valores de cada categoria para o processo de extração do principal recurso para produção do painel, a sílica.

Tabela 14. Valores dos impactos ambientais gerados pela extração de sílica, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 2,39E-06 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 2,10E+01 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 1,64E+00 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 5,10E-08 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 3,89E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 2,61E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 1,17E+03 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 6,57E-04 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 5,30E-04 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 1,14E-02 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 2,05E-03 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

Como demonstrado anteriormente, a extração de sílica não possui saídas relevantes, ou seja, suas taxas de emissão são baixas ou nulas de acordo com os componentes, quando comparado ao restante do processo.

### 4.3. PRODUÇÃO DE SILÍCIO METALÚRGICO

A avaliação de impactos da transformação da sílica em silício metalúrgico esta descrita na Tabela 15.

Tabela 15. Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de Mg-Si, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 6,10E-05 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 2,60E+03 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 2,12E+02 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 7,69E-06 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 9,04E+01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 4,43E+01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 5,26E+05 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 1,84E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 6,31E-02 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 1,38E+00 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 3,05E-01 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

Comparado ao restante do processo, a fase de refino da sílica a fim da obtenção do silício ao grau metalúrgico também não está entre os mais relevantes causadores de impacto da produção do painel. A categoria de impacto que esta etapa da produção possui sua maior participação em relação às outras é a ecotoxicidade aquática marinha.

#### 4.4. PRODUÇÃO DE SILÍCIO POLICRISTALINO

Para a purificação do silício metalúrgico alcançando o silício a grau solar pelo processo Siemens, os seus valores de impactos estão mostrados na Tabela 16.

Tabela 16. Valores dos impactos ambientais gerados pela purificação de Mg-Si, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 4,61E-04 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 1,13E+04 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 8,12E+02 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 5,44E-05 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 2,46E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 1,82E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 1,20E+06 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 4,03E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 2,16E-01 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 5,13E+00 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 1,17E+00 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

A purificação do silício metalúrgico para resultar em silício a grau solar já possui maior representatividade nos impactos da produção em relação as etapas anteriores. O método Siemens modificado que é utilizado para esta etapa é um processo metalúrgico complexo que compromete várias questões ambientais, entretanto, é um dos mais utilizados no ramo eletrônico para purificação de silício.

## 4.5. PRODUÇÃO DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

A avaliação de impactos da purificação do silício solar resultando no cristal único de silício que também é denominado a grau eletrônico está descrita na Tabela 17.

Tabela 17. Valores dos impactos ambientais gerados pela purificação do silício solar, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 9,25E-04 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 2,42E+04 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 1,74E+03 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 9,77E-05 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 4,99E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 4,36E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 2,35E+06 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 1,66E+00 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 4,64E-01 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 1,14E+01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 2,89E+00 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

A purificação do silício a grau solar, que resulta no monocristal de silício de pureza na escala de 99,99999%, é uma das etapas mais causadoras de impactos e emissões ao meio ambiente. Com exceção à depleção de recursos abióticos minerais e a depleção do ozônio estratosférico, esta fase representa mais de 10% dos impactos de todas as categorias restantes.

Quando analisado o seu valor de impactos causados por esta fase isoladamente, sem acumular os impactos que já vem sendo carregados pela produção do silício solar, esta etapa é a que representa maior gasto energético, consumo de recursos e emissão de elementos ao ambiente. Para as categorias de impacto de ecotoxicidade aquática de água doce, acidificação, depleção abiótica de combustíveis fósseis, formação fotooxidante, aquecimento global e ecotoxicidade terrestre, a fase isolada desta etapa pode ser considerada a maior causadora dos impactos ambientais finais. O método Czochralski busca resultar em um produto de elevadíssima pureza e sem a presença de defeitos ou imperfeições, e para isso são consumidos

valores relevantes de recurso tecnológico e natural, além das emissões de grande abrangência de elementos, tanto em quantidade quanto em diversidade.

#### 4.6. PRODUÇÃO DAS BOLACHAS DE SILÍCIO

Os impactos da produção de bolachas de silício, as wafers, estão calculados e demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18. Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de wafers, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 2,47E-03 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 3,09E+04 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 2,19E+03 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 1,20E-04 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 7,88E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 5,86E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 2,87E+06 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 2,29E+00 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 6,08E-01 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 1,41E+01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 3,65E+00 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

Em relação às fases já discutidas, a produção de wafers solares não é a próxima etapa mais representativa na avaliação de impactos da cadeia produtiva do painel fotovoltaico, mas ainda se mostra mais prejudicial ao ambiente que a extração de sílica e produção de silício metalúrgico. Entretanto, a categoria de impacto toxicidade humana é a classe de impacto a qual este processo tem maior representatividade, sendo que suas emissões e consumos causam mais de 20% da toxicidade humana gerada por todo o processo de produção do painel fotovoltaico, quando analisada isoladamente.

## 4.7. PRODUÇÃO DA CÉLULA SOLAR

Para as células solares, os valores dos impactos ambientais causados pela sua produção estão na Tabela 19.

Tabela 19. Valores dos impactos ambientais gerados pela produção de célula solar, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 8,19E-02 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 3,57E+04 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 2,59E+03 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 4,51E-04 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 9,57E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 7,20E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 3,53E+06 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 2,66E+00 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 7,16E-01 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 1,68E+01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 4,58E+00 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

A produção das células solares é uma etapa importante da produção de painéis fotovoltaicos quando se trata de seus impactos ambientais. Seu consumo e emissões geram a maior participação nas categorias de depleção abiótica mineral, depleção de ozônio estratosférico e eutrofização. Apesar de serem apenas 3 das 11 categorias analisadas, sua contribuição nestas categorias é altamente relevante. Para a categoria de depleção abiótica de recursos minerais, os impactos que a produção das células gera em toda a produção representa 55,7%, para a depleção de ozônio estratosférico, esta etapa representa 58,3% e para a categoria de eutrofização, esta fase é responsável por 66,7% de todo impacto. Nos cálculos realizados esta sendo considerado a produção de células de silício monocristalino, entretanto, os processos isoladamente comparados deste com a produção de silício policristalino são similares.

## 4.8. PRODUÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Por fim, o painel fotovoltaico resultou nos seguintes valores de impactos descritos na Tabela 20.

Tabela 20. Valores dos impactos ambientais gerados pela produção do painel fotovoltaico, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 8,97E-02 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 4,26E+04 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 3,18E+03 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 5,32E-04 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 1,39E+03 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 1,06E+03 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 5,39E+06 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 3,04E+00 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 8,98E-01 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 2,10E+01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 5,85E+00 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

Por fim, a produção do produto de foco final, 1m<sup>2</sup> de painel fotovoltaico, é também uma fase representativa em relação à geração de impactos ambientais nas categorias analisadas. Sua contribuição é a maior na categoria de impacto de ecotoxicidade aquática marinha, ficando na ordem de 30% de todo impacto gerado. Esta etapa não exige uma tecnologia tão avançada e degradadora do meio ambiente quanto às categorias anteriores, entretanto utiliza muitos materiais e por isso está entre as mais impactantes de todo processo.

## 4.9. TRANSPORTE MARÍTIMO

Os impactos causados pelo navio de carga para trazer os sete painéis solares, proporcionalmente ao peso dele, estão descritos na Tabela 21.

Tabela 21. Valores dos impactos ambientais gerados pelo transporte marítimo, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 4,65E-07 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 0,00E+00 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 1,32E+01 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 2,17E-08 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 6,73E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 6,38E-02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 1,53E+02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 2,23E-03 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 9,26E-03 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 2,65E-01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 3,35E-02 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

## 4.10. TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Para o caminhão transportar os sete painéis fotovoltaicos de Santos à Itajubá, os impactos causados relativamente a essa carga estão descritos na Tabela 22.

Tabela 22. Valores dos impactos ambientais gerados pelo transporte rodoviário, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 2,73E-07 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 0,00E+00 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 6,78E+00 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 1,39E-08 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 4,57E-01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 1,68E-02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 9,30E+01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 4,34E-04 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 1,97E-03 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 3,96E-02 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 9,44E-03 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

## 4.11. PRODUÇÃO DO INVERSOR

Na Tabela 23 estão descritos os resultados obtidos para a produção do inversor.

