

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

FRANCIELLE DA SILVA LEANDRO

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE QUATRO  
DIFERENTES TECNOLOGIAS DE  
APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA  
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA  
POÇOS DE CALDAS-MG**

Itajubá-MG

Agosto 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

FRANCIELLE DA SILVA LEANDRO

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE QUATRO  
DIFERENTES TECNOLOGIAS DE  
APROVEITAMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA  
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA  
POÇOS DE CALDAS-MG**

Dissertação submetida ao programa de pós graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

**Área de concentração:** Energia, Sociedade e Meio Ambiente

**Orientador:** Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas

**Co-orientador:** Dra. Maria Luiza Grillo Renó

Itajubá-MG

Agosto 2019

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais Creuza e Sebastião exemplos de pessoas de bem, e aos meus irmãos William e Wellington.*

*Ao meu querido esposo Josimar pelo incentivo e apoio durante essa jornada.*

*Ao meu filho Nicolas, que mudou o meu mundo e tem me tornado uma pessoa melhor a cada dia.*

# AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu lutar e alcançar mais essa conquista.

Ao meu orientador, professor Dr. Vladimir Rafael de Melian Cobas, pelos conselhos, ajuda, paciência e confiança na realização deste trabalho.

A minha co-orientadora professora Dra. Maria Luiza Grillo Reno pelas contribuições ao longo deste trabalho.

Ao Dr. Mateus Rocha por compartilhar comigo seu conhecimento e pelo auxílio no desenvolvimento do modelo de simulação no software SIMAPRO.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

A CAPES pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a energia elétrica e a energia atômica: a vontade.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

O sul de Minas Gerais, dispõe de um grande potencial de geração de energia elétrica a partir da fonte solar. Sabendo-se que, as tecnologias renováveis também geram impactos ao longo de toda a sua vida útil, torna-se determinante analisar e comparar as diferentes tecnologias solares, para definir qual delas apresenta um melhor perfil ambiental durante todo o seu ciclo de vida. Tendo em conta esses aspectos, a presente dissertação propõe avaliar e comparar os impactos ambientais e a viabilidade econômica de quatro plantas de geração de eletricidade renovável, instaladas na cidade de Poços de Caldas-MG, utilizando a energia solar como fonte energética, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). As tecnologias analisadas neste trabalho são as seguintes: planta de painéis fotovoltaicos com células monocristalinas, planta de painéis fotovoltaicos com células policristalinas, planta de concentração solar térmica com calhas parabólicas e planta de concentração solar térmica com prato parabólico acoplado a um motor Stirling. O software SIMAPRO 8.0.3.14 foi utilizado para a análise dos inventários, o Ecoindicador RECIPE midpoint, foi utilizado para a avaliação dos impactos ambientais e o software RETScreen Expert foi utilizado para determinar a viabilidade econômica de cada planta. Os resultados mostraram que para a unidade funcional de 1MWh de produção de energia elétrica, e dentro das condições abordadas neste estudo, a planta de concentração solar de prato parabólico apresentou um ótimo perfil ambiental e econômico para a instalação na cidade de Poços de Caldas-MG, no entanto essa tecnologia ainda não possui status comercial para instalações em grande escala, sendo superada pela tecnologia fotovoltaica policristalina que apresentou o segundo melhor perfil ambiental e econômico, sendo esta a melhor opção de instalação neste trabalho, seguida pela tecnologia fotovoltaica monocristalina e por último pela tecnologia de concentração solar de calha parabólica que apresentou maiores emissões nas categorias ambientais analisadas.

Palavras-chave: Análise do ciclo de vida, Tecnologia solar, Sustentabilidade, Energia renovável

# ABSTRACT

The south of Minas Gerais offers a great potential for electric power generation from solar source. Given that renewable technologies also generate impacts throughout their useful life, it is crucial to analyze and compare the different energy generation technologies to determine which one has a better environmental profile throughout its life cycle. Considering these aspects, the present thesis proposes to evaluate and compare the environmental impacts and economic viability of four generation plants of renewable electricity, located in the city of Poços de Caldas, MG, using solar energy as energy source and employing the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The technologies analyzed in this study are: plant of photovoltaic panels with monocrystalline cells, plant of photovoltaic panels with polycrystalline cells, solar thermal concentration plant with parabolic troughs and solar thermal concentration plant with parabolic dish coupled to a Stirling engine. SIMAPRO 8.0.3.14 software was used to analyze the inventories. Ecoindicator RECIPE midpoint was used to evaluate the environmental impacts and RETScreen Expert software was used to determine the economic viability of each plant. Results showed that, for the functional unit of 1MWh of electric energy production and within the conditions addressed in this study, the parabolic dish solar concentration plant presented a good environmental and economic profile for the installation in the city of Poços de Caldas, MG. However, this technology still does not have commercial status for large scale installations, being overcome by polycrystalline photovoltaic technology, that presented the best environmental and economic profile, being the best installation option in this study, followed by monocrystalline photovoltaic technology and, finally, the technology of solar parabolic trough concentration, that presented higher emissions in the analyzed environmental categories.

Keywords: Life Cycle Assessment, Solar Technology, Sustainability, Renewable Energy

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade de energia renovável global, 2007-2017.....	24
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira 2018.....	25
Figura 3 - Principais temas dos trabalhos de ACV publicados no Brasil.....	26
Figura 4 - Levantamento das publicações de trabalhos de ACV contendo inventários..	27
Figura 5 - Fases de uma ACV.....	29
Figura 6 - Etapas necessárias para definição do objetivo e escopo de uma ACV.....	30
Figura 7 - Entradas e saídas de um sistema e subsistema de produto.....	31
Figura 8 - Abordagens de um estudo ACV.....	32
Figura 9 - Investimentos globais em energias renováveis por tipo, 2017.....	37
Figura 10 - Capacidade Global de Energia Térmica Solar, 2007-2017.....	38
Figura 11 - Evolução global da capacidade fotovoltaica instalada por país e região (2007-2017).....	42
Figura 12 - Capacidade instalada acumulada de CSP por região, 2006-2016.....	48
Figura 13 - Reprodução do motor stirling patente 1816.....	55
Figura 14 - Exemplos de coletores parabólicos.....	56
Figura 15 - Porcentagem das principais tecnologias CSP no mundo.....	59
Figura 16 - Pannel fotovoltaico.....	67
Figura 17 - Processos considerados na ACV da tecnologia fotovoltaica em estudo.....	68
Figura 18 – Esquema do princípio de crescimento do lingote policristalino.....	69
Figura 19 - Esquema do princípio de crescimento do método Czochralski.....	69
Figura 20 - A) Calha parabólica; B) Planta de concentração solar de calha parabólica na Espanha.....	72
Figura 21 - Sistema típico e simplificado de geração solar térmica concentrada - Planta 50MW.....	73
Figura 22 - Fluxograma do ciclo de vida da tecnologia de concentração solar de calha parabólica.....	74
Figura 23 - A) Prato parabólico operando com energia solar; B) Motor stirling solar....	77
Figura 24 - Fluxograma do ciclo de vida da tecnologia de prato parabólico.....	78
Figura 25 - Localização da cidade de Poços de Caldas.....	81
Figura 26 - Dados de irradiação referentes a cidade de Poços de Caldas – Sundata.....	82



Figura 27 - Relação entre o ciclo de vida, as categorias de ponto médio e as categorias de ponto de extremidade, incluindo a pontuação única ( <i>Single score</i> ).....	83
Figura 28 - Modelo de análise do software RETScreen Expert.....	103
Figura 29 - Comparativo de tecnologias: Método RECIPE Midpoint (H) World - 18 categorias de impacto.....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Países que mais investiram em energia solar fotovoltaica e ranking mundial de potência acumulada.....	24
Tabela 2 - Geração distribuída: Potência instalada por estado brasileiro.....	39
Tabela 3 - Principais características da tecnologia de concentração térmica de calha parabólica.....	49
Tabela 4 - Principais características da tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling solar.....	59
Tabela 5 - Características dos painéis monocristalinos e policristalinos utilizados neste estudo.....	71
Tabela 6 - Características e dimensões da calha parabólica Sener Trough 1.....	74
Tabela 7 - Dados do motor Stirling SOLO 161.....	78
Tabela 8 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício metalúrgico (mg-Si).....	89
Tabela 9 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício eletrônico (e-Si).....	90
Tabela 10 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício solar (sol-Si).....	91
Tabela 11 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de m-Si e p-Si.....	92
Tabela 12 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1m <sup>2</sup> de bolacha de sílicio: m-Si e p-Si.....	93
Tabela 13 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1m <sup>2</sup> de células de sílicio: m-Si e p-Si.....	94
Tabela 14 - Inventário da fase de extração e fabricação da laminação de 1m <sup>2</sup> de painéis m-Si e p-Si.....	96
Tabela 15 - Inventário da fase de extração e fabricação de 1m <sup>2</sup> de painéis m-Si e p-Si.....	97
Tabela 16 - Inventário da fase de construção da Planta Fotovoltaica Monocristalina e Policristalina.....	98
Tabela 17 – Inventário da fase de operação e manutenção Plantas Fotovoltaicas m-Si e p-Si – 25 anos.....	98

Tabela 18 - Inventário da fase de desmantelamento das Plantas Fotovoltaicas m-Si e p-Si.....	98
Tabela 19 - Inventário da fase de extração e fabricação da planta de calha parabólica de 1MW.....	99
Tabela 20 - Inventário da fase de construção da planta CSP de calha parabólica de 1MW.....	100
Tabela 21 - Inventário da fase de manutenção da planta CSP de calha parabólica de 1MW.....	101
Tabela 22 - Inventário da fase de transporte da planta CSP de calha parabólica de 1MW.....	101
Tabela 23 - Inventário da fase de fabricação da planta CSP de prato parabólico de 1MW.....	102
Tabela 24 - Inventário da fase de construção da planta CSP de prato parabólico de 1MW.....	102
Tabela 25 - Inventário da fase de manutenção da planta CSP de prato parabólico de 1MW.....	102
Tabela 26 - Inventário da fase de desmantelamento da planta CSP de prato parabólico de 1MW.....	103
Tabela 27 – Taxas e tributações para o cálculo da viabilidade econômica.....	104
Tabela 28 - Dados da cidade de Poços de Caldas-MG.....	105
Tabela 29 - Dados financeiros para a planta fotovoltaica monocristalina.....	105
Tabela 30 - Dados técnicos da planta fotovoltaica monocristalina simulada.....	106
Tabela 31 – Distribuição de custos de uma planta fotovoltaica.....	106
Tabela 32 - Resultados da Simulação da planta fotovoltaica monocristalina.....	107
Tabela 33 - Dados financeiros para a planta fotovoltaica policristalina.....	107
Tabela 34 - Dados técnicos da planta fotovoltaica policristalina.....	108
Tabela 35 - Resultados da Simulação da planta fotovoltaica policristalina.....	108
Tabela 36 - Dados financeiros para a planta de prato parabólico.....	109
Tabela 37 - Dados técnicos da planta de prato parabólico.....	110
Tabela 38 – Distribuição de custos de uma planta de prato parabólico.....	110
Tabela 39 - Resultados da Simulação da planta de prato parabólico.....	110
Tabela 40 - Dados financeiros para a planta de calhas parabólicas.....	111
Tabela 41 - Dados técnicos da planta de calhas parabólicas.....	112

Tabela 42 – Distribuição de custos de uma planta de calhas parabólicas.....	112
Tabela 43 - Resultados da Simulação da planta de calhas parabólicas.....	113
Tabela 44 - Comparativo de tecnologias: Mudanças climáticas.....	116
Tabela 45 - Comparativo de tecnologias: Depleção de ozônio.....	117
Tabela 46 - Comparativo de tecnologias: Acidificação terrestre.....	118
Tabela 47 - Comparativo de tecnologias: Eutrofização de água doce.....	119
Tabela 48 - Comparativo de tecnologias: Eutrofização marinha.....	119
Tabela 49 - Comparativo de tecnologias: Toxicidade humana.....	120
Tabela 50 - Comparativo de tecnologias: Formação de oxidante fotoquímico.....	121
Tabela 51 - Comparativo de tecnologias: Formação de material particulado.....	121
Tabela 52 - Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade terrestre.....	122
Tabela 53 - Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade de água doce.....	123
Tabela 54 - Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade marinha.....	123
Tabela 55 - Comparativo de tecnologias: Radiação ionizante.....	124
Tabela 56 - Comparativo de tecnologias: Ocupação de terras agrícolas.....	124
Tabela 57 - Comparativo de tecnologias: Ocupação de áreas urbanas.....	125
Tabela 58 - Comparativo de tecnologias: Transformação natural da terra.....	126
Tabela 59 - Comparativo de tecnologias: Depleção de água.....	126
Tabela 60 - Comparativo de tecnologias: Depleção de metais.....	127
Tabela 61 - Comparativo de tecnologias: Depleção fóssil.....	127

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCV - Associação Brasileira do Ciclo de Vida  
ABNT – Associação brasileira de normas técnicas  
ACV – Análise do ciclo de vida  
AICV – Avaliação dos impactos do ciclo de vida  
a-Si - Silício amorfo  
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social  
BOS - *balance of system* (componentes elétricos e estruturais)  
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica  
CdTe - Telureto de cádmio  
CED - Cumulative Energy Demand (Demanda cumulativa de energia)  
CIGS - Disseleneto de cobre, índio e gálio  
CIS - Disseleneto de cobre e índio  
COP – Conferência das Partes  
COPOM – Comitê de política monetária  
CPV – *Concentrated Photovoltaics Cell* (Célula fotovoltaica concentrada)  
CSP - *Concentrated Solar Power* (Energia solar concentrada)  
CT – Custo total  
*Dalys* – Anos de vida ajustados por invalidez  
DME – Departamento municipal de eletricidade  
DNI - Irradiação direta normal  
DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell* (Células sensibilizadas por corantes)  
EPBT – Energy Payback Time (Tempo de recuperação de energia)  
e-Si - Silício eletrônico  
EUA – Estados Unidos da América  
EVA - Etileno-acetato de vinila  
FV - Fotovoltaico  
GEE – Gases de efeito estufa  
GHI - Irradiação solar global  
GN – Gás Natural

GWP – Potencial de aquecimento global

HCPV - Células de alta concentração fotovoltaica

HSP – Horas de Sol Pleno

HTF - *High Thermal Fluid* (Fluido de transferência térmica)

IBICT - Instituto brasileiro de informação em ciência e tecnologia

IBGE – Instituto brasileiro de geografia e estatística

ICV – Inventário do ciclo de vida

INP - Índio Fosforeto

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

ISO - International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)

LCOE - Custo Nivelado Médio Global

LEN – Leilão de Energia Nova

mg-Si - Silício grau metalúrgico

MME - Ministério de Minas e Energia

NDC – *Nationally Determined Contribution* (Contribuição Nacionalmente Determinada)

NEST - Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída

NH<sub>3</sub> – Amônia

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

O & M – Operação e manutenção

ONU – Organização das Nações Unidas

OPV – *Organic Photovoltaics* (Células orgânicas ou poliméricas)

PBACV - Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida

p-Si - Silício policristalino/multicristalino

PVF – Fluoreto de polivinila

SCA - Solar Collector Assembly ( Montagem de coletor solar)

SCE - Solar Collecting Element (Elemento de coletor solar)

SETAC - Society Environmental Toxicology and Chemistry (Sociedade de toxicologia e química ambiental)

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - Nitreto de silício

SiH<sub>4</sub> - Silano

SiHCl<sub>3</sub> . tricloreto de silício

SIN – Sistema interligado nacional

sol-Si - Silício solar

TES - Sistemas de armazenamento de energia térmica

TIR - Taxa interna de retorno

TIRM - Taxa interna de retorno modificada

TMA – Taxa mínima de atratividade

*yr* - ano

$\eta$  - Eficiência

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá-MG

VPL – Valor presente líquido

# SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Objetivos.....	22
1.2 Motivação e justificativa.....	23
1.3 Estrutura da dissertação.....	27
REVISÃO DE LITERATURA.....	29
2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV).....	29
2.2 Metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) .....	30
2.2.1 Definição de objetivo e escopo.....	30
2.2.2 Análise do inventário.....	33
2.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida.....	33
2.2.4 Interpretação dos resultados.....	34
2.3 Desenvolvimento sustentável .....	35
2.4 Energia Solar.....	37
2.5 Tecnologia Fotovoltaica.....	40
2.5.1 Estado da arte da tecnologia fotovoltaica de células de silício.....	44
2.6 Tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica.....	47
2.6.1 Estado da arte da tecnologia de concentração solar térmica de calha parabólica.....	50
2.7 Tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling.....	55
2.7.1 Estado da arte da tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling.....	60
ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA DA ACV PARA AS DIFERENTES TECNOLOGIAS SOLARES.....	64
3.1 Objetivo do estudo.....	64
3.2 Escopo do estudo.....	64
3.3 Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência.....	66
3.4 Fronteiras do sistema.....	66



3.4.1 Tecnologia fotovoltaica de silício: Células monocristalina (m-Si) e policristalina (p-Si).....	66
3.4.2 Tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica.....	72
3.4.3 Tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling .....	76
3.5 Fronteira geográfica do estudo de caso.....	80
3.6 Metodologia de avaliação do impacto: RECIPE.....	82
3.6.1 Auxílio computacional.....	86
ANÁLISE DOS INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA .....	87
4.1 Preparação para a coleta de dados.....	87
4.2 Coleta de dados.....	87
4.3 Inventário da tecnologia fotovoltaica monocristalina e policristalina.....	88
4.4 Inventário da tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica.....	99
4.5 Inventário da tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling.....	101
4.6 Modelagem e viabilidade econômica.....	103
4.6.1 Planta fotovoltaica monocristalina.....	105
4.6.2 Planta fotovoltaica policristalina.....	107
4.6.3 Planta de Concentração Solar de Prato Parabólico acoplado a motor Stirling Solar.....	109
4.6.4 Planta de concentração solar térmica de calha parabólica.....	111
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA.....	115
5.1 Seleção e definição dos métodos e das categorias de impacto.....	115
5.2 Resultados.....	115
5.2.1 Mudanças climáticas.....	116
5.2.2 Depleção de ozônio.....	117
5.2.3 Acidificação terrestre.....	117
5.2.4 Eutrofização de água doce.....	118
5.2.5 Eutrofização marinha.....	119
5.2.6 Toxicidade humana.....	120
5.2.7 Formação de oxidante fotoquímico.....	120
5.2.8 Formação de material particulado.....	121

5.2.9 Ecotoxicidade terrestre.....	122
5.2.10 Ecotoxicidade de água doce.....	122
5.2.11 Ecotoxicidade marinha.....	123
5.2.12 Radiação ionizante.....	123
5.2.13 Ocupação de terras agrícolas.....	124
5.2.14 Ocupação de áreas urbanas.....	125
5.2.15 Transformação de terra natural.....	127
5.2.16 Depleção de água.....	126
5.2.17 Depleção de metais.....	126
5.2.18 Depleção fóssil.....	127
5.3 Comparação geral entre as plantas solares .....	128
CONCLUSÃO.....	132
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	133
REFERÊNCIAS.....	135
ANEXO A.....	145
ANEXO B.....	147
ANEXO C.....	149
ANEXO D.....	151
ANEXO E.....	153
ANEXO F.....	154
ANEXO G.....	156
ANEXO H.....	159
ANEXO I.....	161
ANEXO J.....	163
ANEXO K.....	164
ANEXO L.....	167
ANEXO M.....	168
ANEXO N.....	169
ANEXO O.....	170
ANEXO P.....	172
ANEXO Q.....	173
ANEXO R.....	178
ANEXO S.....	179

ANEXO T.....	181
ANEXO U.....	182
ANEXO V.....	183
ANEXO X.....	184
ANEXO W.....	186
ANEXO Y.....	188
ANEXO Z.....	190
ANEXO AA.....	192
ANEXO AB.....	194
ANEXO AC.....	196
ANEXO AD.....	197
ANEXO AE.....	198
ANEXO AF.....	199
ANEXO AG.....	201
ANEXO AH.....	202
ANEXO AI.....	203
ANEXO AJ.....	204

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade é dependente do consumo de energia, e a sua demanda anual cresce continuamente para suprir as necessidades da população. A maior parte da geração de energia no mundo é suprida pelo uso de combustíveis fósseis, recursos não renováveis, que emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE) causando impactos significativos ao meio ambiente, essa parcela de geração de acordo com REN21 (2018) chega a 79,5% do consumo mundial total de energia.

No entanto com a crise do petróleo em 1970, percebeu-se uma grande dependência dos combustíveis fósseis, e surgiu a necessidade de buscar outros recursos energéticos, desde então, constantes esforços vêm sendo feitos para aproveitar fontes de energia renováveis (BORGES, 2004).

A produção de energia elétrica a partir da radiação solar é atualmente, uma das mais difundidas, principalmente pelo fato desse tipo de energia estar disponível em todas as partes do mundo, ser um recurso abundante e não haver custos para a sua aquisição. Os sistemas mais comuns desse tipo de tecnologia são os painéis fotovoltaicos que utilizam células de Silício Monocristalinas (m-Si) ou de Silício Policristalinas (p-Si), os concentradores solares térmicos de calha parabólica e os concentradores solares térmicos de prato parabólico com motor stirling solar (SATIRO e COUTINHO, 2012).

A tecnologia fotovoltaica possui maior número de instalações em todo o mundo, principalmente devido a programas governamentais, conscientização da necessidade de redução das emissões de GEE e incentivos fiscais/financeiros, principalmente na Europa, que busca reduzir sua dependência de combustíveis fósseis (PINTO, 2016).

Apesar do crescimento das instalações fotovoltaicas e de concentração solar no mundo, sabe-se que esses sistemas emitem GEE durante a sua fabricação, operação e descarte. Para se determinar qual fonte energética renovável é ambientalmente melhor, é preciso realizar uma avaliação dessas tecnologias a fim de se investigar os impactos ambientais produzidos, desde a extração das matérias-primas até o seu descarte final. Há uma importante metodologia capaz de analisar produtos, serviços e tecnologias chamada Análise do Ciclo de Vida (ACV) baseada na avaliação de impactos ambientais, que por meio da quantificação de dados de insumos, energia e emissões ambientais contabiliza

todos os impactos gerados ao longo do ciclo de vida de diferentes sistemas, inclusive plantas solares, permitindo a sua comparação.

