

# AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA A PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Jordy Lustosa Bezerra – jordylustosa@gmail.com

Marcos Antônio Tavares Lira – marcoslira@ufpi.edu.br  
Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica

Elaine Aparecida da Silva – elaine@ufpi.edu.br  
Universidade Federal do Piauí, Departamento de Recursos Hídricos

**Resumo.** Este trabalho apresenta resultados acerca da aplicação da técnica Avaliação do Ciclo de Vida para um painel fotovoltaico. Esse estudo considera todos os processos envolvendo a fabricação do mesmo, considerando fluxos de massa e energia começando desde produção do silício de grau metalúrgico e terminando no processo de montagem. Todos os processos considerados são resumidamente descritos e, considerações acerca do inventário são abordadas. O inventário foi modelado no software SimaPro 8 e utilizou-se dos métodos ReCiPe e Demanda de Energia Acumulada para a análise de impacto ambiental com os processos e os fluxos de mais destaque sendo discutidos. Mais adiante, o cálculo do tempo de retorno energético foi efetuado considerando as condições médias de radiação solar para o local considerado de instalação do painel solar.

**Palavras-chave:** Energia Solar, ACV, Impactos Ambientais

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com problemas relacionados ao meio ambiente vem se tornando cada vez mais relevantes em tomadas de decisão em diversos setores, incluindo a engenharia. A preocupação não somente com o meio ambiente, mas com acordos internacionais, como por exemplo, o protocolo de Kyoto, tal preocupação vem causando o desenvolvimento de leis ambientais cada vez mais restritas sobre a emissão de poluentes e o consumo de recursos não renováveis e com incentivos cada vez mais atrativos para a implantação de fontes sustentáveis de energia. No Brasil não é diferente, uma vez que a preocupação com a geração de energia por fontes renováveis tornou-se ainda maior com a celebração do Acordo de Paris, na COP 21, no ano de 2015 onde o Brasil assumiu compromisso de redução de emissões de gases estufa, em 2025 e 2030, respectivamente 37% e 43% em relação aos níveis de 2005 (Nascimento, 2017).

Além disso, o nordeste brasileiro vem sendo um importante receptor de investimentos em energias renováveis, em especial na área de energia solar. Como, por exemplo, o Piauí onde a empresa italiana Enel, vencedora do leilão de energia, começou a instalação dos módulos fotovoltaicos na usina solar de Nova Olinda, em Ribeira do Piauí, que terá 292 MWp de capacidade instalada e consumirá US\$ 300 milhões em investimentos (Collet, 2016).

A expansão da geração da energia solar fotovoltaica, dentre outros fatores se deve, em parte, ao fato dessa fonte ter sido vinculada durante décadas a concepção de energia completamente limpa. Porém, é pertinente questionar se isso é verdade para todas as fases de uso do módulo, que é a unidade básica para esse tipo de geração. Para realizar esse tipo de estudo faz-se necessário o uso de uma ferramenta que investigue todos os processos envolvidos durante a vida útil do módulo fotovoltaico.

Uma ferramenta que vem ganhando destaque nesse tipo de investigação é chamada Avaliação do Ciclo de Vida ou ACV. Frischknecht *et al.* (2015), afirmam que, a ACV é um método estruturado e compreensivo de quantificar fluxos de matéria e energia e seus associados impactos no ciclo de vida de produtos ou serviços. Com essa ferramenta é possível identificar quais etapas do ciclo de vida de um produto são mais prejudiciais em termos ambientais e energéticos. Em posse dessa informação, é possível ter uma melhor visão quanto sua sustentabilidade e desenvolver melhorias para o processo como um todo.

Esse trabalho tem como objetivo a realização da ACV para a unidade básica de um sistema fotovoltaico, o painel solar. Esse estudo ajuda a entender que tipo de carga ambiental o mesmo pode produzir, assim como, quais processos são mais prejudiciais ao meio ambiente e que substâncias desses processos contribuem para esse prejuízo, o consumo energético necessário para a realização da produção, assim como as fontes que geram essa energia.

## 2. METODOLOGIA

A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a aquisição de matérias primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo) (ABNT, 2009a).