Tabela 23. Valores dos impactos ambientais gerados pela produção do inversor, divididos por categorias.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE                             |
|---|----------|-------------------------------------|
| Depleção abiótica                           | 4,61E-03 | kg Sb eq                            |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 3,82E+02 | MJ                                  |
| Aquecimento global                          | 2,87E+01 | kg CO <sub>2</sub> eq               |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 2,45E-06 | kg CFC-11 eq                        |
| Toxicidade humana                           | 5,00E+01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 3,36E+01 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 1,20E+05 | kg 1,4-DB eq                        |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 2,98E-02 | kg 1,4-DB eq                        |
| Formação de compostos foto-oxidantes        | 2,24E-02 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq |
| Acidificação                                | 2,52E-01 | kg SO <sub>2</sub> eq               |
| Eutrofização                                | 1,32E-01 | kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq |

O inversor foi produzido separadamente à cadeia produtiva do painel fotovoltaico, assim como os impactos causados pelo transporte dos painéis ocorreu de forma isolada, e para ter seus resultados relacionados ao restante do processo, os valores dos impactos puderam ser somados aos resultados finais. É como se estas etapas não fornecessem o valor acumulado, como as anteriores atuaram, e sim apenas o valor da etapa isoladamente, a única diferença é que não há a necessidade de excluir o impacto gerado por nenhuma matéria prima que surgiu neste processo pois suas etapas anteriores não foram analisadas. O seu impacto final gerado em todo o fluxo analisado do processo de produção do painel é de importante foco. Em duas categorias esta etapa mostra-se como a mais representativa, apresentando praticamente os mesmos valores que a produção do silício monocristalino, são elas a ecotoxicidade aquática de água doce e a formação fotooxidante, respectivamente na ordem de 24,6% e 20,9% de representatividade.

## 5. RESULTADOS

O gráfico a seguir da Figura 30 foi gerado pelo programa SimaPro após a comparação de todas as fases do processo de produção do painel fotovoltaico mais o seu inversor de frequência e os transportes, e demonstra o crescimento de impactos ambientais causados ao decorrer das etapas de produção, separados por categorias, sendo que os processos pertencentes ao painel estão de forma acumulativa.

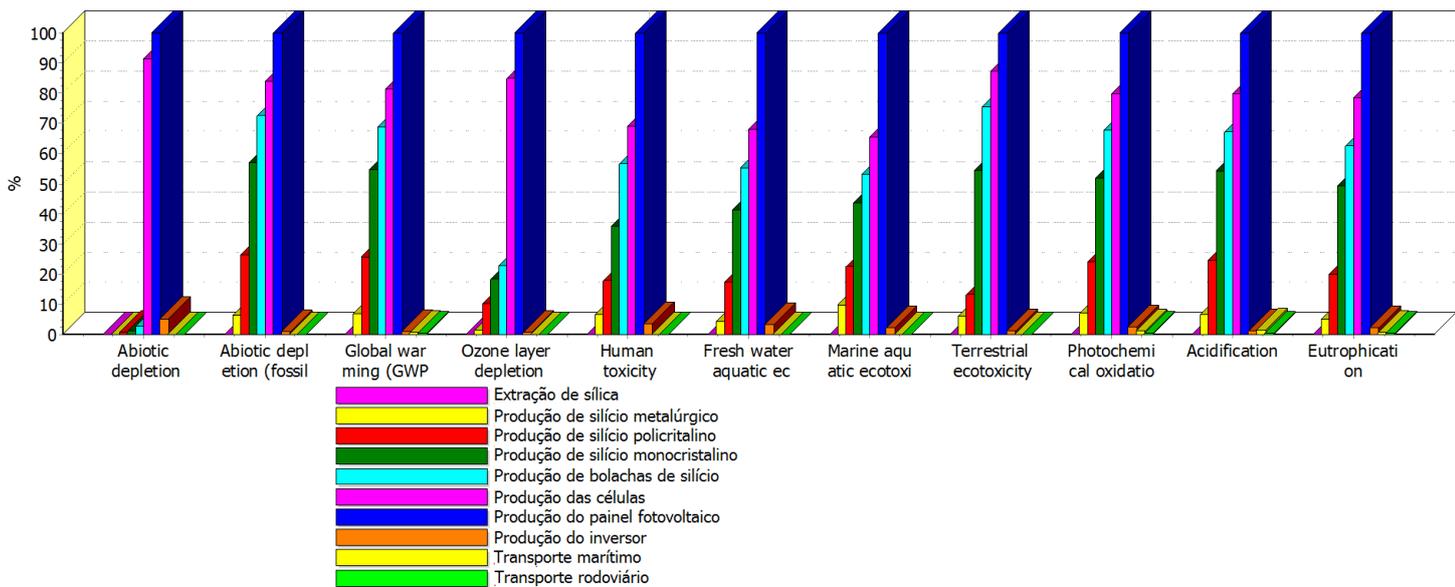


Figura 30 - Gráfico do impacto das etapas de produção de um painel fotovoltaico, seu transporte e um inversor de frequência separados por categorias.

A fim de demonstrar melhor visualização dos dados obtidos pelo inventário, serão analisadas as contribuições de cada etapa do processo todo em relação às categorias de impacto, representadas nos próximos gráficos. Todas as legendas apresentadas dentro dos gráficos estão resumidas no nome do principal produto que é gerado ao fim de cada processo.

### 5.1. DEPLEÇÃO ABIÓTICA

A depleção abiótica de recursos minerais que representa o consumo (ou a extração) de recursos não vivos do ambiente é principalmente causada pelo processo de produção da célula solar, do painel e do inversor. Estes resultados podem ser entendidos quando se analisa a

quantidade e dimensão dos elementos de entrada dos três componentes. A célula utiliza uma pasta de metalização que é mostrada pelos inventários do Ecoinvent como potencialmente consumidora de recursos, para os componentes do painel também é necessária a extração de insumos primários em alta quantidade, proporcionalmente, para 1 m<sup>2</sup> de painel utiliza-se 10 kg de vidro solar. E o inversor, por sua vez, carrega grandes proporções de matérias primas e elementos de entrada para produzir seus componentes eletrônicos e estruturais, e dentre estes, alguns com contribuição representativa podem ser citados, como os transistores, resistores e componentes plásticos. Sua representação está na Figura 31.

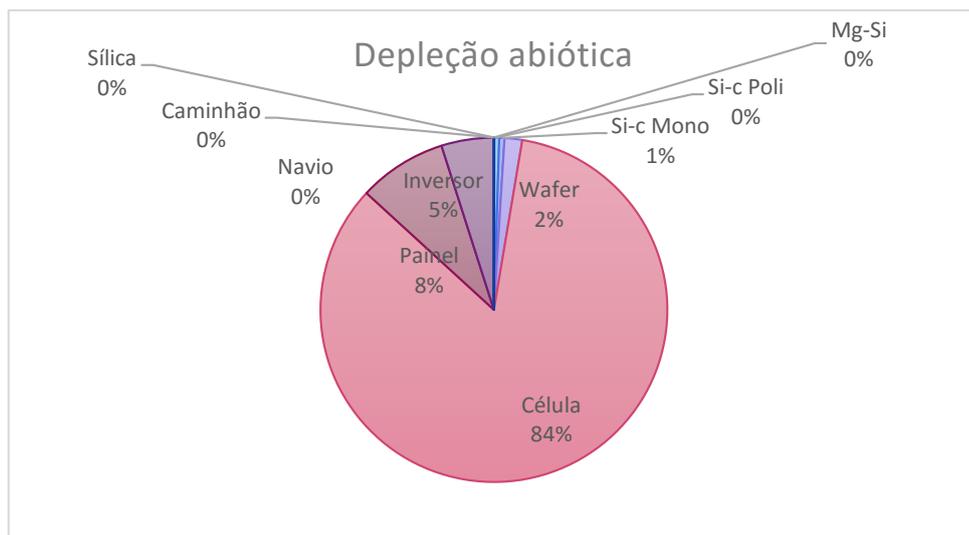


Figura 31 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção abiótica de recursos minerais.

## 5.2. DEPLEÇÃO ABIÓTICA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A depleção abiótica dos combustíveis fósseis está relacionada com a retirada destes combustíveis de suas reservas e suas taxas de desacumulação. Eles são consumidos por todas as etapas do processo em geral e, entretanto, as fases de purificação do silício são as principais responsáveis por esta depleção, consumindo metade de todo recurso utilizado ao longo do processo. Suas contribuições estão na Figura 32.