A ACV é ainda uma abordagem jovem em evolução, com as suas raízes na pesquisa relacionada as necessidades energéticas das décadas de 1960 e 1970, com o maior desenvolvimento em nível científico ocorrendo nos anos 90, devido a esforços do *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), e em nível de normalização formal pelos métodos e procedimentos da *International Organization for Standardization* (ISO) (GUINÉE *et al.*, 2011).

Segundo Cherubini e Ribeiro (2015) em 2003, o Instituto brasileiro de informação em ciência e tecnologia (Ibict), passou a coordenar e desenvolver o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) em parceria com a Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV), com a finalidade de construir uma base nacional de inventários de ciclo de vida (ICV) e contribuir para a disseminação do pensamento do ciclo de vida, como abordagem para a produção mais limpa, aumento da competitividade das empresas brasileiras e promoção das iniciativas de fortalecimento da sustentabilidade.

A metodologia tem sido adotada por instituições de pesquisa, universidades, prestadores de serviço e indústrias, que a utilizam para calcular indicadores de impactos ambientais, com o objetivo de identificar oportunidades para a prevenção de poluição e redução do consumo de recursos, melhorar o desempenho ambiental de produtos ou serviços, aumentar o conhecimento dos processos e produzir informação de posicionamento ambiental (CHERUBINI E RIBEIRO, 2015).

Para Baitz *et al.* (2013), as universidades e instituições de pesquisa desempenham o papel de promover o conceito e a metodologia da avaliação do ciclo de vida, desenvolvendo e refinando os métodos, por meio de estudos de caso reais para a validação da sua implementação prática. Já os prestadores de serviços atuam na ACV com serviços de consultoria, suporte à aplicação da metodologia, desenvolvimento de softwares e bases de dados. Nas empresas a ACV é utilizada não mais como atividade voluntária, mais sim como uma ferramenta para identificar oportunidades de melhoria no desempenho ambiental de seus produtos, produção de informação ambiental para efeitos de marketing e avaliação da sustentabilidade ambiental dos processos, produtos e/ou serviços.

No Brasil de acordo com dados de Cherubini e Ribeiro (2015) há cerca de 27 grupos e/ou laboratórios de pesquisa, 18 empresas de consultoria e 64 indústrias/empresas que utilizam a ACV como prática de gestão ambiental. Sendo assim, tem havido crescente

evolução das publicações científicas, parcerias e redes que visam promover a ACV, dentre as quais se encontra a Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, que tem contribuído com a difusão científica dos estudos de ACV, por meio do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST) pertencente ao Instituto de Engenharia Mecânica, com o programa de Pós Graduação em Engenharia de Energia, ao qual este trabalho pertence.

O presente estudo consiste em uma ACV, para avaliação de impactos ambientais, de quatro diferentes tecnologias solares de produção de energia elétrica, sendo elas as tecnologias fotovoltaicas de células de Silício Monocristalinas (m-Si) e de células de Silício Policristalinas (p-Si), os concentradores solares térmicos de calha parabólica e os concentradores solares de prato parabólico com motor stirling solar, todas com inventários adaptados as condições brasileiras, acompanhadas do cálculo de viabilidade financeira, que demonstram qual destas tecnologias durante toda a sua vida útil, causa menores impactos ambientais para a produção de 1MWh de energia elétrica.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo geral**

O objetivo do presente trabalho é avaliar e comparar os impactos ambientais e a viabilidade econômica de quatro tecnologias de geração de eletricidade renovável utilizando a energia solar como fonte energética. Os impactos ambientais são determinados através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a viabilidade econômica é calculado através do software RETScreen Expert. As tecnologias analisadas neste trabalho são: painéis fotovoltaicos com células monocristalinas, painéis fotovoltaicos com células policristalinas, planta de concentração solar térmica com calhas parabólicas e planta de concentração solar térmica de prato parabólico acoplado a um motor Stirling.

### **Objetivos específicos**

Para que o objetivo geral seja alcançado são necessários alguns objetivos específicos:

1. Avaliar o estado-da-arte de sistemas de concentração de energia solar térmica e fotovoltaicos para a geração de eletricidade no Brasil.
2. Determinar a configuração e o cálculo dos componentes existentes em cada uma das tecnologias de geração de energia consideradas.

3. Elaborar o Inventário do Ciclo Vida (ICV) dos processos produtivos das tecnologias de geração de eletricidade, desde a extração de matérias-primas até a fabricação de cada uma das tecnologias estudadas.
4. Realizar a Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV) para avaliar comparativamente os impactos ambientais das tecnologias para o aproveitamento da energia solar consideradas.
5. Determinar a viabilidade econômica do uso de sistemas fotovoltaicos e de concentração de energia solar térmica para a geração de eletricidade usando a simulação do software RETScreen Expert.

## **1.2 Motivação e justificativa**

A produção de energia por meio de recursos não renováveis, que contribuem para as emissões de GEE e potencializam diversos impactos ambientais negativos, estão sendo repudiados por toda a sociedade, sendo assim o estudo dos impactos que as atividades realizadas pelo homem podem gerar ao meio ambiente, tem se tornado mais relevante com o passar dos anos. Com a crescente demanda por energia e a necessidade do crescimento da capacidade de geração energética sustentável, as tecnologias que possibilitam o aproveitamento de recursos renováveis para a produção de energia despertam grande interesse de estudos e pesquisas.

Na Figura 1, é possível observar que a capacidade total de energia renovável mais do que duplicou entre os anos de 2007 a 2017, e atualmente as energias renováveis representam cerca de 70% das adições anuais à capacidade global. No final de 2017, a capacidade mundial de energia renovável totalizou 2.195 GW, o que corresponde a uma estimativa de 26,5% da eletricidade global (REN21, 2018).

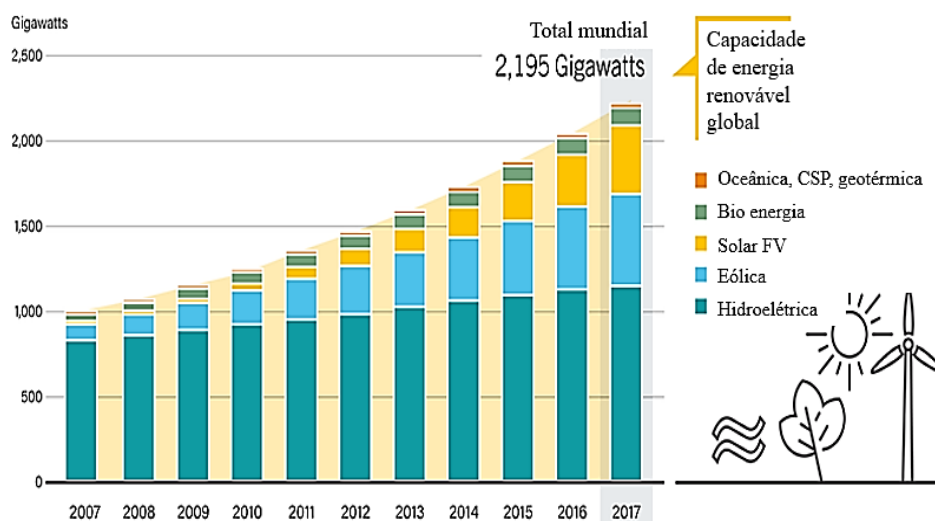


Figura 1 - Capacidade de energia renovável global, 2007-2017

Adaptado de REN21 (2018)

Uma fonte de energia mesmo renovável gera impactos ambientais, durante todo o seu ciclo de vida, iniciando-se com a extração de matérias primas passando pela produção, o uso e o descarte final, dessa forma, a avaliação dos impactos gerados durante toda a vida útil de uma planta energética serve de base para a tomada de decisões relativas a escolha de uma tecnologia (SINGH, PANT E OLSEN 2013). Na Tabela 1, é possível observar os países que mais investiram em energia solar fotovoltaica no ano de 2017, e o ranking mundial de países com maior potência acumulada.

Tabela 1 - Países que mais investiram em energia solar fotovoltaica e ranking mundial de potência acumulada

Países que mais investiram em energia solar fotovoltaica em 2017 (GW)		Ranking mundial dos países com maior potência acumulada (GW)	
China	53	China	131
EUA	10,6	EUA	51
Índia	9,1	Japão	49
Japão	7	Alemanha	42
Turquia	2,6	Itália	19,7
Alemanha	1,8	Índia	18,3
Austrália	1,25	Reino Unido	12,7
Coreia do Sul	1,2	França	8
Reino Unido	0,9	Austrália	7,2
Brasil	0,9	Espanha	5,6

Adaptado de ABSOLAR (2019)



Acompanhando o expressivo crescimento do setor de energia solar no mundo, o Brasil tem buscado enfrentar os desafios e criar oportunidades para a inserção dessa tecnologia na matriz energética nacional. Porém em virtude do país dispor de alternativas de energia limpa mais baratas, os incentivos não são tão expressivos, quanto em países que contam com poucas opções de fontes renováveis, além disso há falta de regulamentação adequada e necessidade de importação dos equipamentos, o que eleva os custos dos sistemas.

Sendo assim um ponto que pode auxiliar na disseminação das instalações de tecnologia solar, se finda no estudo das diferentes tecnologias solares, analisando seus impactos ambientais associados, com a elaboração de um relatório que auxilie na tomada de decisão sobre a tecnologia mais adequada para uma dada aplicação. A participação de cada fonte de energia na matriz energética brasileira no ano de 2018, pode ser observada na Figura 2.

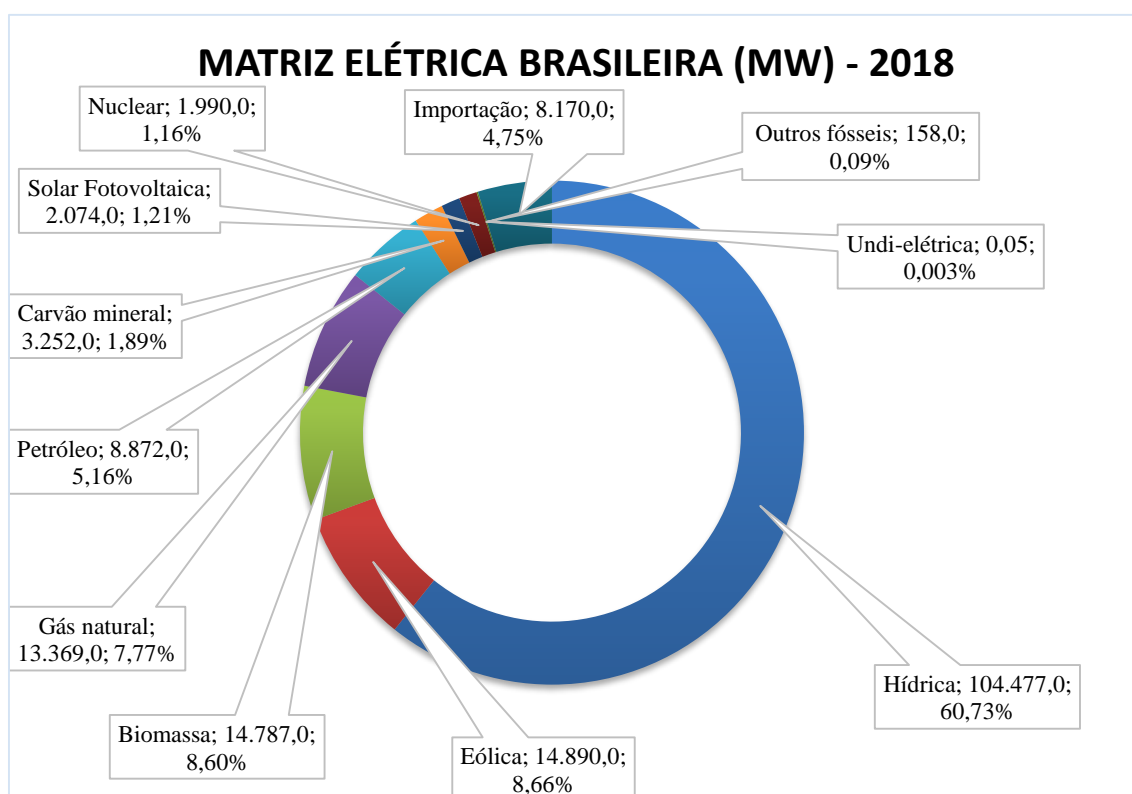


Figura 2 – Matriz elétrica brasileira 2018

Adaptado de ABSOLAR (2019)

Com o intuito de ajudar na disseminação da metodologia ACV e enriquecimento do banco de dados nacional, o presente trabalho visa reunir grande quantidade de

inventários nacionais para realizar uma ACV de quatro diferentes tecnologias solares, com o pressuposto de que os equipamentos e a manufatura dos sistemas serão todos produzidos e instalados no Brasil, visto que há poucos trabalhos publicados semelhantes a este.

Os estudos que são realizados nacionalmente com a metodologia ACV, envolvem diferentes setores de atuação, abordando principalmente a questão ambiental, o setor de produção de combustíveis e de construção civil, sendo publicados por autores com vínculo universitário ou de institutos de pesquisa brasileiras, como pode ser visto na Figura 3.

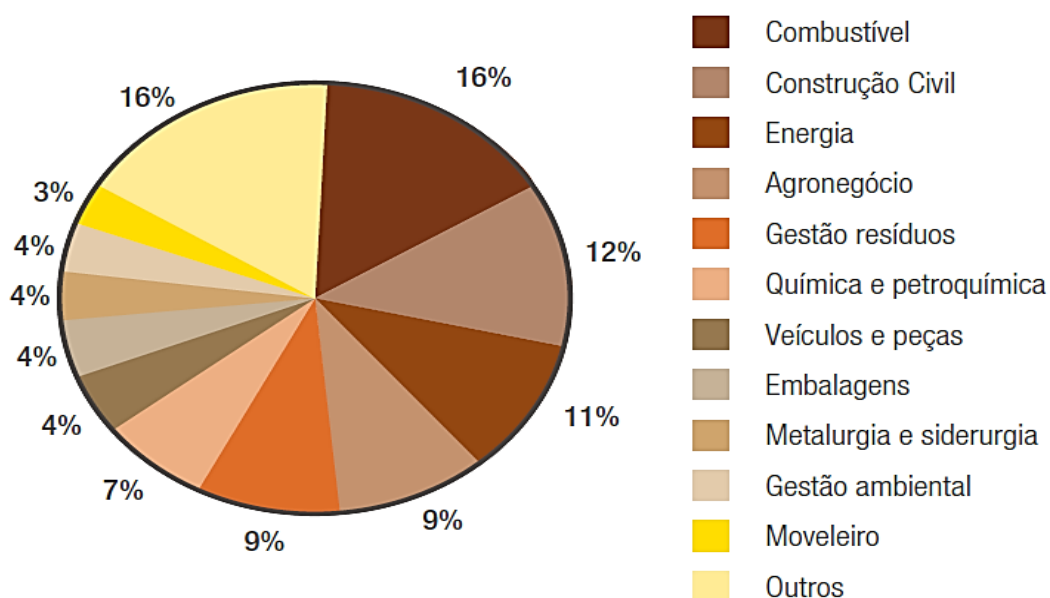


Figura 3 – Principais temas dos trabalhos de ACV publicados no Brasil

Fonte: CHERUBINI E RIBEIRO (2015)

Souza *et al.* (2018) realizaram um levantamento do número de trabalhos brasileiros sobre ACV contendo inventários, desde o ano 2000 até 2017, demonstrando o crescimento no número de publicações até o ano de 2015, conforme mostrado na Figura 4, seguido por queda nas publicações, como consequência da necessidade de recursos e a falta de incentivos governamentais para o desenvolvimento das pesquisas.

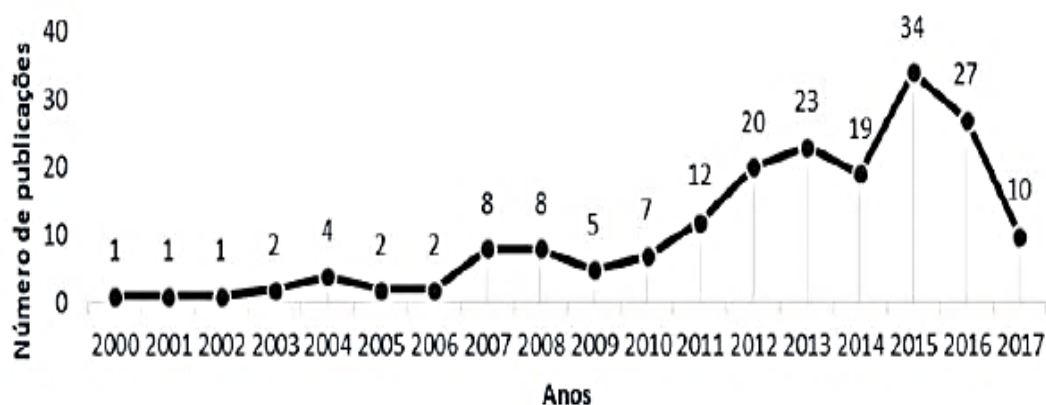


Figura 4 – Levantamento das publicações de trabalhos de ACV contendo inventários

Fonte: SOUZA *et al.* (2018)

A justificativa para a realização deste trabalho, está no fato de que a condução de um estudo comparativo entre as diferentes tecnologias solares, determinando dentre estas qual apresenta um melhor perfil ambiental e econômico, considerando o seu campo de aplicação, irá permitir aos tomadores de decisão uma escolha mais acertada da tecnologia solar adequada para a utilização em empresas, residências, usinas de geração de energia solar entre outros.

### 1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 é apresentada a introdução, os objetivos e a justificativa do tema escolhido.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão da literatura da metodologia ACV, uma breve explicação das questões de desenvolvimento sustentável e o estado da arte brasileiro das tecnologias abordadas neste estudo.

No Capítulo 3 são demonstradas em detalhes as plantas solares em estudo, definindo o objetivo e escopo, a unidade funcional, os materiais utilizados nas plantas, as fronteiras dos sistemas, a seleção do indicador para a avaliação dos impactos ambientais e o método de cálculo.

No capítulo 4 são apresentados os inventários do ciclo de vida das tecnologias abordadas no estudo e a viabilidade econômica das plantas de 1 MW por meio do software RETScreen Expert.

No capítulo 5 são avaliados os impactos ambientais, em 18 diferentes categorias, para cada uma das quatro tecnologias em estudo, de acordo com o ecoindicador RECIPE midpoint, por meio do software Simapro.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do estudo realizado demonstrando qual tecnologia apresenta um melhor perfil ambiental e econômico para as condições de irradiação solar da cidade de Poços de Caldas-MG, além das recomendações para trabalhos futuros

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

A ACV é um método estruturado e abrangente, de quantificação dos fluxos de materiais e energia e dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos produtos. Esta metodologia analisa as diversas entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) e avalia os impactos ambientais utilizando indicadores, que são capazes de interpretar os impactos de um produto ou serviço no consumo de recursos, saúde humana e alteração do ecossistema (FTHENAKIS *et al.*, 2015).

Com uma abordagem do berço ao túmulo (*cradle to grave*), a ACV tem início na extração da matéria-prima e termina quando esta é devolvida à sua origem. Considerando toda a vida útil do produto e estimando os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva, para que se possa observar as implicações reais associadas à criação de um produto ou processo a nível ambiental (ADRIANO, 2015; SINGH, PANT E OLSEN 2013).

A atual metodologia dos estudos de ACV, é normatizada pela ABNT ISO 14.040 (2009), que engloba quatro diferentes fases, cuja iteração pode ser observada na Figura 5:

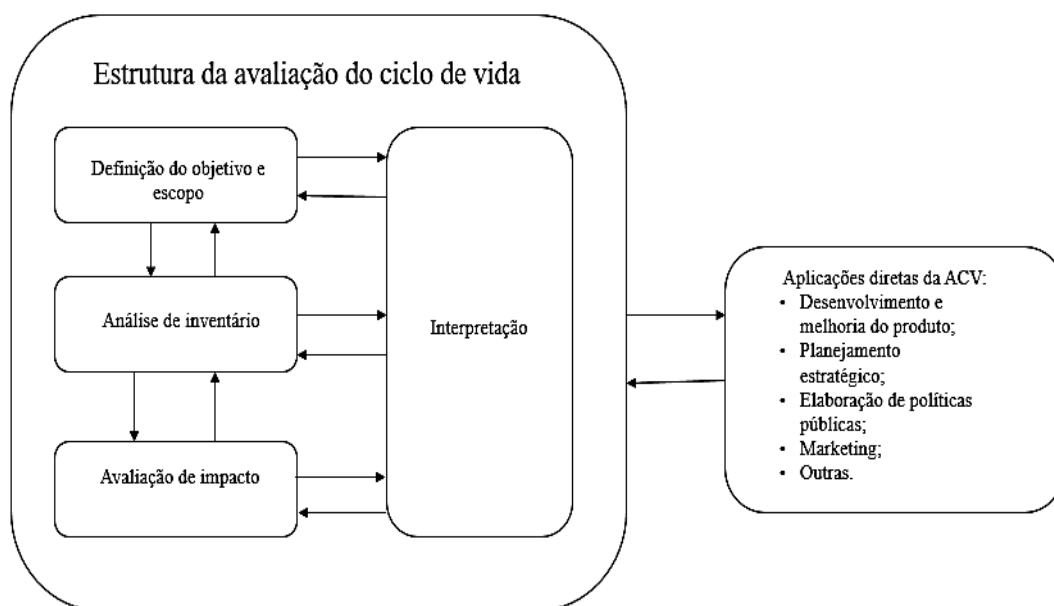


Figura 5 – Fases de uma ACV

Fonte: Adaptado de ABNT ISO 14.040 (2009)

## 2.2 Metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV)

### 2.2.1 Definição de objetivo e escopo

Na etapa de objetivo deve-se documentar, justificar e relatar claramente as aplicações pretendidas pelo estudo, suas razões, o público-alvo e a sua aplicação potencial, fornecendo ainda uma descrição do sistema do produto em termos dos limites do sistema e da unidade funcional, convém que o escopo seja bem definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe possam atender o objetivo estabelecido. No escopo devem ser demonstrados claramente o sistema do produto estudado conforme apresentado na Figura 6 (SINGH, PANT E OLSEN 2013; ABNT ISO 14.040, 2009).

