

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO MÓDULO
FOTOVOLTAICO: PRODUÇÃO E USO COMO FONTE DE ENERGIA
ELÉTRICA**

ADRIANA DE SOUZA OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO MÓDULO
FOTOVOLTAICO: PRODUÇÃO E USO COMO FONTE DE ENERGIA
ELÉTRICA**

ADRIANA DE SOUZA OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF^a DR^a SANDRA MARIA DA LUZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA: SETEMBRO DE 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO MÓDULO
FOTOVOLTAICO: PRODUÇÃO E USO COMO FONTE DE ENERGIA
ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO POR:

Profª. Drª Sandra Maria da Luz (Faculdade do Gama/UnB)
(Orientadora)

Prof. Dr Thiago Oliveira Rodrigues (Departamento de Engenharia Florestal/UnB)
(Examinador externo)

Prof. Dr. Rafael Amaral Shayani (Departamento de Engenharia Elétrica/UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA, 27 DE SETEMBRO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, ADRIANA DE SOUZA

Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica. [DISTRITO FEDERAL] 2017 xv, 77p., 210 x 297 mm (ENMC/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas, 2017).

Dissertação de Mestrado Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

1. Avaliação de ciclo de vida

2. Impactos Ambientais

3. Energia Fotovoltaica

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, ADRIANA DE SOUZA (2017). Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM 268/2017.

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília- DF 77p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Oliveira, Adriana de Souza.

TÍTULO: Avaliação de Impactos Ambientais do Módulo Fotovoltaico: Produção e Uso como Fonte de Energia Elétrica.

GRAU: Mestre ANO: 2017.

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa Dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Adriana de Souza Oliveira

drika.so@gmail.com

“Aprender é a única coisa que a mente
nunca se cansa, nunca tem medo e nunca
se arrepende”.

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a oportunidade de realizar esse mestrado, por ter me dado sabedoria e saúde para concluí-lo.

A minha família, principalmente meus pais por sempre me apoiarem e terem muito orgulho de mim.

Meus companheiros de aulas, Vinícius, Daniel, Érica. Por me ajudarem e me darem apoio em todo o curso.

Aos meus amigos que sempre me incentivaram nesses 2 anos de mestrado.

Ao GaBi pela disponibilização do software.

A minha orientadora Sandra Luz por toda paciência, apoio, instrução e ajuda em tudo que eu pedi e apresentei dificuldade ao longo desse curso de mestrado.

Ao programa de Ciências Mecânicas pela oportunidade.

A Universidade de Brasília.

Aos meus avaliadores, Thiago e Rafael Shayani.

E a todos que direta ou indiretamente me deram apoio em tudo.

RESUMO

Com o crescimento das alterações climáticas, a emissão de gases do efeito estufa e os impactos ao meio ambiente, a necessidade por reduzir o uso de combustíveis fósseis tornou-se prioridade. As energias renováveis podem ser uma boa alternativa para a mitigação de impactos ambientais. Em especial a energia solar que provém do Sol e é uma energia contínua e abundante. A energia fotovoltaica provém do efeito fotovoltaico que transforma a energia solar em energia elétrica. A matéria-prima da tecnologia fotovoltaica é o silício, mas o mesmo deve conter 99,9% de pureza. Para isso, deve-se purificar o silício para produzir o *wafers* e os demais processos até se chegar no módulo fotovoltaico. No entanto, a produção pode gerar impactos ao meio ambiente. Este trabalho tem por objetivo avaliar os impactos ambientais causados em todo o processo produtivo do módulo fotovoltaico (FV) por meio de uma avaliação do ciclo de vida (ACV). A unidade funcional, escolhida foi o 1 kWh. A unidade funcional foi a geração de 330 kWh através da energia fotovoltaica e da energia hidrelétrica necessária para alimentar uma residência de porte médio. Foram modelados 2 cenários, o Cenário 1 com toda a produção do módulo fotovoltaico sendo realizado na China e o Cenário 2 com a produção sendo feita entre China e Brasil. Também foi realizado uma comparação da energia fotovoltaica com a geração de energia elétrica a partir do mix de energia brasileira. Para analisar a ACV, foi utilizado o GaBi Software com a base CML 2001 para modelar os cenários analisados. Os indicadores analisados foram o consumo de água e energia, o Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Eutrofização (PE), o Potencial de Toxicidade Humana (PTH) e a Depleção Abiótica Fóssil (DAF). Observou-se que o Cenário 2 com a produção sendo realizada no Brasil gera menos impactos do que com toda a produção sendo realizada na China representada pelo Cenário 1. Os compostos que mais contribuíram nas categorias de impacto foram durante o processo de produção do módulo FV com o alumínio e o vidro. A purificação do silício, extração e o mix de energia chinesa também foram processos importantes nas categorias de impacto.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Avaliação de ciclo de vida, Impactos Ambientais.

ABSTRACT

With the growth of climate change, greenhouse gases and impacts on the environment, the need to reduce the use of fossil fuels has become a priority. In addition to the above impacts, non-renewable sources bring harm to the ecosystem and also to society such as diseases and atmospheric infections. In this regard, renewable energy is a good alternative. Especially the solar energy that comes from the sun and is a continuous and abundant energy. Photovoltaic energy comes from the photovoltaic effect that turns solar energy into electrical energy. The raw material for photovoltaic technology is the silicon, but it should contain 99.9% purity. For this, it's necessary to purify the silicon to produce the wafer and the other processes until arriving at the photovoltaic module. However, the production of all these processes generate impacts to the environment. The objective of this work is to evaluate the environmental impacts caused in the whole production process of the photovoltaic module by means of a life cycle assessment (LCA). A functional unit, chosen for 1 KWh. Functional file for a generation of 330 KWh through photovoltaic energy and hydroelectric energy for the solution of a medium size residence. Two scenarios were modeled, Scenario 1 with all production of photovoltaic module in China and Scenario 2 with production in production between China and Brazil. A comparison of photovoltaic energy with a generation of electric energy from the Brazilian energy mix was also carried out. To analyze an LCA, GaBi Software with a CML 2001 database was used to model the analyzed scenarios. The indicators analyzed were water and energy consumption, Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Potential Eutrophication (EP), Human Toxicity Potential (HPT) and Fosiotic Abiotic Depletion (ADP) . It was observed that Scenario 2 with the production being carried out in Brazil emits less impacts than with all the production being carried out in China represented by Scenario 1. The compounds that contributed the most in the impact categories were during the production process of the FV module with aluminum and glass. Silicon purification, extraction, and the Chinese energy mix were also important processes in the impact categories.

Keywords: Photovoltaic Energy, Life Cycle Assessment, Environmental Impacts.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	2
1.3. OBJETIVOS	3
2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	5
2.1. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	5
2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR	9
2.3. ENERGIA FOTOVOLTAICA	10
2.3.1. Sobre a energia fotovoltaica.....	10
2.3.2. Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos.....	12
2.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	17
2.4.1. O que é a ACV	17
2.4.2. Estrutura da ACV	18
2.4.3. Metodologia da ACV	20
2.4.4. Elementos fundamentais da ACV	20
2.4.4.1. Unidade Funcional.....	20
2.4.4.2. Fronteira da ACV	21
2.5. CATEGORIAS DE IMPACTO	22
3. METODOLOGIA	27
3.1. ACV	27
3.1.1. Unidade Funcional e Fronteira do Sistema	28
3.1.2. Inventário de Ciclo de Vida	29
3.1.3. Modelagem dos Cenários	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

4.1. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	43
4.2. AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES MAIS INFLUENTES NA EMISSÃO DOS IMPACTOS DE ACORDO COM CADA PROCESSO PRODUTIVO	47
5. CONCLUSÕES	55
6. RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição da Oferta Interna de Energia no Brasil de 2015 e 2016 separadas por energias renováveis e não renováveis (MME, 2017).	6
Tabela 2. Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) no Brasil (MME, 2017).....	7
Tabela 3. Exemplo de classificação dos sistemas fotovoltaicos (NBR11704, 2008).....	16
Tabela 4. Dados de inventário para a purificação do silício policristalino (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).	29
Tabela 6. Dados do inventário da produção da célula multicristalina (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).	31
Tabela 7. Dados de inventário da produção do módulo fotovoltaico (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).	33
Tabela 8. Especificações técnicas do módulo fotovoltaico (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).	34
Tabela 9. Definição dos transportes e distâncias do cenário 1.	38
Tabela 10. Definição dos transportes e distâncias do cenário 2.	39
Tabela 11. Consumo da energia líquida (net calorific value) em cada processo de acordo com os cenários em kWh e o consumo de água em Kg para uma unidade funcional de 1 kWh.	47
Tabela 13. Compostos que contribuíram no PA (kg SO ₂ -Equiv.) e PE (Kg Fosfato Equiv.) para uma unidade funcional de 1 kWh.	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Potencial de Energia FV na região Norte do Brasil apresentando os pontos de instalação de sistemas fotovoltaicos isolados (PEREIRA, et al., 2006).....	8
Figura 2. Partes do Sol (LUNES, 2015).	9
Figura 3. Índices de Radiação Solar Global em KWh/m ² /dia no Brasil de acordo com cada região do país (NREL, 2016).....	10
Figura 4. Principais fabricantes de módulos fotovoltaicos no mundo em 2012 (EPIA, 2013).....	11
Figura 5. Cadeia de produção do silício cristalino (ESPOSITO & FUCHS, 2013).	12
Figura 10. Produção do wafer de silício (POSTAL, 2014).	13
Figura 7. Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ABNT, 2001).	19
Figura 8. Etapas básicas no processo de ACV (COLTRO, 2007).....	20
Figura 9. Principais maneiras de definir a fronteira de um sistema (GABI, 2017).	21
Figura 10. Fronteiras do sistema que irá desde a purificação do silício até o uso da energia em uma residência.	28
Figura 11. Componentes do módulo fotovoltaico (LISBOA, 2010).	33
Figura 12. Geração da energia fotovoltaica ao longo do dia (PINHO & GALDINO, 2014).	36
Figura 13. Cenário 1 - Produção do módulo fotovoltaico na China com instalação em Brasília.....	37
Figura 14. Cenário 2 - Produção da célula na China com montagem do painel PV no Brasil e instalação em Brasília.....	38
Figura 15. Ilustração da energia elétrica usada em uma residência a partir das fontes de energia no Brasil tendo como principal fonte a energia hidrelétrica.	39

LISTA DE ABREVIÇÕES

Tep- toneladas equivalente de petróleo

MME- Ministério de Minas e Energia

ACV- Avaliação do Ciclo de Vida

BNDES- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico

ONS- Operador Nacional do Sistema

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica

OIE- Oferta Interna de Energia

OCDE- *Organisation de Coopération et de Développement Économique*

EPE -Empresa de Pesquisa Energética

ANP- Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis ASTM - American Society for Testing and Materials

KOH- hidróxido de potássio

PNPB- Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

SWERA- *Solar and Wind Energy Resource Assessment*

FV- Energia fotovoltaica

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

SiGS- Silício Grau Solar

NBR- Normas Brasileiras

EPBT- *energy pay-back time*

GEE- gases do efeito estufa

HSP- Horas de Sol Pleno

ILCD- Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos

ICV- Inventário de Ciclo de Vida

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

No Brasil, de acordo com a Resenha Energética Brasileira edição de 2017 emitida pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), 56,5% da energia interna no país em 2016 foi de fontes não renováveis. As fontes de energia não renováveis que foram avaliadas para este cálculo são o petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e derivados, urânio e derivados e outras fontes não renováveis. Em contrapartida, a energia renovável interna no país no mesmo ano foi de 43,5%. As energias renováveis abordadas para a análise desse percentual foram a energia hidráulica, lenha e carvão vegetal, derivados da cana de açúcar, e outras fontes. Desta forma, percebe-se que o Brasil possui em sua matriz energética, as fontes de origem não renováveis.

SILVEIRA (2012) apresentou em seu artigo que a demanda de energia elétrica no Brasil iria crescer a uma taxa de 4,8% ao ano, com um crescimento de 274 mil GWh até 2020, sendo necessária a inserção de mais fontes alternativas de energia no cenário brasileiro para o suprimento da necessidade que vem crescendo com o passar dos anos. No ano de 2015, o Brasil sofreu uma grave crise energética que atingiu grande parte do país. Na busca por reduzir os gastos energéticos, o Governo instalou uma nova tarifa energética conhecida como “bandeira vermelha” onde houve um aumento de quatro reais e cinquenta centavos a cada 100 kWh que era consumido na faixa de baixa tensão, fazendo com que a população fosse impulsionada a gastar menos energia.

As reservas hidrelétricas estavam quase esgotadas devido à escassez de chuva pelo qual o Brasil passava, ocasionando um racionamento principalmente no Sudeste, sendo que de acordo com o MME (2017), a energia hidrelétrica ocupa 61,5% da geração de energia elétrica no país. THUSWOHL (2015) reforça que em 2015 devido ao aumento das estiagens e à queda do nível dos reservatórios, a fonte hidrelétrica perdeu espaço para as Usinas Termelétricas, inserindo na matriz energética, fontes poluentes de energia como o óleo ou carvão mineral.

Em contrapartida, as energias eólica e solar são potenciais fontes de crescimento na geração de energia elétrica. No entanto, para a utilização dessas fontes em larga escala, é necessária uma concretização na área dos projetos e obras de infraestrutura. THUSWOHL (2015) aborda também que o principal gargalo da energia solar no Brasil é devido à falta de incentivos nacionais para a produção da tecnologia no país, o que onera

o preço dos equipamentos devido a necessidade de importação. O Brasil utiliza a energia hidrelétrica como a sua principal fonte de energia limpa. Entretanto, para a criação de uma usina hidrelétrica, há inúmeros impactos ambientais, como impacto sobre a fauna e flora local, aumento do efeito estufa (emissão de CO₂), eutrofização da água da represa, entre outros impactos (JUNIOR, 2010), necessitando-se buscar fontes de energia limpa que tenham pouco impacto sobre o meio ambiente. Desta forma, a energia solar é uma fonte potencial a ser utilizada na matriz energética (FU et al., 2014).

PENG et al., (2012) descreveu em seu artigo a necessidade urgente de novas tecnologias renováveis, especialmente a tecnologia fotovoltaica, para lidar com os desafios de escassez de energia e problemas ambientais como as mudança climáticas, o aquecimento global, a poluição do ar, chuva ácida entre outros. É nesse contexto que surge a necessidade de avaliar quão limpa são essas fontes renováveis, em especial a energia que será abordada neste trabalho, que é a energia fotovoltaica. Mas para isso é necessário avaliar os impactos que essa energia possa ter perante o meio ambiente, e desta forma, comparar os impactos gerados entre a energia fotovoltaica e o mix de energia brasileira.

1.2. JUSTIFICATIVA

Tendo como base as informações citadas na problematização, surge a necessidade de implantar fontes de energia renováveis que possam complementar a energia elétrica convencional. A utilização da energia solar na matriz energética poderá ser inserida na matriz para abastecer residências, comércios e indústrias. Um método bastante estabelecido na área de pesquisa para avaliar os impactos que um processo produtivo possa ter é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de determinado produto ou processo. A ACV é um método bastante utilizado para quantificar impactos ambientais por ser uma ferramenta consolidada e robusta. Além de avaliar os impactos ambientais, a ACV é importante para o aprimoramento de um processo produtivo, para tomada de decisões, definições de prioridades, entre outros. Os indicadores obtidos nos resultados gerados pela ACV poderão mensurar os impactos gerados, podendo ser indicadores locais, regionais ou globais. Exemplos de indicadores que podem ser analisados são as emissões de gases de efeito estufa (GEE), toxicidade humana, potencial de acidificação, eutrofização, potencial de depleção da camada de ozônio, entre outros impactos, além da análise de energia e água consumidas em todo o processo produtivo. Esses indicadores

são importantes para uma possível mudança de tecnologia no processo de produção ou produto, otimizando o uso de energia, água e materiais utilizados. Desta forma, a avaliação do ciclo de vida será uma ferramenta muito importante para estudar a viabilidade ambiental e mensurar os impactos ambientais gerados na produção do módulo fotovoltaico, comparativamente com a energia elétrica utilizada na matriz energética brasileira.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos ambientais da geração de eletricidade a partir do módulo fotovoltaico por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV) desde sua produção até sua aplicação como fonte de energia elétrica em uma residência, bem como a avaliação dos impactos causados na geração da energia elétrica e analisar a viabilidade de uma inserção maior da energia fotovoltaica para produzir energia elétrica no país.

1.3.2. Objetivos específicos

- Elaborar o inventário de ciclo de vida de todo o processo produtivo do módulo fotovoltaico desde a extração do silício até a produção do módulo;
- Modelar a produção do módulo fotovoltaico e elucidar os cenários: Cenário 1- Produção na China, Cenário 2- Produção China-Brasil;
- Analisar o efeito que a modelagem das distâncias podem causar na emissão de poluentes na atmosfera;
- Avaliar comparativamente os impactos das seguintes categorias em relação ao sistema de energia do mix brasileiro:
 - Consumo de Energia (kWh);
 - Consumo de Água (kg);
 - Potencial de Aquecimento Global [PAG (100 anos)];
 - Potencial de Acidificação (PA);
 - Potencial de Eutrofização (PE);

- Potencial de Toxicidade Humana (PTH);
- Depleção Abiótica Fóssil (DAF).

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1.MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz energética brasileira começou a se desenvolver a partir da Segunda Guerra Mundial, em 1945. Alguns fatores que foram importantes contribuíram para o aumento de demanda por energia elétrica, como o crescimento demográfico, crescimento da industrialização e urbanização. A criação da Petrobrás, Eletrobrás e companhias estatais foram muito importantes para o desenvolvimento das fontes de energia elétrica no país. Entre os anos 70 e 80, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDES) incentivou e financiou geradoras privadas para o investimento em energia (GUERRA et al., 2014). O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), criado entre 1997 e 1998 tinha o dever de reestruturar a Eletrobrás e empresas afiliadas a fim de controlar as operações de geração e transmissão de energia elétrica. E a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada de acordo com a *LEI N° 9.427*, de 26 de dezembro de 1996 que teve como atribuição, conforme Art 2º, regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal (D.O de 27.12.1996, seção 1, p. 28653). A Tabela (1) ilustra a Oferta Interna de Energia (OIE) de petróleo no país separadas por energias renováveis e não renováveis.

De acordo com a Tabela (1), observa-se que de 2015 para 2016 houve um aumento de 7,3% na utilização de fontes não renováveis e um aumento de 1,4% no uso de fontes renováveis. A partir dos dados apresentados, demonstra-se que a dependência ainda existe de fontes não renováveis. Porém, a utilização do petróleo e seus derivados teve um aumento de 5,6% no valor relativo em porcentagem de 2015 para 2016, dessa forma o que ocasionou um aumento na utilização de fontes não renováveis foi o crescimento do gás natural e no carvão mineral. Em 2015 a utilização de fontes renováveis era de 41,3% com um aumento para 43,5% em 2016 com a energia hidráulica e eletricidade representando 12,6%. Abordando a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) a Tabela (2) vem mostrar as principais fontes de energia elétrica no Brasil.

Tabela 1. Composição da Oferta Interna de Energia no Brasil de 2015 e 2016 separadas por energias renováveis e não renováveis (MME, 2017).