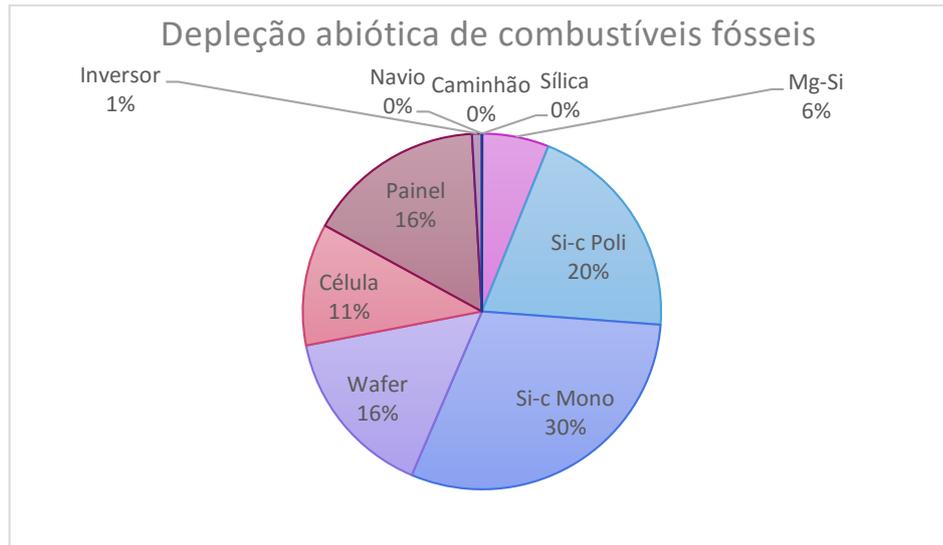


Figura 32 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção abiótica combustíveis fósseis.

### 5.3. AQUECIMENTO GLOBAL

O aquecimento global é medido pela emissão de componentes que tem potencial de causar efeito estufa. Este também é fortemente causado devido à purificação do silício para grau solar e monocristalino. Alguns dos gases mais potenciais para causar este impacto como o HFC-23, CFC-13 e variáveis do propano são encontrados na emissão desta cadeia produtiva, e por isso, o resultado é um fator de equivalência de emissões de gás carbônico relativamente alto. As contribuições de todos os processos estão no gráfico da Figura 33.

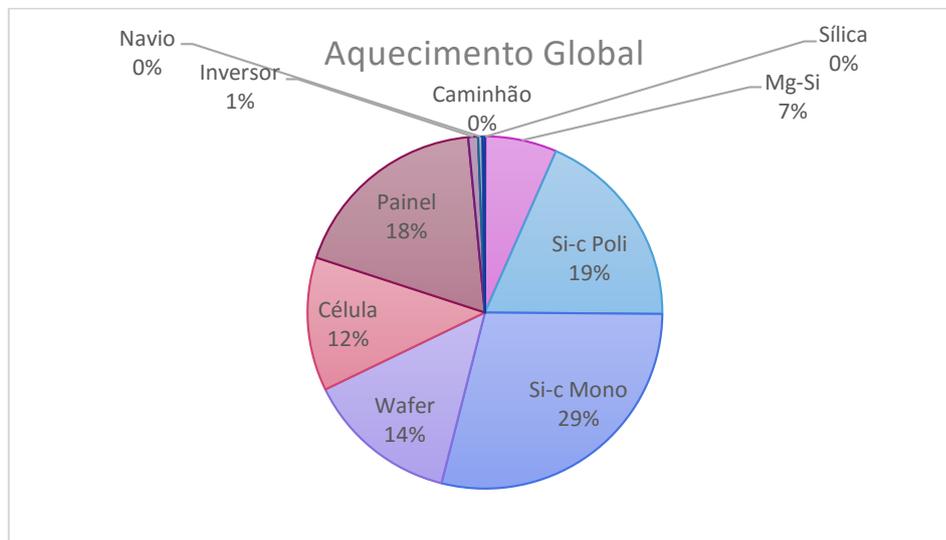


Figura 33 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo no aquecimento global.

## 5.4. DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO

A depleção do ozônio a níveis estratosféricos ocorre principalmente pela produção da célula solar. Esta possui níveis de emissões para o ar de elementos reativos que causam esta degradação do ozônio. Na Figura 34 estão demonstradas essas contribuições.

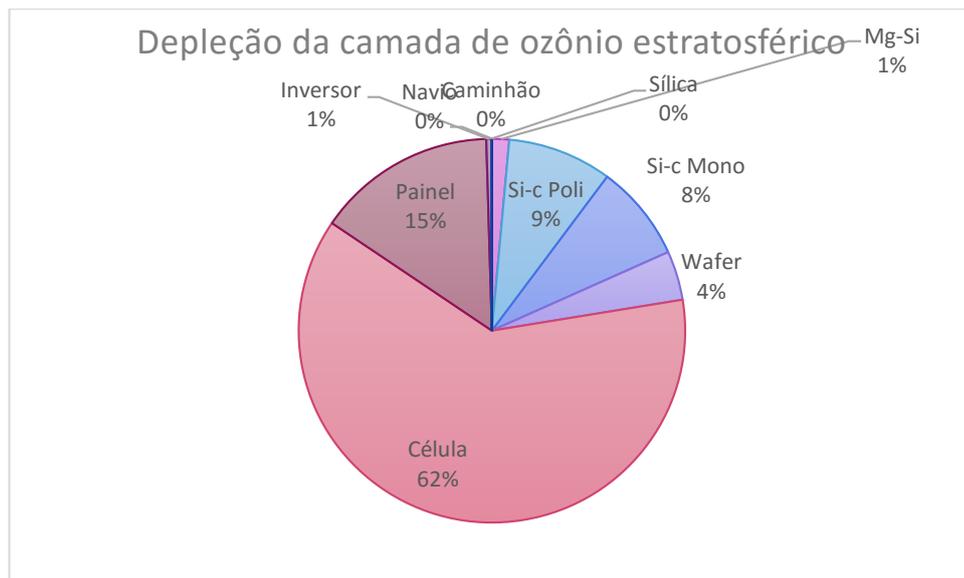


Figura 34 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na depleção de ozônio estratosférico.

## 5.5. TOXICIDADE HUMANA

A toxicidade humana é contribuída também por todas as etapas do processo inteiro, não havendo alguma fase que mereça atenção ou que cause fortemente este impacto. Uma das características da modelagem para cálculo deste indicador de impacto é que as emissões que alcançam solo, água, ar e a geração de resíduos podem contribuir para esta categoria, portanto é esperado que todas as fases possuam uma certa contribuição, conforme Figura 35.

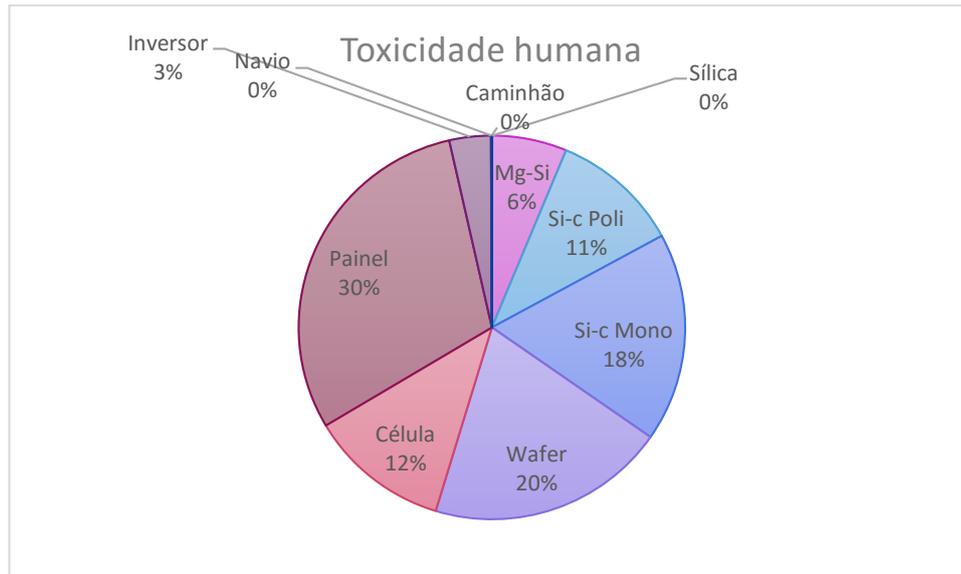


Figura 35 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na toxicidade humana.

## 5.6. ECOTOXICIDADE AQUÁTICA (ÁGUA DOCE)

A ecotoxicidade aquática em águas doces, também denominada ecotoxicidade em água fresca, é principalmente causada por elementos de esfera agrícola, segundo o cálculo do CML. O processo da produção fotovoltaica não possui grandes emissões que contribuam para este tipo de ecotoxicidade quando comparado a outros processos similares, mas ainda assim, algumas etapas que exigem maior nível tecnológico de produção são mais responsáveis por este impacto ambiental, como a produção de silício monocristalino. A produção do inversor não é responsável por uma parte representativa deste impacto, entretanto se este fosse utilizado por uma quantidade menor de painéis, teria sua intensidade relativa aumentada e poderia demonstrar um valor mais impactante. Estão representadas na Figura 36.