De acordo com ABNT, 2009b, um estudo de ACV é composto por quatro fases que são ilustradas na Fig. 1:

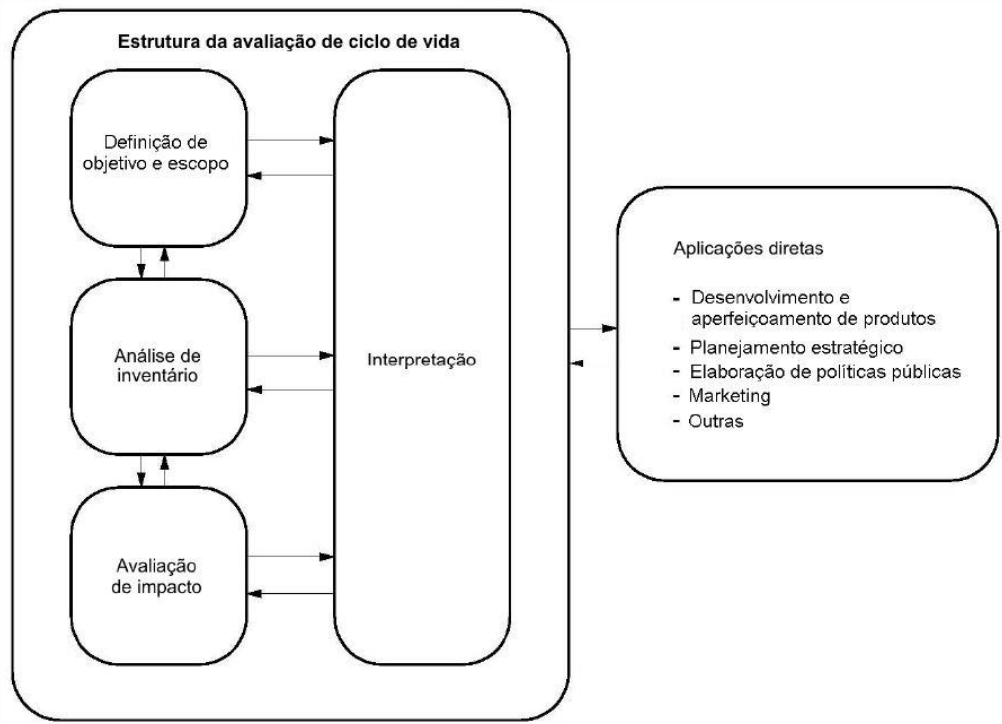


Figura 1 - Estrutura da Avaliação de Ciclo de Vida  
 Fonte – (ABNT, 2009a)

## 2.1 Definição de objetivo e escopo

A definição do escopo e objetivo são passos de grande importância, pois muitos dos parâmetros são identificados, como recursos, fronteiras do sistema, metodologia de avaliação, unidade funcional, propósito do estudo e premissas gerais (Menoufi, 2011).

A unidade funcional para esse trabalho foi o painel JKM315P-72 da Jinko Solar que segundo informações coletadas através de contato com a empresa Enel, responsável pela construção da Usina de Nova Olinda no Piauí, é o painel utilizado na mesma. O painel possui as seguintes especificações na sua folha de dados:

- Potência: 315 Wp;
- Eficiência: 16,2%;
- Tipo de célula: Policristalina 156x156mm;
- Número de células: 72;
- Dimensões 1956x992x40mm;
- Peso: 26,5 kg;
- Estrutura: Liga de alumínio anodizado;
- Tempo de produção linear: 25 anos.

Esse estudo levou em conta uma abordagem similar a “berço ao portão”, que engloba os processos de extração de matérias primas (berço), processamento de materiais utilizados e manufatura, ou seja, até o “portão” da fábrica. Portanto, exclui-se desse estudo todo e qualquer processo após a fabricação do painel fotovoltaico, como por exemplo, os processos de manutenção, reciclagem e fabricação de componentes auxiliares, como inversores.

## 2.2 Processos envolvidos na fabricação

Os processos envolvidos na fabricação do painel fotovoltaico para esse estudo são organizados conforme a Fig. 2 e descritos a seguir:

- Silício de Grau Metalúrgico (MG-Si): é o material inicial para a produção do silício puro usado em painéis fotovoltaicos e componentes eletrônicos. É comumente produzido pelo processo de redução do óxido de silício com carbono em forno de arco (Safarian; Tranell; Tangstad, 2012).
- Purificação do MG-Si: Antes que o silício possa ser usado como semicondutor, o que inclui células solares, o mesmo precisa ser purificado até que atinja um grau de 0,01 até 0,00001 ppm de impurezas. Dependendo da concentração de impurezas, o silício pode ser classificado como Silício de Grau solar (SoG-Si) com 0,01 ppm ou Silício de Grau Eletrônico (EG-Si) com 0,00001 ppm de impurezas (Jungbluth *et al.*, 2012). Por ser um material caro, em aplicações para sistemas fotovoltaicos é comum utilizar EG-Si reaproveitado de processos de fabricação de eletrônicos.