ESPECIFICAÇÃO	Toneladas equivalentes de petróleo		Aumento da (OIE) entre 16/15 em %	Valor Relativo em %	
	2015	2016		2015	2016
NÃO RENOVÁVEL	175.903	162.975	7,3	58,7	56,5
PETRÓLEO E DERIVADOS	111.626	105.354	5,6	37,3	36,5
GÁS NATURAL	40.971	35.569	13,2	13,7	12,3
CARVÃO MINERAL E DERIVADOS	17.625	15.920	9,7	5,9	5,5
URÂNIO (U308) E DERIVADOS	3.855	4.211	9,2	1,3	1,5
OUTRAS NÃO RENOVÁVEIS (*)	1.826	1.921	5,2	0,6	0,7
RENOVÁVEL	123.668	125.345	1,4	41,3	43,5
HIDRÁULICA E ELETRICIDADE	33.897	36.265	7	11,3	12,6
LENHA E CARVÃO VEGETAL	24.900	23.095	7,2	8,3	8,0
DERIVADOS DA CANA DE AÇÚCAR	50.648	50.318	0,7	16,9	17,5
OUTRAS RENOVÁVEIS	14.223	15.667	10,1	4,7	5,4
TOTAL	299.570	288.319	3,8	100,0	100,0
Dos quais fósseis	172.047	158.763	7,7	57,4	55,1

(*) Gás industrial de alto forno, aciaria, coqueira, enxofre e de refinaria.

Analisando a Tabela (2), observa-se que houve aumento para quase todas as fontes de energias renováveis entre 2015 e 2016. Isso deve-se ao fato das novas energias renováveis como o bagaço de cana, energia eólica e solar estarem ganhando mercado. A energia eólica por exemplo está tendo papel de destaque na região nordeste, onde o índice do potencial eólico é bastante atrativo. O uso de energia solar também vem crescendo devido ao seu alto índice de radiação solar no Brasil. Tanto as usinas de grande porte, quanto micro e mini geração dispostos podem ser sistemas conectados à rede ou isolados. O percentual de utilização da energia solar é maior que o registrado na Tabela (2), mas a falta de registro desses dados deve-se ao fato da não contabilização da energia gerada de forma isolada da rede (*off grid*). Locais usuais desse tipo de geração são fazendas de difícil ou nenhum acesso à energia elétrica.

Tabela 2. Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) no Brasil (MME, 2017).

ESPECIFICAÇÃO	GWh		Aumento da (OIEE) entre 15/16	Valor Relativo em %	
	2015	2016		2015	2016
HIDROELÉTRICA	359.743	380.911	5,9	58,4	61,5
BAGAÇO DE CANA	34.163	35.236	3,1	5,5	5,7
ÉOLICA	21.626	33.489	54,9	3,5	5,4
SOLAR	59	85	44,5	0,010	0,014
OUTRAS RENOVÁVEIS	15.074	15.805	4,8	2,4	2,6
ÓLEO	25.657	12.103	52,8	4,2	2,0
GÁS NATURAL	79.490	56.485	28,9	12,9	9,1
CARVÃO	18.856	17.001	9,8	3,1	2,7
NUCLEAR	14.734	15.864	7,7	2,4	2,6
OUTRAS NÃO-RENOVÁVEIS	11.826	11.920	0,8	1,9	1,9
IMPORTAÇÃO	34.422	40.795	18,5	5,6	6,6
TOTAL	615.650	619.693	0,7	100,0	100,0
<i>Sendo fontes renováveis</i>	465.087	506.320	8,9	75,5	81,7

PEREIRA, et al., (2006) descreveu no Atlas Solarimétrico de Energia Solar (2016), que a Amazônia não está conectada ao Sistema Interligado de Distribuição de Energia Elétrica (SIN) pela dificuldade na instalação de rede elétrica. Devido a esse fato, a utilização da energia fotovoltaica é imenso sendo utilizado centenas de MWh somente na Amazônia.

No entanto, a utilização da energia solar em forma de sistemas isolados que são utilizados na Amazônia, não são contabilizadas nos relatórios da ANEEL, pois esta registra somente sistemas que estão conectados à rede elétrica. A Figura (1) apresenta o potencial disponível para geração de energia fotovoltaica (FV) na região Norte do Brasil.

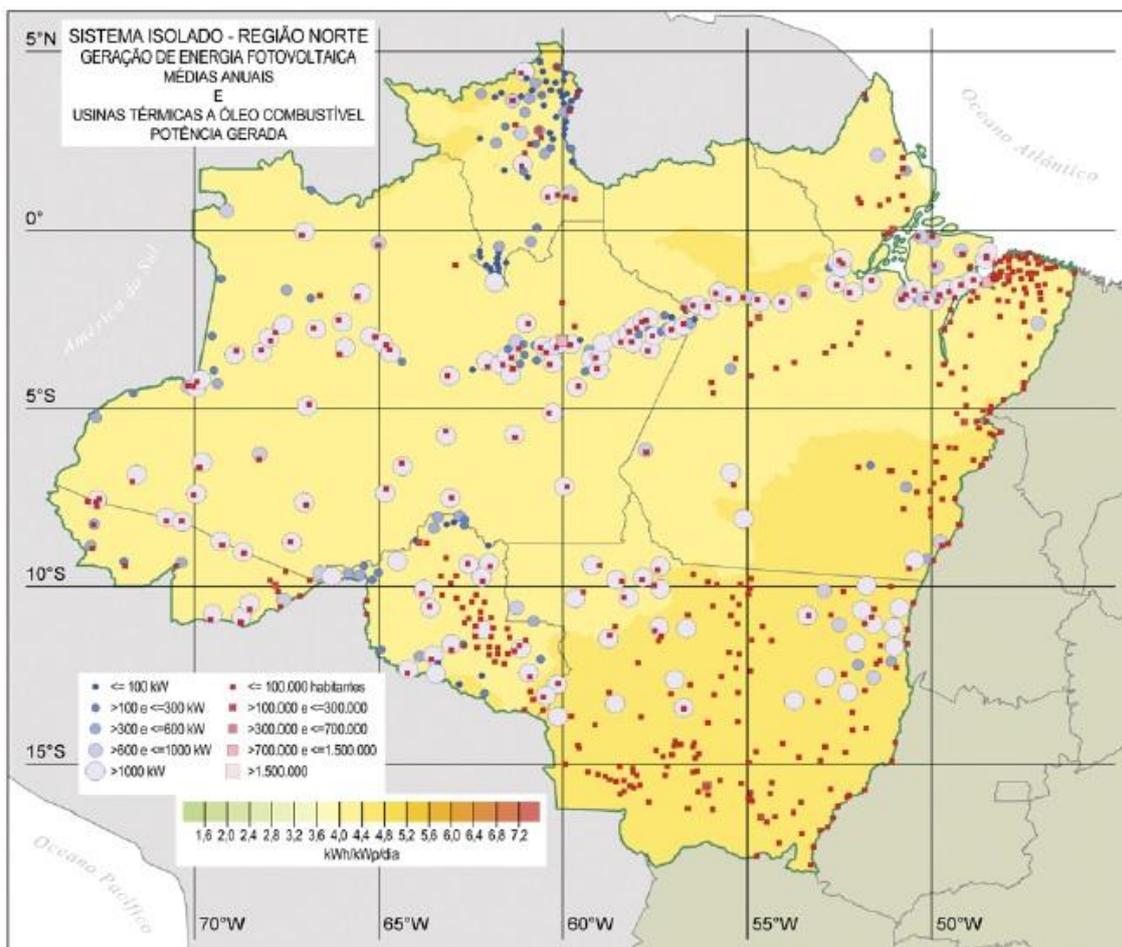


Figura 1. Potencial de Energia FV na região Norte do Brasil apresentando os pontos de instalação de sistemas fotovoltaicos isolados (PEREIRA, et al., 2006).

A região Amazônica possui uma média de radiação solar de 5,5 Wh/m².dia que é considerado um fluxo elevado de radiação solar. Os sistemas FV podem ser adicionados à sistemas híbridos, combinados com a energia térmica e à óleo combustível que já é utilizada usualmente na região (PEREIRA, et al., 2006).

Foi importante ressaltar os dados de utilização da energia fotovoltaica na Amazônia para ressaltar como a energia FV é utilizada em todo o território brasileiro, no entanto, somente os sistemas conectados à rede são registrados pela ANEEL. Deixando de fora os sistemas isolados que são bastante utilizados em locais sem acesso ao sistema interligado de energia. Dessa forma, a geração de energia FV registrada pela ANEEL seria maior caso houvesse também um registro dos sistemas isolados.

2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR

A principal fonte de energia que o planeta Terra possui é o Sol. A irradiação solar é uma fonte de energia para todos os seres vivos (fauna e flora). O Sol possui áreas principais designadas como núcleo, fotosfera, zona radioativa, cromosfera, zona convectiva e corona como mostrado na Figura (2). O núcleo é a região mais densa do Sol, onde a temperatura pode chegar até 15 milhões de Kelvin.

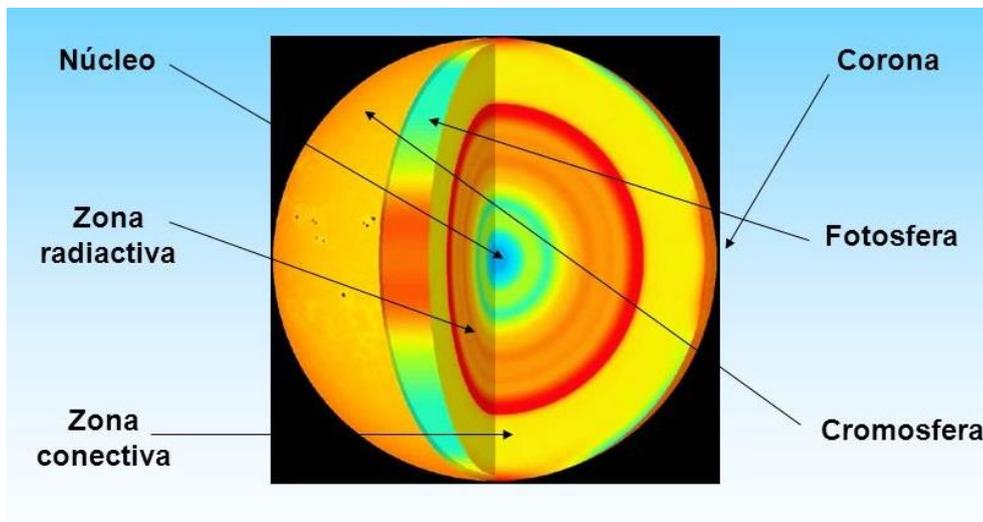


Figura 2. Partes do Sol (LUNES, 2015).

De acordo com a base de dados internacional SWERA, o Brasil possui um potencial solar de 24.993.114.080 MWh/ano, sendo o quinto na posição dos países com melhor potencial solar (NREL, 2016). A Figura (2) apresenta a Radiação Global Horizontal Anual do Brasil de 2006.

Observa-se na Figura (3) que a radiação global do Brasil pertence à faixa entre 4,0 a 7,0 kWh/m²/dia. A região Nordeste e o noroeste de Minas Gerais possuem o maior potencial para o uso de sistemas FV (5,0 a 7,0 kWh/m²/dia), pois é onde apresentam os maiores índices de irradiação solar do país. Também possuem as menores variações de radiação, mostrando que haverá índices altos de radiação de forma constante. Os menores índices de irradiação estão na Região Sul (4,0 a 5,0 kWh/m²/dia), além de possuir uma variação maior dos índices ao longo do ano (ALVES et al., 2014).

A Figura (3) é necessária para embasar o cálculo da capacidade do sistema fotovoltaico que será apresentado nos resultados e discussão. (CABRAL et al., 2013) fazem um comparativo entre o potencial do Brasil e da Alemanha, que é um país de destaque na utilização de energia solar na sua matriz energética. É mostrado que a região

que possui menor insolação no Brasil com 1642 kWh/m² possui maior irradiação que a melhor região da Alemanha com 1300 kWh/m². Avaliando os dados citados, percebe-se então, que toda a região do Brasil possui um bom índice de irradiação solar com potencial para geração de energia FV.

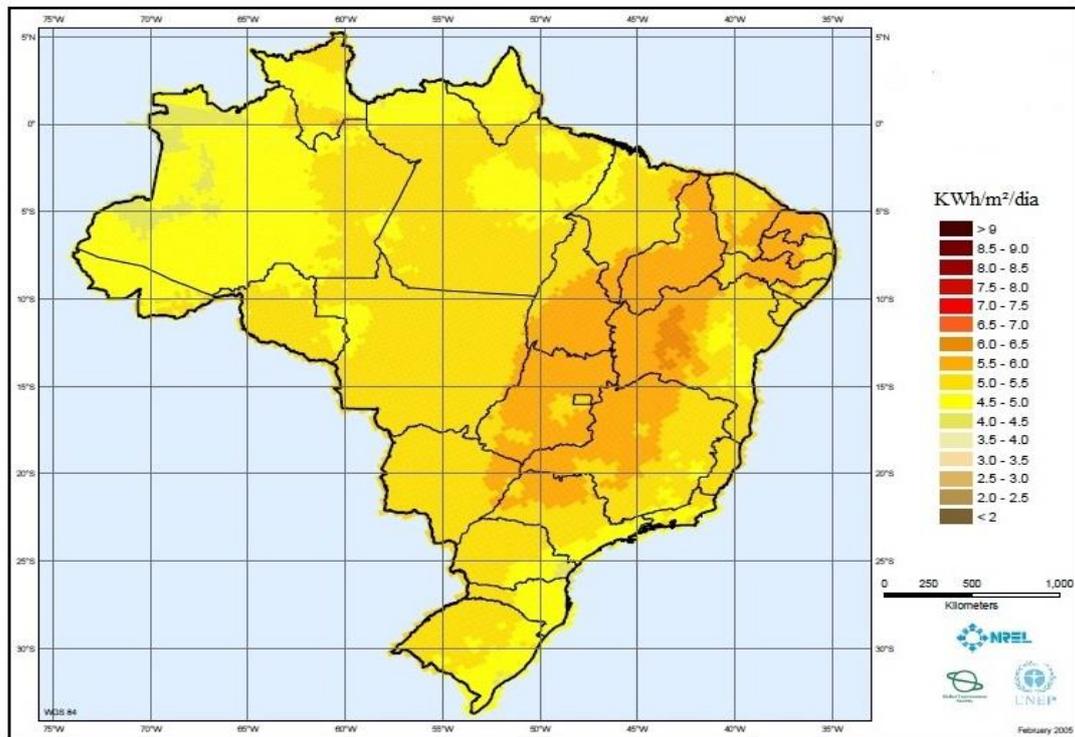


Figura 3. Índices de Radiação Solar Global em KWh/m²/dia no Brasil de acordo com cada região do país (NREL, 2016).

2.3. ENERGIA FOTOVOLTAICA

2.3.1. Sobre a energia fotovoltaica

A energia fotovoltaica provém do efeito fotovoltaico que decorre da excitação dos elétrons na presença de luz solar. Este efeito é obtido pela conversão direta de energia solar em energia elétrica. Dessa forma, a energia fotovoltaica tem a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir uma corrente elétrica. A utilização da energia solar para produção de energia elétrica, surgiu a pouco mais de 160 anos. Em 1839, Edmond Becquerel, um cientista francês, descobriu o efeito fotovoltaico observando suas experiências eletrolíticas. Em seus experimentos, ele percebeu que se gerava mais

eletricidade quando a célula eletrolítica era exposta à luz solar, o efeito fotovoltaico (PROCI, 2004; PINHO & GALDINO, 2014).

OLIVEIRA & JÚNIOR (2011) relatou que a produção em nível industrial da tecnologia fotovoltaica foi somente iniciada em 1956 com a corrida espacial e mais impulsionada em 1973 com a crise do petróleo. Após isso, houve um rápido desenvolvimento da tecnologia, ARANTEGUI & JÄGER-WALDAU (2017) relatam que em 2015 houve uma produção global de células fotovoltaicas entre 56 GW a 61 GW com aumento em 2016 entre 65-76 GW mostrando o rápido crescimento e produção dos componentes fotovoltaicos.

Grande parte dos módulos fotovoltaicos produzidos no mundo provém da China. As grandes empresas na purificação de silício se encontram neste país (ESPOSITO & FUCHS, 2013), conforme mostra a Figura (4).

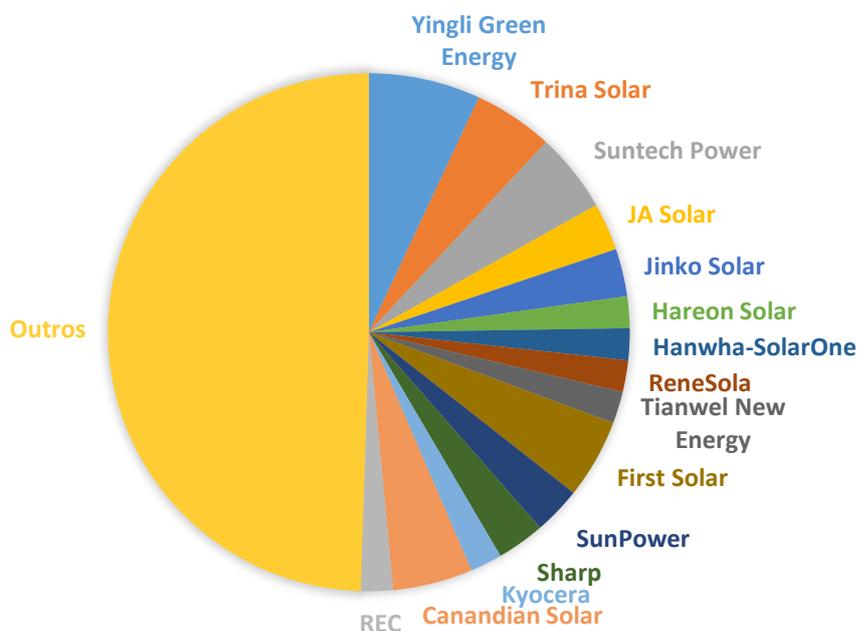


Figura 4. Principais fabricantes de módulos fotovoltaicos no mundo em 2012 (EPIA, 2013).

A Figura (4) reforça o grande papel de destaque que a China representa no mercado de tecnologia fotovoltaica. A competitividade das empresas chinesas contribuiu para a melhoria do custo dos componentes fotovoltaicos.

ESPOSITO & FUCHS (2013) informam em seu artigo que dentre as várias tecnologias existentes na área de energia solar, os módulos fotovoltaicos se destacam em 80% das vendas realizadas no ramo do silício policristalino, completado com 20% das vendas de silício amorfo. A Figura (5) ilustra a cadeia produtiva do silício cristalino.

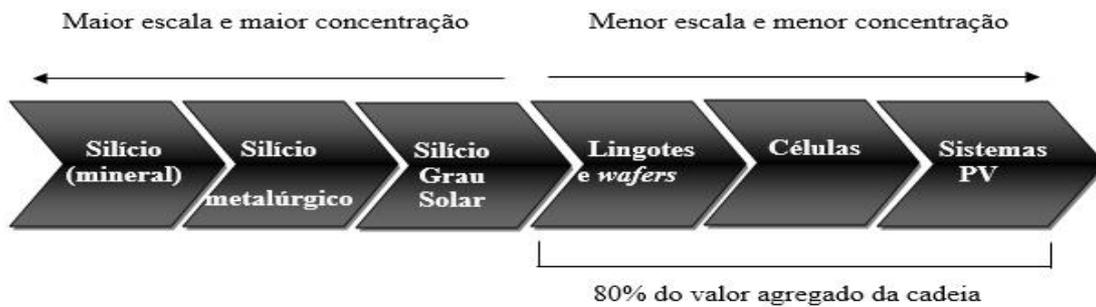


Figura 5. Cadeia de produção do silício cristalino (ESPOSITO & FUCHS, 2013).