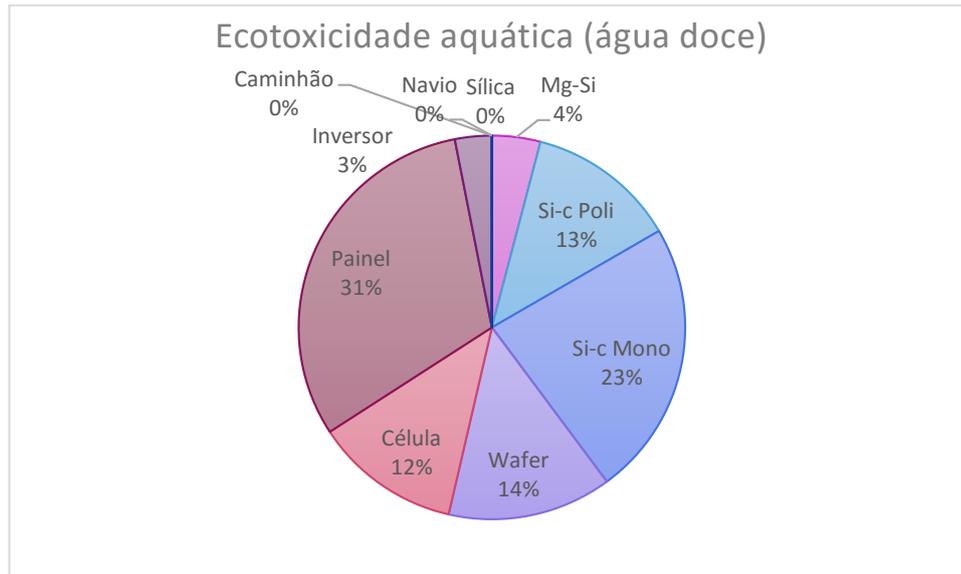


Figura 36 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade aquática em água doce.

## 5.7. ECOTOXICIDADE AQUÁTICA (MARINHA)

A ecotoxicidade aquática de águas marinhas possui em sua caracterização pelo método CML principalmente emissões oceânicas e agrícolas, entretanto, indiretamente, muitas outras emissões existentes nos processos da produção do painel envolvem componentes responsáveis pela ecotoxicidade dos mares. A contribuição de cada processo está demonstrada no gráfico da Figura 37, onde o painel representa a maior contribuição do impacto total causado.

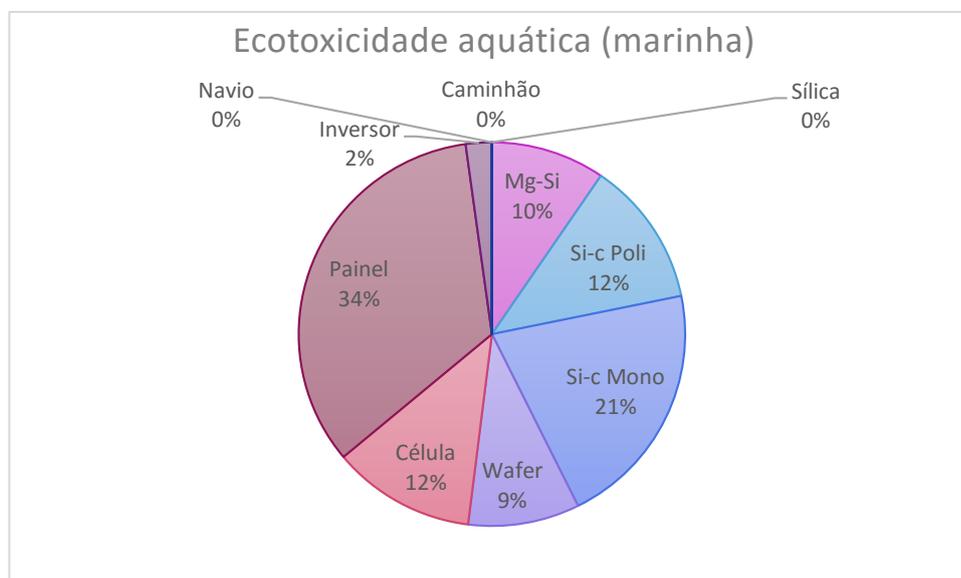


Figura 37 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade aquática em águas marinhas.

## 5.8. ECOTOXICIDADE TERRESTRE

A ecotoxicidade terrestre é em grande parte causada pela produção do silício monocristalino, pois este demonstra altos níveis de emissão de alguns componentes responsáveis por este tipo de poluição, dentre eles podem ser citados alguns benzenos, formóis, glifosatos, entre muitos outros. Na Figura 38 estão ilustradas estas contribuições.

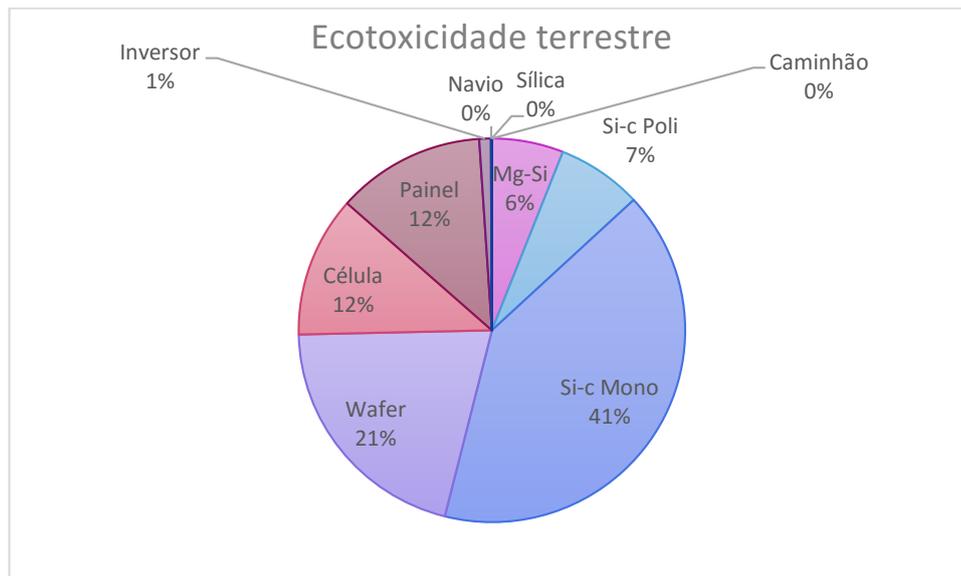


Figura 38 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na ecotoxicidade terrestre.

## 5.9. FORMAÇÃO DE COMPOSTOS FOTO-OXIDANTES

A formação fotooxidante também possui contribuição das diversas etapas da produção do painel, destacando também o método Czochralski de purificação como o principal responsável por este impacto, conforme mostra a Figura 39.

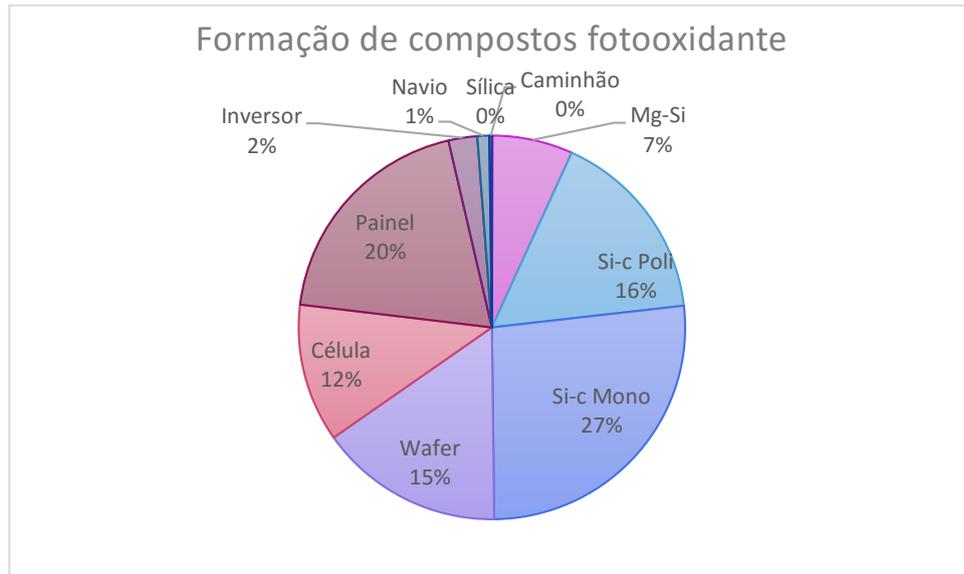


Figura 39 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na formação de compostos foto-oxidantes.