- Produção de silício policristalino: SoG-Si, EG-Si e EG-Si reaproveitados são derretidos, fundidos e transformados em barras de metal. Após isso, são cortados em blocos quadrados de onde os *wafers*, ou partilhas, são diretamente produzidos (Jungbluth *et al.*, 2012).
- Produção do *wafers*: Jungbluth *et al.* (2012) afirmam que, a maioria dos produtores atuais usam a tecnologia de corte através de “múltiplos fios”. O silício policristalino já está cortado em colunas, que são postas na serra de “múltiplos fios” que os corta em finos *wafers* ou partilhas. O corte é finalizado com uma pasta de carboneto de silício.
- Produção da célula fotovoltaica: A cama do emissor do tipo-n é formada na superfície do *wafers* pela difusão de átomos de fósforo. Geralmente o processo se dá em altas temperaturas, em torno de 850-900°C, e consiste em gorgolejar nitrogênio em POCl<sub>3</sub> líquido. Então, o nitrogênio saturado passa pelo *wafers* na presença de oxigênio e um filme difuso de fósforo é criado. O excesso de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é removido através de um ataque químico de HF. Por último, o *wafers* é fatiado em plasma para evitar curtos circuitos (Stoppato, 2008). Pastas de metalização também são incluídas para a aplicação dos contatos elétricos.
- Produção do módulo fotovoltaico: As células são testadas e acopladas em um módulo em forma de matriz para serem conectadas com condutores feitos de cobre revertidos de estanho. A camada de estanho é adicionada para fortalecer as soldas. O próximo passo é a adição do revestimento de acetado etileno de vinila (EVA) (Koroneos; Stylos; Moussiopoulos, 2006). A parte traseira é revertida por um filme de Poliéster e Fluoreto de Polivinila. Após a adição do vidro frontal esse “sanduiche” é unido sob pressão e aquecido, as bordas purificadas e as conexões isoladas. Por último, é acrescentado às partes posteriores de alumínio juntamente com a caixa de conexão (Jungbluth *et al.*, 2012).

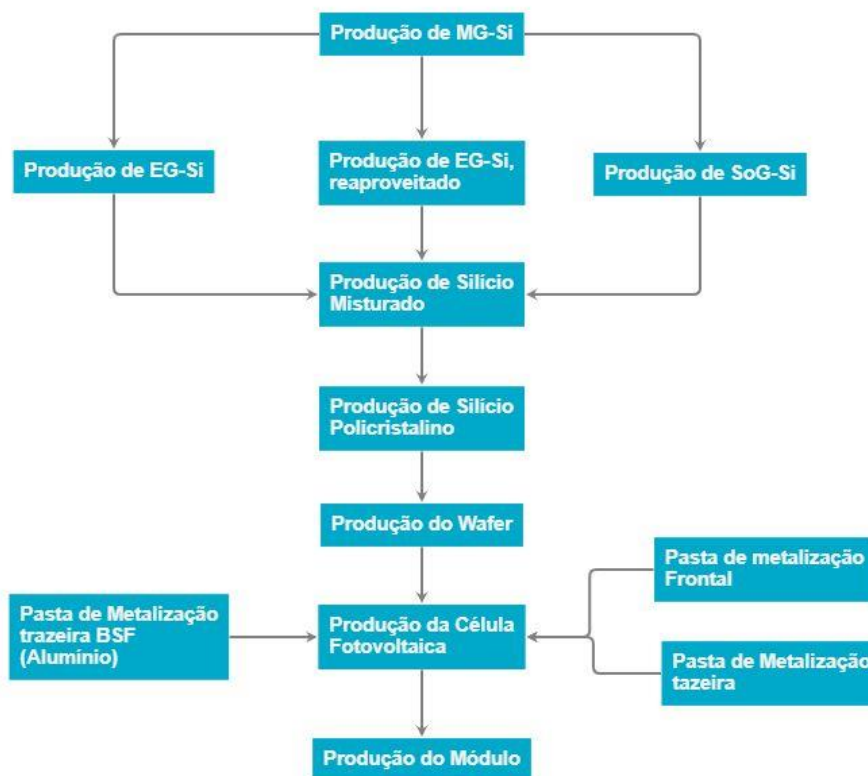


Figura 2 - Processos considerados na ACV de painel fotovoltaico em estudo.

### 2.3 Análise de inventário

A fase de análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) trata-se de um levantamento de dados de entrada e saída associadas ao projeto em questão (ABNT, 2009a).

O inventário foi retirado e adaptado da literatura, pela inviabilidade de coleta do mesmo. Os inventários mais completos e atuais acerca do assunto são abordados nos estudos de Frischknecht *et al.* (2015) e Jungbluth *et al.* (2012), e são utilizados como base para esse estudo.

As adaptações feitas no inventário dizem respeito às quantidades dos fluxos que foram ajustadas às dimensões do painel estudado. Por limitações no software, os fluxos modelados foram do tipo global e mercado, com exceção da matriz elétrica que foi considerada a matriz chinesa, uma vez que o painel é produzido na China.

### 3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Os processos descritos na seção 2.2 tiveram seus inventários modelados no *software* SimPro8 através do banco de dados *ecoinvent* para os métodos de Demanda de Energia Acumulada, ou *Cumulative Energy Demand* (CED) e ReCiPe ponto médio hierárquico.