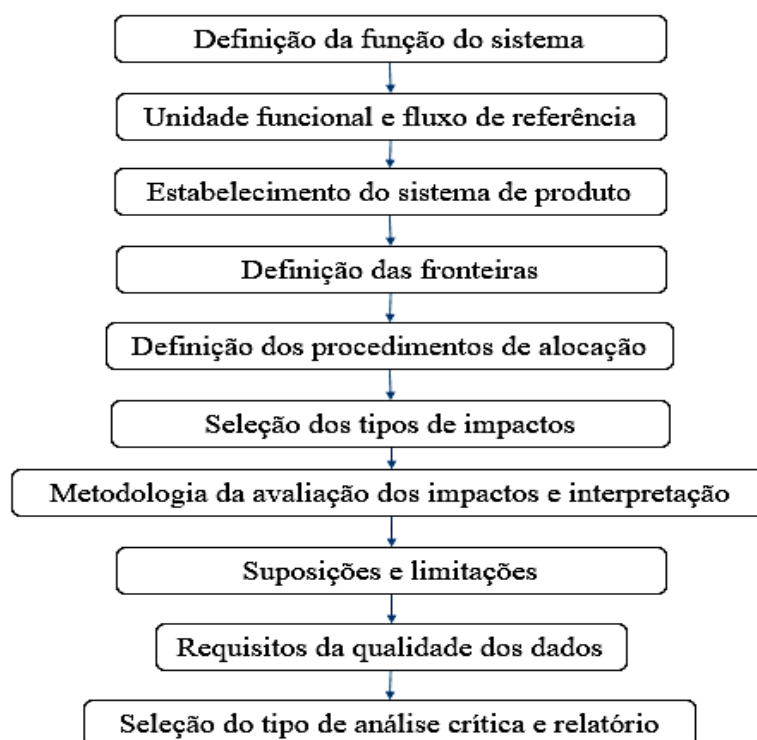


Figura 6 - Etapas necessárias para definição do objetivo e escopo de uma ACV.

Adaptado de ABNT ISO 14.040 (2009)

Cada etapa necessária para a definição do objetivo e escopo será explicada a seguir:

- Definição da função do sistema: trata-se do conjunto de todos os subsistemas, que irão consumir energia e materiais e emitir poluentes, necessários para que um produto cumpra a sua função (FERREIRA, 2004);

- Unidade funcional e fluxo de referência: segundo ABNT ISO 14.040 (2009), uma unidade funcional tem o objetivo de fornecer uma referência para que as entradas e saídas do sistema sejam inventariadas. Esta referência é necessária para assegurar a comparabilidade de resultados da ACV em uma base comum, quando diferentes sistemas estiverem sendo comparados. Para comparações entre produtos, a unidade funcional é convertida em fluxos de referência, que são descritos como a quantidade de produto necessária para cumprir a função na quantidade estabelecida pela unidade funcional (BORGES, 2004);
- Sistema de produto: o modelo do sistema de produto é representado por um fluxograma, composto de processos unitários, cada um representando uma ou várias atividades, como aquisição de matérias-primas, manufatura de produtos intermediários, processos de produção, transporte, uso e disposição final, incluindo a reciclagem e o reuso, sendo que também são mostradas as emissões, os fluxos de resíduos e outras trocas ambientais, como pode ser visto na Figura 7 (REBITZER *et al.* 2004; BORGES, 2004).

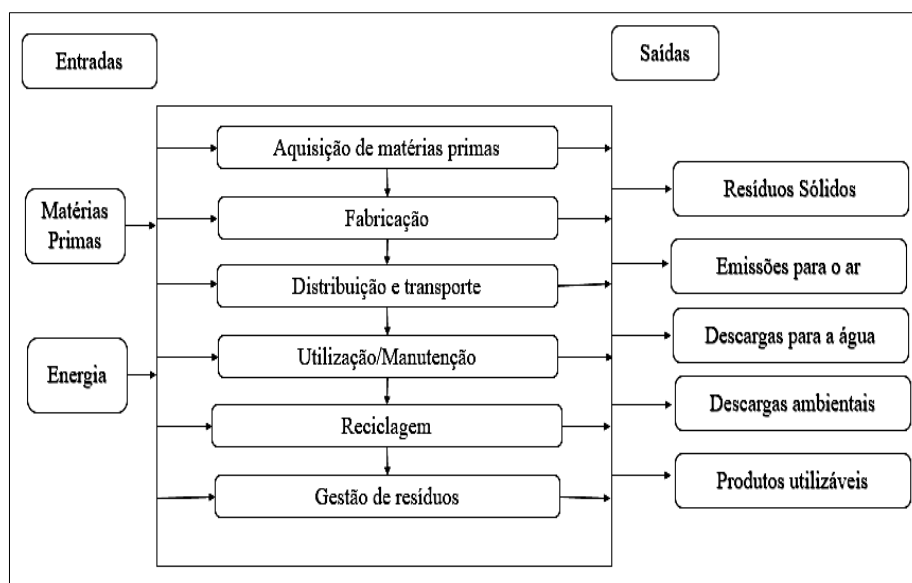


Figura 7 – Entradas e saídas de um sistema e subsistema de produto  
Adaptado de FERREIRA (2004)

- Fronteiras do sistema: as fronteiras de um sistema representam a interface de um sistema de produto com o meio ambiente e outros sistemas ou subsistemas envolvidos (SINGH, PANT e OLSEN, 2013). A abordagem original da ACV enfoca os aspectos ambientais de um produto ou processo desde o berço até o túmulo, porém devido a

complexidade desse tipo de abordagem, há estudos que utilizam a ACV de forma mais simplificada como análise do berço ao portão, análise portão a portão, análise portão ao túmulo (BAUER, 2003), conforme mostrado na Figura 8.

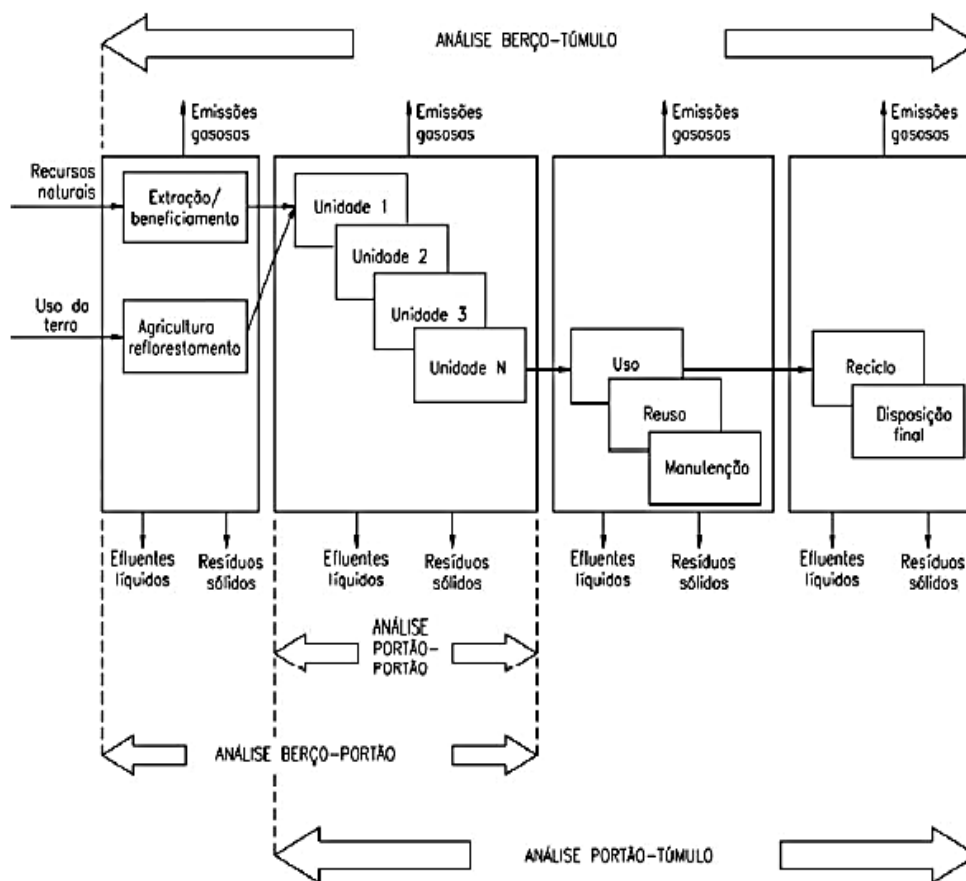


Figura 8 – Abordagens de um estudo ACV.

Adaptado de ROCHA (2009); BAUER (2003)

- Procedimentos de alocação: Em alguns casos os subsistemas abordados no sistema de produto, originam mais de um produto ou subproduto, sendo assim necessário realizar uma alocação que se trata de um procedimento de repartição de responsabilidade dos impactos ambientais entre os diferentes produtos (SEYE, 2003);
- De acordo com Singh, Pant e Olsen (2013), há dois tipos de ACV, que podem ser realizadas: a atribucional que tem o objetivo de avaliar a carga ambiental de um produto, assumindo sua situação atual; e a consequential com o objetivo de avaliar as conseqüências de uma mudança na demanda do sistema;
- Seleção dos tipos de impactos: A escolha categorias de impactos ambientais, tais como aquecimento global, acidificação terrestre, toxicidade humana, ecotoxicidade entre



outras, a serem avaliados em uma ACV tem sido realizado subjetivamente pelos autores, com base no objetivo e escopo definidos no estudo, devido a ausência de um padrão internacional de recomendação (GALDIANO, 2006).

- Metodologia de avaliação dos impactos e interpretação: Na fase de avaliação dos impactos, os resultados dos inventários são interpretados e comparados, por meio de um processo qualitativo ou quantitativo, classificando, caracterizando e normalizando os potenciais impactos ambientais sobre os ecossistemas, a saúde humana e a depleção dos recursos naturais ( SINGH, PANT E OLSEN 2013);
- Requisitos da qualidade dos dados iniciais: A qualidade dos dados varia muito devido a dificuldade de acesso aos dados industriais, tornando necessários cálculos e aproximações, que também dependem da quantidade de recursos financeiros disponíveis para a pesquisa, bem como do tempo disponível para a sua realização (SEYE, 2003).
- Seleção do tipo de análise crítica e definição do tipo e formato do relatório. Os resultados devem ser relatados ao público alvo, de acordo com o formato do relatório definido no escopo do estudo (ROCHA, 2009).

### **2.2.2 Análise do inventário**

A definição do objetivo e escopo é o passo inicial para um extenso levantamento e coleta de dados materiais, seguido pela análise e quantificação de todas as variáveis de entrada (*input*) e saída (*output*) do produto ou sistema, sendo elaborado um modelo do ciclo de vida do mesmo. Estes fluxos incluem o consumo de energia e matéria-prima, e as emissões para o ar, geração de efluentes hídricos, resíduos, entre outros. Ao final dessa fase os dados poderão ser avaliados para a determinação dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida do produto em estudo, por meio da próxima fase da ACV, a Avaliação de impactos (ABNT ISO 14.040, 2009; PIEKARSKI *et al.*, 2012).

### **2.2.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida**

Nessa fase os resultados do inventário são interpretados e comparados quantitativamente ou qualitativamente, de forma a classificar, caracterizar, normalizar e valorar os potenciais impactos ambientais sobre o ecossistema, a saúde humana e a depleção de recursos. A interpretação do ciclo de vida ocorre em todas as etapas de uma ACV, comparando inicialmente o consumo de recursos e as categorias de impacto ou priorizando áreas de interesse dentro do estudo de ciclo de vida (REBITZER *et al.*, 2004).

De acordo com a Norma ABNT ISO 14.044 (2009) essa fase consiste de elementos obrigatórios, a serem realizados após a análise do inventário, como:

- Classificação: os resultados do inventário são relacionados qualitativamente e agrupados em categorias de impactos ambientais, de acordo com os interesses específicos do estudo (GALDIANO, 2006);
- Caracterização: os aspectos ambientais classificados são quantificados por meio de fatores de equivalência em uma unidade comum sendo agregados posteriormente para cada categoria de impacto (YOKOTE, 2003);

Porém dentro da metodologia ACV, existem também as categorias opcionais, que podem ser utilizadas para a avaliação dos resultados do inventário, tais como:

- Normalização: procedimento realizado dividindo o indicador do impacto por um valor de referência, que pode ser uma média global, nacional, regional, uma base per capita ou média similar (YOKOTE, 2003);
- Ponderação: aplicado em inventários que apresentam grande quantidade de dados envolvidos, onde existe complexidade para relacioná-los e prefere-se trabalhar com um indicador ambiental único, que é formado atribuindo-se pesos a cada categoria de impacto em termos de sua importância, e posteriormente os somando (RENO, 2011).

Ao final da avaliação de impactos do ciclo de vida, obtém-se um perfil ambiental do sistema do produto em estudo, conforme definido no objetivo e escopo, que agora poderá ser interpretado na última fase da ACV.

#### **2.2.4 Interpretação dos resultados**

Nessa fase são considerados em conjunto os resultados das etapas de análise do inventário e avaliação dos impactos, que são interpretados e analisados, explicitando limitações do estudo e identificando as fases do ciclo de vida que mais impactam o ambiente. Sendo assim são emitidas conclusões como propostas de melhoria e/ou inovação no produto ou processo, visando a preservação ambiental (PIEKARSKI *et al.*, 2012).

## 2.3 Desenvolvimento sustentável

O aquecimento global e o desenvolvimento sustentável são preocupações sempre presentes nos debates internacionais, sobre as questões ambientais e antropogênicas. Segundo Kassmayer e Fraxe Neto (2016), os resultados do 5º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), demonstram que é muito grande a influência humana no sistema climático, sendo que as emissões recentes de Gases de Efeito Estufa (GEE) por ação antrópica são as maiores de toda a história, gerando consequências e severos impactos ao ambiente e a toda a população, tais como o aquecimento da atmosfera e oceanos, derretimento das calotas polares, elevação do nível do mar, extinção de espécies, aparecimento de doenças, eventos climáticos extremos, entre outros relacionados a saúde humana, ecossistema, acidificação terrestre, eutrofização das águas, depleção de recursos minerais e fósseis, destruição da camada de ozônio, além de mais uma gama de impactos ambientais que devem ser enfocados.

No Acordo de Paris, proposto em dezembro de 2015, tanto os países desenvolvidos quanto aqueles em desenvolvimento, foram encorajados a contribuir com a diminuição das emissões, por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que é definida pelo país participante, e consiste em medidas de mitigação adotadas para uma contínua redução das emissões (KASSMAYER e FRAXE NETO, 2016).

O Acordo de Paris entrou efetivamente em vigor em 4 de novembro de 2016, no entanto devido a rapidez da ratificação desse acordo internacional, não houve tempo hábil para regulamentar os processos, os fluxos de informação, composição e competência de cada órgão e os tipos de informações que deveriam ser apresentadas por cada país, sendo assim desde o final de 2016 as negociações de mudanças climáticas da ONU estavam voltadas para a implementação de um manual de instruções, chamado livro das regras, para que o acordo pudesse efetivamente funcionar (PROLO, 2019).

De acordo com Kassmayer e Fraxe Neto (2016), como participante do Acordo de Paris, o Brasil tomou uma série de medidas para auxiliar na questão da redução das emissões de GEE, tais como o aumento na produção de biocombustíveis e uso de energia solar, bem como a adoção de práticas e tecnologias com menores taxas de emissões de CO<sub>2</sub>-equivalentes. Como NDC o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE, em 37% abaixo dos níveis de 2005 até o ano de 2025, chegando a 43% de redução até 2030, o que corresponde a níveis de emissão de 1,3 Gt CO<sub>2</sub>-eq. em 2025 e 1,2 Gt CO<sub>2</sub>-eq. em

2030. Esse objetivo pretende ser alcançado com medidas de mitigação em diferentes setores como: energia, mudanças no uso da terra, florestas, agricultura, indústria e transportes. No setor de energia a meta é atingir 45% de energias renováveis na matriz energética até 2030, e expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil como eólica, biomassa e solar, além de aumentar a eficiência no setor elétrico em cerca de 10% no mesmo período.

No mês de dezembro de 2018, foi realizada na Polônia a COP 24 (Conferência das Partes), cujo principal objetivo era aprovar o livro de regras para regulamentar o Acordo de Paris, e tratar das questões levantadas a partir de outubro de 2018, quando a divulgação de um relatório do IPCC , alertava que mesmo, para o aumento de 1,5°C na temperatura, haveria um maior risco de fome no mundo. No entanto devido a oposição de alguns países liderados pelos Estados Unidos e Arábia Saudita, em não aceitarem as conclusões das informações contidas no relatório, os países foram apenas convidados a utilizar as informações disponíveis no livro de regras. Em relação as metas de redução de emissões firmadas em 2015, os esforços serão para elevar as ambições até 2020 e para a verificação do cumprimento das metas, cada país irá apresentar um relatório detalhado as suas ações climáticas a cada dois anos, a partir de 2024; e a cada cinco anos, a partir de 2023, os países farão um balanço mundial de seus esforços para alcançar o objetivo coletivo de limitar o aumento da temperatura global (G1 Natureza, 2018).

O tema transição justa, que trata da perda de empregos por trabalhadores à medida que se abandonam as fontes fósseis, teve muita visibilidade na COP 24, sendo citada a Declaração de Silésia, para que as ações de enfrentamento da crise climática levem em consideração a transição justa na força de trabalho e a criação de empregos decentes e de qualidade para os trabalhadores. A participação da sociedade civil e as manifestações de ativistas internacionais entre outras organizações, tem tido redução do seu espaço e esses movimentos tem sido criminalizados, tendo-se tornado um fenômeno global, o que foi muito criticado na COP 24.

Para a COP 25, que será realizada no Chile, espera-se que sejam discutidos os Mecanismos de desenvolvimento sustentável, a compra e venda dos créditos de redução de emissões de gases de efeito estufa, além de como serão definidos os mecanismos de flexibilização pelo Acordo de Paris, juntamente com a meta de financiamento climático, um fundo de investimento para que os países desenvolvidos ajudem financeiramente os países em desenvolvimento, no cumprimento de suas metas de redução de emissões,

sendo que a meta atual é de U\$ 100 bilhões anuais a partir de 2020 (RADAR SOCIOAMBIENTAL, 2018).

## 2.4 Energia solar

De acordo com MME (2014) a influência da energia solar sobre a natureza dá origem a maior parte das outras fontes energéticas da terra. De forma direta, a radiação solar pode ser usada como fonte de energia térmica, para o aquecimento de ambientes, de fluidos e para geração de potência mecânica ou elétrica; ou ser convertida em energia elétrica, por meio de efeito termoelétrico ou fotovoltaico (SILVA, 2015).

De acordo com REN21 (2018) o investimento global em energia renovável e de combustíveis totalizaram U\$ 265 bilhões de dólares (excluindo hidrelétricas maiores de 50 MW), o que seria considerando a cotação do dólar como R\$ 3,996 (15/05/2019), R\$ 1,059 trilhões de reais, conforme Figura 9, sendo a maior parte dos investimentos destinada a energia solar fotovoltaica (57%) e energia eólica (38%).

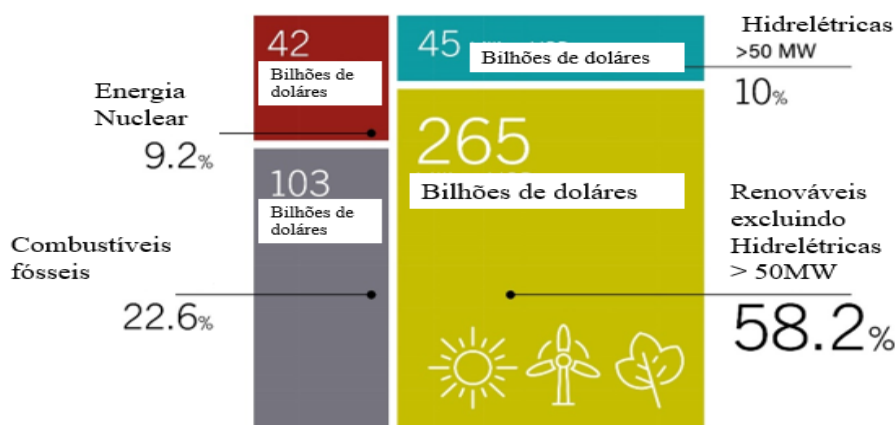


Figura 9 – Investimentos globais em energias renováveis por tipo, 2017

Fonte: REN21 (2018)

Para novos projetos fotovoltaicos contratados em 2017, os custos globais apresentaram quedas de cerca de 73% entre os anos de 2010 a 2017, chegando a um custo nivelado médio global (LCOE) de cerca de U\$ 0,10/kWh, enquanto para a tecnologia solar de concentração térmica o LCOE médio ficou em U\$ 0,22/kWh. A rápida expansão das instalações de energia solar no mundo todo tem levado a fonte solar a crescer consideravelmente ano a ano, o que possibilitará a energia solar ser a maior fonte de capacidade de baixo carbono até 2040, quando a geração de energias renováveis no

mundo chegará a 40% (WEO, 2017). A Figura 10 mostra a capacidade global instalada de plantas energéticas de concentração solar.

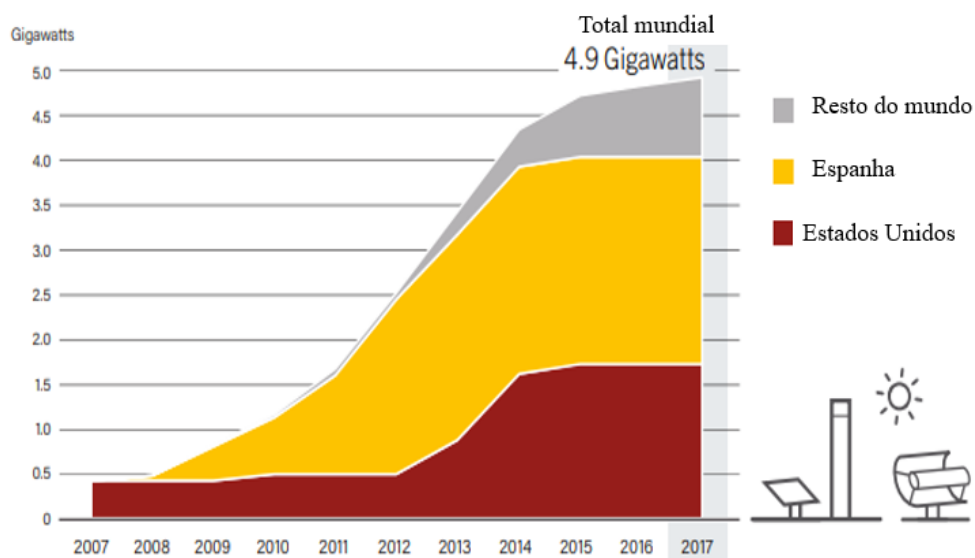


Figura 10 - Capacidade Global de Energia Térmica Solar, 2007-2017

Fonte: REN21 (2018)

No Brasil de acordo com dados do BEN (2017), em 2016, a micro e mini geração distribuída produziram 104,1 GWh com uma potência instalada de 72,4 MW, onde a fonte solar fotovoltaica se destacou, com 53,6 GWh e 56,9 MW de geração e potência instalada respectivamente. Esse crescimento está sendo possível devido a incentivos nacionais e ações regulatórias. Nacionalmente ainda não há empreendimentos comerciais de tecnologia de concentração solar térmica.