2.3.2. Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos

O silício é o segundo elemento químico mais abundante da terra, sendo obtido a partir das rochas de quartzo. O silício teve início do seu desenvolvimento tecnológico com o crescimento da indústria eletrônica. Com a evolução dos componentes eletrônicos, a tecnologia para a extração e purificação do silício se desenvolveu simultaneamente, pois era a matéria básica para produtos como chips, transistores e circuitos integrados (ESPOSITO & FUCHS, 2013). De acordo com RISTIMÄKI et al., (2013), a energia fotovoltaica é um dispositivo semiconductor que é usado para converter a luz solar em eletricidade de corrente contínua. Com base na Figura 4, serão explicados as utilizações do silício policristalino a partir do silício de grau solar, pois a partir deles são confeccionados os lingotes e *wafers*, células e módulos.

Para a utilização do silício no sistema fotovoltaico, é necessário que este elemento atinja um grau altíssimo de pureza, para alcançar uma qualidade de purificação conhecido como Silício Grau Solar (SiGS) com 99,99% de pureza, necessário para condução de energia elétrica (SERODIO, 2009).

No processo de purificação do silício neste estudo foi realizado a partir do processo Siemens. São utilizadas barras de silício reduzido ou metalúrgico (onde o grau chega-se até 99,5%) são expostas, à temperatura de 1.150°C, ao gás triclorossilano, que se decompõe e deposita o silício puro nas barras, fazendo com que se atinja uma pureza aproximada de 99,99% (CARVALHO, MESQUITA & ROCIO, 2017). Para a purificação do silício através do processo Siemens, foi realizado uma reação do silício metalúrgico com ácido clorídrico. Depois o composto é destilado através de uma reação com hidrogênio e é feita a disposição de silício de alta pureza. O silício que é obtido através desse processo é o policristalino (MEI, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos utilizam basicamente dois tipos de células, a célula mono cristalina e a policristalina, o que as diferenciam é o modo de produção do *wafer* de silício conhecido como formato de “bolacha”. O *wafer* é gerado através da produção do lingote. O processo de produção do lingote é criado a partir de uma semente de silício fixada à uma haste central. Esta haste é tracionada enquanto o silício gira e fica fundido à semente, desta forma, o formato final do *wafer* é um disco (POSTAL, 2014). A Figura (6) ilustra o processo de produção do lingote.

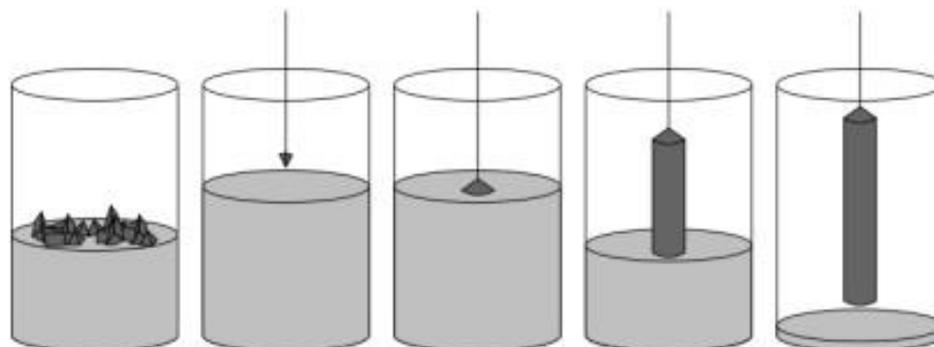


Figura 6. Produção do lingote de silício (POSTAL, 2014).

O componente básico para a geração de eletricidade é a célula fotovoltaica. A matéria-prima da célula fotovoltaica é o silício cristalino. Dentre os tipos de silício existentes, há três tipos de silício que são utilizados na produção de uma célula fotovoltaica, o silício mono cristalino, o silício policristalino e o silício amorfo.

A célula monocristalina é obtida através de barras cilíndricas (*wafer*) onde são produzidas em fornos adequados. Ela possui uma eficiência maior quando comparada aos outros tipos de tecnologias fotovoltaicas existentes (ROSA, 2008).

A célula policristalina é produzida a partir de pedaços de silício, onde estes são obtidos por moldes especiais e moldados a partir da fusão. Devido à junção de vários pedaços, os átomos de silício não se organizam em um único cristal, criando-se assim uma célula com várias superfícies. A eficiência do módulo decresce um pouco devido a esse processo (PINHO & GALDINO, 2014).

As células mono e policristalina são estruturas rígidas. Já as células de silício amorfo é maleável, e pode se adequar a arquitetura do local de instalação. Essas células são obtidas a partir da decomposição de camadas bastante finas de silício. Sua eficiência é a menor dentre as células de poli e mono cristalino (ROSA, 2008). De acordo com RISTIMÄKI et al., (2013), a energia fotovoltaica é um dispositivo semiconductor que é usado para converter a luz solar em eletricidade de corrente contínua. As fitas de silício

são formadas por filmes finos que são uma película fina plana, nas quais são fundidas em uma estrutura policristalina. As fitas de silício possuem uma eficiência um pouco mais baixa quando comparadas com as Poly-Si (células policristalinas). No entanto as fitas de silício apresentam custos mais baixos, pois há uma redução na produção de resíduos (TIWARI & DUBEY, 2010).

O módulo fotovoltaico basicamente é um conjunto de células dispostas em um arranjo. Essa associação serve para produzir corrente e tensão necessária para o funcionamento prático do sistema. Uma única célula possui em média uma tensão de 0,6 V, não sendo suficiente para utilização (PINHO & GALDINO, 2014). Foi necessário então montar um conjunto de células que tem por denominação módulo. Os módulos comerciais possuem 60 células dispostas em série com tensão de 37,8 V e corrente de 8,8 A em média. PINHO & GALDINO (2014) explica que de acordo com cada instalação elétrica, esses módulos podem ser conectados em série ou paralelo de acordo com a sua utilização. Os módulos são fabricados em fábricas totalmente automatizadas, praticamente sem interferência humana, tornando o processo de alta qualidade e baixo custo.

2.3.3. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Atualmente, existem três tipos de sistemas fotovoltaicos, são eles: conectados à rede, isolados e híbridos. De acordo com a NBR 11704 (2008), os sistemas fotovoltaicos se dividem quanto à interligação e quanto à configuração. Quanto à interligação existem dois tipos:

- **Sistemas isolados:** Sistema no qual não há necessidade de uma rede elétrica para transmitir a energia produzida.

A energia que é produzida através dos módulos solares deve ser armazenada em baterias. O sistema isolado é composto por inversor *off grid*, controlador de carga, módulos fotovoltaicos e baterias estacionárias (KABAKIAN et al., 2015). Os sistemas isolados são utilizados em locais onde não há rede elétrica da concessionária ou que a rede seja de difícil acesso. Esse tipo de tecnologia é bastante utilizado para bombeamento de água, iluminação residencial, poste solares e algumas cargas da residência como televisores, tomadas e lâmpadas (PINHO & GALDINO, 2014).

- Sistemas conectados à rede: são sistemas nos quais a interligação é conectada à rede elétrica da concessionária.

Os sistemas conectados à rede também são conhecidos por sistemas *on grid* ou *grid tie*, estes possuem como componentes básicos o módulo fotovoltaico e o inversor *on grid*. Os sistemas conectados à rede são ligados junto ao quadro da concessionária. Esse sistema tem o propósito de redução de custos, pois como o sistema está conectado à rede elétrica, no momento em que a rede da concessionária cair, esse sistema também desligará. Este tipo de acontecimento é conhecido como "anti-ilhamento", essa é uma tecnologia registrada no inversor, quando a rede cai, o inversor para de funcionar por questões de segurança (PINHO & GALDINO, 2014). É um método de segurança, pois caso algum técnico vá realizar a manutenção na rede elétrica e houver energia do sistema fotovoltaico sendo enviada para a concessionária, o mesmo levará um choque elétrico tendo um risco de morte. O sistema conectado à rede por demandar basicamente dois produtos principais é bastante utilizado no mercado e mais barato que o sistema isolado. Uma vantagem do sistema *on grid* é que o projeto pode ser realizado para atender todo o consumo de uma conta simples de energia, e o proprietário somente pagará a tarifa básica de energia (CEB, 2014).

Quanto à configuração, a Tabela (3) mostra os tipos de sistemas fotovoltaicos existentes e suas principais aplicações:

- Sistemas puros: são sistemas que utilizam o gerador fotovoltaico (módulo fotovoltaico) como único elemento de geração de energia (NBR11704, 2008).

Os sistemas puros foram os exemplificados acima, que usam somente como fonte geradora os módulos fotovoltaicos, podendo estar ou não conectados à rede elétrica.

- Sistemas híbridos: Associação do gerador fotovoltaico com outros tipos de fontes de energia que geram energia elétrica (NBR11704, 2008).

Os sistemas híbridos são interligados aos sistemas fotovoltaicos como por exemplo geradores a diesel, nobreaks e outras fontes de energia que geram energia elétrica. Esse tipo de associação pode ser utilizado como estratégia para que o sistema não dependa da rede elétrica da concessionária, caso não transmita energia para o local de geração (GÁRCIA, 2004). Percebeu-se que o sistema isolado possui diversos tipos de aplicações, dentre as que mais se destacam são o bombeamento, as telecomunicações e a

iluminação. Nos sistemas conectados à rede elétrica tem-se por destaques a geração de energia residencial, industrial e comercial.

Tabela 3. Exemplo de classificação dos sistemas fotovoltaicos (NBR11704, 2008).

Tipo de sistema		Alimentação dos consumidores	Acúmulo de energia elétrica	Componentes básicos	Aplicações típicas
Sistemas Isolados	Puros	Tensão Contínua	Não	Seguidor de potência máxima (desejável)	Bombeamento, produção de hidrogênio, etc.
			Sim	Controlador de carga e acumulador	Iluminação, telecomunicações, sinalização náutica, cerca elétrica, proteção catódica, etc.
		Tensão Alternada	Sim	Controlador de carga, acumulador e inversor	Bombeamento, uso industrial, etc. Eletrificação rural, bombeamento, telecomunicações, uso industrial, iluminação, etc.
	Híbridos	Tensão Contínua	Sim	Controlado de carga, acumulador e gerador complementar	Telecomunicações, iluminação, sinalização rodoviária e ferroviária, etc.
		Tensão alternada	Opcional	Controlado de carga, acumulador opcional e gerador complementar	Iluminação, uso industrial, etc.
		Puros	Tensão alternada	Não	Inversor
Sistemas conectados à rede elétrica	Híbridos	Tensão alternada	Não	Inversor, gerador complementar	Aplicações residenciais, industriais e comerciais, produção de energia para a rede pública, etc.
			Sim	Inversor, gerador complementar e acumulador	Eletrificação rural, industrial, suprimento ininterrupto de energia, etc.

NOTA: Todos os tipos de sistemas possuem gerador fotovoltaico entre os componentes básicos (módulos FV).

2.4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

2.4.1. O que é a ACV

Os estudos sobre ACV iniciaram durante a primeira crise do petróleo em meados da década de 60. A partir desse período o mundo despertou para a necessidade de se utilizar melhor e mais sustentável os recursos naturais. Iniciou-se então estudos para avaliar os processos produtivos com o intuito de otimizar o consumo energético. Estes estudos ficaram conhecidos como *Resource Environmental Profile Analysis* – REPA (JUNIOR et al., 2007).

O ciclo de vida é um conjunto de etapas dentro de uma cadeia produtiva. Desta forma a Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta usada para tomada de decisões baseada nos resultados levantados por essa avaliação, sendo em muitos casos, os impactos ambientais por ele contabilizados (BLUMENSCHNEIN & MILLER, 2016). A ACV (em inglês *Life Cycle Assessment-LCA*) é uma das grandes ferramentas na gestão ambiental, muito utilizada no âmbito da sustentabilidade. A ACV estuda todos os aspectos que estão relacionados a um produto, principalmente aspectos ambientais e os impactos que são gerados ao longo de sua produção e utilização. Desta forma, a ACV avalia desde a extração da matéria prima, a produção do insumo e o seu descarte. Os impactos gerados podem estar relacionados ao uso recursos, a danos à saúde humana e a consequências ecológicas (ABNT, 2001).

Para CALDEIRA-PIRES et al., (2005), a ACV tem por objetivo avaliar os impactos causados ao meio ambiente e à saúde. Onde são associados a um produto, processo, serviço ou atividade econômica durante todo o ciclo de vida. Realizando-se uma Avaliação do Ciclo de Vida, a longo prazo, pode-se realizar mudanças tecnológicas na produção e nos produtos otimizando a energia, os materiais e os processos de reciclagem e reutilização do produto (JUNIOR et al., 2007).

Para CHOI et al., (2012), a ACV é o método mais aceito na maior parte dos casos, para avaliar o desempenho ambiental de determinado processo ou produto. Com esse método, é possível avaliar desde a extração da matéria-prima, seu processamento, fabricação, distribuição, uso do produto e gerenciamento do fim de vida. Do ponto de vista econômico, a ACV pode ser utilizada em empresas e organizações para avaliar o impacto que seus produtos, ações ou serviços podem gerar ao longo da cadeia produtiva (ENCICLO, 2014).

Após a análise da ACV de um produto ou insumo, essa análise pode servir para identificar pontos ao longo da sua aquisição, produção, utilização ou descarte que possam estar gerando problemas ambientais e assim poder corrigi-los ou mitiga-los. Também pode ser usada para a tomada de decisões, após a análise da ACV pode ser mudado um plano estratégico ou definições de prioridades. Uma área crescente que a ACV vem se desenvolvendo é na área de *marketing*, muitas empresas usam desse recurso para diminuir impactos ambientais causados na produção de determinado produto e fazer com que a empresa se torne sustentável ou que possa possuir um Selo Verde, do qual seu produto se torna diferenciado do mercado.

2.4.2. Estrutura da ACV

As fases da ACV estão ilustradas na Figura (7). De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a ACV se divide em quatro fases, a definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e a interpretação das três fases anteriores. A ISO 14040 normatiza a Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura.

Na fase da definição do objetivo e escopo deve ser escolhido a fronteira do sistema, a unidade funcional, quais os requisitos de qualidade dos dados e qual o objetivo de estar fazendo essa análise. A análise de inventário é a fase onde os dados são coletados e inseridos nas entradas e saídas do sistema, dados qualitativos e quantitativos. Na fase de avaliação dos impactos é observado a significância dos impactos ambientais potenciais, ou seja, os que mais foram relevantes na análise. Ao final da coleta das três fases, é feita então uma interpretação dos resultados obtidos visando alcançar conclusões e recomendações.

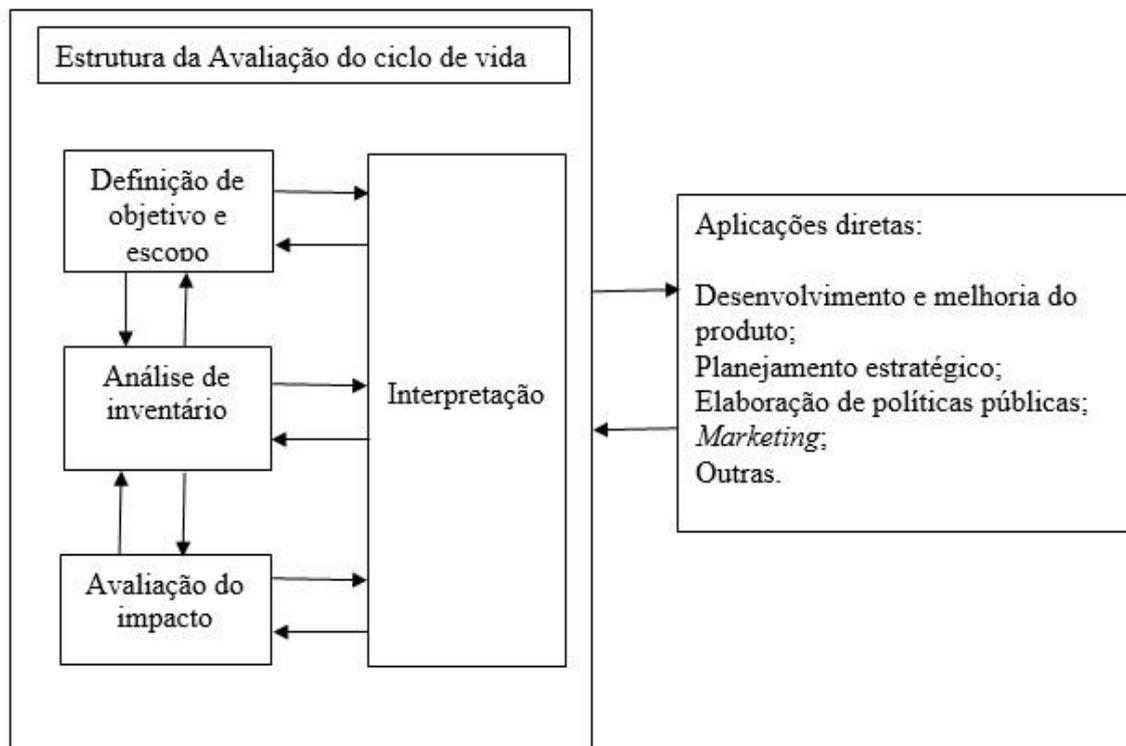


Figura 7. Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ABNT, 2001).

A segunda fase da ACV que é o inventário é bastante importante para a avaliação do impacto ambiental e a relevância ambiental que a análise poderá ter. BRAVI et al., (2011) resalta a importância de cada item do inventário, pois estes poderão ser agregados em pequenos grupos de indicadores, ou indicadores individuais para identificar o impacto ambiental que cada um poderá contribuir ao longo do seu ciclo de vida.

A ACV irá avaliar as entradas e saídas e os potenciais impactos ambientais gerados pelo sistema de produto. Há uma avaliação do impacto ambiental e uma interpretação dos dados para a tomada de decisão. Há também uma análise de inventário do ciclo de vida, nele há uma avaliação dos dados quantitativos de entradas e saídas de um determinado sistema ao longo do seu ciclo de vida. O termo Saída pode ser uma quantidade de material ou de energia que deixou a unidade do processo. E por fim, o sistema de produto são o conjunto de entradas e saídas que tanto podem ser um material ou uma energia.

2.4.3. Metodologia da ACV

A Figura (8) ilustra as etapas básicas de uma ACV em geral. O fluxograma representado na Figura (8) ilustra os processos de entrada e saída do sistema (ROSA, 2008).

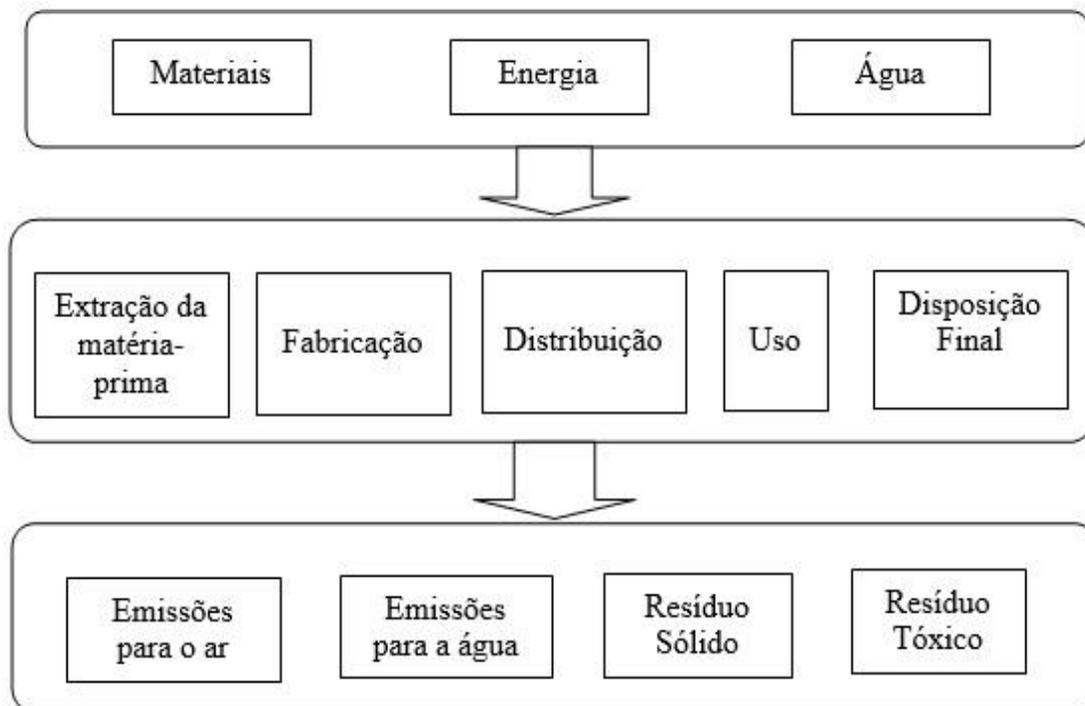


Figura 8. Etapas básicas no processo de ACV (COLTRO, 2007).