#### 3.1 Demanda de Energia Acumulada

CED é um parâmetro e uma metodologia usados para quantificar o uso direto e indireto de energia primeira em MJ por todo o ciclo de um produto ou processo, incluindo a energia consumida durante a extração, fabricação e descarte de materiais. Considera a demanda acumulada de energia para todas as fontes incluindo combustíveis fósseis, carvão mineral, gás natural, nuclear, biomassa, hidráulica, eólica e solar (Menoufi, 2011).

Os resultados obtidos para CED podem ser observados nas Fig. 3 e 4. Observa-se o uso intenso de fontes não renováveis de energia em todo o processo de produção do painel solar, em especial, as fontes energéticas derivadas de combustíveis fósseis e nuclear.

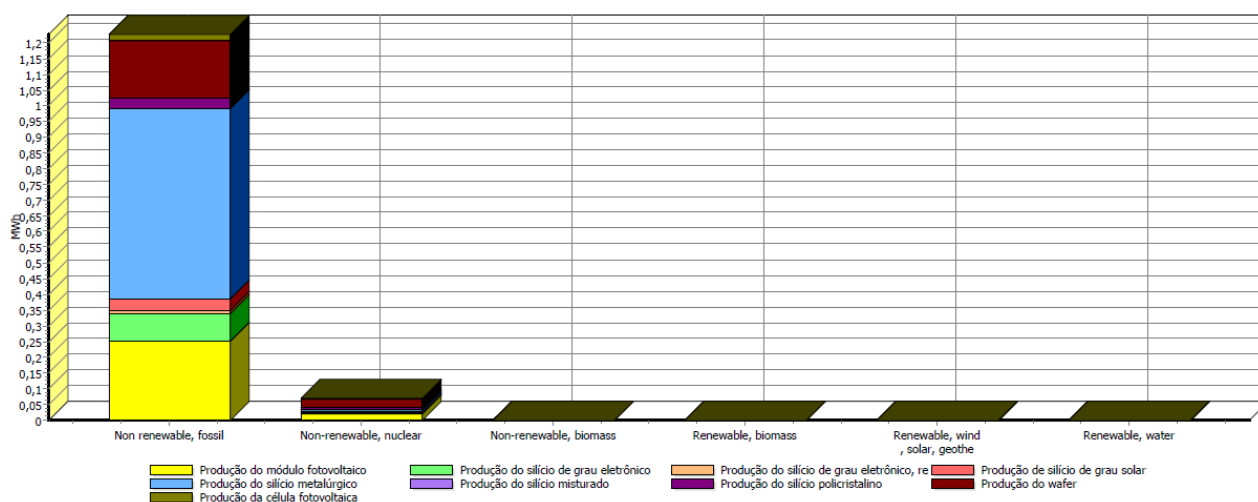


Figura 3 – Resultados para as categorias do CED (Ponderação)

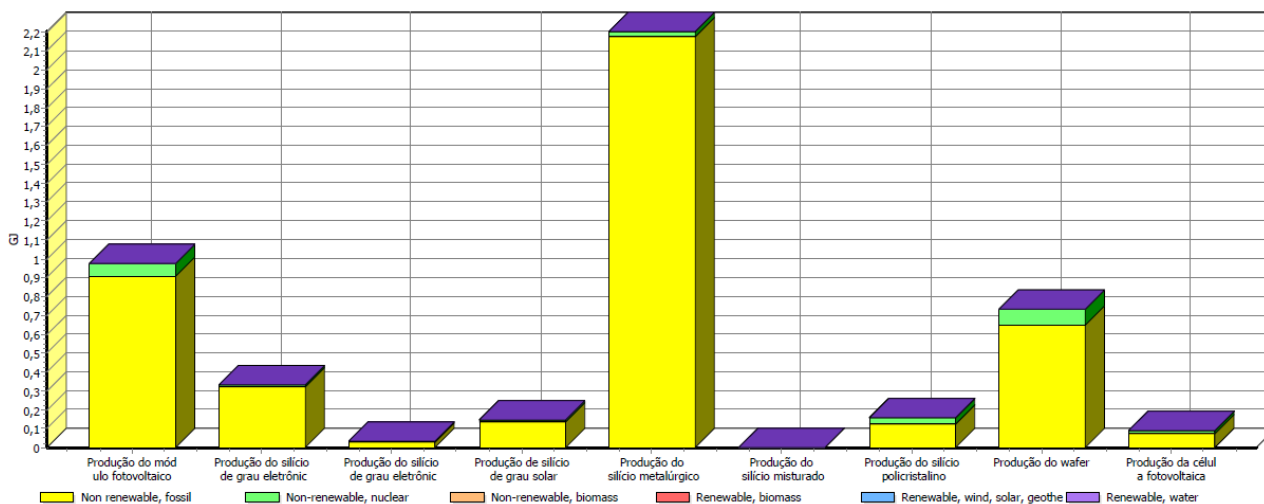


Figura 4 - Contribuição de cada processo para CED (pontuação única)

Fontes renováveis como biomassa, eólica, solar e hidroelétricas aparecem em quantidades desprezíveis e em apenas nos processos de produção do *Wafer* e da *Célula* fotovoltaica. Os processos que mais se destacam no uso energético são, a produção do MG-Si e do módulo fotovoltaico com contribuições de 47% e 21%, respectivamente. Os valores em MWh para as contribuições de cada processo em cada categoria de impacto do CED podem ser observadas na Tab. 1.