O Brasil possui empresas produtoras de silício metalúrgico e montadoras de células, porém ainda não produz silício purificado até o grau solar, dessa forma, exporta silício e importa os módulos fotovoltaicos terminados. O custo e a necessidade de importação dos equipamentos são as principais causas da elevação do preço da energia elétrica gerada por fonte solar. Inicialmente a expansão da fonte solar no Brasil está sendo desenvolvida com o uso de equipamentos importados, fato que também ocorreu com a tecnologia eólica, até o desenvolvimento e consolidação da produção em território nacional (SILVA, 2015).

O território brasileiro possui vantagens para o estabelecimento de uma indústria fotovoltaica forte nacionalmente, conforme destaca EPE (2012), por diferentes motivos dentre os quais:

- Possui uma das maiores reservas mundiais de quartzo de qualidade, matéria-prima para a produção de silício;
- Conta com indústrias estabelecidas de beneficiamento do silício, atualmente até o grau metalúrgico;
- Dispõe de tecnologia para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos, ainda que em escala piloto, tendo como exemplo a planta instalada pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), que produz módulos fotovoltaicos com tecnologia competitiva;
- Possui altos níveis de irradiação solar, o que propicia a geração de energia por meio da tecnologia solar;
- A expectativa para o início da fabricação nacional de células de silício cristalino está programada para o ano de 2020 (SILVA, 2015).

No 27º Leilão de Energia Nova (LEN) realizado em 04/04/2018, foram registrados os menores preços já negociados para energia elétrica de usinas solares, que foram vendidas a R\$ 118,07/MWh. No mesmo leilão a negociação de energia eólica ficou em R\$ 67,60/MWh, seguido pelas térmicas movidas a biomassa, R\$ 198,94/MWh e hidráulica, R\$ 198,12/MWh. Foram contratados 39 empreendimentos de geração, sendo que desse total, 29 unidade são de usinas solares, totalizando 228,5MW, essas usinas serão construídas no Ceará (14), Piauí (6), Minas Gerais (6) e Pernambuco (3), e deverão iniciar o fornecimento de energia elétrica em 1º de janeiro de 2022 (CCEE, 2018). Na Tabela 2 é possível observar a potência instalada de tecnologia fotovoltaica no Brasil distribuída por estado.

Tabela 2 – Geração distribuída: Potência instalada por estado brasileiro

<b>Estado</b>	<b>Potência instalada (MW)</b>	<b>Porcentagem</b>
Minas Gerais	148,4	21,7%
Rio Grande do Sul	110,6	16,1%
São Paulo	83,8	12,2%
Santa Catarina	49	7,2%
Paraná	41,2	6,0%
Mato Grosso	30	4,4%
Rio de Janeiro	27,1	4,0%
Goiás	24,6	3,6%
Ceará	23	3,4%
Pernambuco	19	2,8%
Mato Grosso do Sul	15,4	2,2%

Rio Grande do Norte	15,2	2,2%
Bahia	14,5	2,1%
Paraíba	13,5	2,0%
Espírito Santo	12,1	1,8%
Distrito Federal	10,8	1,6%
Maranhão	10,1	1,5%
Piauí	8,2	1,2%
Tocantins	6,8	1,0%
Pará	5,5	0,8%
Sergipe	5,3	0,8%
Alagoas	4,6	0,7%
Rondônia	2,2	0,3%
Amazonas	1,5	0,2%
Amapá	1,4	0,2%
Acre	0,9	0,1%
Roraima	0,6	0,1%
<b>Total</b>	<b>685,3</b>	<b>100,0%</b>

Adaptado de ABSOLAR (2019)

## 2.5 Tecnologia fotovoltaica

Segundo MME (2014) o efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, e consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula fotovoltaica causada pela absorção de luz. O seu desenvolvimento foi baseado em dois pontos principais: como fonte de energia para locais remotos e para o fornecimento de energia elétrica para as naves e equipamentos enviados ao espaço.

Adriano (2015) descreve que, o efeito fotovoltaico ocorre quando a radiação eletromagnética em algumas longitudes de onda incide na superfície de uma junção semicondutora. O cristal de silício puro que possui quatro elétrons de valência, é um mal condutor, sendo que para melhorar as suas características, são adicionados diferentes materiais por meio de um processo chamado dopagem. Na dopagem pode ser adicionado fosforo (F), com 5 elétrons na camada de valência, para formar a camada tipo N (doadora de elétrons) ou bário, com 3 elétrons na camada de valência que forma a camada P (receptora de elétrons). Cada célula solar é formada por uma camada tipo N e outra do tipo P. A tecnologia fotovoltaica mais difundida e consolidada atualmente são as células solares de silício do tipo monocristalino e policristalino.

Uma célula solar é essencialmente um diodo semicondutor especializado com uma grande camada de barreira que, quando exposto à luz, permite a conversão direta em



eletricidade contínua uma parte da energia luminosa que chega à célula. Uma célula fotovoltaica típica produz uma potência elétrica da ordem de 1,5Wp (watt-pico) que corresponde a uma tensão de 0,5 V (volts) e uma corrente de 3 A (amperes), as células podem ser ligadas entre si em série ou paralelo para formar um módulo fotovoltaico e gerar potências superiores (GONÇALVES, 2014; HABERLIN, 2012).

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos e por um conjunto de componentes chamados de *balance of system* (BOS), que segundo Adriano (2015) e CRESESB (2014) se resumem a:

- Inversores – responsáveis por converter a corrente contínua (CC) gerada no módulo em corrente alternada (CA);
- Baterias – utilizada para armazenar a energia excedente do sistema;
- Componentes elétricos – necessários para a ligação entre os módulos e o ponto de consumo;
- Suporte para os painéis – para estabilidade do módulo, utilizado de acordo com o tipo e o local da instalação, que pode ser fixo ou com rastreamento solar.

De acordo com Khatib *et al.* (2013) a energia de saída dos módulos fotovoltaicos depende principalmente da energia solar disponível, da temperatura ambiente e da velocidade do vento.

A irradiação solar no plano horizontal é o parâmetro mais importante para avaliar o potencial da energia solar em cada região do planeta Terra, sendo também usada como o valor base para simular a instalação de painéis fotovoltaicos; na estimativa de produção de energia elétrica, é considerado um valor acumulado de energia solar ao longo de um dia, chamado de número de horas de sol pleno (HSP), que reflete o número de horas em que a irradiância permanece igual a 1 kW/m<sup>2</sup>, de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão, acumulada ao longo de um dia (SOLARGIS, 2018).

Em 2016 a China conectou 34,5 GW de energia fotovoltaica à sua capacidade, seguida pelos Estados Unidos com um acréscimo de 14,8 GW no seu sistema (GMO,2016). Na Figura 11, é mostrada a Evolução global da capacidade FV instalada no mundo.

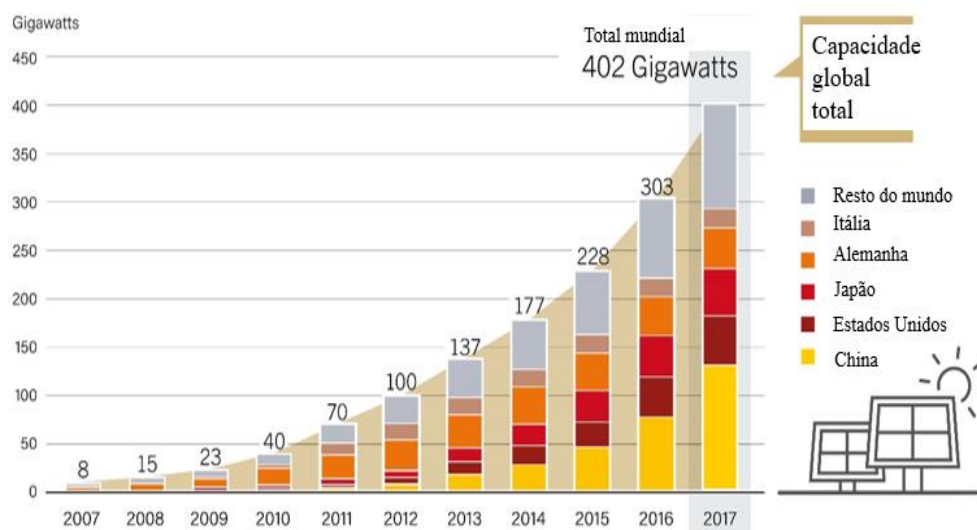


Figura 11 - Evolução global da capacidade fotovoltaica instalada por país e região (2007-2017)

Fonte: REN21 (2018)

Os sistemas fotovoltaicos podem ser autônomos, não ligados à rede (*off-grid*) ou ligados à rede (*on-grid*). No sistema *off-grid* é necessário armazenar a energia não consumida em baterias, que são um dos constituintes mais caros do sistema fotovoltaico. O sistema pode ser doméstico (casas isoladas, iluminação ou refrigeração) ou não doméstico (bombeamento de água, sinais de trânsito, entre outros). O sistema *on-grid* é ligado à rede e a energia gerada é distribuída (residências, empresas e escritórios) ou centralizada na produção em larga escala (centrais fotovoltaicas) (GONÇALVES, 2014).

A queda nos custos tem tornado a tecnologia fotovoltaica muito competitiva no mercado energético e líder nas adições anuais de capacidade. Com essa perspectiva espera-se que a tecnologia FV exceda 400 GW em 2018, 500 GW em 2019, 600 GW em 2020 e 700 GW em 2021 (GMO, 2016).

### Primeira geração de células FV

Esta geração é integrada pelas células de silício cristalino que integram as tecnologias de silício monocristalino, policristalino e *string ribbon*. Essa tecnologia atualmente representa 87% do mercado fotovoltaico e trata-se de uma tecnologia consolidada e confiável. As eficiências das tecnologias variam de 16% a 21% para monocristalinas; 14 a 18% para policristalina e 18% para o *string ribbon* (WEC, 2016; ADRIANO, 2015). A estrutura e ordenação dos cristais é o que difere a tecnologia mono e policristalina, na primeira os cristais estão perfeitamente ordenados e na segunda estão

desordenados, já o *string ribbon* (células solares de fitas) caracteriza-se pelo crescimento de lingotes que são cortados a laser, evitando a utilização de ataque químico, o que reduz custos devido a uma melhor utilização da matéria prima (GONÇALVES, 2014).

A grande desvantagem da tecnologia de células de silício, reside no alto custo energético para a purificação do Silício para grau metalúrgico, eletrônico e solar. No entanto as pesquisas estão aceleradas a fim de melhorar sua eficiência, os custos de fabricação e a competitividade com as outras tecnologias. Pode se destacar como possíveis melhorias nas células de silício: o desenvolvimento de células para minimizar o sombreamento, o esquema hetero-junção, o processamento de *wafers* (bolacha) com espessura reduzida (abaixo de 50  $\mu\text{m}$ ), as células solares bifaciais (capturam a luz solar no lado traseiro da célula), entre outras (MME, 2014).

### **Segunda geração de células FV**

A segunda geração é denominada *Thin film* (filmes finos) e é composta da tecnologia de silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe) com as eficiências de 16%-24%; 18%; e 14%-17% respectivamente (ADRIANO, 2015). De acordo com dados do MME, em relação a primeira geração, e existem dificuldades quanto as matérias primas, vida útil, rendimento e toxicidade dos materiais. Segundo WEC (2016) essa tecnologia utiliza películas finas (*Thin film*), de substratos de baixo custo (plástico, vidro, aço inoxidável), que sofrem a deposição de camadas ultra-finas de material fotossensível, utilizando apenas 1% de silício na sua fabricação se comparados as células da primeira geração. Essa geração utiliza outras matérias primas, além do silício, e devido ao seu peso reduzido pode ser usada em telhados e fachadas de edifício.

### **Terceira geração de células FV**

Nesta geração encontram-se as tecnologias em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), segundo MME (2014) são elas: célula fotovoltaica multijunção, célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated photovoltaics*), células sensibilizadas por corantes (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*). Nesse caso a produção é realizada em

pequena escala, as tecnologias passam por muitos testes e o alto custo das mesmas ainda não é competitivo com a tecnologia de silício.

Como a indústria atualmente é muito dependente do silício a busca de novos materiais para a fabricação de células se destaca, e a tecnologia *Thin film*, célula solar orgânica e células *perovskite* tem sido usado para a próxima geração de células solares. Outros materiais estão em estudo tais como o grafeno e índio fosforeto (INP), porém ainda com estabilidade e eficiência insatisfatórias (WEC, 2016).

### **2.5.1 Estado da arte da tecnologia fotovoltaica de células de silício**

Os estudos brasileiros voltados para a ACV da tecnologia fotovoltaica se destacam em relação as demais tecnologias de geração de energia elétrica por meio da radiação solar, pois esta tecnologia já se encontra disseminada no Brasil. A grande maioria dos trabalhos brasileiros utiliza bancos de dados internacionais para a realização dos estudos ACV, devido a ausência de um banco de dados nacional abrangente e consolidado, dentre os trabalhos a maior parte das pesquisas está focado em identificar os aspectos ambientais da utilização dos painéis fotovoltaicos importados, a emissão de GEE gerada durante o seu ciclo de vida, a sua viabilidade econômica e as vantagens da utilização dessa tecnologia. Dentre os trabalhos brasileiros publicados sobre a tecnologia fotovoltaica, alguns dos mais relevantes são mostrados a seguir.

Bezerra, Lira e Silva (2018) realizaram um estudo de painéis fotovoltaicos com células policristalinas, por meio de uma abordagem do berço ao portão, utilizando o Software SIMAPRO, com dados referentes a produção do painel fotovoltaico na China analisando os impactos ambientais gerados. Como resultado concluíram que 95% da energia utilizada na produção dos painéis é de fonte fóssil, e os processos de maior demanda energética são a produção de mg-Si (47%) e do módulo fotovoltaico (21%); a demanda de energia total para a produção de um painel é 1,3MWh, o tempo de retorno de energia é de 2,94 anos, e no ecoindicador Recipe as categorias de impacto que apresentaram maiores pontuações foram: ecotoxicidade, eutrofização de água doce e toxicidade humana devido ao uso de metais pesados e emissão de compostos tóxicos durante a produção do módulo .

Lara (2018) realizou um estudo de um sistema fotovoltaico policristalino conectado à rede, com o objetivo de avaliar o um sistema fotovoltaico residencial de

2,6kWp, na cidade de Cacoal – RO e um sistema de uma indústria envasadora de água mineral e refrigerante de 500kWp, em Pimenta Bueno - RO, levando em consideração o Payback time e a taxa de emissão de CO<sub>2</sub>. Como resultados obteve para o sistema residencial um EPBT de 2,36 anos e uma taxa de emissão de CO<sub>2</sub> de 0,063 kg CO<sub>2</sub> eq./kwh, já para planta industrial obteve um EPBT entre 3,98 a 4,36 anos e uma taxa de emissão de 0,080 kg CO<sub>2</sub> eq./kwh.

Oliveira, Rodrigues e Luz (2018) realizaram um trabalho sobre a produção de um módulo fotovoltaico policristalino com dois cenários, sendo o primeiro a fabricação do módulo realizada inteiramente na China e no segundo a fabricação sendo realizada entre a China e o Brasil. Foi utilizado o Software Thinkstep Gabi 2016 e o Ecoindicador CML 2001. A avaliação do berço ao túmulo foi utilizada, a unidade funcional foi definida como 1kWh. No cenário 2, o wafer produzido na China é enviado para o Brasil para que o módulo seja montado. Resultados para o potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, toxicidade humana, consumo de energia e de água foram respectivamente para o Cenário 1: 8,83 kg CO<sub>2</sub> eq.; 0,038 kg SO<sub>2</sub> eq; 0,00251 kg fosfato eq.; 13,6 kg DCB eq.; 53,4kWh e 86,2kg; e para o cenário 2, 8,66 kg CO<sub>2</sub> eq.; 0,0386 kg SO<sub>2</sub> eq; 0,0253 kg fosfato eq.; 13,7 kg DCB eq.; 52,8kWh e 93,6kg. Devido as características da matriz energética renovável do Brasil em comparação com a grande utilização de fontes fósseis na China, concluiu-se que os impactos do cenário 2 foram menores.

Constantino, Freitas, Fidelis e Pereira (2018) avaliaram Sistemas fotovoltaicos policristalinos, de 10 diferentes usinas fotovoltaicas instaladas no nordeste do Brasil, totalizando 1,1MWp instalados, com painéis importados da China. Os autores avaliaram o tempo de recuperação de energia (EPBT) e a taxa de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Os estudos resultaram em uma EPBT variando de 2,9 a 5,16 anos de acordo com a produtividade da planta, uma taxa de GEE média 68,35 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, maior do que a projeção de emissão da rede elétrica brasileira para 2020, que é de 63,9 g CO<sub>2</sub> eq/kWh. Concluíram que a adoção de tecnologia fotovoltaica de países com matriz energética fóssil como a China, não mostra tantos benefícios em relação a emissão de GEE. A produção de painéis em países com matriz energética renovável, torna a implementação dessa tecnologia ambientalmente melhor.

Paiva (2018) realizou o estudo com o objetivo de dimensionar um sistema fotovoltaico para uma granja no município de Sorriso – MT, com oito galpões, escritório,

almoxarifado, e quatro residências, com consumo anual de 227.981 kWh, e dessa forma verificar a aplicabilidade de um sistema fotovoltaico nesta granja, identificando os impactos ambientais gerados. Ao final do estudo foi constatada a viabilidade do sistema fotovoltaico para o empreendimento, e os impactos ambientais mais significativos foram observados durante a fase de fabricação dos equipamentos do sistema fotovoltaico, quando há grande consumo de recursos naturais e emissão de poluentes. A instalação do sistema também evitaria a emissão de 17,1 t CO<sub>2</sub> eq anualmente.

Os estudos internacionais que foram relevantes para a realização deste trabalho, são comentados a seguir.

No trabalho de Adriano (2015), o principal objetivo foi analisar o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal e comparar essa tecnologia com outras formas de produção de eletricidade. O método Ecoblok foi utilizado, fornecendo os indicadores de desempenho. Como resultado da ACV, foi constatado que os principais impactos do ciclo de vida estão na fase de produção da célula, montagem do painel e componentes do sistema (BOS). Os indicadores mais impactados foram: extração de recursos, emissão de gases de efeito estufa e poluição da água e do solo, além da quantidade de energia utilizada para as transformações do silício até o grau solar. A tecnologia monocristalina gerou maiores impactos que a tecnologia multicristalina, principalmente devido as diferenças dos processos produtivos. Na comparação com outras tecnologias, verificou-se que a tecnologia de gás natural apresenta maiores impactos nos indicadores: extração de água, extração de recursos e emissão de gases de efeito de estufa; já a tecnologia hídrica gera maiores impactos no indicador uso do solo. Nos indicadores poluição da água, solo e ar a tecnologia fotovoltaica apresenta o valor mais elevado de todas as tecnologias. A energia eólica foi identificada como fonte que gera menores impactos na maioria dos indicadores. Comparando a tecnologia fotovoltaica com a tecnologia eólica, concluiu-se que a fotovoltaica oferece a vantagem, por ter uma produção mais estável e previsível, mesmo com o céu nublado sendo que a sua instalação pode ser feita em qualquer lugar que receba irradiação e seja livre de sombras, já a tecnologia eólica, por outro lado, requer condições mais específicas para a sua instalação, necessitando de estudos prévios mais aprofundados no local, sendo menos adaptável a diferentes localidades.

Yang *et al.* (2015) o trabalho apresenta uma ACV da fabricação de módulos fotovoltaicos de silício policristalino na China, levando em consideração o comércio internacional, e na sequência é feita a combinação dos resultados com os dados de

exportação de módulos fotovoltaicos, avaliando-se a mudança de impactos ambientais atribuíveis à exportação de módulos fotovoltaicos.

Gerbinet *et al.* (2014) apresenta uma revisão precisa das várias ACV's efetuadas da tecnologia fotovoltaica, e relata que os painéis de silício são os mais estudados, e que por vezes os componentes do sistema fotovoltaico (*BOS*) que influenciam a ACV, são omitidos nos estudos, a grande maioria dos estudos se concentra em indicadores relacionados a energia, como o tempo de retorno de energia (EPBT), indicadores relativos as mudanças climáticas e as emissões de CO<sub>2</sub>. Quando se utilizam as metodologias de impacto geralmente são utilizados o Ecoindicador 99 e o CML 2001, porém com resultados expressos após a sua normalização, o que ao final da revisão destacou a necessidade de mais ACV's de painéis fotovoltaicos, que tenha abordagem convencional, além de incorporar as propriedades eletrônicas do painel, o *BOS* e as novas tecnologias em desenvolvimento.

Peng *et al.* (2013) realizou uma revisão da ACV com o objetivo de analisar a sustentabilidade e o desempenho ambiental de diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos monocristalinos, policristalinos, silício amorfo, CdTe (filme fino), CIS (filme fino) e sistemas fotovoltaicos avançados. Na comparação dos cinco primeiros sistemas o CdTe apresentou melhor desempenho ambiental em termos de retorno de energia e emissão de GEE, já o monocristalino apresentou o pior desempenho ambiental devido a alta necessidade energética para a produção das células solares. Nos sistemas avançados como alta concentração, hetero-junção e células sensibilizadas por corantes, o sistema de alta concentração apresentou o menor tempo de retorno de energia de 0,7 a 2,0 anos, enquanto as células sensibilizadas por corantes apresentaram a maior taxa de emissão de CO<sub>2</sub> de todos os sistemas fotovoltaicos. Dessa forma conclui-se que as tecnologias fotovoltaicas são sustentáveis e favoráveis ao meio ambiente, e que com o constante desenvolvimento e melhoramento das tecnologias o desempenho ambiental seja muito melhor no futuro reduzindo os impactos ambientais.