Analisando a Figura (8) observa-se que as entradas do processo são relacionadas às matérias, energia e água. Durante os processos eles iniciam na extração da matéria-prima e podem ir até a disposição final do produto. E possuem saídas, onde podem ser emissões para o ar ou para a água, resíduos sólidos ou tóxicos.

2.4.4. Elementos fundamentais da ACV

2.4.4.1. Unidade Funcional

Toda Avaliação do Ciclo de Vida precisa ter como base uma unidade funcional para o estudo. Durante a definição do escopo é necessário definir quais as funções que estão avaliadas no estudo. (COLTRO, 2007) explica que a unidade funcional tem por objetivo quantificar o desempenho do produto com uma função associada a ele. Essa unidade funcional será uma referência durante todo o inventário, as entradas e saídas serão associadas a essa base funcional.

2.4.4.2. Fronteira da ACV

A fronteira do sistema define os limites de estudo, quando começa a análise da ACV até qual ponto ela será analisada (COLTRO, 2007). Toda análise possui limitações, dessa forma as fronteiras definem as limitações do estudo. O levantamento inicial da fronteira é definido no início da fase da definição do objetivo e escopo, mas ao ser feito o levantamento do inventário é que se define o final da fronteira, pois somente com todo o levantamento feito, é que se pode saber quais as fronteiras que poderão ser analisadas, sendo que se alguma parte do processo não for levantada, a mesma deve estar clara no estudo (COLTRO, 2007) (ROSA, 2008). CHOI et al., (2012) relatou em seu artigo que o uso arbitrário das fronteiras do sistema, sem uma análise prévia, poderá introduzir erros significativos nas análises dos resultados da ACV. Assim, a análise de um inventário é de extrema importância para que a ACV gere resultados concisos.

A Figura (9) ilustra as quatro principais maneiras de definir a fronteira do sistema baseadas na ISO 14044.

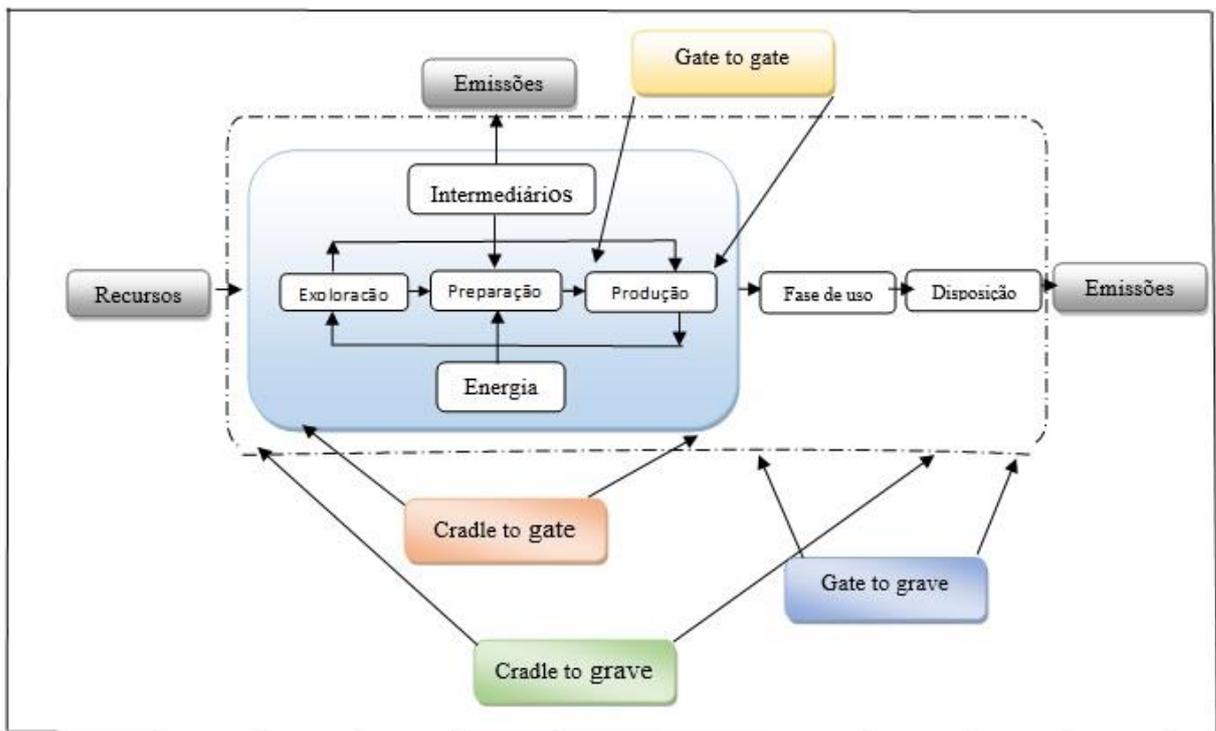


Figura 9. Principais maneiras de definir a fronteira de um sistema (GABI, 2017).

CRADLE TO GATE: Este tipo de fronteira analisa desde o “berço” do sistema, como por exemplo, o início da extração até o produto no portão da fábrica (MORETTI et al., (2017) (GABi, 2017).

CRADLE TO GRAVE: Além de iniciar com a extração da matéria-prima, o termo *cradle to grave* passa pela fase produção, transporte, fase de uso do produto até finalizar na disposição final do produto ou a sua reciclagem (SILVA & OLIVEIRA, 2014).

GATE TO GATE: Este tipo de fronteira ocorre quando tem-se a intenção de avaliar as fases de produção que ocorrem dentro do portão da fábrica. Este tipo de avaliação pode ser usado por exemplo, para analisar um único processo inserido na fase produtiva de um determinado produto. (CAMPOS, 2012).

GATE TO GRAVE: O termo do “portão ao túmulo” é usado para avaliar o produto que sai da sua produção e é utilizado até sua fase final. Este tipo de avaliação é mais utilizado para determinar impactos ambientais na fase de vida útil do produto (GABI, 2017).

2.5. CATEGORIAS DE IMPACTO

A ACV pode ser interpretada a partir das categorias de impacto que são analisadas. Neste estudo, foram estudadas sete categorias de impacto que foram utilizadas para embasar os resultados encontrados. Abaixo são discutidos sobre as definições e algumas considerações da ACV na energia fotovoltaica.

Água

Estudos de ACV relatam a quantidade total de água usada pelo sistema de produção a partir da fronteira *cradle to grave* (“do berço até o túmulo”). MILÀ & CANALS et al. (2009) mostra como a água pode ser abordada em ACV tendo como características as principais vias de impacto. Eles estudam a definição dos fluxos que requerem quantificação no Inventário de Ciclo de Vida (ICV).

A partir de estudos realizados, foram verificados que são usadas pelos autores duas terminologias para o uso de água doce. São conceitos de entrada e saída do sistema de produção. Estes conceitos são apresentados abaixo:

- Entrada de água: a água ocorre na forma de "água verde" (que é armazenada como composto do solo e disponível para evaporação através das lavouras e vegetação terrestre) e "água azul" (armazenada na superfície ou águas subterrâneas).
- Saída de água: a saída da água tem como definição o retorno para a natureza. No entanto essa água pode ser reutilizada, como por exemplo, ela pode ser evaporada

e retornar para a base original onde pode ser usada para outros fins após a saída do sistema. A saída da água também pode ser evaporada e dissipada para o meio ambiente após ser usada (CLAUDINO & TALAMINIA,2013).

Também são definidos os tipos de impactos associados à água doce. Que são eles:

- Impactos de água doce (*Freshwater Ecosystem Impact* -FEI): indicadores relativos ao atual uso da água doce para a disposição dos recursos da água doce.
- Esgotamento de água doce (*Freshwater Depletion*-FD): os parâmetros necessários para a avaliação comumente utilizada dos potenciais esgotamentos abióticos (CLAUDINO & TALAMINIA,2013).

Energia

O indicador utilizado para medir o consumo de energia foi o *net calorific value* dado em kWh. Ele analisa a quantidade de energia disponibilizada com a quantidade de energia consumida naquele sistema. Estudos de balanço energético consideram tanto a energia direta quanto a energia indireta consumida no processo. Essa energia abrange todas as etapas de produção desde a extração até a disposição dos resíduos. A utilização da energia é um aspecto local ou regional. Ou seja, de acordo com a localidade do processo de produção do produto, a fonte de energia irá variar com a que é utilizada na localidade (DONKE, 2016).

Aquecimento Global

O aquecimento global está relacionado com atividades humanas que aumentam a concentração na atmosfera dos gases de efeito estufa (GEE) como o dióxido de carbono (CO₂) devido à queima de combustíveis fósseis. Também estão presentes nos GEE o metano que provém da decomposição anaeróbica de matéria orgânica e o óxido nitroso relacionado à fertilizantes nitrogenados e indústria química. A alta concentração desses gases produz um aquecimento gradual da superfície da Terra mudando a dinâmica dos oceanos e da atmosfera. (VILELA,2013) (FILHO & MACEDO, 2010). Para quantificar o Potencial de Aquecimento Global (PAG) são necessários saber previamente quais são os GEE que foram emitidos. O gás de referência do PAG é o CO₂, desta forma, o PAG é expresso em quilogramas equivalentes de dióxido de carbono (RODRIGUES, 2013).

Potencial de Acidificação

RODRIGUES, (2013) explica que a acidificação é uma reação de alguns componentes químicos que reagem com a umidade do ar. Estes componentes químicos são emitidos por sistemas humanos que são formados por SO₂, NO_x e NH₃. Assim, um potencial alto de acidificação pode contribuir com a chuva ácida e danos ao meio ambiente. O Potencial de Acidificação (PA) é dado em quilogramas de dióxido de enxofre equivalente. Seu indicador é expresso em SO₂ equiv.

Potencial de eutrofização

A eutrofização está relacionado com a deterioração da qualidade da água. Pode haver um enriquecimento de nutrientes na água ocasionando o crescimento de algas. Assim, a eutrofização é o enriquecimento de um ecossistema com nutrientes químicos como azoto, fósforo ou ambos. A eutrofização também está ligada à falta de oxigênio e desenvolvimento de algas no solo ou ambientes aquáticos devido à alta concentração de nutrientes. Sua unidade é dada em Kg Fosfato Equiv (LOPES, 2014).

Potencial de toxicidade Humana

A toxicidade humana pode ser ocasionada por atividades antrópicas que emitem substâncias químicas com difícil quebra molecular e podem atingir o ser humano através do meio ambiente em escala local ou regional como explica OMETTO et al., (2005). De acordo com GUINÉE et al., (2001) a categoria de impacto toxicidade humana cobre os impactos sobre a saúde humana (área de proteção), ocasionados por substâncias tóxicas presentes no meio ambiente.

O Potencial de Toxicidade Humana serve para mensurar o potencial dano de uma unidade de produto químico lançado no meio ambiente. Assim, pode-se basear a toxicidade presente em um composto e seu potencial (PALANOV, 2014). Compostos principalmente como arsênio, dicromato de sódio e fluoreto de hidrogênio, são causados, principalmente pela produção de eletricidade a partir de fontes fósseis. Estes são produtos químicos potencialmente perigosos para os seres humanos por inalação, ingestão e até mesmo contato físico (PALANOV, 2014). Esta categoria de impacto é mensurada em 1,4 – Diclorobenzeno equivalente. Seu indicador é dado em kg DCB - Equiv.

Potencial de Depleção Abiótica

Os recursos abióticos são considerados recursos naturais incluindo recursos energéticos como minério de ferro, óleo bruto e energia eólica que são considerados sistemas não vivos. O Potencial de Depleção Abiótica (PDA) são uma das categorias de impactos mais discutidas e existem vários tipos de métodos para caracterizar as contribuições referentes a esta categoria. Como por exemplo, a Depleção Abiótica Fóssil (DAF) que analisa principalmente análises que incluem a extração do produto como no caso desse estudo (CML, 2001). A DAF é dada em kg Sb-Equiv.

Considerações da ACV na Energia Fotovoltaica

BRAVI et al., (2011) reforça a importância da ACV na avaliação dos potenciais impactos associados à produção dos componentes fotovoltaicos ao longo do seu ciclo de vida. Em concordância com a norma de avaliação do ciclo de vida, VARUN et al. (2008) mostra que a ACV é uma técnica usada para avaliar vários aspectos relacionados ao desenvolvimento de um produto e a análise de um potencial impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida.

CHOI et al., (2012) apresenta em seu artigo os principais indicadores onde são analisados os impactos ambientais na produção do módulo fotovoltaico. Dentre os indicadores apresentados, CHOI et al., (2012) discute principalmente o Potencial de Aquecimento Global (GWP) onde as maiores categorias de impactos são apresentados na fabricação do silício e do módulo, sendo que de acordo com vários cenários estudados, um dos maiores índices encontrados foi de 40 kg CO₂ Equiv./módulo.

A ACV da produção do módulo fotovoltaico é um método utilizado para avaliar impactos ambientais, sendo uma ferramenta para tomadas de decisões quanto aos insumos inseridos na produção dos componentes fotovoltaicos e aos problemas decorrentes dos impactos ao meio ambiente ao longo de sua cadeia produtiva. De acordo com SHERWANI et al., (2011), a estrutura da ACV baseada na tecnologia fotovoltaica divide-se no levantamento do inventário de materiais para a vida útil total do sistema fotovoltaico, na compilação da energia do ciclo de vida, levantamento das emissões de GEE do ciclo de vida, que é estimado a partir de cada componente do Sistema FV que é estudado, estimativa da geração de eletricidade pelo sistema fotovoltaico e estimativa de

indicadores ambientais, ou seja, o tempo de retorno da energia gasta (*energy payback time*-EPBT) e as emissões de gases do efeito estufa (GEE).

PENG et al. (2012) ressalta que embora o sistema fotovoltaico seja amplamente reconhecido como uma das tecnologias mais limpas para a geração de energia, pois o mesmo não gera emissões durante a sua utilização. O sistema fotovoltaico consome muita energia e emissões durante seu ciclo de vida, particularmente nos processos de fabricação. Portanto, a fim de investigar minuciosamente os efeitos ambientais do ciclo de vida e a eficiência do retorno da energia do sistema fotovoltaico, a avaliação do ciclo de vida é essencial para mensurar a sua sustentabilidade.

Abordando o lado econômico, recentemente, as vendas globais de sistemas fotovoltaicos cresceram rapidamente. Atualmente, a maioria dos sistemas fotovoltaicos nos Estados Unidos (cerca de 77% da participação de mercado em 2009) são feitos de silício cristalino. O silício cristalino (c-Si) tem sido utilizado para aplicações fotovoltaicas há décadas e é o material mais considerado para ser a tecnologia FV mais estabelecida (DAVID, 2012). Esse crescimento econômico também foi devido ao fato do crescimento de empresas trabalhando na área de energia fotovoltaica e com isso aumentando a concorrência, o que acarreta redução no preço dos equipamentos. A energia fotovoltaica possui tanto potencial que VARUN et al., (2008) fala que a tecnologia fotovoltaica (FV) deverá ser líder de tecnologia para resolver as questões relativas à energia e ao ambiente, devido à várias vantagens do sistema fotovoltaico. Desta forma, o uso da tecnologia do sistema fotovoltaico tem muito a crescer e a ACV é uma ferramenta bastante importante para analisar a sustentabilidade desse sistema.

3. METODOLOGIA

3.1. ACV

Neste trabalho, a ACV será essencial para avaliar os impactos ambientais que são causados no processo produtivo do módulo fotovoltaico, uma vez que será analisada desde a extração do silício até a produção do módulo e fase de uso.

A metodologia descrita a seguir delinea todas as fases realizadas para a avaliação do sistema de produção do módulo fotovoltaico. O software utilizado na modelagem foi o *Thinkstep GaBi* versão *Education 2016* (<http://www.gabi-software.com/brazil/index/>). Os dados quantitativos usados em toda a metodologia foram baseados em dados secundários obtidos no artigo *Environmental Life Cycle Inventory Of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production* (ALSEMA & WILD-SCHOLTEN, 2005). Estes dados mesmo com o passar dos anos ainda são atuais pois a forma do processo produtivo continua similar, o que pode variar é o tipo de processo utilizado na purificação do silício e as fontes de energia usadas nos processos produtivos.

A coleta de dados incluiu todos os processos de entrada e saída do sistema que foram obtidos a partir da base de dados secundária. Os principais dados utilizados foram classificados como (GaBi, 2017):

- Insumos de energia;
- Entrada de matérias-primas (silício);
- Entradas auxiliares (energia, água);
- Outras entradas físicas;
- Produtos;
- Coprodutos;
- Resíduos;
- Emissões para ar, água e solo;
- Outros aspectos ambientais.

As etapas do processo foram divididas em extração do silício, purificação do silício policristalino, produção do *wafers* multicristalino, produção da célula de silício e produção do módulo fotovoltaico. O objetivo e escopo do sistema é a avaliação do ciclo de vida da produção do módulo.

3.1.1. Unidade Funcional e Fronteira do Sistema

A unidade funcional, escolhida da fase de objetivo e escopo da dissertação foi o 1 kWh. É importante ressaltar que ao final da avaliação de todo o processo produtivo, quantificada a energia gerada em função da quantidade de módulos fotovoltaicos instalados, facilitando a comparação com a energia gerada pela fonte hidrelétrica. Será realizado uma comparação da geração de energia solar e do mix de energia brasileira para alimentar uma casa de porte médio que consuma em torno de 330 kWh/mês de energia elétrica. Este consumo equivale à uma casa que possua um quarto com uma televisão, um computador e uma lâmpada fluorescente; uma cozinha com uma geladeira, fogão elétrico, espremedor, batedeira, liquidificador e uma lâmpada fluorescente; e com um banheiro que contenha um chuveiro, lâmpada fluorescente e um secador (COPEL, 2017).

A unidade funcional foi a geração de 330 KWh através da energia solar e da energia hidrelétrica necessária para alimentar uma residência de porte médio.

A fronteira do sistema foi definida como *cradle to grave* de acordo com a definição mostrada na Figura (9), pois a avaliação iniciou-se na extração do silício e finalizou na fase de utilização do módulo fotovoltaico até a sua fase de uso com a geração de eletricidade. A reciclagem do material não foi abordada neste trabalho. A Figura (10) abaixo ilustra a fronteira do sistema escolhido e cada processo analisado.