Tabela 1 – Dados obtidos pelo SimaPro8 para o método Demanda de Energia Acumulada.

Processos/Categorias	Unidade	Fóssil	Nuclear	Biomassa (Renovável)	Eólica e Solar	Hidroelétrica
Prod. do módulo	MWh	0,251	0,0191	0	0	0
Prod. de EG-Si	MWh	0,0889	0,00326	0	0	0
Prod. de EG-Si, reaproveitado	MWh	0,00847	0,00031	0	0	0
Prod. de SoG-Si	MWh	0,0383	0,00271	0	0	0
Prod. de Silício Policristalino	MWh	0,604	0,008	0	0	0
Produção do <i>Wafer</i>	MWh	0,18	0,0246	$6,48 \times 10^{-09}$	$1,18 \times 10^{-06}$	$2,93 \times 10^{-0,6}$
Produção da Célula	MWh	0,021	0,00347	$3,1 \times 10^{-08}$	$5,76 \times 10^{-06}$	$1,43 \times 10^{-05}$
Total	MWh	1,226	0,0697	$3,78 \times 10^{-08}$	$6,64 \times 10^{-06}$	$1,723 \times 10^{-05}$

Fonte – Resultados de simulação no software SimaPro 8.

Os dados da Tab. 1 e da Fig. 3 mostram que as fontes energéticas provenientes de recursos fósseis possuem uma contribuição de cerca de 95%, seguidos de 5% de fontes provenientes de recursos nucleares. Os dados apresentam 1,3 MWh de demanda energética para a realização de todo o processo de produção do painel fotovoltaico.

Outro parâmetro muito utilizado na ACV de recursos energéticos é o Tempo de Retorno de Energia ou Energy Payback Time (EBPT), que de acordo com Frischknecht et al. (2015), é definido como o período necessário para o sistema de energia gerar a mesma quantidade de energia que foi usada para o construir e, é dado pela Eq. (1):

$$EPBT = (E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{fdv}) / [(E_{gen} / n_g) - E_{manut}] \quad (1)$$

Onde:

$E_{mat}$  - Energia para produzir os materiais que compõem o módulo fotovoltaico;

$E_{manuf}$  - Energia para manufaturar o módulo fotovoltaico;

$E_{trans}$  - Energia utilizada no transporte de materiais durante todo o ciclo de vida;

$E_{inst}$  - Energia para instalar o módulo fotovoltaico;

$E_{fdv}$  - Energia para lidar com o desgaste de materiais;

$E_{gen}$  - Energia anual gerada;

$n_g$  - Eficiência do sistema;

$E_{manut}$  - Energia anual para operação e manutenção.

Para o cálculo EPBT é necessário estimar a produção energética anual para o painel em estudo que, de acordo com Fthenakis, Kim e Alsema (2008), pode ser dado pela Eq. (2):

$$E_{gen} = I \times n_{modulo} \times n_{sis} \times A \quad (2)$$

Onde:

$I$  - Irradiação solar média anual (kWh/m<sup>2</sup>-ano);

$n_{modulo}$  - Energia para manufaturar o módulo fotovoltaico;

$n_{sis}$  - Energia utilizada no transporte de materiais durante todo o ciclo de vida;

$A$  - Energia para instalar o módulo fotovoltaico (m<sup>2</sup>);

$E_{gen}$  - Energia anual gerada (kWh/m<sup>2</sup>).

A eficiência do sistema que engloba as perdas nos inversores, cabeamento, sombreamento e temperatura foi considerada ser de 70 %. A irradiação solar média para a região de acordo com Pereira et al. (2017) é de 5,5 kWh/m<sup>2</sup>-dia, fornecendo anualmente 2009,3 kWh/m<sup>2</sup>-ano. Com base nesses dados a Energia anual gerada é de 442,04 kWh/ano e o EBPT de 2,94 anos.