## 5.10. ACIDIFICAÇÃO

A acidificação é gerada por emissões que estão presentes nos processos de purificação do silício e em toda a produção dos produtos do painel, como saídas de amônia, ácido sulfúrico e óxidos sulfúrico. Na Figura 40 estão demonstrados estes processos.

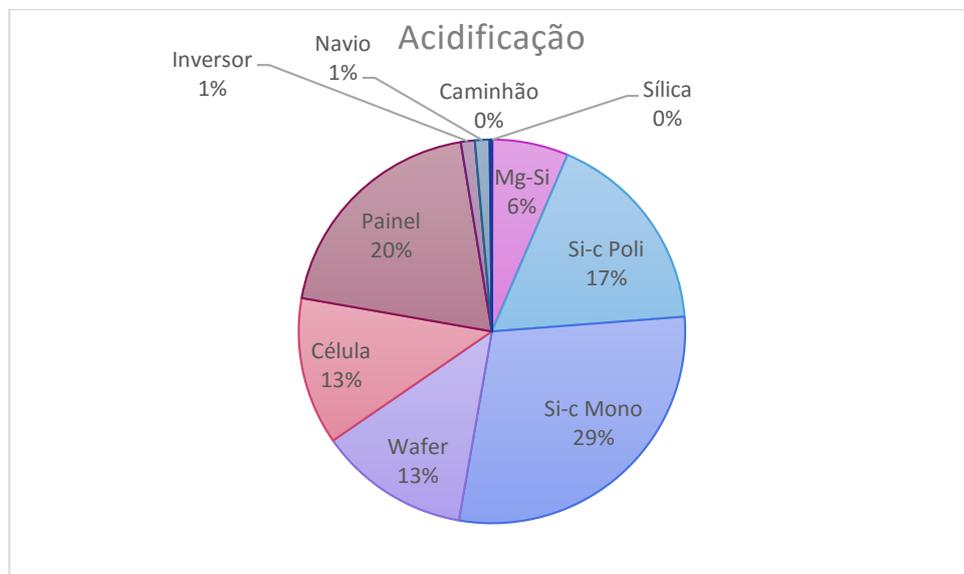


Figura 40 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na acidificação.

## 5.11. EUTROFIZAÇÃO

Por fim, a eutrofização é gerada principalmente pela etapa de produção da célula solar, onde esta representa praticamente dois terços de todo impacto gerado por esta categoria. Isso pode ser explicado pelo fato da produção das células apresentar saídas como a emissão de elementos com fósforo, nitrogênio e amônia, principais contribuintes para a eutrofização de ambientes. A Figura 41 contém o gráfico de cada contribuição.

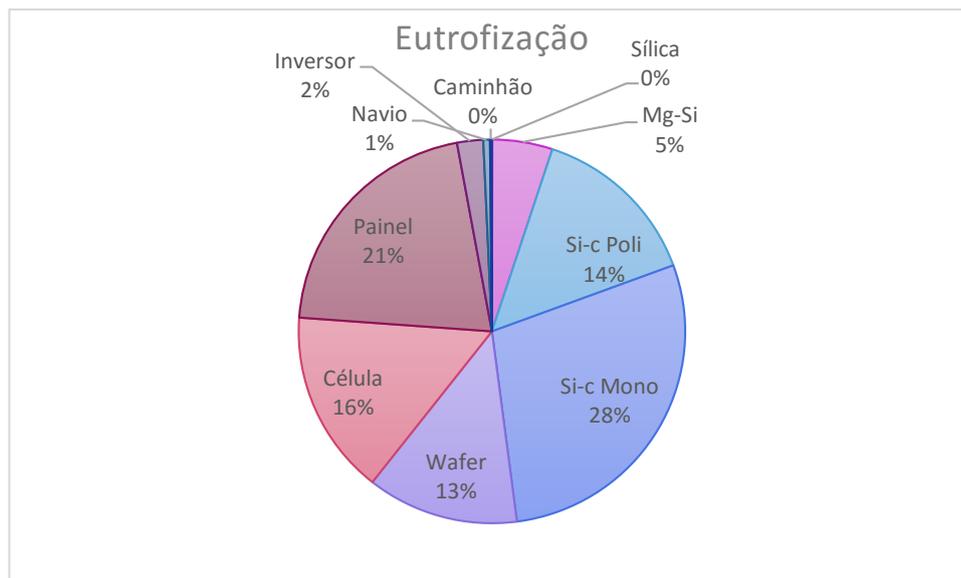


Figura 41 - Contribuição de cada etapa do processo produtivo na eutrofização.

## 5.12. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando num todo, os valores finais em unidades funcionais de todo processo (somado a etapa de produção do painel fotovoltaico com o inversor e os transportes), está demonstrado na Tabela 24 a seguir:

Tabela 24. Resultado final da Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de 250 kWh de energia produzida através de painel fotovoltaico com um inversor de 500W.

| CATEGORIA DE IMPACTO                        | VALOR    | UNIDADE      |
|---|----------|--------------|
| Depleção abiótica                           | 9,43E-02 | kg Sb eq     |
| Depleção abiótica de combustíveis fósseis   | 4,30E+04 | MJ           |
| Aquecimento Global                          | 3,23E+03 | kg CO2 eq    |
| Depleção da camada de ozônio estratosférico | 5,34E-04 | kg CFC-11 eq |
| Toxicidade humana                           | 1,44E+03 | kg 1,4-DB eq |
| Ecotoxicidade aquática (água doce)          | 1,09E+03 | kg 1,4-DB eq |
| Ecotoxicidade aquática (marinha)            | 5,51E+06 | kg 1,4-DB eq |
| Ecotoxicidade terrestre                     | 3,07E+00 | kg 1,4-DB eq |
| Formação fotooxidante                       | 9,31E-01 | kg C2H4 eq   |
| Acidificação                                | 2,16E+01 | kg SO2 eq    |
| Eutrofização                                | 6,02E+00 | kg PO4 eq    |

### 5.13. INTERPRETAÇÃO

Na Figura 42 está um resumo de todos os gráficos mostrados nos tópicos anteriores com a finalidade de facilitar sua visualização:



Figura 42 - Resumo dos resultados de todas as categorias de impacto.

Através da análise dos impactos gerados pela cadeia produtiva estudada e pelo inventário de dados obtido através de diversas fontes, foi possível coletar informações muito importantes e de sensibilidade apurada dentre as possibilidades do estudo, com exceção da fase final de descarte, a qual não foi possível realizar um estudo detalhado quantitativamente por falta de informações sobre o cenário de disposição final dos painéis fotovoltaicos.

Foi possível encontrar dados válidos e confiáveis para todas as etapas e fluxos calculados, entretanto não foi possível analisar uma situação mais pontual como por exemplo toda sua produção e comercialização apenas no Brasil, logo, as informações coletadas que são em relações globais, podem apresentar certa margem de erro considerável.

Não é possível obter simplesmente uma resposta objetiva afirmando se o uso da tecnologia fotovoltaica é ou não viável ambientalmente, pois esta afirmação depende de outros fatores em se tratando de uma situação real. Entretanto, é possível afirmar que sua cadeia produtiva pode ter impactos muito menores se tomadas algumas mudanças em relação à produção que ocorre na maioria dos casos dos painéis fotovoltaicos, como menor gasto com transporte (distâncias menores entre extração e coleta de insumos e local de faturamento e produção) ou substituição das células de silício monocristalinas por policristalinas, as quais passariam por uma etapa a menos de purificação além de ser uma das mais impactantes para diversas categorias, ou ainda uma busca por um tratamento das emissões causadas ao longo de sua produção, visando um possível aproveitamento destes elementos.

## **5.14. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, com informações suficientes para iniciar uma busca mais abrangente sobre os reais impactos da geração de energia fotovoltaica no Brasil, inclusive pelo fato de existirem poucas informações sobre esta etapa do ciclo de vida dos painéis, além de muitos trabalhos publicados por diversos autores não considerarem as etapas anteriores à produção das células, logo, este trabalho deverá fornecer informações úteis para a busca e análise de próximos estudos sobre os impactos ambientais dos painéis e a sua viabilidade em determinadas aplicações.