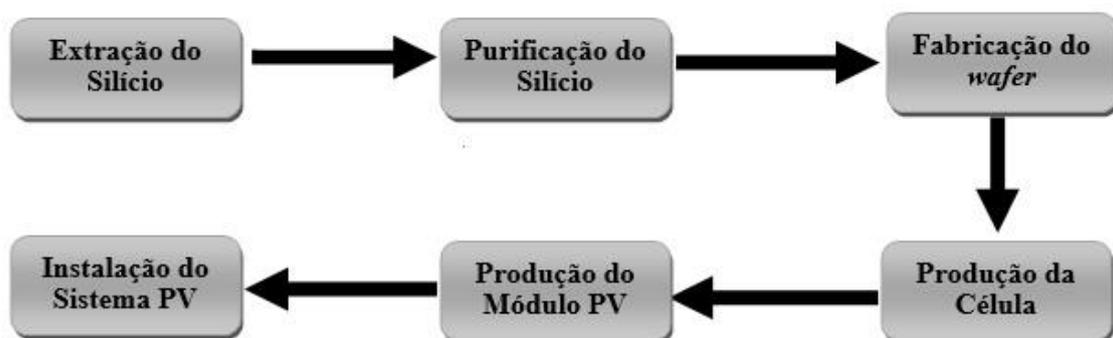


Figura 10. Fronteiras do sistema que irá desde a purificação do silício até o uso da energia em uma residência.

A Figura (10) representa o modelo padrão do processo de produção do módulo fotovoltaico. A partir desse modelo padrão, foram analisados dois cenários nos quais

variaram-se os transportes entre cada processo, dependendo da localidade de produção e as fontes de eletricidade utilizadas em cada cenário.

3.1.2. Inventário de Ciclo de Vida

Primeiramente, a Tabela (4) apresenta os dados do inventário para a purificação do silício.

Tabela 4. Dados de inventário para a purificação do silício policristalino (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).

PRODUTOS	UNIDADE	QUANTIDADE	PAÍS	REFERÊNCIA
ENTRADAS				
Silício grau metalúrgico	Kg	1,13	Global (GLO)	ts
Produtos químicos inorgânicos (NaOH, HCL, H ₂)	Kg	2,00	Global (GLO)	ts
Calor de gás natural	MJ	185	Europa (RER)	ts
Eletricidade, de ciclo combinado, com gás	KWh	45	China (CN)	ts
Eletricidade, mix de energia Chinesa	KWh	65	China (CN)	ts
SAÍDAS				
Silício policristalino, processo Siemens	Kg	1,00	Gobal (GLO)	ts

NOTA: as emissões através do gás natural não foram inclusas no estudo.

A purificação do silício foi realizado a partir do Processo Siemens. A extração do silício não está descrita em forma de entradas e saídas no estudo porque este dado foi coletado diretamente do GaBi Software em forma de processo, desta forma, o fluxo já estava pronto. A extração do silício foi representada na Tabela (4) como silício grau metalúrgico. Assim, entra o silício extraído para sair o silício purificado.

O próximo processo de produção foi o *wafer* multicristalino. Os componentes utilizados estão descritos na Tabela (5) abaixo.

Tabela 5. Dados do inventário para a produção do *wafer* multicristalino (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).

PRODUTOS	UNIDADE	QUANTIDADE	PAÍS	REFERÊNCIA
ENTRADAS				
Cadinho de quartzo (todo consumido)	Kg	3,9x10 ⁻¹	Alemanha (DE)	ts

Vidro	Kg	1×10^{-2}	Suíça (CH)	ts
Cabo de aço	Kg	1,49	Alemanha (DE)	ts
Carboneto de silício (SiC)	Kg	2,61		
Nitrogênio (N ₂)	Kg	$5,33 \times 10^{-2}$	Global (GLO)	ts
Argônio (Ar)	Kg	$3,04 \times 10^{-1}$	Global (GLO)	ts
Hélio (He)	Kg	$1,36 \times 10^{-4}$	Global (GLO)	ts
Polietileno glicol (PEG)	Kg	2,63	Global (GLO)	ts
Éter monometílico de di-propileno glicol (DPM)	Kg	$3,03 \times 10^{-1}$	Global (GLO)	ts
Adesivo	Kg	$2,00 \times 10^{-3}$	Global (GLO)	ts
Hidróxido de sódio, 50% em H ₂ O	Kg	$1,49 \times 10^{-2}$	Europa (RER)	ts
Ácido clorídrico, 30% em H ₂ O	Kg	$2,72 \times 10^{-3}$	Europa (RER)	ts
Ácido acético 98% em H ₂ O	Kg	$3,0 \times 10^{-2}$	Europa (RER)	ts
Água da torneira (para lavagem)	Kg	$6,41 \times 10^{-3}$	Global (GLO)	ts
Água desionizada (para lavagem)	Kg	64,9	Global (GLO)	ts
Eletricidade, média tensão	KWh	30	China (CN)	ts
gas natural	MJ	39,6	China (CN)	ts
SAÍDAS				
Multi-Si-wafer	m ²	1	China (CN)	u-so
Desperdício de silício (não reciclado)	Kg	0,3	Suíça (CH)	ts
Corte de resíduos (Si + borra)	Kg	6,2	Alemanha (DE)	ts

Após a produção do *wafer* multicristalino, a célula cristalina é obtida a partir do *wafer*. Como informado anteriormente, a célula mono ou policristalina é obtida através

de barras cilíndricas (*wafer*) representado na Figura (10). O inventário da produção da célula cristalina é mostrado na Tabela (6).

Tabela 6. Dados do inventário da produção da célula multicristalina (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).

PRODUTOS	UNIDADE	QUANTIDADE	PAÍS	REFERÊNCIA
ENTRADAS				
Água, refrigeração	m ³	1,56x10 ⁻²	Global (GLO)	ts
Multi/mono-Si-wafer (156 m ²)	ρ	1,06	China (CN)	u-so
Pasta de fósforo	Kg	2,27x10 ⁻⁵	Global (GLO)	ts
Poliestireno expansível	Kg	6,36x10 ⁻⁶	Global (GLO)	ts
Nitrogênio (N ₂)	Kg	2,89x10 ⁻²	Global (GLO)	ts
Oxigênio (O ₂)	Kg	1,59x10 ⁻³	Global (GLO)	ts
Argônio (Ar)	Kg	4,01x10 ⁻⁴	Global (GLO)	ts
Amônia (NH ₂)	Kg	1,05x10 ⁻⁴	Global (GLO)	ts
Silano (SiH ₄)	Kg	1,89x10 ⁻⁵	Global (GLO)	ts
Hidróxido de sódio, 50% em H ₂ O (NaOH)	Kg	2,45x10 ⁻³	Europa (RER)	ts
Ácido acético, 98% em H ₂ O (CH ₃ COOH)	Kg	4,42x10 ⁻⁵	Europa (RER)	ts
Ácido de hidrogênio, 30% em H ₂ O (HCl)	Kg	7,12x10 ⁻⁴	Europa (RER)	ts
Fluoreto de hidrogênio (HF) 100%	Kg	5,89x10 ⁻⁴	Global (GLO)	ts
Ácido nítrico, 50% em H ₂ O (HNO ₃)	Kg	4,17x10 ⁻⁴	Europa (RER)	ts
POCl ₃ , Cloreto de fosforila	Kg	3,39x10 ⁻⁶	Europa (RER)	ts
Ácido fosfórico industrial, 85% em H ₂ O (H ₂ PO ₄)	Kg	1,19x10 ⁻⁴	Europa (RER)	ts
Silicato de sódio	Kg	1,17x10 ⁻³	Global (GLO)	ts
Cloreto de cálcio (CaCl ₂)	Kg	3,37x10 ⁻⁴	Europa (RER)	ts

Isopropanol	Kg	$1,23 \times 10^{-3}$	Global (GLO)	ts
Etanol	Kg	$9,98 \times 10^{-6}$	Global (GLO)	ts
Solventes orgânicos, não especificados	Kg	$2,24 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Água deionizada	Kg	2,15	Global (GLO)	ts
Eletricidade, média tensão	Kwh	$5,9 \times 10^{-1}$	China (CN)	ts
Gás natural	MJ	$7,42 \times 10^{-2}$	China (CN)	ts
Óleo combustível	Litro	$5,06 \times 10^{-4}$	Suíça (CH)	ts
SAÍDAS				
Multi-Si cell (156 m ²)	ρ	1	China (CN)	u-so
Alumínio	Kg	$1,21 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Cloreto de hidrogênio	Kg	$4,16 \times 10^{-6}$	Global (GLO)	ts
Chumbo	Kg	$1,21 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Partículas, não especificadas (para o ar)	Kg	$4,16 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Dióxido de silício	Kg	$1,13 \times 10^{-6}$	Global (GLO)	ts
Prata	Kg	$1,21 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Hidróxido de sódio	Kg	$7,56 \times 10^{-7}$	Global (GLO)	ts
Lata	Kg	$1,21 \times 10^{-5}$	Global (GLO)	ts
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	Kg	$3,02 \times 10^{-3}$	Global (GLO)	ts
Resíduos de células fotovoltaicas	Kg	$4,31 \times 10^{-3}$	Alemanha (DE)	ts
Multi-Si cell, para reciclagem	ρ	$1,76 \times 10^{-2}$	Europa (RER)	ts
Solução neutra de limpeza	M ³	$7,31 \times 10^{-1}$	Global (GLO)	ts

Com a produção da célula fotovoltaica, foi possível a produção do módulo fotovoltaico, onde seus componentes estão descritos na Figura (11).

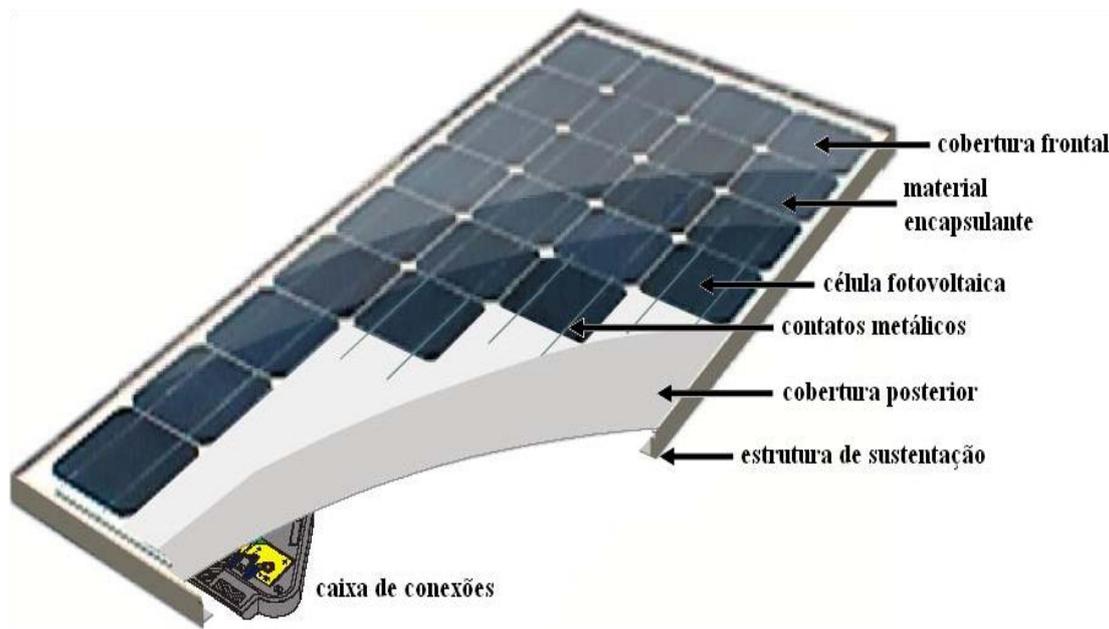


Figura 11. Componentes do módulo fotovoltaico (LISBOA, 2010).

Além da célula fotovoltaica, o módulo fotovoltaico é composto por vidro, interconectores para transporte de energia, suporte do módulo e *plugs* tipo MC4 para a captação e emissão da energia gerada, conforme descrito na Tabela (7).

Tabela 7. Dados de inventário da produção do módulo fotovoltaico (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).

PRODUTOS	UNIDADE	QUANTIDADE	PAÍS	REFERÊNCIA
ENTRADAS				
Células solares	Pc	73,4	Global (GLO)	ts
Perfil de alumínio	Kg	3,8	Global (GLO)	ts
Polifenilenoaxídico	Kg	0,2	Global (GLO)	ts
Folha de vidro, ferro baixo, temperado	Kg	11,4	Global (GLO)	ts
Cobre	Kg	0,14	Global (GLO)	ts
Lata	Kg	7×10^{-3}	Global (GLO)	ts
Chumbo	Kg	4×10^{-3}	Global (GLO)	ts
Níquel	Kg	2×10^{-3}	Global (GLO)	ts

Fluxo de solda	Kg	0,01	Global (GLO)	ts
Metanol	Kg	0,016	Global (GLO)	ts
Silicone	Kg	2,9x10 ⁻³	Europa (RER)	ts
Silicone kit	Kg	0,15	Global (GLO)	ts
Caixa de embalagem (papelão)	Kg	1,37	Global (GLO)	ts
Água da torneira	Kg	27	Global (GLO)	ts
Eletricidade, média tensão	KWh	8,33	China/Brasil (CN;BR)	ts
SAÍDAS				
Módulo-Si	Pc	1	China/Brasil (CN;BR)	u-so
Resíduos de células solares	Kg	0,015	Alemanha (DE)	ts
Vidro solar, baixo teor de ferro, reciclagem	Kg	0,11	Europa (RER)	ts

A água utilizada na Tabela (7) foi somente para limpeza dos componentes, desta forma, foi uma água líquida que após a limpeza foi reaproveitada. O vidro solar citado na Tabela (7) foi considerado apenas como um dado informativo onde há restos que vão para a reciclagem, no entanto, não foi abordado a reciclagem de materiais nesse estudo.

Tabela 8. Especificações técnicas do módulo fotovoltaico (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005).

Número de células (largura)	6 cm
Número de células (comprimento)	12 cm
Tamanho da célula (altura)	12,5 cm
Eficiência da célula	14,7%
Largura do módulo (sem estrutura)	80 cm
Comprimento do módulo (sem estrutura)	156 cm
Área do módulo (sem estrutura)	1,25 m ²
Número de células	72
Potência do módulo	165Wp
Eficiência do módulo	13,2%

Além dos dados quantitativos de inventário do módulo fotovoltaico, também são bastante importantes, as especificações técnicas do módulo. Tais especificações são descritas na Tabela (8). A Tabela (8) será bastante importante para dimensionar a energia produzida a partir do módulo fotovoltaico, pois ela apresenta a eficiência do módulo, o número de células que a compõe e a potência.

A célula fotovoltaica possui maior eficiência quando comparada com o módulo fotovoltaico, devido às perdas de energia quando são acopladas às 72 células que formam o módulo. É com a potência do módulo e mais alguns dados que são mostrados abaixo, que é possível identificar quanto de kWh que a energia fotovoltaica pode gerar.

Dados necessários para o dimensionamento de kWh gerados a partir do sistema fotovoltaico:

- Irradiação solar do local de instalação do sistema fotovoltaico;
- Consumo mensal de kWh/mês do estabelecimento;
- Percentual de conversão de energia;
- Potência do módulo fotovoltaico;
- Área necessária para a instalação;
- Quantidade de módulos;
- Capacidade do sistema em kWp.

A partir das informações citadas acima, é possível dimensionar a capacidade do sistema dado em kWp, esta unidade significa quanto de energia (kW) pode ser gerada em sua máxima capacidade de geração de eletricidade, que acontece quando o módulo recebe a maior quantidade de irradiação solar (1000 W/m^2). A Figura (12) mostra a geração de energia ao longo do dia.

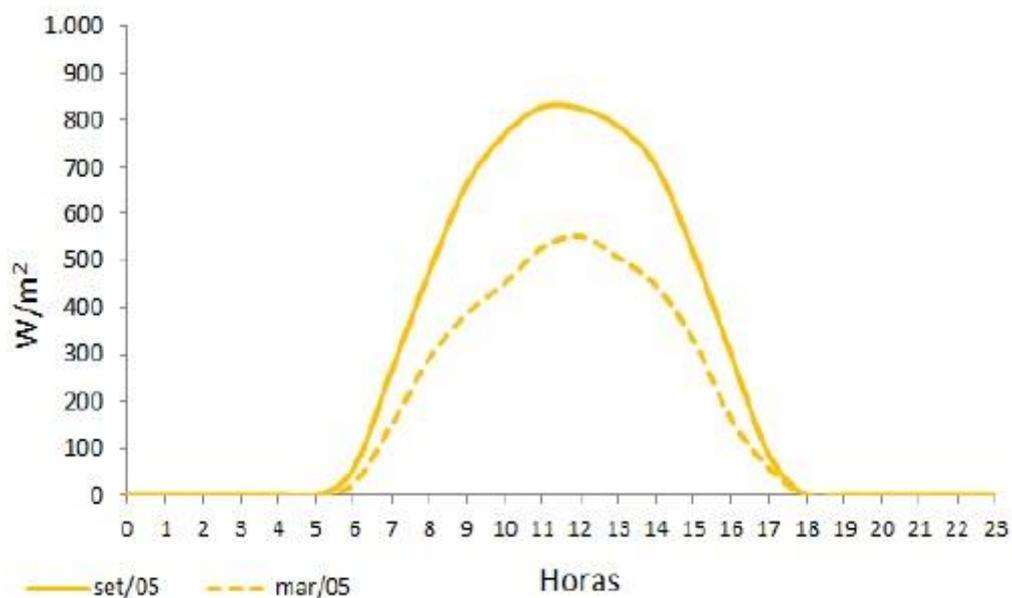


Figura 12. Geração da energia fotovoltaica ao longo do dia (PINHO & GALDINO, 2014).

A Figura (12) mostra que o horário de maior geração de energia é em torno das 12h da manhã, pois é quando há a maior incidência de irradiação de potência por metro quadrado (W/m^2). PINHO (2014) considera as horas úteis para geração de energia como Horas de Sol Pleno (HSP), esta medida reflete a quantidade de horas que a irradiação solar deve manter-se contante a $1000 W/m^2$, de forma que a energia resultante dependerá da irradiação do local acumulada ao longo do dia. A média de horas úteis para geração de energia em Brasília são de 6h (ANEEL2017), desta forma, a Equação (1) mostrará o cálculo de HSP.

$$HSP = \frac{6 \text{ KWh}/m^2}{1 \text{ KW}/m^2} = 6 \text{ h/dia} \quad (1)$$

Os dados de irradiação de cada localidade do país podem ser encontrados no site do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), este contém mapas com a média de irradiação global para todo o Brasil.

3.1.3. Modelagem dos Cenários

Tendo em vista a análise de produção mundial dos módulos fotovoltaicos, percebe-se que os processos de extração do silício até a produção do *wafer* ocorrem em sua grande parte na China. Após essa fase, o módulo pode ser montado na própria China ou montado no país de comercialização. Assim, o inventário da extração, purificação do silício e produção do *wafer* foram dados coletados a partir da fabricação na China (ALSEMA, & WILD-SCHOLTEN, 2005). O material que será utilizado para a modelagem do sistema, será o silício policristalino, pois o mesmo apresenta eficiência bastante similar ao silício mono cristalino, no entanto, seu valor comercial é mais baixo, o que o torna mais atrativo no mercado.

Dentre as informações citadas acima, foram definidos dois Cenários de modelagem da produção do módulo fotovoltaico. Os cenários estão ilustrados nas Figuras (13) e (14) abaixo.