### 3.2 ReCiPe

O método ReCiPe é um método derivado do Eco-Indicator99, é um dos principais métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida. Este equilibra e reúne a abordagem de ponto médio e de ponto final em uma estrutura

consistente. A nível de ponto médio, o mesmo aborda questões ambientais dentro de 18 categorias de impacto, sendo reunidas em um posterior na cadeia causa-efeito em 3 categorias de ponto final (Goedkoop *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos para esse método podem ser visualizados na Fig. 5. As categorias de impacto que se mostram mais relevantes são: ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade de água doce, eutrofização de água doce e toxicidade humana. As outras categorias de impacto possuem resultados insignificantes uma vez que há pouco lançamento e/ou consumo de substâncias que causam esses impactos e não terão seus resultados analisados.

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

As categorias de ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade de água doce obtiveram as mesmas contribuições percentuais e podem ser observadas na Fig. 6. Os processos que mais se destacaram para essas categorias foram a produção do módulo fotovoltaico e a produção de MG-Si com 49% e 29%, respectivamente. Isso é resultado do uso de quantidades significativas de metais pesados como níquel, estanho, chumbo, cobre e manganês que são os principais elementos que contribuem para essa categoria.

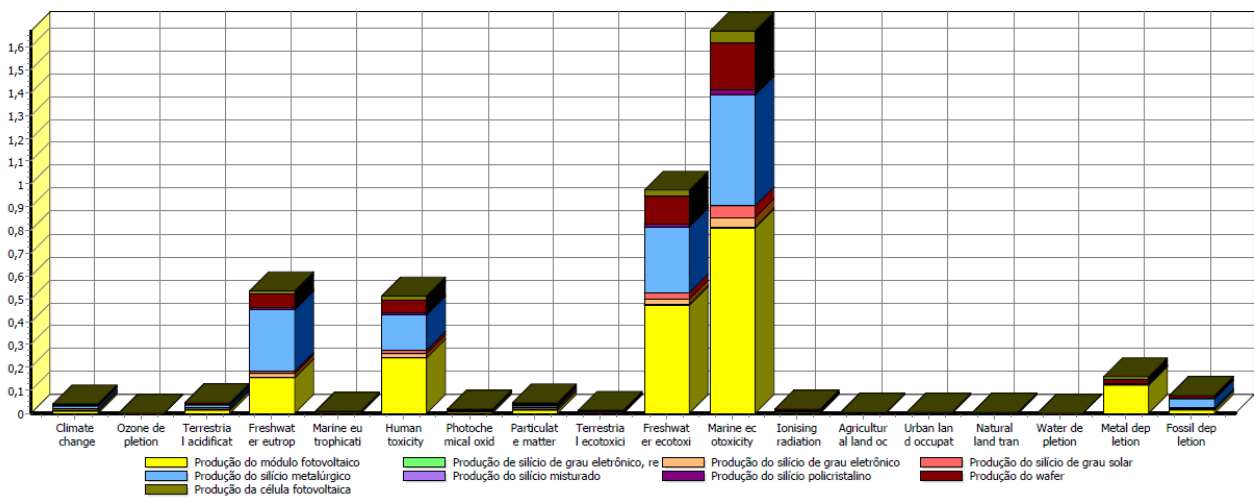


Figura 5 - Resultado da modelagem para o método ReCiPe no *software* SimaPro8 (Normalização)

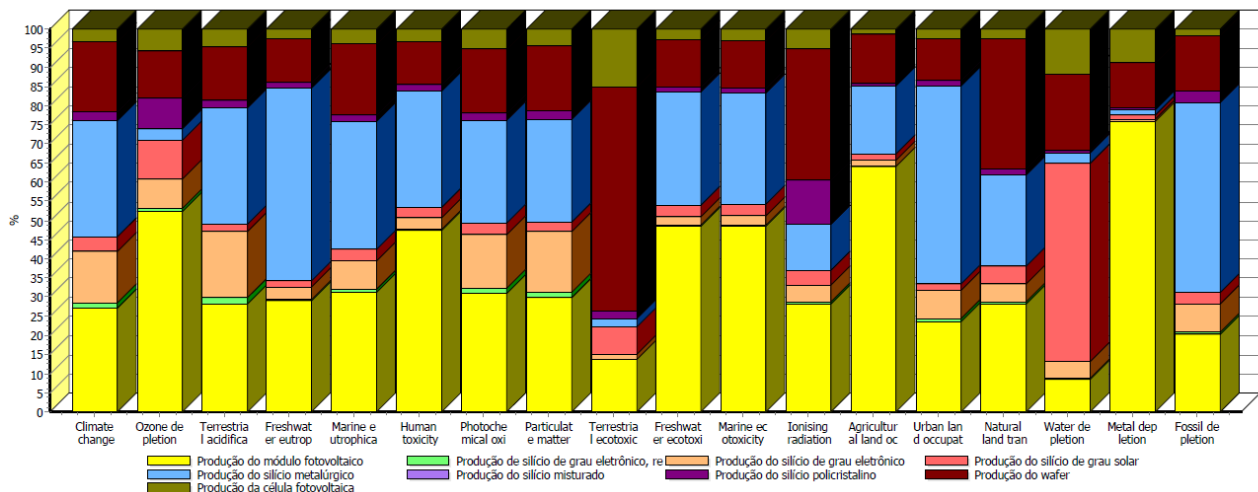


Figura 6 – Resultado da modelagem para o método ReCiPe no *software* SimaPro8 (Caracterização)