No cenário brasileiro onde é mais comum o sistema conectado à rede, foi importante considerar a produção do inversor de corrente, um importante equipamento para uso neste tipo de sistema de geração, o qual tem valores relativos e estes devem levar em consideração o fato de que quanto maior for a área produzida de painéis, menor será sua contribuição para os impactos relativamente, pois este permanecerá sendo uma unidade. Obviamente outros inversores de outras potências podem ser utilizados, mas para uma vasta aplicação do uso de painéis, o utilizado neste trabalho mostra-se viável.

Os principais produtos gerados na indústria fotovoltaica são os painéis de silício monocristalinos e policristalinos, onde há uma grande divergência de autores sobre a eficiência dos dois, entretanto, estudos mais recentes mostram que a eficiência que vem sendo melhorada a cada ano está em fase de desaceleração, portanto, não é esperado que haja grandes mudanças dos valores mais altos alcançados até agora, e estes, estão cada vez tornando um tipo de painel com eficiências muito próximas a do outro tipo.

Segundo diversos autores, as empresas que produzem painéis fotovoltaicos trabalham com dois modelos cristalinos, tanto o de silício monocristalino quanto o de silício policristalino, inclusive devido às etapas de corte de lingote, montagem dos módulos e painéis serem semelhantes e ocorrerem simultaneamente nos processos de produção das indústrias, e estes costumam trabalhar com os dois tipos para atender qualquer que seja a necessidade de seus clientes. A mudança que ocorre deste para o painel policristalino está apenas na etapa de purificação através do método Czochralski. Caso fosse utilizada a cadeia do painel policristalino, esta etapa poderia ser removida do fluxograma, e o silício a grau solar produzido pelo método de Siemens modificado seria utilizado diretamente na etapa de produção das wafers, sem maiores mudanças. Entretanto é possível analisar que as placas de silício policristalino apesar de seu menor rendimento, possuem grande vantagem ambiental (e financeira) por dependerem de uma etapa a menos de produção que é a principal contribuinte na maioria das categorias de impactos (6 das 11 mencionadas). Considera-se então, que uma alternativa viável seja o aumento na produção de painéis de silício policristalino, que além destas vantagens, é mais barata e pode aumentar a possibilidade de esta ser inserida em mais residências e estabelecimentos.

Como grande parte dos impactos causados ocorre devido ao consumo energético das fases de produção do painel e suas matérias primas, e esta energia está relacionada à um mix energético dependente de combustíveis fósseis que são responsáveis por inúmeras emissões poluentes, e a tendência global está migrando em rumo ao uso de energias mais limpas, como o exemplo da China que já demonstra diversos investimentos e mudanças neste sentido, pode-se considerar a energia oriunda de painéis fotovoltaicos viável e vantajosa, tanto para os seus consumidores diretos, quanto para toda a sociedade e o meio ambiente. No momento presente já é possível considerar que o investimento nesta fonte é algo possível e interessante, logo, num futuro próximo será cada vez mais fácil e acessível a migração para o uso de painéis

fotovoltaicos como fonte parcial da energia elétrica consumida, mas este caminho poderá ser acelerado de acordo com as mudanças nos quadros políticos e econômicos de todo o mundo.

Foi usado um potencial médio global para analisar toda a cadeia produtiva que ocorre desde a extração das matérias primas até a produção do painel fotovoltaico e de um inversor, portanto, as situações devem ser consideradas levando este fator como um resultado muito abrangente e muitas vezes fora da realidade de determinado local.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2018), a média das emissões de gás carbônico por energia gerada através das fontes utilizadas no Brasil em 2018 resultarão em 0,11 kg CO<sub>2</sub>/kWh. O indicador de categoria que pode ser comparado a este valor é o aquecimento global, onde é obtido o valor de 3231,3949 kg CO<sub>2</sub> na geração de 250 kWh, ou seja, o valor médio de emissão de gás carbônico para a produção de energia através do painel fotovoltaico é de 0,1293 kg CO<sub>2</sub>/kWh, o que demonstra que a instalação de painéis no país pode aumentar ligeiramente o seu potencial de aquecimento global de acordo com este indicador.

Foi possível perceber que os incentivos brasileiros estão atrasados em relação a outros países que produzem painéis fotovoltaicos. Haveria um menor gasto com importação se utilizasse o silício e os outros componentes daqui e investimento na tecnologia, além de incentivos fiscais para a compra e instalação de painéis, o que auxiliaria a empresas a vender em larga escala e assim diminuir o preço unitário de seus produtos e serviços. O Brasil conta com muitos recursos, mas o uso deles é muito limitado devido aos seus impostos, o que muitas vezes facilita para empresas externas extraírem seus recursos, modificarem fora daqui e depois vender muitas vezes mais caro. Se essas medidas fossem modificadas, provavelmente em breve existiriam dados reais sobre a produção brasileira de painéis cristalinos e estes seriam provavelmente muito menos impactantes ao meio ambiente do que os dados apresentados no presente trabalho, além de aproximar os consumidores dos fabricantes, o que permitiria esperar uma logística reversa mais eficiente.

Utilizou-se nesse estudo um mix energético baseado em dados mundiais, entretanto a realidade mostra que no mundo o painel é produzido principalmente na China, cuja matriz energética é o carvão, o qual representa um grande responsável pelas emissões atmosféricas e vários impactos ambientais mais agravantes comparado à energia gerada por hidroeletricidade, por exemplo, que é a grande dominante do cenário energético brasileiro, portanto, caso este

estudo analisasse uma situação no qual as entradas dos sistemas baseiam-se em dados chineses até a produção do painel, podemos esperar que muitos impactos relacionados a poluentes atmosféricos seriam muito mais graves, e ao mesmo tempo, como o Brasil mostrou-se preparado para produzir todas as matérias primas e insumos necessários para toda a produção dos painéis e inversores, uma análise sobre o impacto desta produção realizada exclusivamente em território nacional, poderiam mostrar valores de impactos de diversas categorias com menores prejuízos para o meio ambiente.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com a ACV dos painéis fotovoltaicos considerando desde a extração de sílica até a produção do painel em conjunto com um inversor de frequência, foi possível perceber que seu impacto final foi similar à média dos impactos gerados no Brasil em 2018 utilizando suas fontes energéticas atuais. Isso quer dizer que a substituição das fontes atuais no Brasil pela energia solar, não diminuiria os impactos causados pelo menos em relação ao potencial de aquecimento global, que se mostra um pouco abaixo atualmente do que a produção dos painéis seria capaz de causar na situação considerada.

Os impactos causados pelo transporte dos painéis desde seu local de produção até o local de utilização não foram relevantes em relação ao restante do processo, entretanto, a quantidade de painéis considerada foi pequena perto do carregamento total considerada nas situações do navio e caminhão utilizados, portanto sua participação de impactos nos mesmos seria realmente menor, mas deve-se levar em consideração que em uma situação real, a carga transportada pode ser dezenas de vezes maior e em condições mais atenuantes no consumo energético e conseqüente emissão de poluentes. Entretanto, a maior contribuição no total dos impactos gerados nessa cadeia de produção sendo finalizada no China não está no fato do transporte utilizado, e sim na matriz energética utilizada na China que faz com que os painéis resultem em valores altos de emissões de poluentes.

### 6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os estudos que desejarem seguir esta linha de pesquisa devem levar em consideração os seguintes pontos:

- Pesquisar dados exclusivamente do Brasil ou ainda do estado ou região que se deseja aplicar.
- Realização de um estudo prático sobre as reais eficiências, gastos e emissões das etapas produtivas dos painéis.
- Tentativa de coleta de dados diretamente nas empresas que atuam há mais tempo neste ramo no país.
- Atualizar-se sobre a situação de descarte do momento para uma ACV mais completa.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, p.1-10, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, p.1-10, 2006.

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios. Dr. Rodrigo Lopes Sauaia. Seminário Desafios da Energia Elétrica no Brasil. Brasília. 2017.

ACV Brasil, Softwares, **Ecoinvent**, Disponível em <https://acvbrasil.com.br/software/ecoinvent> Acesso em Setembro, 2018.

ADRIANO, G. L. M., **Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal**. Dissertação FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica – ANEEL 2ª Edição; Brasília. 243p. ANEEL, 2005.**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Guia Para Utilização De Recursos Da Conta Consumo De Combustíveis – CCC**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/Manual\\_CCCrev.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/Manual_CCCrev.pdf)> Acesso em: Janeiro de 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015.**

ARAMIZU, J. **Modelagem E Análise De Desempenho De Um Sistema Fotovoltaico Em Operação Isolada E Em Paralelo Com Uma Rede De Distribuição De Energia Elétrica**. USP – Escola de Engenharia de São Carlos. 2010.