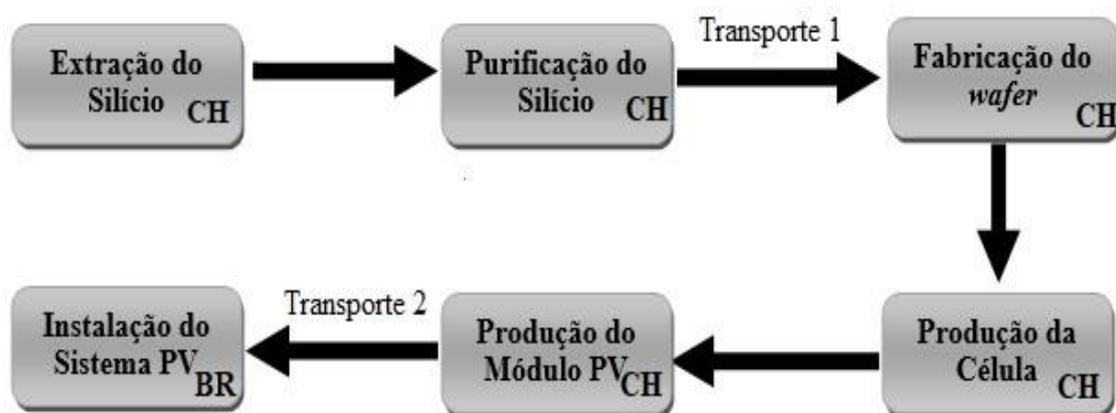


Figura 13. Cenário 1 - Produção do módulo fotovoltaico na China com instalação em Brasília.

O Cenário 1 foi modelado com a extração do silício até a produção do módulo feito na China. O módulo chega então montado no Brasil e a instalação é feita em Brasília.

A informação sobre qual país foi realizada a extração do silício não foi apresentada foi devido ao fato deste dado ter sido coletado do banco de dados do GaBi e o mesmo coletou dados globais para esta fonte. Assim, aonde foi feita a extração e por qual meio de transporte chegou até a China na fábrica de purificação não será considerado. A Tabela (9) definiu quais foram os meios de transporte utilizados no Cenário 1 bem como as distâncias assumidas na modelagem.

Tabela 9. Definição dos transportes e distâncias do cenário 1.

TRANSPORTE	MODELAGEM	DISTÂNCIA (km)
Transporte 1: Caminhão	Fábrica de Fine Silicon- Fábrica Hainan	2.597
Transporte 2: Caminhão + navio	Fábrica De Hainan- Porto de Yangpu-Porto de Itajaí- Brasília	34.997

Para modelagem das distâncias, assumiu-se como locais de fabricação a empresa Yingli Solar. A purificação do silício foi feita na fábrica Fine Silicon e a produção dos *wafers*, células e módulos, na fábrica de Hainan. Após a finalização do módulo, este foi levado via transporte rodoviário para o Porto Yangpu onde foram enviadas para o Porto de Itajaí-SC, assim, a primeira distância foi definida. O transporte 2 saiu do Porto de Itajaí e seguiu via transporte rodoviário (caminhão) para Brasília, onde os módulos foram instalados.

O Cenário 2 foi modelado assumindo-se que o *wafer* foi produzido na China e a montagem dos módulos no Brasil. A empresa escolhida para modelar a distância foi a Globo Brasil, primeira montadora de painéis fotovoltaicos no Brasil, inaugurada em 2015 em Valinhos-SP (BRASIL, 2017). Desta forma, o *wafer* veio da China, o módulo foi montado no Brasil e enviado para os distribuidores nacionais. O Cenário 2 é ilustrado na Figura (14).

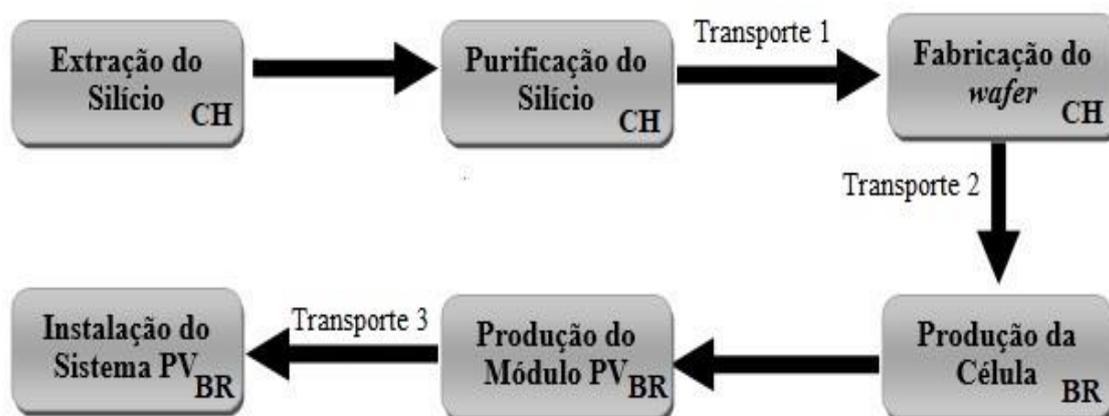


Figura 14. Cenário 2 - Produção da célula na China com montagem do painel PV no Brasil e instalação em Brasília.

Os meios de transporte bem como suas distâncias estão descritos na Tabela (10).

Tabela 10. Definição dos transportes e distâncias do cenário 2.

TRANSPORTE	MODELAGEM	DISTÂNCIA (km)
Transp 1: Caminhão	Fábrica de Fine Silicon- Fábrica Hainan	2.597
Transp 2: Caminhão + navio	Fáb. De Hainan- Porto deYangpu- Porto de Itajaí-Valinhos	34.076
Trasp. 3: caminhão	Valinhos- Brasília	928

Após a modelagem dos dois cenários, foi feita uma comparação assumindo-se que a mesma residência alimentada pela energia fotovoltaica fosse alimentada pela energia elétrica no Brasil (*grid mix*). Esta energia irá alimentar uma residência padrão brasileira que apresenta um consumo médio de 330 KWh/mês.

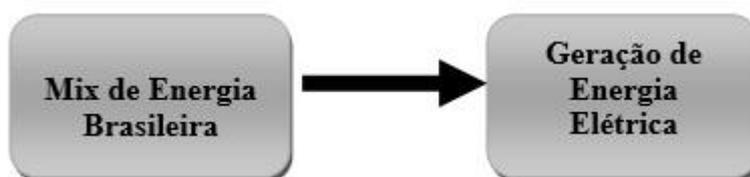


Figura 15. Ilustração da energia elétrica usada em uma residência a partir das fontes de energia no Brasil tendo como principal fonte a energia hidrelétrica.

A Figura (15) representa a utilização do mix de energia brasileira para gerar energia elétrica. O mix de energia brasileira é representado pelas principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil como a hidrelétrica, termelétrica, eólica, gás natural, entre outros como foi mostrado na Tabela (2) para gerar eletricidade para alimentar uma residência com um consumo médio de 330 KWh/mês. Esta comparação é bastante importante para analisar os impactos que são causados com a utilização das principais fontes de energia brasileira e com a energia fotovoltaica.

3.1.4. Modelagem no GaBi Software

A modelagem em Gabi envolveu a implementação dos dados de inventário e os dois cenários propostos. O passo a passo para a modelagem do processo foi:

- Ativar a base de dados Gabi;
- Criar um plano nomeado como ACV módulo fotovoltaico;
- Criar os processos a partir dos dados quantitativos;
- Adicionar as entradas e saídas de cada processo;
- Criar fluxos quando necessário;
- Criar objetos quando necessário;
- Definir os fluxos que são elementares no processo;
- Verificação do balanço de massa;
- Adicionar os processos ao plano dos fluxos elementares;
- Inserir os processos de transporte;
- Agregar os processos;
- Analisar os cenários no explorador de parâmetros Gabi;
- Geração dos resultados;
- Analisar os resultados.

Para a realização de todas as etapas citadas acima foi necessário a utilização dos tutoriais GaBi_Paperclip_tutorial_Part1 e GaBi_Paperclip_tutorial_Part2 bem como Gabi_6_manual, ambos disponíveis na plataforma Thinkstep Gabi disponível em <<http://www.gabi-software.com/brazil/index/>> na aba “My GaBi” opção “GaBi Learning Center”. Os tutoriais e o manual foram de extrema importância para o aprendizado e domínio do software, bem como de referência na definição dos termos utilizados.

Os dados secundários coletados no artigo (ALSEMA & WILD-SCHOLTEN, 2005) foram inseridos nos processos como entradas e saídas, conforme descritos nas Tabelas (5), (6), (7) e (8).

Outro passo muito importante foi a análise do balanço de massa. Este passo foi realizado para todos os processos criados. Desta forma a quantidade de massa que sai no processo deve ser a mesma que entra, tendo então a Equação (2).

$$\text{Massa [Kg]} = \text{saídas} - \text{entradas} = 0 \quad (2)$$

De acordo com (GaBi, 2017), existem 5 tipos de definições de processos de acordo com Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD) da União Europeia (Commission, 2017). São eles:

- Unidade de Processo (u-so) ;
- Caixa Preta de processo unitário (u-bb);
- Processo do berço-ao-portão (agg);
- Processo com parte os dados da ACV (p-agg);
- Sistema de produto evitado (aps).

Para a criação de cada processo produtivo, o processo utilizado a partir do sistema ILCD foi o u-so. Este tipo de processo é utilizado para referenciar um processo de unidade ou um processo que referencia cada etapa do processo em um inventário do ciclo de vida (GaBi, 2017). Ou seja, o processo u-so é utilizado para criar processos porta-a-porta (*gate-to-gate*). Foram criados 6 processos, sendo que cada processo criado é um *gate-to-gate*.

Após a inserção dos processos no plano, foram adicionados os processos de transportes ao modelo. Foram utilizados 3 transportes, conforme descrito na metodologia. Os meios de transporte usados foram o transporte rodoviário por meio do caminhão e o transporte naval por meio do navio. O que irá diferenciar de um cenário do outro é a distância percorrida pelos transportes. A distância adotada para o transporte 1 é mantida em todos os cenários. No entanto, para o transporte 2 a distância é variada. Já o transporte 3 foi inserido somente no Cenário 2.

Após a modelagem dos cenários, a última etapa da metodologia foi a Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida. Estes resultados são obtidos em função de todas as entradas e saídas de cada processo incluído no modelo. É a partir da análise de resultados que obtém-se informações sobre os indicadores de ciclo de vida e dos fluxos totais de energia e água inseridos no modelo.

A análise dos resultados foi feita para os dois cenários, cada um continha um plano no GaBi. O primeiro plano mostrando a purificação do silício até a produção do módulo FV mostrando o Cenário 1 representado na Figura (16).

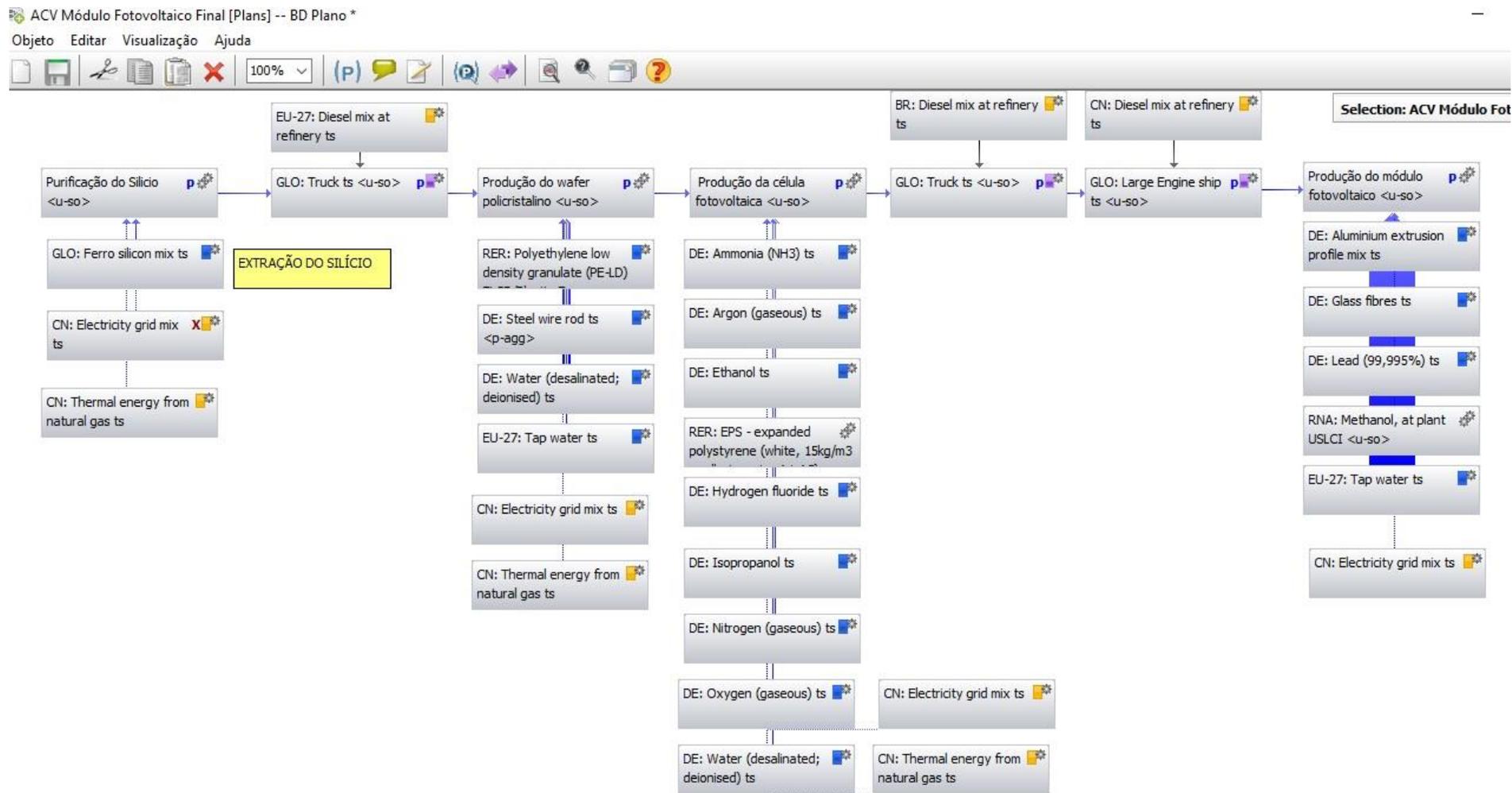


Figura 16. Plano representando o Cenário 1, englobando todas as fases de produção do módulo fotovoltaico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a modelagem dos cenários, os resultados foram tratados e organizados neste item para apresentar de uma forma geral as análises das categorias de impacto. Toda a análise foi realizada em torno da unidade funcional em kWh para alimentar uma residência com um consumo médio de 330 kWh/mês de energia elétrica. A fronteira do sistema adotada foi o *cradle to grave* que se iniciou com a extração do silício até a fase de uso do módulo fotovoltaico.

4.1. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

O Cenário 1 foi modelado com todo o processo produtivo sendo realizado na China. Houve os transportes internos na China que foram do silício purificado para a fábrica de produção do *wafer* e deslocamento do módulo FV até o Porto de cargas na China conforme demonstrado na Tabela (9). Depois o módulo FV seguiu de navio até o Porto no Brasil e em seguida para o seu destino final, que foi Brasília, para ser instalado e aplicado.

Já o Cenário 2 considerou o que já vem acontecendo no Brasil, desde 2015. Existem montadoras que estão sendo instaladas no Brasil e fabricando seus próprios painéis. No entanto, como não há fábricas de purificação a grau de silício solar no país, estas fabricantes importam a célula ou o *wafer* e finalizam a produção no Brasil.

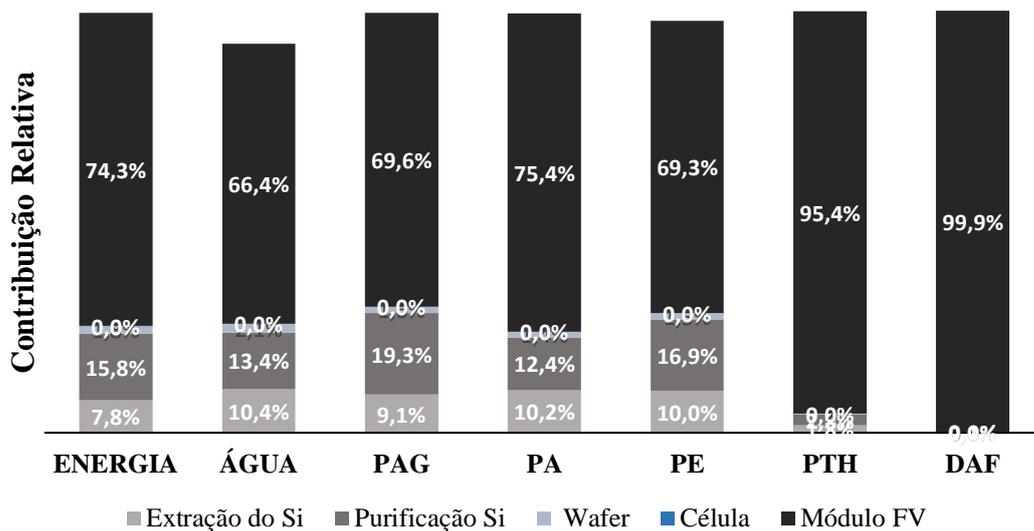
Em todos os cenários, foram analisados 7 categorias de impacto escolhidos baseados na literatura que aborda ACV de sistemas de energia (FU,2014) (ALSEMA,2011). Essas categorias de impacto fazem parte do método de avaliação *midpoint CML 2001* (2010):

- Consumo de Energia (kWh);
- Consumo de Água (kg);
- Potencial de Aquecimento Global [PAG (100 anos)];
- Potencial de Acidificação (PA);
- Potencial de Eutrofização (PE);

- Potencial de Toxicidade Humana (PTH);
- Depleção Abiótica Fóssil (DAF).

A Figura (17) representa a contribuição relativa (%) referente às categorias de impacto analisadas a partir dos processos que foram analisados desde a extração do silício até a produção do módulo.

A)



B)

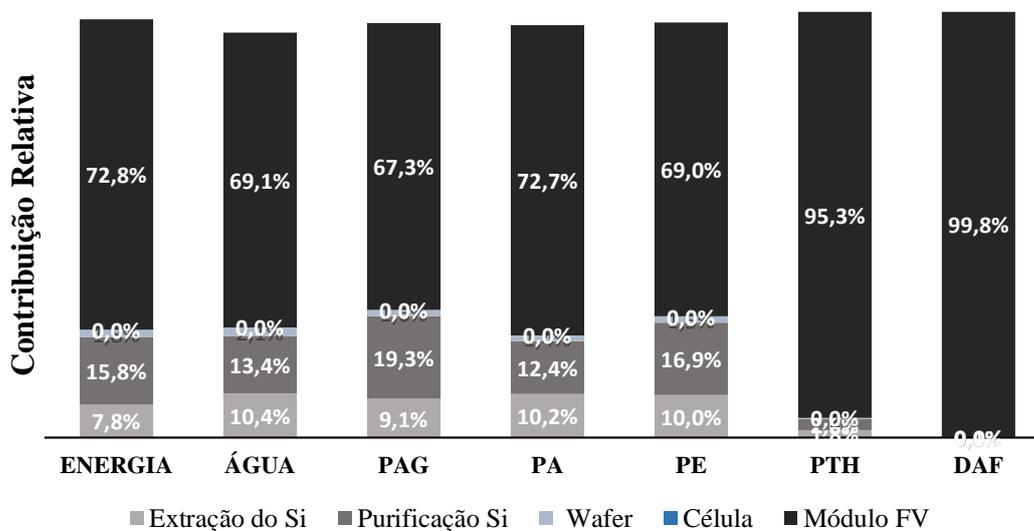


Figura 17. Impactos ambientais para o Cenário 1 (A) e Cenário 2 (B) a partir das categorias de impacto de energia (Energia), Consumo de água (Água), Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Eutrofização (PE) e Potencial de Toxicidade Humana (PTH) e Depleção abiótica Fóssil(DAF) respectivamente.