**Toxicidade Humana.** A toxicidade humana cobre uma gama de diferentes efeitos: toxicidade aguda, irritação/efeitos corrosivos, efeitos alérgicos, danos irreversíveis em órgãos, efeitos cancerígenos, toxicidade para o sistema reprodutivo e toxicidade neural (Stranddorf *et al.*, 2005).

Os destaques em termos de contribuição para essa categoria de impacto foi a produção do módulo fotovoltaico e a produção do MG-Si com 47% e 31%, respectivamente. Dentre os fluxos presentes nesses processos e que contribui para a toxicidade humana pode-se destacar dióxido de enxofre, óxidos nitrosos, compostos orgânicos voláteis, material particulado fino e metais pesados como chumbo, níquel, estanho, cobre, cádmio, arsênio e mercúrio.

**Eutrofização de água doce:** A eutrofização de água doce ocorre devido ao descarte de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, no solo ou em água doce. Os impactos ambientais envolvidos nessa categoria são numerosos. Eles seguem uma sequência de desequilíbrios ecológicos, engatilhados pelo consumo desses nutrientes por organismos autotróficos como cianobactérias e algas (Huijbregts *et al.*, 2017).

O processo que apresenta mais destaque nessa categoria é a produção de silício metalúrgico, com 51% de contribuição. Isso se dá ao fato de ter fluxos de emissões de óxidos nitrosos que são liberados em processos de queima.

**Depleção de recursos fósseis:** Por ser um recurso não renovável, o método ReCiPe avalia essa categoria através do cálculo do fator de caracterização em termos energéticos para a unidade kg oil-eq/unidade de recurso (Goedkoop *et al.*, 2009).

Como pode-se observar na figura 6, houve um destaque significativo para três processos: produção de MG-Si, produção do módulo e produção do *Wafer* com contribuições percentuais de, respectivamente, 50%, 20% e 14%. Para a produção de MG-Si, que é o processo que demanda mais energia, há o uso de carvão, coca de petróleo e energia proveniente da matriz chinesa e da coca de carvão bruto;

**Depleção de metais:** Essa categoria de impacto não foi analisada profundamente devido a suas diferentes abordagens na literatura.

**Acidificação terrestre:** A deposição atmosférica de substâncias inorgânicas como sulfatos, nitratos e fosfatos, causam uma mudança na acidez do solo. Para a maioria das plantas, existe um nível ótimo de acidez. Uma mudança séria nesse nível é prejudicial para aquela espécie de planta específica. Como resultado, essa mudança no grau de acidez do solo irá mudar a ocorrência de certas espécies. As emissões principais que contribuem para essa categoria são os óxidos nitrosos, amônia e dióxido de enxofre (Huijbregts *et al.*, 2017).

O processo que possui maior contribuição com um percentual total de 30% é a produção do MG-Si. Esse processo possui emissões em quantidades consideráveis de dióxido de enxofre. Apesar disso, essa categoria possui uma contribuição pequena em relação as outras possuindo uma emissão total de 1,8 kg SO<sub>2</sub>-eq.

**Mudanças Climáticas:** O interesse para essa categoria de impacto é o efeito marginal da adição de quantidades de CO<sub>2</sub> ou gases estufa na atmosfera. O fator de caracterização para ponto médio é a categoria Potencial de Aquecimento Global (ou sigla em inglês, GWP) e é dado em kg CO<sub>2</sub>-eq para uma linha do tempo de 100 anos (Goedkoop *et al.*, 2009).

Os processos que possuem maior contribuição são a produção de MG-Si, produção do módulo fotovoltaicos e produção do *Wafer* com 31%, 27% e 18% de contribuição percentual total, respectivamente. Dentre as emissões que foram responsáveis por esse destaque no processo de produção de MG-Si estão monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos nitrosos e o uso de uma gama de produtos fósseis como a coca de carvão bruto no fluxo energético.

Pode-se atribuir a relativamente pequena contribuição dessa categoria no cenário geral entre as outras categorias o fato de não haver fluxos com a presença significativa de clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidrofluorcarbonetos (HFCs) que são milhares de vezes mais ativos que o CO<sub>2</sub>. Mesmo assim, essa categoria apresentou uma soma total de 273 kg CO<sub>2</sub>-eq.