BAIRD, C. **Química ambiental**. (Trad. Maria Angeles Lobo Recio; Luiz Carlos Marques

Carrera). 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BARROS, E. V. **A Matriz Energética Mundial E A Competitividade Das Nações: Bases De Uma Nova Geopolítica**. UFF, Departamento de Eng. de Produção. ENGEVISTA, v. 9, n. 1, p. 47-56, junho 2007.

BEZERRA, J. L., LIRA, M. A. T., SILVA, E. A. **Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada a Painéis Fotovoltaicos**. Universidade Federal do Piauí, Departamento de Recursos Hídricos. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

BROWER, K. A., **Methods of concerns for disposal of photovoltaic solar panels**. Project Report (Master of Science in Engineering) – Department of General Engineering. San Jose State University, San Jose. 2011.

BNDES. **A Cadeia Produtiva Dobcobre: Panorama Internacional E Nacional**. Setorial de Mineração e Metalurgia do BNDES. 1997.

BNDES. **A indústria do alumínio: Estrutura E Tendências**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. BNDES Setorial 33, p. 43-88. 2010.

BNDES. **Considerações Sobre A Indústria Do Vidro No Brasil**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, p. 101-138, set. 2007.

CALILI, R. F. **Diretrizes para um Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais**. 4 th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XIV Congreso de Ingeniería de Organización Donostia- San Sebastián , September 8th -10th 2010.

CAMPOLINA, J. M., SIGRIST, C. S. L., MORIS, V. A. S., **Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - V. 19, n. 2, mai-ago, p. 735-750. 2015.

CAMPOS, M. G. **Abordagem Do Ciclo De Vida Na Avaliação de Impactos Ambientais no Processamento Primário Offshore**. Rio de Janeiro. Nov 2012.

CARDOSO, J. G. R., CARVALHO, P. S. R., FONSECA, P. S. M., SILVA, M. M., ROCIO, M. A. R. **A indústria do alumínio: estruturas e tendências**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. BNDES Setorial 33, p. 43-88. 2010.

CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos: Características E Associações**, Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Universidade do Minho, 2010.

CASTRO, R. M. G., **Introdução À Energia Fotovoltaica: Energias Renováveis E Produção Descentralizada**. UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA. INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO - DEEC / Secção de Energia. Novembro de 2002.

CELINSKI, T. M., CELINSKI, V. G., REZENDE, H. G., FERREIRA, J. S., **Perspectivas Para Reuso E Reciclagem Do Lixo Eletrônico**. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Londrina – PR. 2011.

**Clean Energy Reviews**, Jason Svarc, August 20, 2018. Disponível em <<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>>, Acesso em Setembro, 2018.

CHAPIN, D. M., FULLER, C. S., PEARSON, G. L., **A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power**, Journal of Applied Physics 25, 1954.

CHAPMAN, P. M. **Emerging substances — Emerging problems? Environmental Toxicology and Chemistry**, v.25, n.6, p.1445-1447. 2006.

CHEHEBE, J. R. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark.,CNI,1997.

CHOI, J. K., FRILEY, P., ALFSTAD, T. **Implications of energy policy on a product system's dynamic life cycle environmental impact: Survey and model**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jun 2012.

CONAMA, RESOLUÇÃO Nº 001, Ministério do Meio Ambiente – MMA, **LICENCIAMENTO AMBIENTAL** – Normas e procedimentos de 23 de janeiro de 1986.

CORTEZ, R. J. M., **Sistema De Seguimento Solar Em Produção De Energia Fotovoltaica**, Dissertação para o Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. 2013.

CRESESB. **Centro De Referência Para A Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito**. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2000.

CRESESB. **Centro De Referência Para A Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito**, 4. Energia Solar Fotovoltaica. Pg4. 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321). Acesso em agosto, 2018.

DANA, R., **Thin Film Makes Solar Headlines**, Solar Tribune. June 17, 2015.

DIAS, P. R. **Caracterização e Reciclagem de Materiais de Módulos Fotovoltaicos**. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

ENKHARDT, S. **Prices for monocrystalline solar modules are picking up**. PV Magazine Germany. Outubro de 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, **Balanco Energético Nacional (BEN) 2017**: Ano base 2016, 2017. Disponível em <https://ben.epe.gov.br>. Acesso em julho 2018.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.

FERREIRA, L. E. B. **Diretor-geral do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**. ONS. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-12/ons-cri-se-faz-consumo-de-energia-em-2016-se-manter-no-mesmo-nivel-de-2015>. Acesso em junho, 2018.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H. J; DOKA, G.; DONES, R.; HECK, T.; HELLWEG, S.; HISCHIER, R.; NEMECEK, T.; REBITZER, G.; SPIELMANN, M. **The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. International Journal Life Cycle Assessment**, v. 10, n° 1, p. 3 – 9, 2005.

GARCIA, J. OLIVEIRA, L. JOHN, V. M., **Emissões De Gases Do Efeito Estufa E Conteúdo Energético De Placas Fotovoltaicas Na America Latina.** Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. Maceió – AL. Novembro de 2014.

GERBINET, S., BELBOOM, S. & LÉONARD, A. **Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, pp.747–753. 2014.

GLOBAL SOLAR ATLAS, SWERA, Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/?c=-20.509355,-37.705078,5&s=-22.4237,-45.4524>>, Acesso em Janeiro de 2019.

GOEDKOOP, M., SCHRYVER, A. D., OELE, M., DURKSZ, S., ROEST, D. **Introduction to LCA with SimaPro 7.** USA, PRé Consultants, p.88. 2010.

GOODSTEIN, D. **Out Of Gas: The End Of The Age Of Oil.** New York: W. W. Norton Company, 2004.

GUINÉE, J.B. **Handbook On Life Cycle Assessment: Operational Guide To The ISO Standards.** Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.2002.

GREEN, M., **Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years,** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005.

HERNAIS, C. A., ROSA, E. O. R., BARROS, H. M. **Observações sobre o Desenvolvimento Tecnológico e os Ciclos da Indústria de Polímeros no Brasil.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 10, n° 3, p. 149-154, 2000.

IEA-PVPS- International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. **Snapshot Of Global Photovoltaic Markets** (2018). Disponível em: <[www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)>. Acesso em: julho de 2018.

IEA-PVPS- International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems Programme. **Annual Report 2013** (2014). Disponível em: [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org). Acesso em: julho de 2018.

Instituto Ideal, **Simulador Solar**. Disponível em: <<http://institutoideal.org/projetos/>>, Acesso em Fevereiro de 2019.

JUNGBLUTH N., STUCKI M, FRISCHKNECHT R., AND S. BUESSER (2010) **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.

Jungbluth N. and Itten R. **Umweltbelastungen des Konsums in der Schweiz und in der Stadt Zürich: Grundlegenden Daten und Reduktionspotentiale**. ESUservices GmbH im Auftrag der Stadt Zürich (unpublished), Zürich. Jungbluth N. and Itten R., Zürich. 2012

KOHLRAUSCH, A. K. **A Rotulagem Ambiental no Auxílio à Formação de Consumidores Conscientes**. Dissertação de Mestrado - UFSC. Florianópolis, 2003.

LO, K. **A critical review of China's rapidly developing renewable energy and energy efficiency policies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 29, p. 508-516, 2014.

LUNARDI, M. M., ALVAREZ-GAITAN, J. P., BILBAO, J. I., CORKISH, R. **Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules**. Applied Sciences. MDPI, 2018, 8, 1396. August 2018.

LUZ, L. M., FRANCISCO, A. C., KOVALESKI, J. L., GAIA, S., **Aplicación y utilización del análisis de ciclo de vida en la industria**. Revista Espacios. Vol. 32 (4). Pág. 28. 2011.

MAIA, L. A. G. **Estudo Comparativo de Produção entre Centrais Fotovoltaicas de Silício Policristalino e Amorfo**. Dissertação do Mestrado em Energias Sustentáveis. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Dpto de Engenharia Mecânica. Novembro de 2016.

Manual do Sistema ILCD. **Sistema internacional de referência de dados do ciclo de produtos e processos**: Guia geral para avaliações do ciclo de vida: orientações detalhadas (União Europeia - tradução de Luiz Marcos Vasconcelos). Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia -Ibict: Brasília, 2014.