Observa-se a partir da Figura (17) uma grande contribuição da produção do módulo nas categorias de impacto. Em seguida veio a purificação do silício, a extração, e a produção do *wafers*. A célula não apresentou nenhuma contribuição relativa devido ao fato de seus percentuais não terem alcançado sequer 1%.

Ainda analisando a Figura (17), percebe-se que tanto para o Cenário 1 quanto para o Cenário 2 o módulo fotovoltaico foi o principal contribuinte de impactos em todos os indicadores de análise. Isso se deve ao fato de além do conjunto de células solares, o módulo também é constituído por vidro e alumínio que agregam grande contribuição nos impactos ambientais. E a partir dos dados obtidos no GaBi Software, os mesmos apresentaram grande contribuição na produção do módulo FV. ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) também mostraram em seu livro que os principais contribuintes em emissões gasosas na produção do módulo fotovoltaico são o vidro e o alumínio. A purificação do silício foi o segundo processo que mais contribuiu para os impactos avaliados. Este resultado resultou da contribuição do mix de energia utilizado na China tendo o carvão com grande utilização na matriz energética (PAUTASSO & OLIVEIRA, 2008). Desta forma, por utilizar-se de uma fonte não renovável para gerar energia, o processo de purificação apresentou valores expressivos na análise das categorias de impacto.

Na Figura (11) foram apresentados os componentes do módulo FV. Estes componentes que em conjunto formam o módulo agregam os impactos para a produção da célula, levando também em consideração o vidro e o alumínio. Para o Cenário 1, a emissão do PAG pelo módulo fotovoltaico foi de 69,6% e para o Cenário 2 foi de 67,3%. Já no estudo de YANG et al., (2014), foi mostrado que 89% das emissões por kg de CO₂ Equiv são referentes à fabricação do módulo fotovoltaico. Desta forma, os resultados deste trabalho apresentaram percentuais de PAG menores que os dados observados por YANG et al., (2014). Analisando os dados absolutos, o Cenário 1 apresentou um PAG de 8,83 kg de CO₂ Equiv e para o Cenário 2 um valor de 8,66 kg de CO₂ Equiv. Em contrapartida, XIAN-QIANG (2012) apresentou em seu artigo que estudos entre os anos de 2000 a 2005 apresentaram indicadores de GWP entre 20-40 kg CO₂ Equiv devido ao alto uso de energia elétrica na produção da célula fotovoltaica, mostrando resultados maiores do que os encontrados neste estudo.

A purificação do silício vem em seguida como a segunda maior representatividade na geração de impactos ambientais a partir dos indicadores analisados. Sua maior contribuição foi no indicador de Consumo de Água com 13,4% no Cenário 1 e no Cenário

2 mostrados na Figura (17). Os valores foram iguais, pois a purificação do silício tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2 foram realizados na China. Analisando o consumo de energia, percebeu-se que o o módulo FV consumiu mais energia no Cenário 1 com 674,3% do que o Cenário 2 com 72,8% de contribuição relativa. Percebe-se que a produção completa do módulo FV na China consome mais energia elétrica do que com a produção do módulo FV sendo finalizada no Brasil, pois a matriz energética utilizada na China possui grande contribuição de carvão mineral que consome bastante energia para ser gerado (ANEEL,2017).

Para o Potencial de acidificação (PA), o Cenário 1 apresentou uma contribuição maior com 75,4% no módulo FV e o Cenário 2 com 72,7%. A acidificação é bastante importante para analisar a quantidade de SO₂ presente no composto (RODRIGUES, 2013).

O Potencial de eutrofização (PE) também teve sua maior contribuição no módulo FV com 69,3% de contribuição relativa no Cenário 1 e 69% no Cenário 2. O estudo do ALSEMA (2005) mostrou que módulo FV representa 85% de contribuição no potencial de eutrofização. A eutrofização pode alterar a qualidade da água como por exemplo na proliferação de algas que podem produzir substâncias nocivas à saúde como explica BARRETO et al., (2013) em seu artigo.

Também foi quantificado o Potencial de Toxicidade Humana (PTH), tendo o módulo FV o maior potencial de TH. O módulo FV contribui com 95,4% no Cenário 1 e com 95,3% no Cenário 2. E a purificação do silício contribuiu somente com 2,6% no cenário 1 e 2. A última categoria de impacto analisada foi a Depleção Abiótica Fóssil (DAF) . No Cenário 1 foi registrado uma contribuição relativa no módulo FV para essa categoria de impacto com um valor de 68,4% no Cenário 1 e 67,6% no Cenário 2. Esta categoria também é muito importante analisar já que a ACV engloba a extração do silício.

A Figura (17) apresentou de uma forma geral quanto de contribuição relativa cada processo apresentou de acordo com os indicadores analisados. No próximo capítulo será abordado de acordo com cada indicador, os componentes que foram importantes na geração desses impactos.

4.2. AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES MAIS INFLUENTES NA EMISSÃO DOS IMPACTOS DE ACORDO COM CADA PROCESSO PRODUTIVO

A partir da ferramenta “weak point” (ponto fraco) do GaBi Software é possível indentificar os valores mais significativos, indicando os principais elementos que mais contribuem sobre alguns indicadores de impacto.

Tabela 11. Consumo da energia líquida (*net calorific value*) em cada processo de acordo com os cenários em kWh e o consumo de água em Kg para uma unidade funcional de 1 kWh.

ETAPAS	ENERGIA (kWh)		ÁGUA (kg)	
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Extração do Silício	4,14	4,14	8,16	8,16
Purificação do Silício	8,46	8,46	18,6	18,6
Produção do Wafer	0,957	0,957	1,6	1,6
Produção da Célula	0,001	0,001	0,006	0,0145
Produção do Módulo	39,6	39,1	57,3	64,7
Transporte 1	0,008	0,008	0,462	0,462
Transporte 2	0,07	0,063	0,125	0,07
Transporte 3	N/A	0,048	N/A	0,049
TOTAL	53,4	52,8	86,2	93,6

N/A: Não se aplica.

Na Tabela (11), são mostrados o consumo de energia e de água de acordo com cada processo por cenário. O cenário 1 apresentou um consumo total de 53,4 kWh e o Cenário 2 com 52,8 kWh respectivamente. A extração e a purificação do silício apresentaram uma boa representatividade no consumo de energia. Durante o processo de extração, o principal consumo de energia foi o do carvão mineral com 1,72 kWh de um total de 4,14 kWh. Na purificação do silício, os principais contribuintes no consumo de energia foram a energia térmica proveniente de gás natural e o mix de energia chinesa. No processo de produção do módulo FV, o consumo de energia de 39,6 kWh tiveram contribuição do alumínio, vidro e da eletricidade chinesa.

ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) mostraram que para a produção de 1 módulo FV foi consumido uma quantidade de energia de 91 kWh/módulo. O resultado encontrado por ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) foi quase o dobro do que os resultados obtidos

neste estudo. No entanto, vale ressaltar que os resultados encontrados foram baseados no inventário feito por ALSEMA (2005). Desta forma, vê-se uma redução no consumo de energia para gerar o módulo FV no estudo do mesmo autor entre 1995 e 2005.

Avaliando o consumo de água, percebeu-se pela Tabela (11) que o Cenário 1 apresentou menor consumo de água com 86,2 kg comparado ao Cenário 2 com 93,6 kg de consumo. O consumo de água foi mais presente no mix de energia chinesa para o Cenário 1, alumínio e vidro com representação nos 2 Cenários. Todos esses compostos consumiram quantidades representativas de água durante seu processo de fabricação. O consumo de água nos sistemas fotovoltaicos são relacionados principalmente à fabricação dos componentes. A água foi utilizada para limpeza e refrigeração dos processos dos *wafers*, vidro, células e módulos, e para a preparação de soluções químicas (CANADA, 2012). Assim, analisou-se que a produção do módulo FV sendo realizada no Brasil consome mais água do que realizado na China.

O indicador de análise da água no Gabi foi o *freshwater (including rainwater)*. Este termo está relacionado ao uso de água doce incluindo água de chuva. O uso da água doce no inventário foi atribuído à entradas e saídas dos processos (KOEHLER,2008). Mas como foi informado acima, a utilização da água doce apresentou entradas e saídas sem consumo durante o processo de produção (CLAUDINO & TALAMINIA,2013). Como foi o caso do *wafer* que entrou com 6,5 kg de água para lavagem dos *wafers*. Desta forma, esta água saiu do processo e retornou para a natureza ou para reutilização. O mesmo acontece com o processo de produção da célula, foram utilizados 2,15 kg de água deionizada na entrada do processo, mas esta água doce se juntou a uma solução alcalina e saiu com 2,17kg.

A utilização da água de *freshwater* também é um indicador local, pois a quantidade de água doce utilizada irá variar de acordo com a região de produção. Observou-se que a produção do módulo FV produzido no Brasil como informado acima consumiu mais água. No entanto, conforme mostrado na Metodologia, a fonte de consumo das águas utilizadas são de dados Globais do GaBi, desta forma, havendo uma utilização de dados locais, o resultados poderiam variar de uma forma mais precisa.

Tabela 12. Compostos que mais contribuíram no PAG (kg CO₂ Equiv) no Cenário 1 e no Cenário 2 de acordo com a modelagem de cada um deles para uma unidade funcional de 1 kWh.

ETAPAS	PAG (kg CO ₂ Equiv.)	
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Extração do Silício	0,805	0,805
Purificação do Silício	1,705	1,705
Produção do Wafer	0,138	0,138
Produção da Célula	0,0002	0,0001
Produção do Módulo	6,15	5,98
Transporte 1	0,0018	0,0018
Transporte 2	0,002	0,0009
Transporte 3	N/A	0,0001
TOTAL	8,83	8,66

N/A: Não se aplica.

A Tabela (12) apresenta os principais compostos que contribuíram para o PAG nos Cenários 1 e 2. De acordo com os resultados apresentados pelo GaBi Software, os principais compostos que influenciaram nas emissões do PAG foram o CO₂ e o metano. O CO₂ esteve mais presente principalmente na produção do módulo e na purificação do silício. O metano foi mais presente na produção do módulo FV. Os transportes 1, 2 e 3 também contribuíram para o PAG. ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) já haviam mencionado o CO₂ nas categorias de impacto mais relevantes do PAG. Analisando de uma forma geral, o Cenário 1 obteve uma emissão de 8,83 kg CO₂ Equiv. contra 8,66 kg CO₂ Equiv do Cenário 2. ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) mostraram em seu estudo que o módulo FV possui em média uma emissão de 9,8 kg CO₂ Equiv. Já no estudo de ALSEMA (2005) foi mostrada uma redução nas emissões de PAG para 6,1 kg CO₂ Equiv. No entanto, o estudo de ALSEMA (2005) não estava incluso a avaliação da extração do silício, por isso o resultado obtido com os dados secundários de ALSEMA (2005) apresentou um potencial inferior ao obtido neste estudo. LI et al., (2017) apresentou um impacto maior no potencial de emissões gasosas com 11,2 kg CO₂ Equiv/kWh. Já FU et al., (2014) relatou ter tido uma emissão de 5 kg CO₂ Equiv./kWh. SENGÜL & THOMAS (2010) também apresenta em sua análise do PAG de 5 kg CO₂ Equiv./kWh emitidos durante a produção do módulo FV. Avaliando os resultados encontrados, percebe-se que os dados obtidos estão próximos aos da média da literatura.

A extração do silício e a purificação também apresentaram índices importantes do PAG com 0,805 kg CO₂ Equiv para a extração e 1,705 kg CO₂ Equiv para a purificação. O CO₂ foi o principal composto que contribuiu nesses dois processos. O mix de energia chinesa também contribuiu para o potencial de aquecimento global dentro do processo de purificação do silício.

Durante a produção do *wafer*, o principal processo que contribuiu para o PAG foi no uso do mix de energia chinesa com o CO₂ apresentando um potencial de 0,07 kg CO₂ Equiv em um total de 0,138 kg CO₂ Equiv em toda a fabricação do *wafer*. Avaliando a célula, a mesma não apresentou valores significativos em nenhum dos cenários. No entanto a pequena contribuição que ela apresentou foi de CO₂ de emissões gasosas.

O processo que mais se destacou na contribuição de impactos ambientais foi a produção do módulo. Os elementos de destaque foram o alumínio com 3,85 kg de CO₂ Equiv e o vidro com 2,06 kg de CO₂ Equiv para o Cenário 1. O CO₂ e o metano foram as emissões mais presentes nessa fase produtiva. ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) mostram em seu artigo que o alumínio e o vidro são os principais materiais presentes na produção do módulo FV e por isso seu impacto é grande quando comparado à outros processos. Assim, entende-se o porquê do potencial de aquecimento global do módulo ser tão representativo.

Tabela 13. Compostos que contribuíram no PA (kg SO₂-Equiv.) e PE (kg Fosfato Equiv.) para uma unidade funcional de 1 kWh.

ETAPAS	PA (kg SO ₂ -Equiv.)		PE (kg Fosfato Equiv.)	
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Extração do Silício	0,0038	0,0038	0,0002	0,0002
Purificação do Silício	0,0085	0,0085	0,0006	0,0006
Produção do Wafer	0,00053	0,00053	0,00003	0,00003
Produção da Célula	1,15E-6	5,18E-7	8,69E-8	4,6E-8
Produção do Módulo	0,0287	0,0281	0,00174	0,0017
Transporte 1	1,67E-5	1,67E-5	2,66E-6	2,66E-6
Transporte 2	1,4E-5	5,05E-6	2,91E-5	1,33E-6
Transporte 3	N/A	7,72E-7	N/A	1,54E-7
TOTAL	0,038	0,0386	0,00251	0,00253

N/A: Não se aplica.

No Potencial de Acidificação (PA) de acordo com a Tabela (13), os componentes que contribuíram neste potencial foram o dióxido de enxofre (SO₂) e óxido de nitrogênio (NO). Estes compostos estavam presentes principalmente no alumínio e no vidro, mas também teve representatividade na purificação do silício. O Cenários 1 e 2 apresentaram valores semelhantes com um total de 0,038 kg SO₂-Equiv. O SO₂ apresentou uma maior emissão com 0,0223 kg SO₂-Equiv e o NO com 0,004 kg SO₂-Equiv, ambos presentes na produção do módulo FV. Na purificação do silício, o resultado apresentado foi de 0,00615 kg SO₂-Equiv.

LI et al., (2017) descreveu resultados similares na purificação do silício. O potencial de acidificação foi de 0,0018 kg SO₂-Equiv. ALSEMA & PHYLIPSEN (1995) também citam o SO₂ como categoria de impacto relevante no potencial de acidificação. Na análise realizada por SENGÜL & THOMAS (2010) o potencial de acidificação obtido foi de 0,4 kg SO₂-Equiv e os principais compostos que contribuíram foram o SO_x e o NO_x. Obteve-se um índice de PA mais expressivo que o encontrado neste estudo. FU et al., (2014) informa que o SO₂ apresentou um PA de 0,000427 kg SO₂-Equiv e revela que o SO₂ contribui com 73% das emissões no potencial de acidificação.

Avaliado o Potencial de Eutrofização nos Cenários 1 e 2, o NO₂ e o NO estiveram presentes com 0,0004 kg Fósforo Equiv. e 0,0169 kg Fósforo Equiv. respectivamente. Tendo então, o dióxido de nitrogênio (NO₂) como principal contribuinte no potencial de eutrofização. O NO₂ esteve presente principalmente no módulo FV e na purificação do silício. No módulo FV a maior contribuição foi no alumínio com 0,0008 kg Fósforo Equiv. Na purificação do silício, o mix de energia chinesa foi o que mais contribuiu com o potencial de eutrofização com 0,0002 kg Fósforo Equiv. Os valores foram semelhantes nos dois cenários. FU et al., (2014) apresentou um potencial de eutrofização para o módulo FV de 0,0000425 kg Fósforo Equiv. sendo que o principal composto que contribuiu foi o NO₂. LI et al., (2017) apresentou um potencial de eutrofização mais baixo na produção do módulo FV com $9,49 \times 10^{-7}$ kg Fósforo Equiv.

ROSA (2008) relatou que o alumínio contribuiu na contaminação de águas com seus resíduos e também com uma influência direta na contaminação de ecossistemas submersos. Assim, embasa-se que o alumínio foi o principal contribuinte na emissão de NO₂ e NO no meio ambiente.

Tabela 14. Elemento que contribui com o PTH (kg DCB - Equiv.) e com a DAF (kg Sb-Equiv) para uma unidade funcional de 1 kWh.

ETAPAS	PTH (kg DCB - Equiv.)		DAF (kg Sb-Equiv.)	
	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Extração do Silício	0,24	0,24	$4,8 \times 10^{-8}$	$4,8 \times 10^{-8}$
Purificação do Silício	0,597	0,597	$1,21 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-7}$
Produção do Wafer	0,0277	0,0277	$3,67 \times 10^{-8}$	$3,67 \times 10^{-8}$
Produção da Célula	0,0001	$2,58 \times 10^{-5}$	$3,11 \times 10^{-11}$	$3,28 \times 10^{-10}$
Produção do Módulo	13	12,9	$1,41 \times 10^{-4}$	$1,41 \times 10^{-4}$
Transporte 1	$1,67 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-9}$	$1,38 \times 10^{-9}$
Transporte 2	$1,83 \times 10^{-4}$	$8,38 \times 10^{-6}$	$5,31 \times 10^{-11}$	$5,31 \times 10^{-11}$
Transporte 3	N/A	$9,72 \times 10^{-7}$	N/A	$1,1 \times 10^{-11}$
TOTAL	13,6	13,7	$1,412 \times 10^{-4}$	$1,41 \times 10^{-4}$

N/A: Não se aplica. DCB: Diclorobenzeno.

Para os Cenários 1 e 2 como mostrado na Tabela (14), o Potencial de Toxicidade Humana (PTH) obtiveram valores semelhantes para os Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) de 13,6 e 13,7 kg DCB-Equiv para os Cenários 1 e 2 respectivamente tendo o módulo FV com a maior contribuição de 13 kg DCB-Equiv no Cenário 1, este valor está relacionado à contribuição do alumínio presente no módulo FV. Este elemento aromático provém através da queima de combustíveis como o petróleo e seus derivados, o que em índices alterados, pode trazer malefícios à saúde, diz ALSEMA (2011). No entanto, LI et al., (2017) obteve um potencial de toxicidade humana de $3,2 \times 10^{-4}$ kg DCB-Equiv. Um valor bem abaixo do encontrado neste trabalho. Na análise feita por PALANOV (2014) o potencial de toxicidade humana foi de $1,35 \times 10^{-4}$ kg DCB-Equiv, um resultado mais aproximado ao de LI et al., (2017).

A Depleção Abiótica Fóssil (DAF) está relacionada com a extração dos recursos e os impactos que são relacionados à essas atividades de extração (MONTEIRO, 2008). Desta forma, pela fronteira selecionada que incluiu a extração do silício, analisar essa categoria de impacto é muito importante. Os resultados para o Cenário 1 e 2 foram bastante semelhantes, ambos próximos de $1,41 \times 10^{-4}$ kg Sb-Equiv. Essa categoria de impacto obteve maior representatividade no módulo FV com o cobre como maior contribuinte. Como MONTEIRO (2008) explica, o potencial de depleção abiótica está relacionado à produção de enxofre. A purificação do silício contribui para no resultado

obtido, mas o processo que obteve resultados mais expressivos foi na produção do Módulo FV em especial na produção do vidro. O mesmo apresentou um valor de $1,06 \times 10^{-4}$ kg Sb-Equiv. Desta forma, é muito importante analisar essa categoria de impacto para mensurar o quanto de enxofre está sendo emitido na atmosfera e dependendo do índice, tomar medidas cabíveis de redução.