## **2.6 Tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica**

De acordo com Satiro e Coutinho (2012) os concentradores solares podem ter diferentes arranjos, tais como: concentrador tipo Fresnel, concentrador heliotérmico

(torre solar), concentrador de prato parabólico e concentrador de calha parabólica; todos os arranjos desviam e concentram a radiação recebida em uma área reduzida podendo alcançar temperaturas bem elevadas. A capacidade mundial acumulada de CSP, no ano de 2016 chegou a 5GW, conforme pode ser vista na Figura 12.

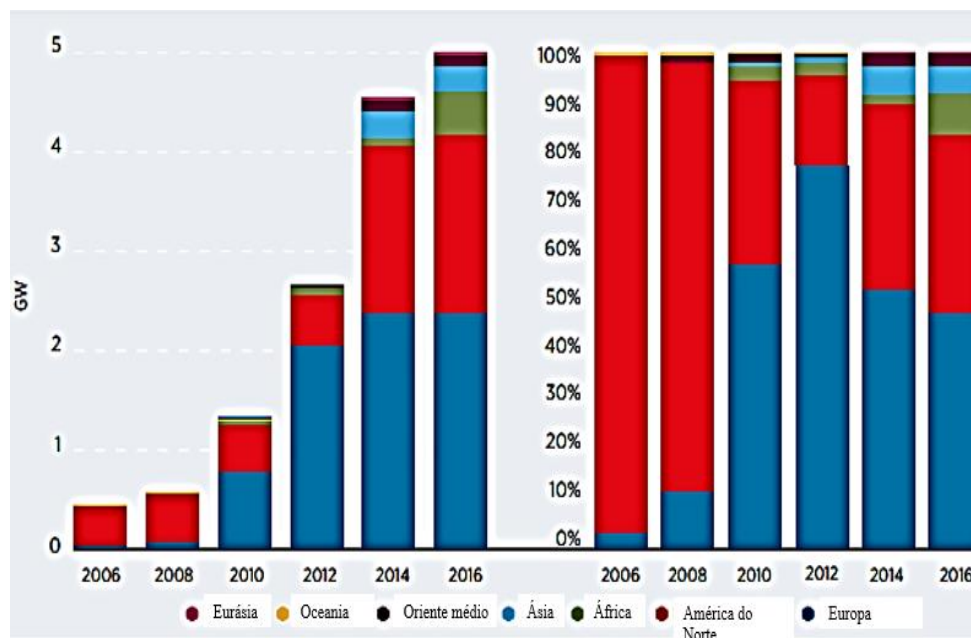


Figura 12 –Capacidade instalada acumulada de CSP por região, 2006-2016.

Fonte: IRENA (2017)

Os concentradores de calha parabólica representam cerca de 85% da capacidade instalada no mundo (WEC, 2016). Segundo Corona *et al.* (2014) nessa tecnologia os espelhos ou materiais refletores são montados em formato de calha e a radiação é concentrada em um ponto. No foco concentrador é colocado um tubo geralmente de cor preta com alta absorvidade e baixa emissividade. A tubulação é envolvida por um invólucro de vidro à vácuo, para reduzir as perdas por convecção.

Na tubulação um fluido de transferência térmica (HTF), que pode ser de diferentes composições, circula no campo solar absorvendo energia que passa para um fluido termodinâmico, por meio de um trocador de calor, gerando um vapor superaquecido, que aciona uma turbina acoplada a um gerador (LOVEGROVE e STEIN, 2012; DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Em algumas plantas, são incorporados sistemas de armazenamento de energia térmica (TES), que armazenam energia térmica durante o dia para entre outras coisas produzir eletricidade adicional à noite, evitar o congelamento do fluido HTF e facilitar as operações *start-up*. Diferentes tecnologias de armazenamento foram desenvolvidas para



os sistemas de concentração solar dentre elas: o armazenamento de calor sensível tanto em meio sólido quanto em meio líquido, o armazenamento de calor latente que usa mudanças de fases e o armazenamento termoquímico (MING *et al.*, 2016; LOVEGROVE e STEIN, 2012).

Os custos de investimento para as instalações de calha parabólica sem armazenamento nos países membros da Organização para cooperação e desenvolvimento econômico (OCDE) são tipicamente entre US \$4.600-8.000 por kW. Nos países que não são membros da OCDE os custos de capital variam entre US \$3.500-7.300 por kW. As plantas que possuem capacidade de armazenamento entre 0,5 e 4 horas apresentam custos variando entre US \$3.400-10.000 por kW enquanto que para as plantas com capacidade de armazenamento entre 4 e 8 horas os custos variam entre US \$6.800-12.800 por kW. O custo nivelado médio global atual para plantas de calha parabólica sem armazenamento está na escala de US \$0,19-0,38 por kWh, já com sistema de armazenamento o LCOE passa a variar de US \$0,20 a US \$0,36 por kWh (WEC, 2016).

As plantas de energia solar concentrada (*Concentrated solar power - CSP*) operam utilizando a irradiação direta normal (DNI), então a sua instalação é indicada para locais com elevados valores de DNI. As principais características deste tipo de tecnologia são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais características da tecnologia de concentração térmica de calha parabólica

<b>Capacidade (MW)</b>	10-300	<b>Maturidade tecnologia</b>	Comercial	<b>Risco da tecnologia</b>	Baixo
<b>Temperatura de operação (°C)</b>	350-550	<b>Pico de eficiência da planta (%)</b>	14-20	<b>Eficiência de conversão da energia solar/eletricidade (%)</b>	11-16
<b>Tipo de aplicação</b>	On-grid	<b>Adequação para o resfriamento a ar</b>	Baixo para bom	<b>Armazenamento com sal fundido</b>	Comercialmente disponível
<b>Provedores de tecnologia</b>	Abengoa Solar, SolarMillennium, Sener Group, Acciona, Siemens, NextEra, ACS, SAMCA, etc.	<b>Receptor / absorvedor</b>	Absorvedor ligado ao Coletor, design complexo		

Fonte: RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES (2012)

De acordo com Ming *et al.* (2016) uma das barreiras para a adoção da tecnologia CSP em larga escala ainda são os custos altos dessa tecnologia, porém, em vários países os esforços de pesquisa têm se concentrado em promover um sistema CSP mais econômico e viável.

É previsto que o setor CSP se expanda globalmente, com novos mercados sendo desenvolvidos. Na atualidade destacam-se nessa tecnologia (WEC, 2016):

- A Espanha que atualmente tem o maior mercado de CSP, com mais de 50 projetos aprovados pelo governo em obras e com exportação de tecnologia, a fim de aumentar a participação no sistema energético global;
- Marrocos e África do Sul que são mercados onde o crescimento de CSP será mais rápido nos próximos anos, auxiliado por políticas energéticas e níveis de irradiação adequados para a tecnologia. Sendo que o LCOE, pode ser reduzido a US \$0,10 por kWh, a partir de um valor atual de US \$0,14 por kWh, com o desenvolvimento de projetos na região;
- China e Índia que também estão interessadas em entrar o mercado de CSP, o que ajudará a reduzir os custos de tubos coletores, espelhos e infraestrutura de armazenamento ainda mais;
- A expansão também ocorrerá pelo uso de CSP no setor de óleo e gás para recuperação térmica de óleo aprimorado.

### **2.6.1 Estado da arte da tecnologia de concentração solar térmica de calha parabólica**

No Brasil ainda não existem instalações de produção de energia elétrica a partir da tecnologia de concentração solar térmica, devido a esse motivo os estudos nacionais utilizam base de dados internacionais e buscam principalmente avaliar o potencial de geração de energia dessa tecnologia no Brasil. Entretanto há projetos em andamento para a instalação de usinas de energia solar concentrada no Brasil que são descritos como:

- Projeto de uma usina de calhas parabólicas com 1MWel de capacidade, a ser construída na cidade de Petrolina-PE, uma parceria da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) com o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL);

- Projeto chamado SMILE (*Solar-hibridy microturbine systems for cogeneration in agroindustrial eletricity and heat production*), que é uma parceria entre a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, a empresa Solinova, BNDES, Elektro e o centro aeroespacial alemão (DLR), que visam a construção de duas usinas de torre central no campus da USP em Pirassununga-SP e em Caiçara do Rio dos Ventos-RN (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2019; PEQUENAS EMPRESAS GRANDES NEGÓCIOS, 2016; SOLINOVA, 2019 );
- Construção de uma planta heliotérmica no Rio Grande do Norte, no Vale do Açu, com a finalidade de produzir calor para ser utilizado no processo de tratamento e separação do óleo extraído, e para o consumo elétrico dos edifícios da empresa Petrobrás, com potência do projeto está estimada em 3 MW. Este empreendimento está sendo desenvolvido em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2019).

Dentre os trabalhos que foram realizados para diferentes regiões brasileiras, os que se destacam são comentados a seguir.

Zucatelli, Salvalaio, Pereira e Meneguelo (2017) realizaram um estudo do potencial técnico e econômico da geração de eletricidade a partir de uma usina CSP de calhas parabólicas instalada no Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), por meio da utilização do software SAM (*System advisor model*). A planta foi modelada com capacidade de geração de 2MW, a irradiação direta normal considerada no estudo foi de 900W/m<sup>2</sup>, o fluido de transferência utilizado foi o Therminol VP-1 e a vida útil da planta foi estimada em 30 anos. Após a modelagem concluiu-se que o projeto é viável a longo prazo, produzindo cerca de 2650 MWh anualmente, suficientes para atender o consumo do CEUNES e ainda gerar créditos para serem utilizados posteriormente. O projeto seria compensado no 26º ano de operação da planta, pois o valor estimado para essa usina ficou em USD 4.230/kW, conforme dados da literatura, o que torna necessário incentivos governamentais para incentivar e viabilizar a utilização desse tipo de tecnologia no Brasil.

Bezerra (2017) realizou uma simulação de uma planta CSP com receptor central de 70kWel com cogeração de calor integrado a sistemas agroindustriais no interior de São

Paulo. As análises foram realizadas para a cidade de Pirassununga-SP, com a ferramenta computacional TRNSYS, por meio de simulação da planta CSP em resposta a irradiação solar variável no tempo e a dinâmica de operação do consumidor agroindustrial. O valor de geração de eletricidade ficou em 9,051 MWh/mês, sendo que para suprir os consumidores agroindustriais seriam necessários mensalmente 4.500 MWh para o matadouro, 1.900 MWh para o laticínio e 32.200 MWh para a usina sucroalcooleira, dessa forma essa planta não conseguiu suprir a demanda solicitada. O autor concluiu que é necessário redimensionar o campo solar, incluindo mais heliostatos a planta, para que ela possa suprir as atividades agroindustriais de cada consumidor. Constatou também que em dias de condições favoráveis, com disponibilidade de irradiação por cerca de 10 horas diárias, a planta é capaz de suprir 60% da demanda solicitada pelo laticínio.

Araujo Junior (2017) realizou um trabalho comparativo da eficiência energética de todo o processo produtivo das energias renováveis fotovoltaicas e termossolar, para a geração de 30MW de energia elétrica, em plantas com vida útil de 30 anos, localizadas no município de Itaguaçu-BA. Para o arranjo fotovoltaico foram consideradas a produção de MG-Si, a produção de lâminas de Si, a confecção de células, a produção do painel fotovoltaico e o transporte até o local da instalação, sendo que para a produção de 30MW são necessários 540 módulos. Para a produção do arranjo termossolar foi considerado a produção do aço inox refletivo e não refletivo, o alumínio, o cobre, o vidro, a produção do concentrador solar e o transporte até o local da instalação, sendo que para a produção de 30 MW são necessários 1.380 coletores. O consumo total de energia para a planta fotovoltaica foi de 30,191 GWh, já para a planta termossolar o consumo energético total foi de 307,161 GWh, o autor conclui que para o sistema fotovoltaico o maior consumo energético está na fabricação das partes componentes do sistema, enquanto para a tecnologia termossolar mais de 70% do consumo está no transporte dos equipamentos e peças de suporte, e ainda destaca que para haver o aumento da participação da energia solar na matriz brasileira é necessário o incentivo governamental e a parceria com indústrias para o desenvolvimento da tecnologia.

Lampkowski e Seraphim (2015) apresentaram parte dos resultados do projeto “Estudos de energia heli térmica CSP: consórcio educacional para a integração e sustentabilidade na agroindústria”, desenvolvido entre parcerias de instituições brasileiras e alemãs. Os dados utilizados no estudo se referem a uma planta que será construída em Caiçara do Rio do Vento-RN, trata-se de uma planta de torre solar irá fornecer calor e

energia a um laticínio. Por meio do uso do software de simulação de usinas CSP, Tonatiuh desenvolvido pelo Centro Nacional de energias renováveis da Espanha, permitindo a modelagem em 3D da planta, que será capaz de produzir 100kW de energia e produzir calor suficiente para processar a produção de 500 vacas leiteiras. Por meio do software é possível modelar a altura da torre, 23 m, e o tamanho dos heliostatos, 3,21mx2,5m, e as condições de irradiação solar da região selecionada, sendo que para processamento posterior dos dados é necessário utilizar o Matlab, os autores concluem que o software é muito útil mas necessita de mais amadurecimento.

Os estudos de CSP de calha parabólica se concentram nas regiões europeias, na América do Norte, Ásia e África onde o desenvolvimento dessa tecnologia encontra-se bem avançado, dentre os trabalhos publicados pode-se citar alguns a seguir, que são relevantes para o desenvolvimento deste estudo.

Mahlangu e Thopil (2018) analisaram uma planta solar CSP de calha parabólica de 100MW, desenvolvida pela empresa Abengoa (Espanha) e instalada na região de Northern Cape (África do Sul), que utiliza óleo térmico como fluido de transferência de calor e possui um sistema de armazenamento (TES) de 2,5 h com base na tecnologia de sal fundido indireto de dois tanques. O estudo teve como objetivo quantificar os custos externos associados ao ciclo de vida da planta com irradiação solar de 2900 kWh / m<sup>2</sup> ano, considerando as fases de manufatura, construção, operação e manutenção, desmontagem e descarte e os seus impactos nas mudanças climáticas, saúde humana, perda da biodiversidade, efeitos locais nas culturas e danos aos materiais. O estudo constatou que as alterações climáticas causadas por GEE representam 32,2 g de CO<sub>2eq</sub>/kWh da eletricidade gerada, sendo que o maior impacto dos gases que não causam efeito estufa foi na categoria saúde humana (0,214 g / kWh) seguida por perda da biodiversidade (0,149 g / kWh), efeitos locais nas colheitas (0,130 g / kWh) e danos aos materiais (0,122 g / kWh). O custo de danos quantificado no estudo para a usina solar CSP estava na faixa 1,4-2,2 euros / MWh, com uma estimativa central de 1,9 euros / MWh. Os resultados sugeriram que as alterações climáticas (43%) e a saúde humana (48%) contribuíram em 91% para a estimativa central dos custos externos. As subcategorias em estudo foram influenciadas principalmente pelas diferentes fases do ciclo de vida que contribuíram para os resultados totais da estimativa central, descritas a seguir com sua respectiva porcentagem de contribuição: fase de fabricação (43,5%), fase de desmantelamento e eliminação (22,6%), devido as emissões causadas pelo transporte em ambas as fases, fase

de construção (20,4%) e pôr fim a fase de operação e manutenção (13,4%). A partir dos resultados, notou-se que a localização dessas plantas deve ser considerada, devido a etapa de transporte dos principais componentes da usina solar ser responsável pela maior parte das emissões de GEE. Como resultado concluiu-se que os custos globais de danos podem ser reduzidos se a fabricação dos componentes principais for localizada regionalmente, o que poderia também trazer benefícios adicionais para as comunidades e indústrias locais.

Corona *et al.* (2014) avaliou o efeito da hibridização de uma planta de concentração solar de calha parabólica de 50MW, com diferentes valores de entrada de gás natural. Como resultado observou-se que o desempenho ambiental usando apenas a energia solar (de acordo com o indicador RECIPE mid-point) foram: alterações climáticas 26,6 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh e depleção de água 6,27 m<sup>3</sup>/MWh. A demanda cumulativa de energia (Cumulative energy demand – CED), que é a quantificação de toda a energia consumida direta ou indiretamente ao longo do ciclo de vida do produto, foi de 1,15 MJ/kWh e o tempo de recuperação de energia utilizada para a manufatura do produto (Energy payback time – EPBT) 17,1 meses. Destacando que a extração de matérias-primas e fabricação de componentes são as fases mais impactantes no ciclo de vida da tecnologia. Para a operação solar as categorias de impacto mais afetadas neste cenário foram a ecotoxicidade marinha, a toxicidade humana, a eutrofização de água doce e, em menor medida, a transformação natural da terra. Com o aumento das entradas de gás natural houve uma rápida deterioração das categorias ambientais, como mudança climática, transformação de terras naturais e esgotamento fóssil (até 311 kg de CO<sub>2</sub> eq/MWh; 5,01 e-02 m<sup>2</sup>/MWh; 123 kg de óleo eq/MWh, respectivamente, quando usando a entrada de 35% GN). No entanto, com ligeira redução dos danos de outras categorias de impacto, tais como a toxicidade humana, a ecotoxicidade marinha e a eutrofização de água doce devido a maior saída de eletricidade líquida. O esgotamento da água (por quilowatt-hora) não foi afetado pela hibridização, embora o consumo total de água na planta tenha aumentado em consequência da maior saída de eletricidade.

Desideri *et al.* (2013) realizou avaliações técnicas comparativas sobre a quantidade de eletricidade produzida por duas plantas hipotéticas, uma usina solar térmica com coletores parabólicos e uma planta fotovoltaica com um sistema de eixo único de rastreamento, localizadas na Sicília (Itália), afim de avaliar o impacto ambiental gerado durante todo o ciclo de vida das duas tecnologias. As comparações foram feitas com as usinas possuindo a mesma potência elétrica nominal e, em seguida, a mesma superfície

coberta total. Em relação a comparação das usinas com a mesma potência instalada, a usina fotovoltaica produz mais energia no primeiro ano e ocupa 23% menos área que a usina CSP, porém, ao fim da vida útil as duas usinas produzem substancialmente a mesma quantidade de energia. Se a comparação for feita entre as usinas com a mesma área ocupada a usina fotovoltaica produz mais energia que a usina CSP, durante toda a sua vida útil. O Ecoindicador 99 foi utilizado, e as emissões de CO<sub>2</sub> para as usinas CSP e fotovoltaica foram 22,6 g / kW h e 44,7 g / kW h, respectivamente. Já para o potencial de aquecimento global ao longo de um período de 100 anos (GWP100) os resultados foram 29,9g de CO<sub>2</sub> eq / kW h, para CSP e 47,9g de CO<sub>2</sub> eq / kW h para a fotovoltaica. Em relação ao tempo de retorno (EPBT) para usina CSP o valor estimado foi de 2 anos, enquanto que para a usina fotovoltaica o tempo estimado ficou em 5,5 anos. Concluiu-se então que o perfil ambiental da planta CSP é melhor que o da planta fotovoltaica.

## 2.7 Tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling

O motor stirling é um motor de combustão externa que utiliza uma fonte quente, que pode ser produzida por diferentes combustíveis, inclusive a energia solar. Esse motor foi desenvolvido pelo escocês Robert Stirling em 1816 e, esse novo conceito foi tão avançado para a época que cerca de 30 anos se passaram sem que ninguém compreendesse por completo o seu funcionamento, conforme Figura 13 (SATIRO E COUTINHO, 2012).

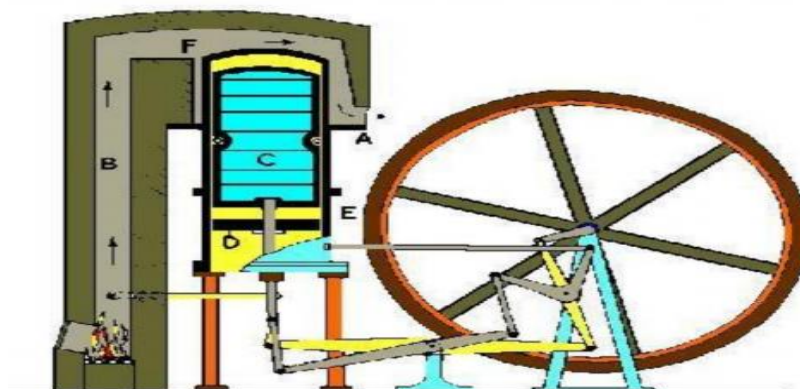


Figura 13 – Reprodução do motor stirling patente 1816

Fonte: SATIRO E COUTINHO (2012)

No motor original de acordo com a Figura 13, o calor é gerado pela queima de combustível (B). Os gases gerados passam pela parte quente do motor (F) e saem pela chaminé (A). O pistão de deslocamento (C) é responsável por deslocar o fluido de trabalho do espaço de expansão para o de compressão. O pistão (D) é o pistão de trabalho, nesse exemplo o motor funcionava com a expansão e a compressão do fluido de trabalho e por meio de um mecanismo para sincronizar o movimento dos dois pistões (E).

Os componentes de um sistema de prato Stirling solar são o concentrador, formado por uma parábola de espelhos refletores, o motor Stirling com um receptor solar, o alternador, gerador e o dispositivo de rastreamento solar conforme Figura 14. O prato parabólico, suportado por uma estrutura metálica fixada com concreto, reflete os raios solares paralelos e os envia para um ponto focal, onde um trocador de calor absorve a radiação, aquecendo o fluido de trabalho e transmitindo a energia rotacional do motor para um gerador que produz energia elétrica (BRAVO *et al.*, 2012, BRAVO *et al.*, 2011).