#### 4. CONCLUSÕES

Um dos resultados de mais destaque para o método CED foi que, grande parte da energia utilizada na produção do painel é proveniente de fontes não renováveis, com destaque para fontes derivadas de recursos fósseis com 95% de contribuição total. A escolha da matriz energética chinesa influenciou diretamente nesse resultado. Os processos de maior demanda energética foram a produção de MG-Si e do módulo fotovoltaico com 47% e 21%, respectivamente. A demanda de energia para todo o processo de fabricação somou 1,3 MWh e de acordo com estimativas de produção, o módulo apresentou um tempo de retorno de energia de 2,94 anos.

Por outro lado, os resultados de mais destaque para o método ReCiPe foram as categorias de impacto ecotoxicidade, eutrofização de água doce e toxicidade humana. Os processos que apresentaram uma maior participação em todas essas categorias foram a produção de MG-Si e do módulo. O uso de grande quantidade de metais pesados como níquel, estanho, chumbo e cobre e de compostos como SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, óxidos nitrosos, material particulado e orgânicos voláteis são os responsáveis por contribuir para o destaque dessas categorias de impacto.

Por fim, considerando a expectativa de tempo de uso para esse painel ser de 25 anos, um tempo de retorno de aproximadamente 3 anos mostra-se promissor, uma vez que a energia produzida pelo mesmo por 22 anos será livre de emissões prejudiciais ao ecossistema. Quanto aos demais impactos, eles possuem valores potenciais, um estudo mais avançado a respeito de emissões precisa ser realizado para afirmar com precisão o real impacto ao meio ambiente.

No momento, novos estudos estão sendo realizados com intuito de incluir novos fluxos, por exemplo, um fluxo de transporte final entre o portão da fábrica na China e o local de montagem do painel no Brasil. Além disso, novos dados estão sendo coletados para análise das quantidades de emissões de CO<sub>2</sub>-eq que o uso dessa tecnologia de geração pode evitar durante sua fase de produção comparada com outras fontes.

### **Agradecimentos**

O autor agradece o incentivo do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, por meio de bolsa oferecida para o desenvolvimento desse projeto.

### **REFERÊNCIAS**

- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro.
- Collet, L., 2016. Enel inicia construção de usina solar de US\$ 300 mi no Piauí. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/enel-inicia-construcao-de-usina-solar-de-us-300-mi-no-piaui/>. Acesso em: 29 set. 2017.
- Frischknecht, R; Itten, R; Sinha, P; Wild-Scholten, M; Zhang, J, 2015. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Repost T12, v.5.
- Fthenakis, V. M; Kim, H. C.; Alsema, E., 2008. Emissions from photovoltaic life cycles. Environmental science & technology, ACS Publications, v. 42, n. 6, p. 2168-2174.
- Goedkoop, M; Heijungs, R; Huijbregts, M; Schryver, A; Struijs, J; Zelm, R, 2009. Recipe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: characterization. National Institute of Public Health, Netherlands, v. 1.
- Huijbregts, M. A.; Steinmannw, Z.J.N; Elshout, P.M.F; Stam, G; Verones, F; Vieira, M.D.M; Hollander, A; Zijp, M; Zelm, R, 2017. Recipe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer, v. 22, n. 2, p. 138-147.
- Koroneos, C.; Stylos, N.; Moussiopoulos, N., 2006. LCA of multicrystalline silicone photovoltaic system-part 1: Present situation and future perspective. The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer, v. 11, n. 2, p. 129-136.
- Menoufi, K. A. I, 2011. Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. Tese de Mestrado, Universitat de Lleida, Escola Politècnica Superior.
- Nascimento, R. L., 2017. Energia solar no Brasil: situação e perspectivas. Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa.
- Safarian, J; Tranell, G; Tangstad, M, 2012. Processes for upgrading metallurgical grade silicon to solar grade silicon. Energy Procedia, Elsevier, v.20, p. 88-97.
- Stoppato, A, 2008. Life Cycle Assessment of photovoltaic electricity generation. Energy, v. 33, n. 2, p. 224-232.
- Stranddorf, H; Hoffmann, L; Schmidt, A; FORCE Technology, 2005. Impact categories, normalization and weighting in lca, environmental News no. 78, the Danish ministry of the environment. Environmental Protection Agency, Copenhagen.

### **LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO PHOTOVOLTAIC MODULES**

**Abstract.** *This paper presents results about the application of the life cycle assessment (LCA) technique for a photovoltaic panel. This study takes into account all processes involving the manufacture of a photovoltaic panel considering mass and energy fluxes starting from the production of metallurgical grade silicon until the assembly process. All the processes considered are briefly described and inventory considerations are addressed. The inventory was modeled on SimaPro8 software and ReCiPe and Cumulative Energy Demand methods were used for environmental impact analysis with the processes and flows more prominence being discussed. Moreover, energy payback time calculation was applied considering local conditions of solar irradiation.*

**Key words:** *Solar Energy, LCA, environmental impacts*