Os indicadores utilizados nas análises dos resultados foram desenvolvidos a partir da base de dados do GABI (2017) da China para o Cenário 1, e China-Brasil para o Cenário 2. Estes resultados apresentam sua relevância de acordo com a localidade da análise. O interessante da análise de ACV é que os locais de análise podem mudar, mas a estrutura não se altera.

Como citado na metodologia, após a análise dos dois cenários, foi feita uma comparação com o mix de energia brasileira que é utilizado no Brasil. Dentre as fontes utilizadas na matriz energética brasileira, a fonte hidrelétrica é a que apresenta maior percentual de utilização.

Foi realizado uma análise no GaBi Software onde utilizava-se o mix de energia brasileira para gerar 330 kWh/mês de uma residência padrão. Os resultados analisados foram para as mesmas categorias de impactos utilizadas nos Cenários 1 e 2. Observou-se que os maiores contribuintes no consumo de energia foram as fontes hidrelétrica, o gás natural e a biomassa com 45,5%, 14,5% e 9,76% respectivamente. Para o consumo de água, a fonte hidrelétrica consumiu 59,8% e a biomassa 38,6%. Analisando o Potencial de Aquecimento Global (PAG), a fonte hidrelétrica representou 51,5% de emissão e o gás natural com 19,5%. Na análise do potencial de acidificação (PA), o óleo pesado teve a maior contribuição com 68,6%, em seguida vem a lignina com 17,5% e a biomassa com 14,6%. A biomassa apresentou uma contribuição de 57,4% no Potencial de Eutrofização (PE) tendo também índices do óleo pesado com 11,7% e do gás natural com 13,6%. Analisando o último indicador, a Toxicidade Humana (PTH) teve contribuição do óleo pesado com 61,2% e da biomassa com 27,5%.

Os dados citados acima mostram que ao utilizar-se o mix de energia brasileiro, os resultados das categorias de impactos analisadas são maiores quando comparado aos Cenários 1 e 2 com a geração de energia a partir da tecnologia fotovoltaica. No caso do aquecimento global por exemplo, no Cenário 1 que foi onde encontrou-se o maior valor, foi de 8,83 kg CO₂ Equiv sendo que no mix de energia brasileira, o valor obtido foi de 25,6 kg CO₂ Equiv, ou seja, em torno de quatro vezes maior. Desta forma, a ACV foi uma ferramenta muito importante para se analisar as fontes que já são utilizadas no mix de

energia brasileira e a fonte de energia fotovoltaica que pode ter um percentual maior de contribuição na matriz energética.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho tratou de avaliar a geração de eletricidade a partir da tecnologia fotovoltaica e analisar os impactos relacionados à sua produção. Esta produção foi analisada desde a extração do silício até a produção e fase de uso do módulo fotovoltaico (FV). Foi realizado uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar os impactos que são ocasionados ao longo do processo produtivo e fazer uma comparação com a energia utilizada na matriz brasileira

Para realizar esta análise foram modelados 2 cenários. O Cenário 1 com a produção do módulo FV sendo realizado na China e o Cenário 2 com a modelagem entre China e Brasil. Esta modelagem foi necessária devido ao fato de no Brasil ainda não haverem fábricas de purificação do silício a grau solar.

Avaliou-se comparativamente os impactos gerados de acordo com as sete categorias de impacto analisadas e percebe-se que a ACV do módulo fotovoltaico e todas as categorias de impacto analisadas, mostrou que dentre os cenários 1 e 2, a energia fotovoltaica gera menos impactos ambientais com a produção sendo realizada entre China e Brasil que é o Cenário 2.

Durante os processos de extração do silício até a produção do *wafer* que foi realizado na China para os 2 Cenários, foram obtidos valores iguais para os cenários analisados. No entanto, a partir da produção da célula que diferencia o país de produção, verificou-se valores diferentes entre os cenários. Observou-se que estas variações estavam diretamente relacionadas principalmente com as fontes de utilização de energia de acordo com cada localidade. No Cenário 1 foi utilizado o mix de energia chinesa e no Cenário 2 o mix de energia brasileira. Por verificar que o Cenário 2 apresentou menores impactos em todas as categorias de impacto, percebe-se que a matriz energética brasileira é mais limpa que a chinesa, onde grande parte de fonte energética provém do carvão.

A partir dos processos que foram realizados para se produzir o módulo FV, verificou-se que o processo de produção do módulo FV foi o que mais contribuiu nas categorias de impacto. Dentro do processo de produção do módulo FV, o alumínio e o vidro foram os compostos que mais tiveram representatividade da emissão dos impactos. Em seguida o processo de purificação do silício também obteve resultados significativos nas categorias de impacto. A extração do silício e o uso do mix de energia chinesa foram os compostos que mais contribuíram no processo de purificação do silício.

Já a produção do *wafers* e da célula fotovoltaica não apresentaram valores significativos nas categorias de impacto. A modelagem dos transportes também não apresentou resultados relevantes para a tomada de decisão de qual cenário apresentou mais impactos.

Ao comparar os Cenários 1 e 2 com o mix de energia brasileira, foi observado que o Potencial de Aquecimento Global (PAG) foi quatro vezes menor que a apresentada pela matriz energética brasileira. Ao comparar os 2 Cenários, o Cenário 2 apresentou uma menor emissão do PAG do que o Cenário 1.

Nos Cenários 1 e 2, os indicadores de energia e água obtiveram maior consumo na extração, purificação do silício e na produção do módulo, onde os principais compostos de consumo foram o silício, o alumínio e o vidro.

No Potencial de Acidificação (PA), o dióxido de enxofre (SO₂) apresentou valores semelhantes nos Cenários 1 e 2. O alumínio e o vidro foram os compostos que mais contribuíram na acidificação no processo produtivo do módulo fotovoltaico. Desta forma, um potencial significativo de acidificação pode contribuir para a geração de chuva ácida e com danos ao meio ambiente.

Para o Potencial de Eutrofização, o óxido de nitrogênio (NO) esteve presente nos 2 Cenários. A eutrofização pode contribuir na proliferação de algas e pode causar danos à saúde. O Potencial de Toxicidade Humana apresentou valores representativos nos Cenários 1 e 2. Seu índice alto foi referente à grande contribuição do alumínio nesta categoria de impacto. Por fim, o Potencial de Depleção Abiótica (PDA) mostrou valores semelhantes nos 2 Cenários e foi verificado que essa categoria de impacto obteve maior representatividade no módulo FV com o cobre como maior contribuinte. O vidro também apresentou uma contribuição expressiva no PDA.

De uma forma geral, os componentes que mais contribuíram para os impactos ambientais foram o alumínio, o vidro, silício e o mix de energia chinesa. Como o alumínio e o vidro estão mais presentes no módulo FV, o mesmo foi o processo que mais apresentou impacto em toda a linha produtiva.

Conclui-se que o Cenário 2 apresentou menos impactos do que o Cenário 1. Desta forma, a produção do módulo no Brasil emitiu menos impactos ao meio ambiente do que sendo realizado todo na China.

6. RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS

Analisando todos os resultados obtidos, o que deve haver no Brasil são incentivos para que haja fábricas de purificação do silício. O Brasil possui uma ampla reserva de matéria-prima, mas o silício de grau solar é vendido para empresas estrangeiras realizarem a purificação do silício. Após a purificação, o silício é comprado de volta agregando um valor muito alto ao produto.

Se houvesse empresas de purificação de silício no Brasil, todo o processo produtivo poderia ser feito em solo nacional e assim reduziria bastante os custos e os impactos ambientais. A tecnologia também poderia ser aprimorada para melhorar a qualidade do produto, principalmente com relação à eficiência que é o principal gargalo da tecnologia fotovoltaica. Como o módulo FV foi o que mais apresentou impactos ambientais, deve-se propor estudos para mitigar os impactos que são causados principalmente no processo de produção do alumínio e do vidro. Deve-se propor também que a base de dados do GaBi tenha os processos de todos os países, pois assim a análise se tornará mais precisa.

A tecnologia fotovoltaica tem tudo para crescer no mercado e estar presente na matriz energética brasileira, o que ajudará a diminuir a utilização de fontes poluidoras e tornará a utilização de energia mais sustentável. No entanto, para mitigar as emissões poluentes, deve ser proposto o uso de materiais que possam substituir os principais compostos que influenciam nos impactos ambientais. Tornando a tecnologia fotovoltaica mais limpa desde o início da sua fabricação. A energia fotovoltaica também é uma forma de descentralização energética, o que trata uma independência maior para os utilizadores dessa tecnologia, pois não necessitará em todos os momentos da energia que é fornecida pela concessionária.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT 11704, A. Sistemas fotovoltaicos — Classificação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABNT. NBR ISO 14040 Gestão Ambiental :Avaliação do Ciclo de Vida-Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, Nov. 2001.
- ALSEMA, E. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. *Research Gate*, 11. 2005.
- ALSEMA, E., & PHYLIPSEN, G. J. Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules. Agency for Energy and the Environment, *NOVEM*, 67. 1995.
- ALSEMA E., & WILD-SCHOLTEN, M. D. Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production. Boston. Nov 2005.
- ALSEMA, et. al. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. *ResearchGate*, 21. 2011.
- ALVES, et al. Energia Solar no Brasil. *O Setor Elétrico*. 2014.
- ANEEL. Energia Solar. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf). 13 de outubro de 2017.
- ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf. 23 de outubro de 2017.
- ARANTEGUI, R. L., & JÄGER-WALDAU, A. Photovoltaics and wind status in the European Union after the Paris Agreement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 12. 18 Jun 2017.
- BARRETO, et al.. Eutrofização Em Rios Brasileiros . Itapetinga, BA, Brasil. 01 Jul 2013.
- BLUMENSCHHEIN, R. N., & MILLER, K. B. *Inmetro*. Fonte: Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função: Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentacoes/3.pdf . 14 Nov 2016.
- BRASIL, G. *Globo Brasil*. Fonte: Globo Brasil Indústria Brasileira de Painéis Solares: Disponível em: <https://globasil.commercesuite.com.br/globobrasil>. 07 Jun de 2017.
- BRAVI,et al. Life cycle assessment of a micromorph photovoltaic system. *Energy*, p. 10. 05 Maio 2011.

- CABRAL, I. D., TORRES, A. C., & SENNA, P. R.. Energia Solar- Análise Comparativa entre Brasil e Alemanha. *IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, p. 10. 28 Nov 2013.
- CAMPOS, M. G. Abordagem de Ciclo de Vida na Avaliação de Impactos Ambientais no Processamento Primário Offshore. Rio de Janeiro. Nov 2012.
- CANADA. Assessment of the Environmental Performance of Solar Photovoltaic Technologies. Canadá: *Environmental Canada*. 2012.
- CEB. *NTD 6.09* Requisitos Para A Conexão De Acessantes Ao Sistema De Distribuição Ceb D- Conexão Em Baixa E Média Tensão. Brasília: Ceb Distribuição. 2014.
- CEB. *Gerência de Faturamento- GRFA*. Fonte: CEB Distribuição. Disponível em: <file:///C:/Users/Windows10/Downloads/gta-gtb%20set.pdf>. 04 Set 2017.
- 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*, p. 9. 27 Jun 2012.
- CLAUDINO, E. S., & TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio - Uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9. 2013.
- COLTRO, L.. Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão. Campinas, São Paulo. 2007.
- COMMISSION, E. *European Platform on Life Cycle Assessment*. Fonte: European Commission. Disponível em: http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86. 08 Jun 2017.
- COPEL. Simulador de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/simulador/>. 09 de Outubro de 2017.
- CRESESB.. *CRESESB SunData*. Fonte: CRESESB: Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. 04 Set 2017.
- DAVID D. HSU, P. O.-K. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. Denver, 2012.
- DONKE, A. C.. Avaliação do Desempenho Ambiental e Energético da Produção de Etanol de cana, milho e sorgo em uma Unidade Integrada, segundo a abordagem do Ciclo de Vida. São Paulo. 2016.

- ENCICLO. Entenda o que é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Fonte: EnCiclo: Disponível em: <http://blog.enciclo.com.br/entenda-o-que-e-acv/>. 09 Out 2014.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: EPE. 2015.
- EPIA. Global Market Outlook for photovoltaic 2013-2017. Bruxelas, 2013.
- ESPOSITO, A. S., & FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. *Revista do BNDES* 40, 31. 2013.
- FU, Y., LIU, X., & YUAN, Z. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 11. 2014.
- GABI. *LCA and introduction to Gabi*. Fonte: Thinkstep Gabi. Disponível em: http://www.gabisoftware.com/fileadmin/GaBi_Manual/GaBi_Paperclip_tutorial_Part.pdf. 15 Maio 2017.
- GABI. Paper Clip Tutorial Part 1. Disponível em: http://www.gabisoftware.com/fileadmin/GaBi_Manual/GaBi_Paperclip_tutorial_Part1.pdf. Acesso: 10 mar 2017.
- GÁRCIA, F. H. Análise Experimental E Simulação De Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos. Porto Alegre. 27 Jan 2004.
- GUERRA, et al. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. *Journal of Cleaner Production*, 14. 2014.
- GUINÉE, J. B. Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 6, n. 5, p. 255, 2001.
- Júnior, A. F. CONCEITOS E APLICAÇÕES DE ACV no Brasil. *XXVII Congresso Nacional de Engenharia de Produção*, p. 9. 2007.
- JUNIOR, M. C. Os Impactos Ambientais E Sociais Das Grandes Usinas Hidrelétricas. *WebArtigos*. 2010.
- KABAKIAN, V., MCMANUS, M. C., & HARAJLI, H. Attributional life cycle assessment of mounted 1.8 kWp monocrystalline photovoltaic system with batteries and comparison with fossil energy production system. *Applied Energy*, 10. 2015.
- KOEHLER, A. Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources. Zurich,. 2008.

- LI, T., ROSKILLY, A. P., & WANG, Y. A Regional Life Cycle Sustainability Assessment Approach and its Application on Solar Photovoltaic. *Energy Procedia*, 6p. 2017.
- LISBOA, D. D. Dimensionamento De Um Sfvcr: Estudo De Caso Do Prédio Central Do Campus Universitário De Tucuruí – PA. Tucuruí, 2010.
- LOPES, T. A.. Avaliação do ciclo de vida de uma ete composta por reator uasb seguido de wetlands construídos . Salvador. 2014.
- MEI, P. R.. Obtenção de silício monocristalino de grau eletrônico. Campinas. 2017.
- MILÀ et al. Freshwater Use Impacts in LCA part I- Inventory modelling and Characterisation Factors for the main Impact Pathways. *International Journal of Life Cycle Assesment*. p 14. 2009.
- MME. Resenha Energética Brasileira. Fonte: Ministério de Minas e Energia. Disponível em:
<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica++Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>. Jun 2015.
- MOANA, A. Eficiência energética, energia renovável e sustentabilidade. *Lumière Eletric*, 2. 2017.
- MONTEIRO, M. F.. Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples. Bahia,2008.
- MORETTI, L. et al. Comparative “from Cradle to Gate” Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials. *sustainability*, p. 16. 2017.
- NETO, J. T., & GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL CRESEESB. 2014.
- NREL. *OpenEI*. Fonte: OpenEI Brazil: *Energy Resources*. Disponível em:
<http://en.openei.org/wiki/Brazil>. 02 Nov 2016.
- OLIVEIRA, R. D., & JÚNIOR, J. C. Análise Econômica Da Geração Fotovoltaica De Energia Elétrica No Município De São Carlos (SP). *Revista Brasileira de Energia*, p. 18. 2011.
- OMETTO et al. Mapeamento de potenciais de impactos ambientais da queima de cana-de-açúcar no Brasil. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 3. 21 Abril 2005.
- PALANOV, N. Life-cycle assessment of Photovaltaic systems. Lund. 2014.

- PAUTASSO D. E KERR L. A Segurança Energética da China e as Reações dos EUA. Revista CONTEXTO INTERNACIONAL. Vol. 30. 2008, p.37. Rio de Janeiro. 2008.
- PENG, J., LU, L., & YANG, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems . *Renewable and Sustainable Energy Review*, p. 20. 1 Dez 2012.
- PEREIRA et al.. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos, SP, Brasil. 2006.
- PINHO, J. T., & GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL-CRESESB. Rio de Janeiro. Mar 2014.
- POSTAL, M. R. Microgeração e distribuição predial em corrente contínua. Porto Alegre. 2014.
- PROCI, P. Instituto Superior Técnico. Fonte: Universidade Federal de Lisboa. Disponível em: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>. 24 Set 2016.
- RAMOS, L. A., DURANTE, L. C., & CALLEJAS, I. J. Electrical Power through Life Cycle: A Systematic Review under the Optics of Environmental Sustainability. *Engineering and Science*, p. 15. 2017.
- RIBEIRO, F. D. Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil-Usina de Itaipu: primeira aproximação. São Paulo. 2003.
- RISTIMÄKI et al. Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, p. 12. 8 Out 2013.
- RODRIGUES, T. O. Avaliação Dos Impactos Ambientais Da Produção De Bioóleo A Partir De Serragem No Estado Do Pará. Brasília. Jun 2013.
- ROSA, C. A. Estudo do Balanço Energético e do Passivo Ambiental Resultante da Fabricação do Módulo Fotovoltaico. Itajubá, Minas Gerais-MG, Brasil. 2008.
- SENGÜL, H., & THOMAS , T. L. An environmental impact assessment of quantum dot photovoltaics (QDPV) from raw material acquisition through use. *Journal of Cleaner Production*, p11. 2010.
- SERODIO, L. M. Jun. Silício Grau Solar. Rio de Janeiro. 2009.
- SHERWANI, A. F., USMANI, J. A., VARUN, & SIDDHARTHA. Life cycle assessment of 50 kWp grid connected solar photovoltaic (SPV) system in India. *International Journal Of Energy And Environment*, p.9. 2011.
- SICES. *Tabela Distribuição Julho 2017*. Fonte: Sices Brasil: <https://sicesbrasil.com.br/>. Acesso em: 01 Jul 2017.

- SILVA, G. A., & OLIVEIRA, S. A. Glossário de Avaliação de Ciclo de Vida. São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil. 05 Mai 2014.
- SILVEIRA, T. *A evolução da matriz energética brasileira: O papel dos biocombustíveis e outras fontes alternativas*. Fonte: Portal de e-governo, inclusão digital e sociedade do conhecimento: <http://www.egov.ufsc.br:8080/portal/conteudo/evolu%C3%A7%C3%A3o-da-matriz-ener%C3%A9tica-brasileira-o-papel-dos-biocombust%C3%ADveis-e-outras-fontes-altern>. 15 Mai 2012.
- THUSWOHL, M. O desafio da energia limpa. *Revista Brasil n°110*. 2015.
- TIWARI, G. N., & DUBEY, S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Application*. Cambridge: RSC Publishing. 2010.
- VARUN, BHAT, I. K., & PRAKASH, R. 21 Ago 2008. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 7.
- VILELA, F. S. *Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar*. Brasília. 2013.
- XIAN-QIANG, et al. Life Cycle Assessment, Estimation and Comparison of Greenhouse Gas Mitigation Potential of New Energy Power Generation in China. *Advances In Climate Change Research*, 7. 2012.
- YANG, et al. A Hybrid Life-Cycle Assessment of CO₂ Emissions of a PV Water Pumping System in China. *Elsevier*, 5. 2012.