Figura 14 - Exemplos de coletores parabólicos

Fonte: SATIRO e COUTINHO (2012)

Segundo Lovegrove e Stein (2012) a maior parte das atividades comerciais de CSP com concentradores de prato utiliza motores Stirling, integrados ao receptor para produção direta de eletricidade. No entanto, os concentradores de prato podem ser usados para uma grande variedade de processos de conversão de energia tais como, o apoio de sistemas conectados em rede menores ou maiores e alimentação, por exemplo, de bombas de água ou usinas de dessalinização. As suas aplicações podem chegar até 10 MW, sendo



que acima desta faixa, outros sistemas solares térmicos podem ser mais econômicos ou eficiente.

De acordo com Satiro e Coutinho (2012) há três tipos básicos de motores *stirling* a saber:

- Motor Stirling tipo Alfa - na configuração Alfa o motor possui dois pistões, montados em um ângulo de 90°, separados por um regenerador. Esse modelo pode ser construído de forma compacta e com múltiplos cilindros, apresentando elevada potência de saída, porém, como desvantagem os pistões necessitam de vedação por possuírem gás de trabalho confinado na região dos pistões;
- Motor Stirling tipo Beta – nessa configuração o pistão de deslocamento e trabalho estão alinhados no mesmo cilindro o que torna a sua construção complexa. Por essa sobreposição é possível uma compressão maior originando maior potência que o motor tipo Gama, o regenerador fica superposto ao cilindro e em motores pequenos geralmente está ausente;
- Motor Stirling tipo Gama – esse motor possui um pistão de deslocamento similar ao modelo beta, porém, montado em outro cilindro. O seu mecanismo é mais simples e ajustes na taxa de compressão e incremento da área de transferência de calor são fáceis de obter. Apresenta um volume morto maior e parte do processo de expansão ocorre no espaço de compressão reduzindo a sua potência de saída.

As informações disponíveis relacionadas aos motores *stirling* são limitadas devido ao status atual dessa tecnologia, com dados coletados ao longo de cerca de 25 anos, de protótipos geralmente executados em condições de teste com poucas unidades, sendo que com o número de horas operacionais coletadas até o momento não foi suficiente para amadurecer um sistema tão complexo, para alcançar a confiabilidade desejada e uma baixa manutenção e reparo (LOVEGROVE e STEIN, 2012).

Os motores Stirling podem trabalhar com diferentes fluidos de trabalho tais como hélio ou hidrogênio. A seleção do fluido é baseada nas suas propriedades como condutividade térmica, calor específico, densidade e viscosidade (SATIRO e COUTINHO, 2012).

Segundo dados da SolarPaces (2019) os projetos de tecnologia *dish* *stirling* que podem ser citados são o projeto de demonstração Maricopa Solar, desenvolvido pela Tessera Solar, com capacidade de operação de 1,5 MW, com início de operação em 2010;

e o projeto comercial Depot Solar Tooele, desenvolvido pela Infinia Corp, com capacidade de 1,5 MW, com início de operação em 2013, ambos localizados nos Estados Unidos e atualmente com status não operacionais.

As principais vantagens de um motor stirling são (SATIRO e COUTINHO, 2012):

- Capacidade de usar diferentes combustíveis – Devido as semelhanças nas características operacionais, o que permite que qualquer um deles possa ser usado para produzir energia elétrica de uma fonte de combustível fóssil, energia solar, biogás, entre outros;
- Funcionamento silencioso – o que permite sua instalação em centros urbanos, pois sua construção não possui muitas partes móveis, nem utiliza explosão, nem altas velocidades de rotação e, portanto, tem um baixo nível de ruído e vibração;
- Baixo desgaste interno e consumo de lubrificante – Os produtos da combustão externa não entram em contato direto com o motor sendo assim não há contaminação com lubrificantes;
- Diferentes arranjos físicos – essencialmente um motor stirling é composto de um cilindro de expansão, um cilindro de compressão e um regenerador, que podem ser dispostos de diferentes formas para adaptar-se ao espaço físico;
- Grande valor de eficiência – por usar uma fonte de energia contínua externa, permitindo maior rendimento e menores perdas;
- Simplicidade – o motor consiste de duas câmaras com diferentes temperaturas que aquecem e resfriam o fluido de trabalho alternadamente;
- Menor impacto ambiental – pois funciona com uma fonte de energia externa, que pode ser renovável, e por apresentar maior rendimento que outros motores.

E como desvantagens para o motor stirling solar se destacam (SATIRO e COUTINHO, 2012):

- O custo que geralmente é duas vezes maior que o motor a diesel com a mesma potência;
- Devido ao trabalho do motor ser em alta pressão é difícil uma boa vedação dos cilindros, para evitar a contaminação do gás de trabalho pelo lubrificante;
- Como a fonte de calor é externa, mudanças no calor aplicado aos cilindros, podem ter respostas lentas, enquanto o calor se conduz por suas paredes;

- Há dificuldade para dar partida no motor e fazer alterações rápidas da sua velocidade.

Na Figura 15 é possível observar a potência operacional instalada de CSP por país e região.

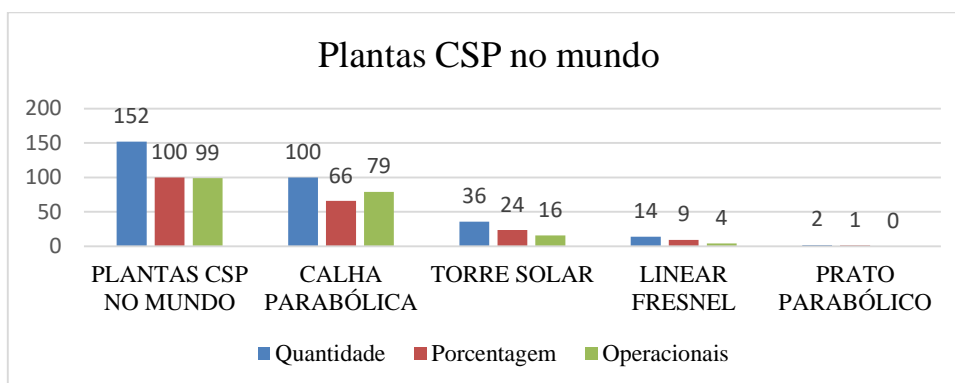


Figura 15 – Porcentagem das principais tecnologias CSP no mundo

Adaptado de SOLARPACES (2019)

Dentre as tecnologias solares o sistema de concentração de prato apresenta o maior potencial a longo prazo, por sua eficiência e modularidade. As capacidades de uma unidade de motor stirling variam de alguns watts (W) até 80 kW com uma eficiência aproximada de 25%, o que torna a tecnologia atraente e promissora para a produção de eletricidade em locais isolados ou para sistemas de energia distribuída, conforme Tabela 4, as expectativas são de que os custos de geração de eletricidade em breve alcancem valores entre 0,12–0,17 Euros / kWh (BRAVO *et al.*, 2014).

Tabela 4 – Principais características da tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling solar

Capacidade (MW)	0,01-0,25	Maturidade da tecnologia	Demonstração	Risco da tecnologia	Médio
Temperatura de operação (°C)	550-750	Pico de eficiência da planta (%)	25-30	Eficiência de conversão da energia (%)	12-25
Fator de capacidade anual (%)	25-28	Concentração do coletor	>1 300 sóis	Exigência de água (m <sup>3</sup> / MWh)	0,05-0,1 (lavagem dos espelhos)
Sistema de armazenamento	Nenhum	Ciclo	Stirling	Estabilidade	baixa

Fonte: RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES (2012)

### **2.7.1 Estado da arte da tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling**

No Brasil e no mundo ainda não existem grandes instalações comerciais de produção de energia elétrica a partir da tecnologia de concentração solar térmica de prato parabólico com motor stirling, devido a esse motivo os estudos utilizam base de dados internacionais e buscam principalmente avaliar o potencial de geração de energia dessa tecnologia no Brasil. Por se tratar de uma tecnologia ainda em desenvolvimento as informações para o levantamento de inventários são escassas, e se faz necessário a utilização de dados secundários bem como a realização de cálculos, e aproximações para o desenvolvimento de uma ACV.

Como exemplo de instalação CSP de prato parabólico no Brasil, destaca-se um Laboratório Solar Térmico, implementado pelo projeto de pesquisa (P&D da ANEEL), chamado “Sistema Híbrido Solar Biomassa – SHBS”, financiado pela CPFL (Companhia Piratininga de Força e Luz, Companhia Paulista de Força e Luz e Rio Grande Energia), localizado no campus da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). O laboratório inclui os seguintes equipamentos:

- Dois sistemas Dish Stirling (prato parabólico concentrador com motor Stirling) com 1 kWe de potência cada e um coletor de 3,7 m de com uma potência máxima de 900 We, uma temperatura de concentração solar de 500°C e eficiência de conversão da energia solar em eletricidade de 17%;
- Um sistema de concentrador solar de calha parabólica, do tipo ORC (Ciclo Orgânico de Rankine) de potência de 5 kWe, pelos coletores circula água aquecida até 160°C com uma pressão de 6 bar;
- Um sistema gaseificador/motor de 6 kWe de potência, alimentado por aparas de madeira de Eucalipto ou biomassa (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2019).

Alguns dos trabalhos brasileiros recentemente publicados referentes a tecnologia de concentração solar térmica de prato parabólico acoplado a motor stirling, são comentados a seguir.

Dentello (2017) realizou um estudo da geração de energia de um motor stirling, instalado no Brasil, movido a biogás ou por radiação solar, abordando as características de um motor do tipo alfa, concluiu que para o Cenário 1 com operação de 7h/dia, por

2.555 horas/ano, tanto para a operação a biogás quanto para operação solar, os custos da geração de energia para ambos torna-se atrativo para períodos entre 5 e 16 anos, com uma taxa de juros de 8%, já para o Cenário 2 com operação a biogás de 16h/dia, 6.205 horas/ano e para operação solar de 7h/dia, 2.555 horas/ano, os custos de energia elétrica se tornam atrativos entre 5 e 4,5 anos, para a taxa de juros de 8%. Em relação ao valor da eficiência ecológica o motor stirling operando com energia solar obteve 98%, enquanto o motor operando com biogás, teve eficiência de 98,02%, o que indica que sistemas descentralizados deste tipo são pouco poluidores. Os estudos realizados demonstraram que a tecnologia que utiliza motores stirling é promissora, mas ainda necessita de melhorias tecnológicas.

Os trabalhos referentes a ACV da tecnologia de prato parabólico acoplado a motor stirling solar, que foram relevantes para a realização deste estudo são comentados a seguir.

No estudo de Bravo *et al.* (2014) foi realizada uma análise comparativa do ciclo de vida de duas instalações de motores stirling operando com gás natural e biogás. De acordo com o regulamento espanhol a limitação do uso de combustível externo para fontes convencionais, é de 15% da eletricidade anual produzida por gás natural e 12% no caso de outros combustíveis fósseis, já para a hibridação de sistemas solares com fontes de energia renováveis como biomassa ou biogás, o limite é definido em 50% da eletricidade anual produzida. Como resultado da hibridação, que permite mais horas de produção de energia, o uso médio da instalação aumentaria de 4,9 h na capacidade total (operação solar) para 6,0 h com a hibridação de gás natural e 10,5 h para hibridação com biogás. A saída de eletricidade simulada comparada com a saída ideal (operação todos os dias em capacidade de carga total, sem restrições) aumentaria 19% para operação somente solar, 23% para o sistema híbrido de gás natural e 40% para o sistema híbrido de biogás. Ao final de 30 anos (tempo de vida útil) a produção de energia por fonte de combustível seria de 3.750 GJ para biogás e 2.130 GJ para gás natural. Como a quantidade de combustível utilizada em cada instalação foi diferente a pontuação final obtida no trabalho foi dividida pela saída de eletricidade resultando em 21,6 pt / MWh para o biogás e 43,5 pt / MWh para o gás natural. A categoria de extração de recursos é a mais significativa para os dois combustíveis. No cálculo de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> - eq) por kWh, calculado pelo método IMPACT 2002+ os resultados foram 265 g CO<sub>2</sub> - eq / kWh para biogás e 410 g CO<sub>2</sub> - eq / kWh para gás

natural. Dessa forma concluiu-se que a escolha da hibridização de uma instalação de dish-Stirling com outra fonte de energia renovável, como o biogás, ao invés de uma hibridização com combustíveis fósseis, é uma opção melhor ecologicamente com vantagem significativa, tanto na operação quanto nas cargas ambientais emitidas.

Kuenlin *et al.* (2013) realizou uma comparação da análise do ciclo de vida de diferentes tecnologias CSP das seguintes plantas solares: parabólica (Andasol), torre (Gemazol), Fresnel (PE2) e pratos (Maricopa), o estudo mostrou que em relação a plantas concorrentes que utilizam combustíveis fósseis, a tecnologia CSP tem um impacto muito menor na maioria das categorias de impacto. Em relação aos danos ambientais verificou-se que mais de 86% do impacto é devido à fase de construção além do tipo de fluido de armazenamento / transferência de calor também influenciar consideravelmente nos impactos (em especial para as centrais).

Bravo *et al.* (2012) avaliaram o impacto ambiental de uma instalação de 10 kW prato-Stirling usada para energia distribuída e a compararam com uma instalação fotovoltaica similar, usando uma ampla variedade de aspectos ambientais. O software SimaPro foi utilizado para calcular o impacto associado à produção e disposição final das instalações levando em consideração uma vida útil de 30 anos. Os resultados dos inventários em termos de emissões por kWh produzido para as tecnologias de prato Stirling e fotovoltaica foram respectivamente: para dióxido de carbono 36,85g CO<sub>2</sub> / kWh e 22,84 g CO<sub>2</sub> / kWh; dióxido de carbono equivalente 37,66g CO<sub>2</sub>-eq / kWh e 24,88g CO<sub>2</sub>-eq / kWh; óxidos de enxofre 0,047g SO<sub>x</sub> / kWh e 0,073g SO<sub>x</sub> / kWh; óxidos de nitrogênio 0,050g NO<sub>x</sub> / kWh e 0,048 g NO<sub>x</sub> / kWh; compostos orgânicos voláteis diferentes do metano 0,012g NMVOC / kWh e 0,025 g NMVOC / kWh. No presente estudo, a superfície da instalação fotovoltaica é de 73,2 m<sup>2</sup>, com uma produção de 1708 MJ / m<sup>2</sup>. Para o prato de Stirling, foi obtido um valor de 1040 MJ / m<sup>2</sup>, com 56,7 m<sup>2</sup> de área instalada, que é significativamente menor do que a instalação fotovoltaica. O período de retorno de energia para o prato Stirling foi aproximadamente 0,6 anos contra 1,3 anos para a instalação fotovoltaica, considerando o mesmo tempo de operação por ano para ambas as instalações de 10 kW. Os resultados obtidos foram bastante encorajadores e merecem ser estudados, para desenvolver um estudo comparativo com outras tecnologias solares termodinâmicas que utilizam concentradores solares.

O estudo de Cavallaro e Ciruolo (2006) apresentou uma análise específica da tecnologia de prato parabólico de uma instalação de 1 MW, localizada na Itália, composta de 17 placas solares que acionavam cinco motores Stirling para produzir energia elétrica, a eficiência de conversão elétrica era de 18%, para o estudo foi utilizado o software SimaPro e o método de avaliação de impacto Eco-indicator 99. A análise foi feita considerando a construção da instalação, com e sem reciclagem. As fases incluídas foram: construção da fábrica, fabricação de coletores solares de grande porte e motores Stirling, extração e fornecimento de materiais de consumo, transporte e descomissionamento e reciclagem da usina. Os efeitos ambientais foram avaliados em termos de CO<sub>2</sub> e devem ser destacados os valores de 7,3 g-CO<sub>2</sub>-eq / kWh com reciclagem e 13,6 g-CO<sub>2</sub>-eq / kWh sem reciclagem. A construção da planta com prato parabólico foi a fase mais significativa, e a reciclagem apresentou uma contribuição menor, mas importante. Como conclusão geral, observou-se que o impacto ambiental associado a todo o ciclo de vida da instalação de prato parabólico é insignificante em relação às usinas tradicionais de combustíveis fósseis.

## **CAPÍTULO 3**

# **ESTRUTURAÇÃO METODOLÓGICA DA ACV PARA AS DIFERENTES TECNOLOGIAS SOLARES**

Devido à necessidade de combater o aquecimento global e a poluição que alteram negativamente o planeta em que vivemos, os países vem adotando fontes renováveis de produção de energia, entre outras medidas para a mitigação dos impactos ambientais. Atualmente a fonte solar é uma das principais alternativas ao consumo de recursos fósseis, pois essa tecnologia não gera emissões durante o seu uso, porém é necessário verificar o processo produtivo dessa tecnologia, para avaliar os impactos ambientais que podem ser produzidos ao longo do seu ciclo de vida, determinando assim o quanto essa tecnologia é realmente limpa.

### **3.1 Objetivo do estudo**

O objetivo desse trabalho é aplicar a ACV para avaliar os impactos ambientais de quatro diferentes tecnologias de geração de eletricidade a partir da energia solar. As tecnologias em estudo são as plantas solares de energia fotovoltaica: células monocristalinas e policristalinas, de concentração solar de calha parabólica e prato parabólico acoplado com motor stirling.

O público alvo deste trabalho são pesquisadores, consultores, empresas, governo entre outros tomadores de decisão, que necessitem de um indicador de impactos ambientais, originados pelas diferentes tecnologias solares, para facilitar na escolha da melhor tecnologia a ser instalada na região sul do estado de Minas Gerais ou em outras localidades brasileiras que possuam níveis de irradiação semelhantes.

### **3.2 Escopo do estudo**

O cenário definido para esse estudo consiste na construção de quatro diferentes plantas de geração de energia elétrica, que utilizam apenas a radiação solar como fonte energética, com potência instalada de 1MW, sendo assim neste trabalho será considerada uma abordagem dos estágios do ciclo de vida que vão desde a extração da matéria-prima até o fim da sua vida útil.



Os aspectos essenciais para a realização deste estudo de ACV, são descritos a seguir:

- Trata-se de um estudo baseado em informações e dados da literatura a respeito das tecnologias em estudo;
- Os dados inventariados são de inventários europeus, sendo que os materiais, produtos e substâncias quando possível, foram substituídos por inventários dos mesmos itens produzidos no Brasil;
- Considerou-se que as matérias-primas e os equipamentos necessários para a construção das plantas, foram extraídos e fabricados nacionalmente, especificamente na cidade de São Paulo-SP, devido as condições industriais favoráveis disponíveis nesta cidade, e adotou-se como sendo percorrida a distância de 261 km, do polo de produção até o local de instalação das plantas, na cidade de Poços de Caldas-MG;
- Não se considerou o transporte de nenhum material ou equipamento da Europa para o Brasil;
- Para substâncias que não possuem inventários nacionais foi utilizada a base de dados do Ecoinvent 3.0, adaptando as entradas de insumos, energia e combustíveis para os inventários nacionais disponíveis (ECOINVENT CENTRE, 2018);
- Não havia dados disponíveis para o processo de manutenção da tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling solar, no entanto, com base nas semelhanças existentes com a tecnologia de calha parabólica, os dados de manutenção foram adaptados desta e utilizados na análise da tecnologia de prato parabólico, sendo mostrado na Tabela 25;
- O período de vida útil para a tecnologia fotovoltaica é estimado em cerca de 25 anos, enquanto para as plantas CSP esse período varia de 25 a 30 anos (IEA, 2010). Para este estudo o período de análise estabelecido para cada tecnologia foi de 25 anos;

O sistema de produto sob estudo consiste na produção de energia elétrica a partir da radiação solar, sendo que duas plantas solares se referem a tecnologia fotovoltaica: uma com células monocristalinas (m-Si) e outra com células policristalinas (p-Si); enquanto as outras duas se baseiam na tecnologia de concentração solar térmica sendo uma de calhas parabólicas e outra de prato parabólico acoplado com motor stirling solar.

Dessa forma, considerando toda a vida útil até o desmantelamento da planta, as fases abordadas para cada tecnologia são:

- Extração e fabricação de equipamentos necessários a cada tecnologia;
- Manufatura dos espelhos/painéis responsáveis por captar ou concentrar a luz solar;
- Construção e instalação de toda a estrutura da planta energética;
- Operação e manutenção, considerando os insumos e equipamentos que serão substituídos até o final da vida útil das plantas solares;
- Desmantelamento, onde foi considerado apenas o transporte de todo o material resultante da planta, após o seu desmonte no fim da sua vida útil, até a cidade de São Paulo-SP. As etapas de reciclagem e destinação final dos resíduos gerados pelas plantas não foram abordadas neste estudo.

### **3.3 Função do sistema, unidade funcional e fluxo de referência**

O modelo representativo do sistema de produto deste estudo contempla as fases de extração/fabricação dos equipamentos, manufatura dos espelhos ou painéis, construção da planta, operação e manutenção e desmantelamento, avaliando todo o ciclo de vida das plantas em estudo.

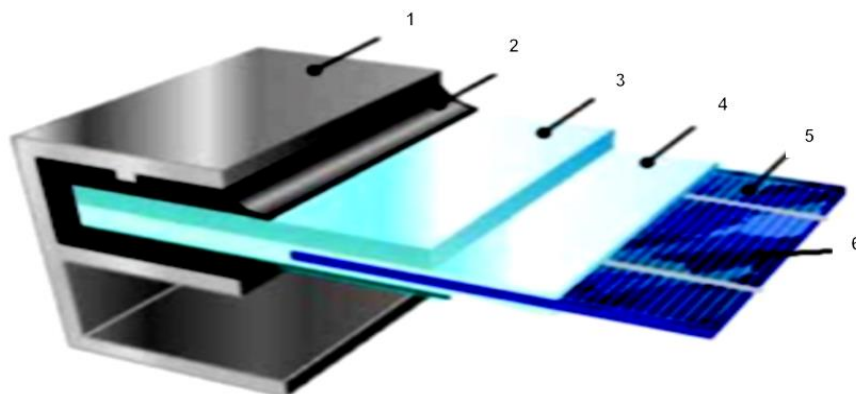
Os modelos representativos de cada tecnologia, bem como suas interligações entre as fases estudadas, são demonstrados no decorrer deste capítulo. A função dos sistemas analisados é a produção de energia elétrica a partir da radiação solar por meio da tecnologia fotovoltaica ou por concentração solar térmica, sendo que a unidade funcional adotada para a análise foi de 1MWh de energia elétrica produzida, a fim de se comparar as diferentes tecnologias avaliadas.