MARIANI, C. F. **Testes de Toxicidade**. Ecotoxicologia. Ecologia USP. 15p. Disponível em: <[http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?view=article&id=143:-ecotoxicologia&format=pdf&option=com\\_content&Itemid=356](http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?view=article&id=143:-ecotoxicologia&format=pdf&option=com_content&Itemid=356)> Acesso em: Setembro de 2018

MARTINS, R., FERREIRA, I. & FORTUNATO, E., **Materiais e dispositivos fotovoltaicos**. Universidade Nova de Lisboa - Monte da Caparica: sn. 2012.

MATSUMOTO, A. **Desenvolvimento de Células Fotovoltaicas Orgânicas e Flexíveis**. Dissertação, UNICAMP, 2013.

McDONALD, N. C., PEARCE, J. M. **Producer responsibility and recycling solar photovoltaics modules**. Energy policy, 38, 7041 – 7047. 2010.

MENDES, N. C. **Métodos E Modelos De Caracterização Para A Avaliação De Impacto Do Ciclo De Vida**: Análise e Subsídios para a Aplicação no Brasil. USP, São Carlos. 2013.

MIAN, H. M., **Análise Regulatória Da Participação Da Energia Solar Fotovoltaica E Estudo Do Melhor Mecanismo De Suporte Para Inserir Na Matriz Elétrica Brasileira**. Dissertação De Mestrado Em Engenharia Elétrica, Universidade De Brasília, Faculdade De Tecnologia, Dpto. De Engenharia Elétrica, Brasília, maio de 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, **Geração de Energia Elétrica no Brasil e CO<sub>2</sub>**, SBCS10, Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/255/\\_arquivos/3\\_como\\_medir\\_creditos\\_de\\_carbono\\_255.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/255/_arquivos/3_como_medir_creditos_de_carbono_255.pdf)>, Acesso em Fevereiro, 2019.

MME – Ministério de Minas e Energia, **Secretaria De Geologia, Mineração E Transformação Mineral-Sgm, A Mineração Brasileira**. Produto 27 – Quartzos; Relatório Técnico 37-Perfil Do Quartzos. Emílio Lobato. Projeto Estal - Projeto De Assistência Técnica Ao Setor De Energia. Agosto 2009

MORI, M., SANTOS, R. L. C., SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do silício: Processos de obtenção e impactos ambientais**. Série Tecnologia Ambiental. CETEM – Centro De Tecnologia Mineral/ MCT. 42p. 2007.

NASCIMENTO, P. A. M. M., **Considerações Sobre As Indústrias De Equipamentos Para Produção De Energias Eólica E Solar Fotovoltaica E Suas Dimensões Científicas No Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2015.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar No Brasil: Situação e Perspectivas**. Consultor Legislativo da Área XII: Recursos Minerais, Hídricos e Energéticos. Estudo técnico – Câmara dos deputados, Consultoria Legislativa, 2017.

NJ, **Solar panels invented in N.J. 55 years ago**. October 5, 2010. Disponível em <[https://www.nj.com/business/index.ssf/2010/10/solar\\_panels.html](https://www.nj.com/business/index.ssf/2010/10/solar_panels.html)>, Acesso em janeiro de 2019.

NOBRE, C. A. **Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país**. Parcerias Estratégicas, Vol. 6, No 12. 2001.

OLIVEIRA, A. S. **Avaliação De Impactos Ambientais Do Módulo Fotovoltaico: Produção E Uso Como Fonte De Energia Elétrica**. Dissertação De Mestrado Em Ciências Mecânicas. Universidade De Brasília. Faculdade De Tecnologia – Dpto. De Engenharia Mecânica, 2017.

OLSON, C. **Current and Future Priorities for Mass and Material in Silicon Pv Module Recycling**. EUPVSEC, Paris, pp.1–5. 2013.

PAIXÃO, M. A. S., **Um Comparativo Entre A Política De Energia Renovável No Brasil E Na China. Revista Pesquisa E Debate**, v. 29, p. 50-83, 2018.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar (*Brazilian Atlas of Solar Energy*)**: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, Brasil. 2006.

PRÉ-SUSTAINABILITY - **SimaPro Database Manual**. Methods Library. V 4.1. Fev 2018.

PROENÇA, E. D. R. B., **A Energia Solar Fotovoltaica Em Portugal**. Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento. Universidade Técnica de Lisboa. Agosto de 2007.

PORTAL SOLAR, **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico**. 2019. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em janeiro 2019.

RADZIEMSKA, E. **Chemical, thermal and laser processes in recycling of photovoltaic silicone solar cells and modules**. Ecological Chemistry and Engineering S. Vol. 17. No 3. 2010.

ROCHA, A. M., **Tecnologias de Geração de Energia Solar**, Relatório de Estágio no âmbito do Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente pela Faculdade de Economia do Porto, 2015.

ROCHA, M. H. **Uso da Análise do Ciclo de Vida para Comparação do Desempenho Ambiental de Quatro Alternativas para Tratamento da Vinhaça**, Itajubá, 234p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2009.

ROCHA, P. **Principais Tipos de Células Fotovoltaicas**. Engenharia de Petróleo - UFRJ Luxnova – Energia Solar. Rio de Janeiro, 2017.

ROSA, C. A. **Estudo do Balanço Energético e do Passivo Ambiental Resultante da Fabricação do Módulo Fotovoltaico**. Itajubá, 248p. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 2008.

RSC - Royal Society of Chemistry, **Chemical Elements**, 2014. Disponível em [www.rsc.org/www.chemicalelements.com/www.chemistryexplained.com/biomania.com](http://www.rsc.org/www.chemicalelements.com/www.chemistryexplained.com/biomania.com), Acesso em Set 2018.

RTS Corporation. **The photovoltaics industry, today and tomorrow**. Osamu Ikki, Tokyo, Novembro 2006.

SAGA, T. **Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production**. NPG Asia Materials, Vol 2, Pag 96–102. 2010.

SANTANA, R. J., **Desenvolvimento de filme fino de a-Si:H por pulverização catódica para aplicações fotovoltaicas**. Dissertação de Mestrado, Rede Temática em Engenharia de Materiais – UFOP. Ouro Preto-MG. 2011.

SENDY, A. **Pros and Cons of Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels**. Solar Reviews. Published on 08/23/2017.

SILVA, A. L. R. T. **Desenvolvimento de fatores de normalização de impactos ambientais regionais para avaliação do ciclo de vida de produtos no estado de São Paulo**. 2010. 168 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, S. B., SEVERINO, M. M., OLIVEIRA, M. A. G, **Sizing and Optimization of Hybrid Photovoltaic, Fuel Cell and Battery System**. IEEE Latin America Transactions, Vol 9, Pg 817 - 822, March 2011.

SMA Technologie AG, **Técnicas de Sistemas para Aplicaciones Fotovoltaicas**. Sunny Family. 2005.

SolarGIS. **World Map of Global Horizontal Irradiation**. GeoModel Solar. Disponível em [http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps). 2016.

SOUZA, R. M. P., LEÃO, V. A. & PINA, P. S. **Remoção de metais pesados em resíduos sólidos: o caso das baterias de celular**. REM: Esc. Minas, Ouro Preto 58(4): 375-479, out. dez. 2005.

SPINACÉ, M. A. S., PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas. Quim. Nova, Vol. 28, No. 1, 65-72, 2005.

US EPA – Environmental Protection Agency. **Health and Environmental Effects of Ground-Level Ozone**. 1997.

VALLÊRA, ANTÔNIO M.; BRITO, MIGUEL. **Meio século de História Fotovoltaica**, Disponível em <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: setembro de 2018.

VARELLA, F. K. O. M, CAVALIERO, C. K. N., SILVA, E. P. **Sistemas Fotovoltaicos No Brasil: Estimativa Do Índice De Nacionalização**. Revista Brasileira de Energia, Vol. 17, No. 2, 2o Sem., p. 193-216, 2011.

WALDMAN, M. **Reciclagem, Preservação Ambiental e o Papel dos Catadores no Brasil**. Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Editora Kotev, Série Resíduos Sólidos 7. São Paulo. 2016.

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

WILDMER, R. OSWALD-KRAPF, H. SINHA-KHETRIWAL D., SCHNELLMANN, M. **Global Perspectives on e-waste**. Environmental Impact Assessment Review 25. Pg 436 -458. 2005.

WOLF, M., **Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters**, Proceedings of the IRE, 48. 1960.

ZENG; DE-WN, BORN, MANFRED, KARSTEN. **Pyrolysis of EVA and its application in recycling of photovoltaics**. Journal of Environmental Sciences. Vol 16, 6, pg 889 – 893. 2004.