## **3.4 Fronteiras do sistema**

### **3.4.1 Tecnologia fotovoltaica de silício: Células monocristalina (m-Si) e policristalina (p-Si)**

Os dados utilizados no ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica de células monocristalinas e multicristalinas são oriundos do Relatório do IEA PVPS Task 12 (FRISCHKNECHT *et al.*, 2015), que tem como objetivo fornecer os últimos resultados de consenso de análise de ciclo de vida entre os autores e especialistas de tecnologia fotovoltaica na América do Norte, Europa e Ásia. Nesse relatório estão os dados de cinco tecnologias para as quais existem inventários estabelecidos: Silício monocristalino (m-Si)

e policristalino (p-Si), CDTe, CIGS e células de alta concentração fotovoltaica HCPV (células III/IV). Os conjuntos de dados de inventário apresentados nesse relatório são os dados de inventários disponíveis para o público, descrevendo o status no ano 2011 para tecnologia m-Si e p-Si; nos anos 2010-2011 para CDTe; 2010 para CIGS e 2010 para a tecnologia HCPV. As informações desse relatório se referem a entradas e saídas durante a fabricação das bolachas, células, módulos e sistema BOS que foram estimados de instalações reais. Os principais componentes de um painel fotovoltaico e um sistema fotovoltaico são mostrados na Figura 16.



**Nota Figura 16:** 1-estrutura; 2-EVA; 3 – Vidro anti-reflexo; 4-Encapsulante; 5-Contato metálico; 6-Célula

Figura 16 - Painel fotovoltaico

Fonte: ABENGOA SOLAR (2018)

Após definir o sistema de produto é necessário verificar a sua interação com o meio. Os processos considerados durante todo o ciclo de vida das plantas fotovoltaicas desde a extração das matérias primas até o desmantelamento da planta, são apresentados no fluxograma abaixo, na Figura 17.

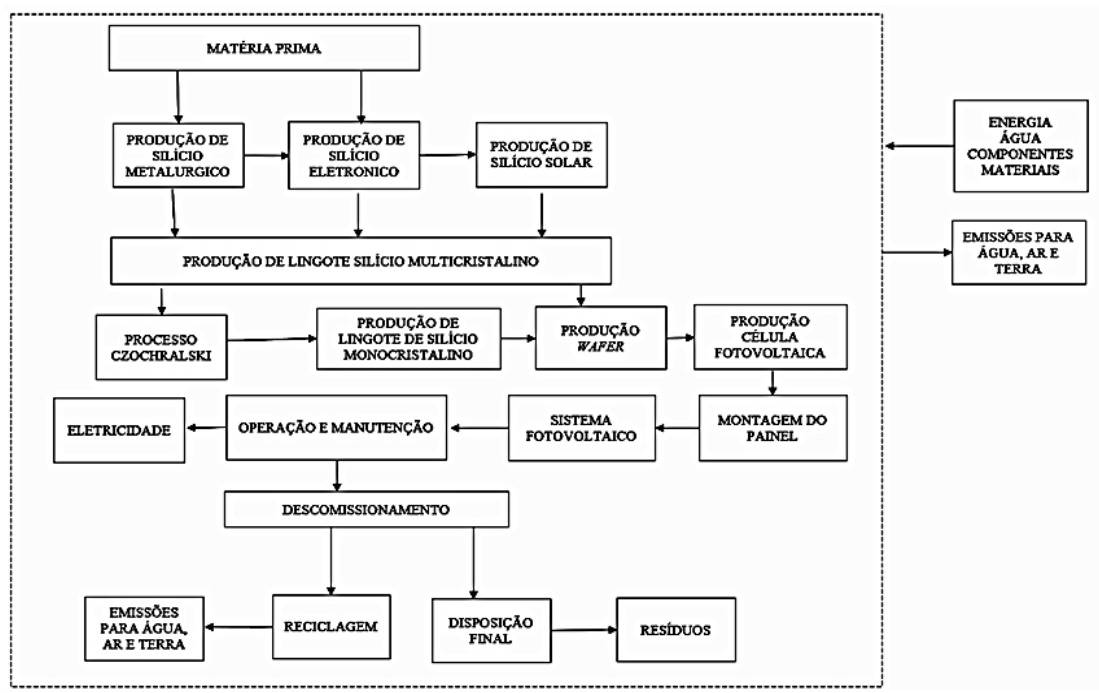


Figura 17 - Processos considerados na ACV da tecnologia fotovoltaica em estudo  
Adaptado de BEZERRA; LIRA e SILVA (2018); STOPPATO (2008)

Será apresentado a seguir o detalhamento dos sistemas que compõem cada uma das fases, abordadas na avaliação das tecnologias fotovoltaicas monocristalina e policristalina.

- **Extração de matéria prima e produção de silício metalúrgico**

De acordo com Adriano (2015), o ciclo da tecnologia fotovoltaica inicia-se com a extração da sílica, matéria-prima presente na terra e principalmente na areia, sendo que a transformação em silício grau metalúrgico (mg-Si), com grau de pureza 98%, ocorre em um forno de arco elétrico.

- **Produção de silício eletrônico e solar**

O silício metalúrgico, passa pelo processo Siemens, onde tricloreto de silício ( $\text{SiHCl}_3$ ) e hidrogênio (H) são aquecidos há aproximadamente 1100-1200°C e reagem formando o Silício eletrônico (e-Si), e para formar o silício solar (sol-Si) passa por meio do processo Siemens modificado, onde há o aquecimento de silano ( $\text{SiH}_4$ ) e hidrogênio (H) até cerca de 800°C, ocorrendo a sua formação.

- **Produção de lingote de silício policristalino**

O e-Si e o sol-Si são misturados com sucata de silício reciclada na indústria, derretidos e resfriados para formar lingotes, no forno é feito o controle do calor para garantir a homogeneidade e maximizar a produtividade, a interface entre o sólido em crescimento e o lingote é tão plano quanto possível. O lingote cresce em grandes colunas de poucos centímetros de seção, e as impurezas são segregadas para o topo do lingote, finalizando assim o processo de produção do lingote de silício policristalino (p-Si), mostrado na Figura 18 (MARKVART e CASTAÑER, 2003).

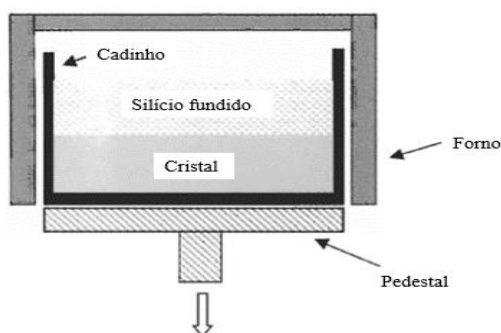


Figura 18 – Esquema do princípio de crescimento do lingote policristalino

Fonte: MARKVART e CASTAÑER (2003)

- **Produção de lingote de silício monocristalino**

Para a produção Silício monocristalino (m-Si), os lingotes precisam passar pelo processo *Czochralski*, onde ocorre a fusão do silício e por meio de uma semente orientada, lentamente fora do silício fundido, é formado um lingote com a orientação única, conforme Figura 19 (MARKVART e CASTAÑER, 2003).

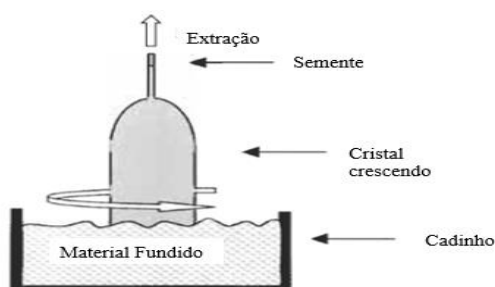


Figura 19 – Esquema do princípio de crescimento do método *Czochralski*

Fonte: MARKVART e CASTAÑER (2003)

- **Produção de *wafers* e célula fotovoltaica**

Nessa etapa os lingotes de silício policristalino e monocristalino são cortados originando *wafers* ou bolachas de silício. A espessura típica de uma célula policristalina (p-Si) e monocristalina (m-Si) é de 200  $\mu\text{m}$  e 180  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Para a fabricação da célula, as bolachas de silício passam por diferentes processos como:

- Ataque químico para remover danos na superfície da célula devido ao corte do lingote;
- Dopagem (junção p ou n) processo que ocorre em alta temperatura (850-900 °C) e consiste no gorgolejar de nitrogênio em cloreto de fosforila ou bário líquido; de forma que o nitrogênio (N) saturado passe sobre a bolacha na presença de oxigênio (O) e forme um filme que difunde o fósforo (P) ou bário (Ba) na superfície, nesse caso formando a camada dopada;
- Aplicação de contatos elétricos feito pela evaporação a vácuo de pastas metálicas de alumínio (Al) e prata (Ag) (LUQUE e HEGEDUS, 2003);
- Metalização da face frontal e posterior (passivação) esses dois processos ocorrem simultaneamente com a deposição de vapor químico de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) na célula por meio de um reator de silano ( $\text{SiH}_4$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) a uma temperatura de 400-450°C, sendo em seguida realizada a verificação das características elétricas e eficiência da célula (STOPPATO, 2008);
- Anti-reflexo é a aplicação de uma camada dielétrica opticamente fina projetada para suprimir a reflexão por efeitos de interferência, é utilizado  $\text{TiO}_x$  depositada por vapor químico (LUQUE e HEGEDUS, 2003).

- **Montagem do painel**

As células são montadas por meio de tiras de cobre cobertas por estanho. Em seguida, as células são encapsuladas entre duas folhas de etileno-acetato de vinila (EVA). A parte frontal do módulo é coberta por uma folha de vidro temperado transparente, enquanto a parte posterior recebe uma folha de fluoreto de polivinila (PVF), uma moldura de alumínio e uma caixa de conexão (STOPPATO, 2008).

- **Tipo de painel utilizado**

Os painéis fotovoltaicos abordados nesse estudo e suas características, seguem a base de dados fornecida pela empresa Yingli Solar, que trata-se de uma *holding* da

tecnologia solar, com uma cadeia de abastecimento global, que utiliza inclusive equipamentos e tecnologia europeus na fabricação de seus painéis.

O painel fotovoltaico monocristalino utilizado foi o modelo Panda YL280C-30b, , já o painel fotovoltaico policristalino utilizado foi o modelo poly-Si YL310p-35b, ambos da empresa multinacional, Yingli Solar, as características destes dois modelos de painéis são mostradas na Tabela 5:

Tabela 5 – Características dos painéis monocristalinos e policristalinos utilizados neste estudo

Descrição	Unidades	Painel	Painel
		monocristalino	policristalino
Dimensão (mm)	-	1650x990x40	2000 x 992 x 40
Peso (kg)	-	19,1	26
Potência (W)	$P_{m\acute{a}x}$	280	310
Eficiência do módulo (%)	$\eta_m$	17,2	16
Tensão na $P_{m\acute{a}x}$ (V)	$V_{mpp}$	31,1	36,3
Corrente na $P_{m\acute{a}x}$ (A)	$I_{mpp}$	9,01	8,53
Tensão em circuito aberto (V)	$V_{oc}$	38,9	45,6
Corrente de curto circuito (A)	$I_{ac}$	9,61	8,99

STC: 1000W/m<sup>2</sup> irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3. Average relative efficiency reduction of 3.5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

Fonte: Yingli Solar (2018a, 2018b)

- **Construção das Plantas Fotovoltaicas (m-Si) e (p-Si)**

A instalação dos painéis fotovoltaicos necessita de uma fundação de concreto, para a fixação das estruturas metálicas de suporte do painel e do dispositivo que permite a movimentação bia-axial do sistema.

- **Operação e manutenção da planta**

A manutenção das plantas solares que utilizam painéis fotovoltaicos ou espelhos concentradores, basicamente trata-se da lavagem de tais estruturas para a retirada de poeira e outros resíduos que acumulados causam a perda de eficiência nos módulos solares.

Não há muitas informações disponíveis sobre o consumo de água para o processo de limpeza dos módulos fotovoltaicos ou concentradores, então, baseado na informação disponibilizada por Airlight Energy será considerado, para as condições urbanas

abordadas neste estudo, o consumo de 0,37 litro de água, a cada três meses, para a limpeza de 1 m<sup>2</sup> de espelhos, (AIRLIGHT S.A, 2019).

- **Descomissionamento e Gestão de resíduos**

A vida útil da planta foi adotada como sendo 25 anos, e os resíduos e materiais resultantes do fim da vida útil das plantas vão ser levados para a cidade de São Paulo para destinação final, onde passarão por processos de reciclagem e disposição final, de acordo com as normas brasileiras vigentes.

### 3.4.2 Tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica

Os dados utilizados no ciclo de vida da tecnologia de concentrador solar térmico foram adaptados do trabalho Corona *et al.* (2014) que analisou uma planta comercial de 50MW refrigerada-úmida, usando como referência uma planta com capacidade de armazenamento de 7,5 h, localizada em *Ciudad Real* (Castilha La Mancha, Espanha). As informações deste trabalho se referem a entradas e saídas durante a extração das matérias primas, fabricação dos componentes do campo solar, construção e instalação da planta, operação, manutenção e descomissionamento ao final da vida útil do empreendimento.

O detalhe de uma calha parabólica unitária e a estrutura de uma planta de calhas parabólicas são mostradas na Figura 20.

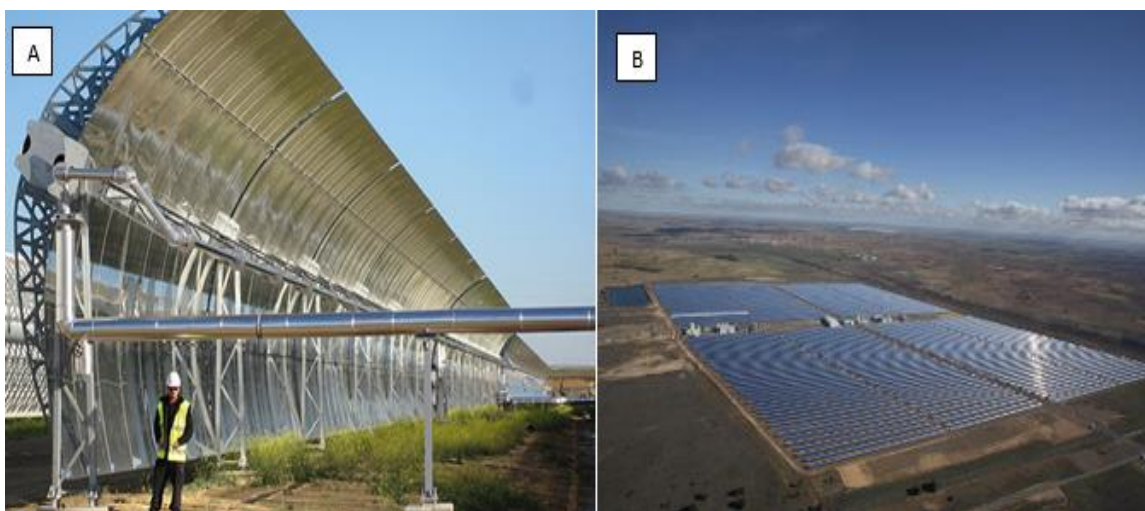


Figura 20 – A) Calha parabólica; B) Planta de concentração solar de calha parabólica na Espanha

Fonte: SENER (2018); ABENGOA SOLAR (2018)



As plantas de concentração solar de acordo com Oró *et al.* (2012) são compostas de cinco elementos principais concentradores, receptores, sistemas de transporte e armazenamento de fluido de trabalho e dispositivo de conversão de energia.

A integração de um sistema de armazenamento de energia térmica (TES) tem se mostrado bastante eficiente nas plantas de concentração solar de calha parabólica, mitigando as flutuações de carga curtas e deslocando ou estendendo o fornecimento de energia (MING *et al.*, 2016).

Os sistemas (TES) aplicam um princípio simples de funcionamento: o excesso de calor coletado no campo solar é enviado para um permutador de calor e aquece o fluido de transferência de calor (HTF) indo do tanque de armazenamento frio para o tanque quente, quando necessário, o calor do tanque quente pode ser devolvido ao HTF e enviado ao gerador de vapor. Sem capacidade de armazenamento, é necessário desativar alguns coletores solares para evitar o superaquecimento do HTF, dessa forma conclui-se que o armazenamento evita perder o excesso de energia durante o dia e ainda permite a produção elétrica após o pôr-do-sol (ZHANG *et al.* 2013). O esquema de uma planta com TES é mostrado na Figura 21.

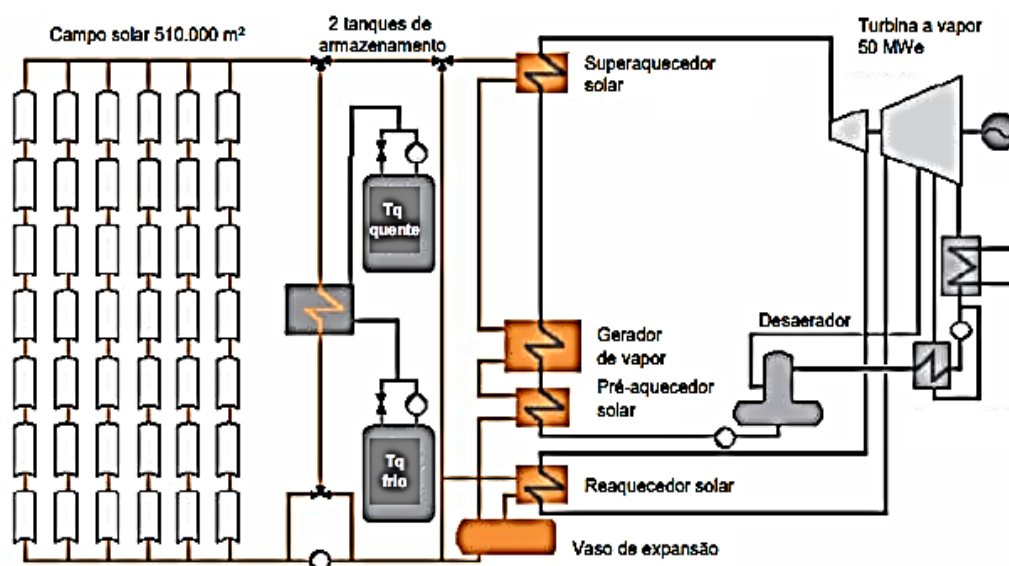


Figura 21 - Sistema típico e simplificado de geração solar térmica concentrada - Planta 50MW

Fonte: Adaptado de SOLARPACES (2018)

O fluxograma considerado para o estudo da planta solar de calha parabólica é demonstrado na Figura 22.

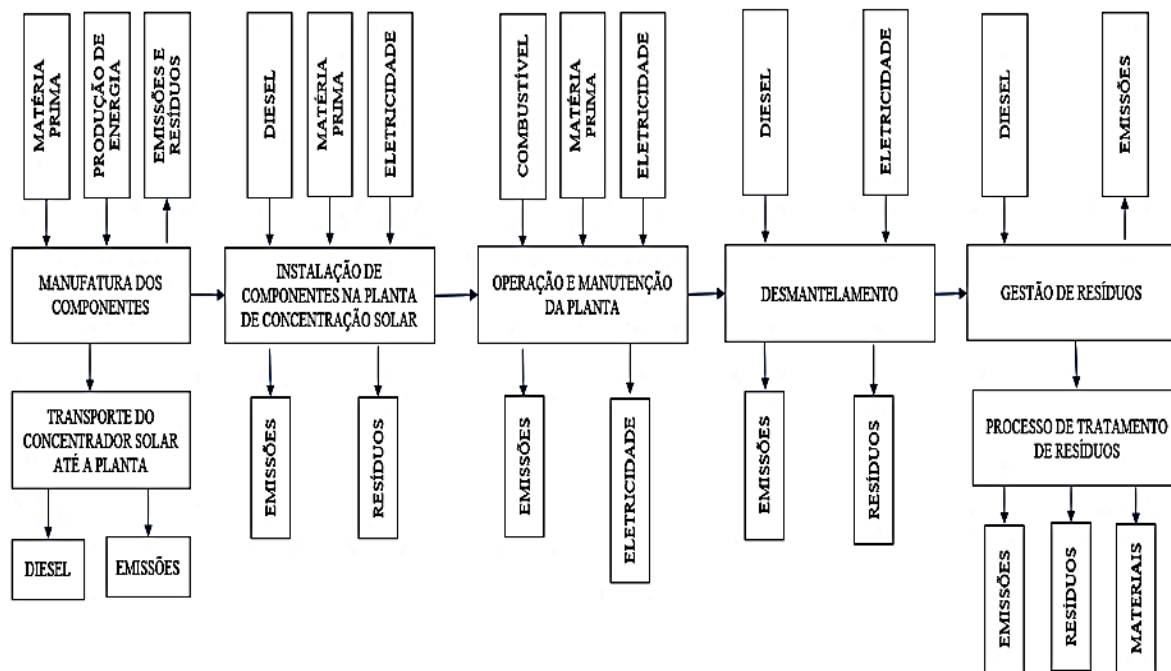


Figura 22 - Fluxograma do ciclo de vida da tecnologia de concentração solar de calha parabólica

Fonte: Adaptado de CORONA *et al.* (2014)

Para este estudo foi assumido que a planta opera apenas com energia solar, e não há nenhum sistema de armazenamento térmico (TES), para que a planta possa se equiparar as demais plantas em estudo que não possuem sistema de armazenamento. No entanto, a planta utiliza a combustão de gás natural em uma caldeira auxiliar ( $\eta = 95\%$ ) para facilitar as operações de startup, manutenção, circulação e aquecimento do fluido HTF, sendo que essas atividades não influenciam na geração de energia. O sistema de calha parabólica utilizado nesta planta é o Sener Trough 1, sendo que cada módulo SCA (*Solar Collector Assembly*) é formado por estruturas SCE (*Solar Collecting Element*) com comprimento de 12m cada um. As características do equipamento Sener Trough 1 são mostradas na Tabela 6:

Tabela 6 – Características e dimensões da calha parabólica Sener Trough 1

Sistema	Largura de abertura [m]	Comprimento da SCE [m]	SCEs por SCA [-]	Diâmetro HCE / Abertura [mm]	Área de Abertura Líquida / SCA [m <sup>2</sup> ]
Sener Trough 1	5,76	12	12	70	818
Concentração Cgeom	Cgeom Projetada	Meio de transferência	Máxima temperatura	Tipo de refletor	Estrutura

de operação					
(°C)					
26	82	Óleo sintético	393	vidro solar monolítico	Aço

Nota: Concentração geométrica (Cgeom) é a relação entre a superfície de abertura solar e a superfície do absorvedor  
 Fonte: Adaptado de Solar Thermal Heat & Power (2014)

Será apresentado a seguir o detalhamento dos sistemas que compõem cada uma das fases, abordadas na avaliação da tecnologia de concentração solar térmica de calha parabólica.

- **Extração de matérias primas e manufatura dos componentes da planta solar**

Nessa fase encontram-se todas as matérias-primas necessárias para a fabricação e manufatura dos componentes, equipamentos e demais produtos, que serão utilizados na planta. Dentre os principais materiais utilizados na planta pode-se destacar os seguintes: ferro, aço, alumínio, vidro, brita, concreto, resina epóxi, prata, cobre, material refratário, grafite, níquel, derivados de petróleo, eletricidade e diferentes tipos de gases.

- **Fabricação de elementos dos sistemas do campo solar**

Nesta fase será considerada a fabricação dos elementos constituintes do campo solar, como:

- Coletores e toda a sua estrutura, formados por um conjunto de espelhos curvos em forma parabólica linear, agrupados em uma série de laços paralelos alinhados horizontalmente, no sentido norte-sul para maximizar a eficiência da captação solar. Para esta planta será considerado o modelo de coletor parabólico *Sener trough 1*;
- Sistema de *trackers* e fundações, cada série de coletores é montada sobre uma estrutura metálica com seguidor solar chamado *tracker*, fixada no solo por meio de uma base de concreto;
- Fluido de transferência térmica (HTF), o fluido HTF aquecido no campo solar passa por uma série de trocadores de calor transferindo a sua energia, para um fluido de trabalho, que se transforma em vapor superaquecido de alta pressão que alimenta uma turbina /gerador produzindo energia mecânica que é convertida em eletricidade. O ciclo termodinâmico é fechado com um condensador que transforma o vapor gasto em líquido, que retorna ao início do ciclo (CORONA *et al.*, 2014).

- **Fabricação de elementos do sistema de produção de energia**

Nessa etapa estarão os componentes do ciclo de vapor como caldeira, superaquecedor, turbina a vapor, condensador, desgaseificador e bomba de alimentação. Compostos basicamente de diferentes ligas metálicas, componentes elétricos e estruturais.

- **Construção e instalação da planta CSP**

Na construção serão considerados as instalações da planta solar, o campo solar, um edifício de escritório, estradas e uma estação de tratamento de água. Para a instalação da planta de calha parabólica, são necessários componentes e materiais estruturais metálicos para suporte dos coletores solares, bem como uma fundação de concreto para suporte da calha.

- **Operação e manutenção da planta**

A transformação da energia térmica em eletricidade é realizada com uma estimativa de eficiência de  $\eta = 16\%$  (CORONA *et al.* 2014), a manutenção da planta é constituída da limpeza dos espelhos parabólicos, troca de fluido lubrificante, utilização de água para resfriamento do fluido de trabalho e consumo no prédio de escritórios.

- **Descomissionamento e Gestão de resíduos**

A vida útil da planta foi adotada como sendo 25 anos e os resíduos resultantes das plantas serão encaminhados para a cidade de São Paulo-SP para a destinação final.

### **3.4.3 Tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor Stirling**

Os dados utilizados no ciclo de vida do motor stirling foram retirados do trabalho de Bravo *et al.* (2014), que realizaram uma análise comparativa de duas instalações híbridas de motores stirling de 10KW de capacidade. O estudo considerou o motor SOLO-161 da empresa alemã Solo Kleinmotoren (STIRLING SYSTEM GmbH, 2011).

As informações deste trabalho se referem a entradas e saídas durante a extração das matérias primas, manufatura do prato solar, manufatura do motor, montagem do campo solar, operação e manutenção e descomissionamento da planta.

As principais características dos diferentes componentes deste sistema são: o concentrador ou receptor de prato, motor stirling, seguidor solar (*tracker*), estrutura

metálica de suporte e fundações. Uma máquina de ciclo Stirling opera um ciclo termodinâmico regenerativo fechado usando um gás de trabalho sujeito a processos de expansão e compressão em diferentes temperaturas (NEPVEU *et al.*, 2009).

Na Figura 23 pode-se observar um prato parabólico operando com energia solar e um motor stirling com configuração solar, e as etapas abordadas na análise do ciclo de vida da tecnologia de prato parabólico com motor stirling solar.

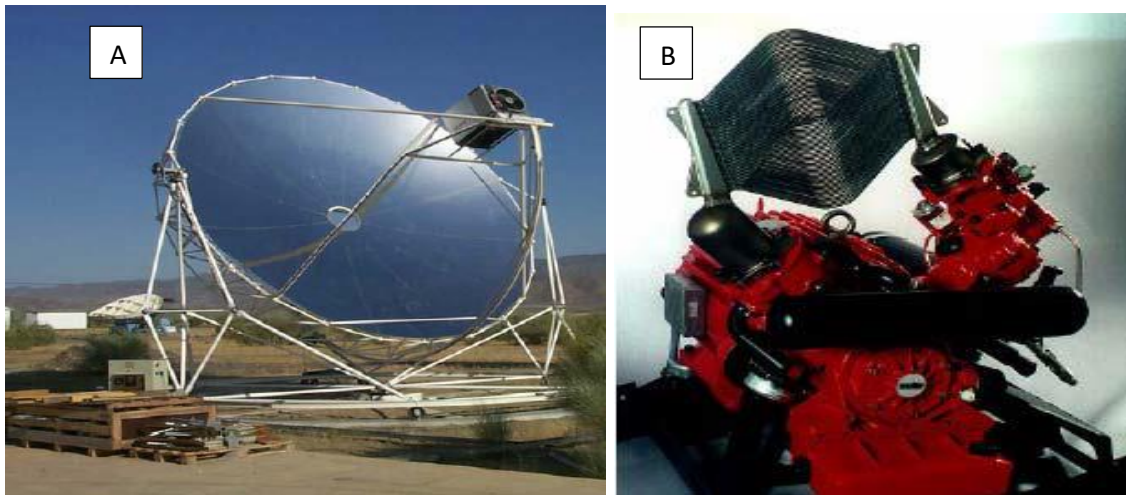


Figura 23 - A) Prato parabólico operando com energia solar; B) Motor stirling solar

Fonte: BARROS (2005)

O fluxograma considerado para o estudo da planta solar de prato parabólico é demonstrado na Figura 24.

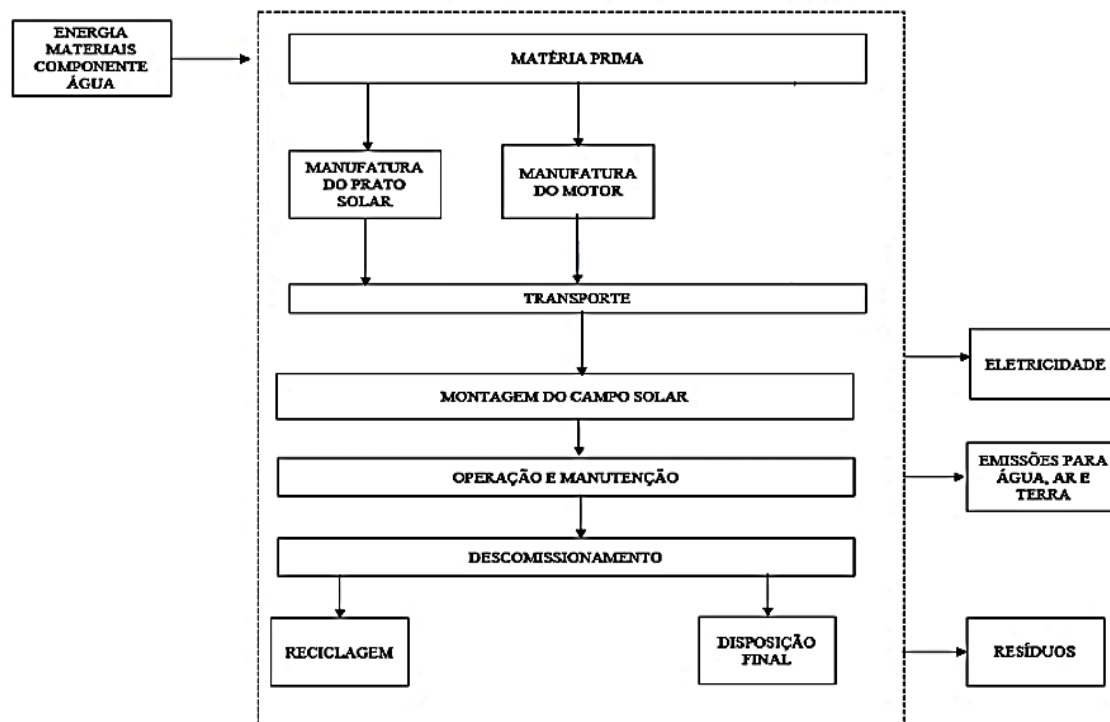


Figura 24 - Fluxograma do ciclo de vida da tecnologia de prato parabólico

Fonte: Adaptado de Cavallaro e Ciarolo (2006)

As características do motor SOLO 161, utilizado para a análise neste estudo são mostradas na Tabela 7:

Tabela 7 – Dados do motor Stirling SOLO 161

Descrição	Valores
Comprimento (mm)	1280
Largura (mm)	750
Altura (mm)	980
Peso (kg)	470
Eficiência elétrica 50-100% de carga (%)	25
Pistão de compressão - Diâmetro D (mm)	68
Curso do pistão (mm)	44
Volume total do cilindro (cm <sup>3</sup> )	160
Pistão de expansão	
Diâmetro D (mm)	68
Curso do pistão (mm)	44
Volume total do cilindro (cm <sup>3</sup> )	160
Volume do regenerador VR (cm <sup>3</sup> )	108,95
Pressão média do motor (bar)	150
Rotação nominal n (rpm)	1500

---

<b>Sistema Hélio</b>	
<b>Conteúdo de hélio no processo (l)</b>	0,6
<b>Conteúdo de hélio na área de amortecimento abaixo do pistão (l)</b>	2,1
<b>Conteúdo do tanque de hélio (l)</b>	6
<b>Pressão de hélio no tanque, máximo (bar)</b>	220
<b>Consumo operacional de hélio (ml/h)</b>	100-300
<b>Sistema de lubrificação - Tipo</b>	Forçado
<b>Óleo</b>	Mobil 1; 0W 40 SHC
<b>Capacidade (l)</b>	1,7
<b>Intervalo de troca de óleo (h)</b>	15.000

---

Fonte: SATIRO E COUTINHO (2012)

Será apresentado a seguir o detalhamento dos sistemas que compõem cada uma das fases, abordadas na avaliação da tecnologia de concentração solar térmica prato parabólico acoplado com um motor stirling solar.

- **Extração de matérias primas e manufatura dos componentes da planta solar**

Nessa fase encontram-se todas as matérias-primas e materiais constituintes da planta solar e/ou necessárias para a fabricação dos componentes que serão utilizados na planta, com base em dados nacionais. Dentre os quais podemos destacar aço, fibra de vidro, concreto, vidro, níquel, cobre, cerâmica, derivados de petróleo, eletricidade e diferentes tipos de gases.

- **Manufatura do prato parabólico**

O prato parabólico é formado por doze segmentos de refletores, que são montados em forma parabólica, com uma camada de vidro fino adicionada para obter uma alta refletividade (94%), em seguida esses segmentos são tensionados externamente para garantir a forma adequada (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

O receptor de prato transfere a energia solar concentrada para uma cavidade de cerâmica, que por meio do trocador de calor aquece o fluido de trabalho dentro do motor Stirling, gerando potência mecânica para a produção de eletricidade. O receptor solar é composto por uma cavidade cilíndrica cerâmica de 30 cm de diâmetro e 12 cm de profundidade, a radiação solar entra através de uma abertura de 19 cm de diâmetro, que intercepta 85% da energia solar concentrada que entra. As paredes da cavidade são

isoladas por um material cerâmico à base de sílica (BRAVO *et al.* 2014; NEPVEU *et al.*, 2009).

O motor SOLO-161 é um motor tipo alfa, que possui dois pistões em cilindros dispostos em “V”, que são conectados em série por um absorvedor solar, um regenerador, um resfriador, o fluido de trabalho é o gás hélio (NEPVEU *et al.*, 2009).

- **Manufatura da estrutura de suporte e fundação de concreto**

O sistema é suportado por uma estrutura metálica feita de barras de aço e a sua fundação é de concreto.

- **Montagem da planta solar**

O prato-Stirling apresenta o receptor solar montado na própria unidade e, portanto, o abastecimento de combustível e a produção de energia ocorrem na mesma unidade. Não há necessidade de construção de edificações para escritório.

- **Operação e manutenção**

O motor apresenta eficiência de aproximadamente 25% (MANSIRI; SUKCHAI; SIRISAMPHANWONG, 2014). Os consumos de todos os componentes individuais (bomba de água, sistema de rastreamento, ventilador de refrigeração) são entradas definidas pelo usuário (NEPVEU *et al.*, 2009) e a manutenção da instalação inclui a limpeza do concentrador para garantir a máxima eficiência, troca do óleo lubrificante e reposição do gás de trabalho.

- **Descomissionamento e Gestão de resíduos**

A vida útil da planta foi adotada como sendo 25 anos e os resíduos resultantes das plantas passarão por processos de reciclagem e disposição final, de acordo com as normas brasileiras vigentes, sendo encaminhados para a cidade de São Paulo - SP para a destinação final.

### **3.5 Fronteira geográfica do estudo de caso**

Este trabalho apresenta um estudo de quatro diferentes tecnologias de produção de energia elétrica a partir da radiação solar, na cidade de Poços de Caldas no estado de Minas Gerais, Brasil. O objetivo do trabalho é realizar uma análise do ciclo de vida das



diferentes tecnologias aqui abordadas e definir dentre elas qual apresenta melhor perfil ambiental para a instalação no local, considerando as características técnicas, mão de obra, tecnologia, condições geográficas e de irradiação solar.

A cidade de Poços de Caldas está localizada na Serra da Mantiqueira, no sul de Minas Gerais. Suas coordenadas são  $21,787778^{\circ}$  S e  $46,561389^{\circ}$  W, possui uma extensão territorial de  $546,958 \text{ km}^2$  e a sua população é estimada em cerca de 166.111 habitantes, segundo dados do IBGE (CODEMGE, 2019).

A escolha dessa localidade para aplicação deste estudo se baseia principalmente nos dados de irradiação solar disponíveis para o cálculo da geração de eletricidade e da viabilidade econômica no software RETScreen Expert. A Figura 25, mostra a cidade de Poços de Caldas e sua localização em relação as principais capitais brasileiras.

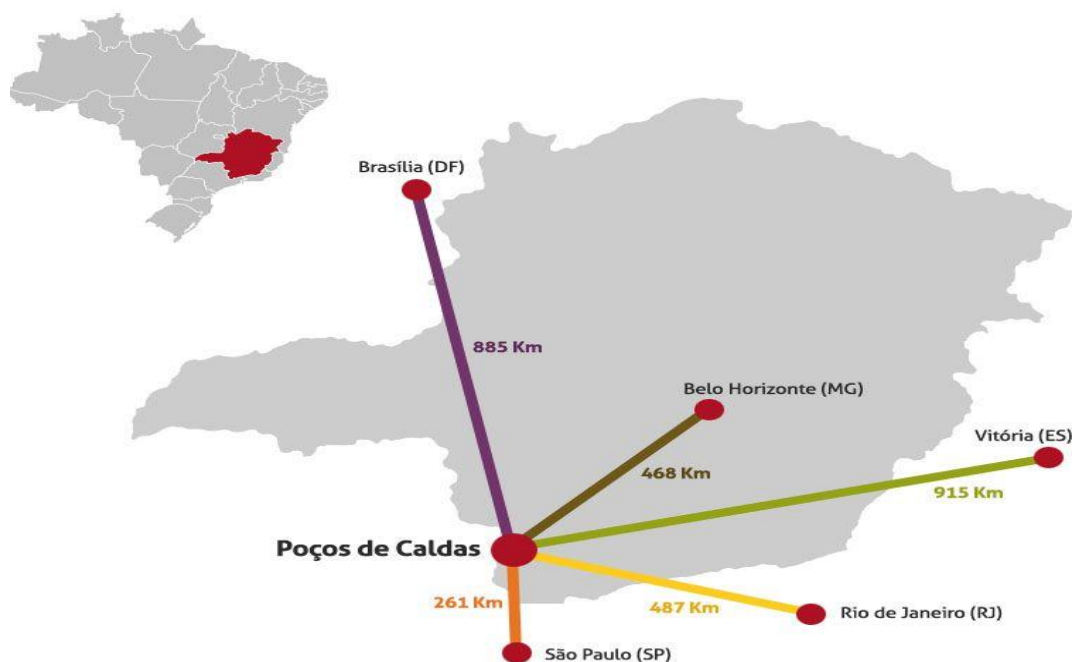


Figura 25 – Localização da cidade de Poços de Caldas

Fonte: CODEMGE (2019)

A irradiação média diária a uma distância de 2,0 km no plano horizontal chega a  $4,80 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ ; no plano inclinado com ângulo de inclinação igual a latitude ( $22^{\circ}$ ) a irradiação solar média anual chega a  $5,09 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$  (CRESESB, 2019). As informações relativas radiação solar de acordo com dados do Sundata, encontram-se na Figura 26.

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]															
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
✓	Pocos de Caldas	Pocos de Caldas	MG	BRASIL	21,801° S	46,549° O	2,0	5,26	5,51	4,72	4,52	3,92	3,70	3,97	4,89	5,00	5,31	5,26	5,53	4,80
✓	Pocos de Caldas	Pocos de Caldas	MG	BRASIL	21,801° S	46,649° O	9,2	5,29	5,55	4,81	4,58	3,97	3,73	3,96	4,88	5,02	5,37	5,39	5,66	4,85
✓	Pocos de Caldas	Pocos de Caldas	MG	BRASIL	21,701° S	46,549° O	9,7	5,32	5,61	4,82	4,58	3,93	3,71	3,98	4,89	5,01	5,38	5,32	5,61	4,84

Figura 26 – Dados de irradiação referentes a cidade de Poços de Caldas - Sundata

Fonte: CRESESB (2019)

### 3.6 Metodologia de avaliação do impacto: RECIPE

Para a caracterização dos impactos ambientais foi escolhido o eco indicador RECIPE, que conta com dois tipos de abordagens, sendo uma orientada para o problema (*mid-point*) a qual determina as diferentes categorias de impacto ambientais, e outra orientada para os danos à saúde humana, recursos e meio ambiente (*end-point*) (SIMAPRO, 2018).

A Figura 27 esboça as relações estabelecidas no método RECIPE entre as 18 categorias de impacto *mid-points* e as 3 categorias de danos *end-points*, incluindo a etapa de pontuação única (*Single score*), onde as três categorias *end-point* são normalizadas, ponderadas e somadas em uma única pontuação.

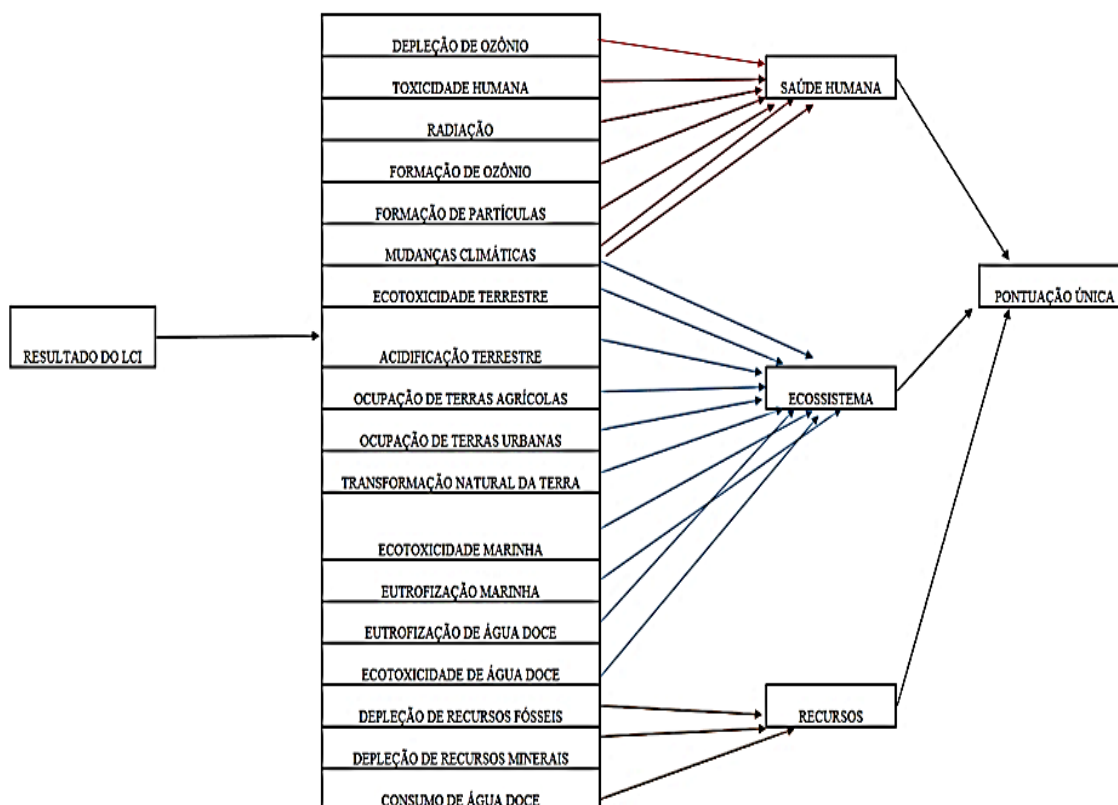


Figura 27 - Relação entre o ciclo de vida, as categorias de ponto médio e as categorias de ponto de extremidade, incluindo a pontuação única (*Single score*)

Fonte: Adaptado de HUIJBREGTS *et al.* (2016)

Na abordagem *mid-point* são abordadas 18 categorias de impacto, cientificamente mais aceitas, que são detalhadas a seguir (HUIJBREGTS *et al.*, 2016):

- Depleção de ozônio: Refere-se a diminuição do ozônio estratosférico (kg CFC-11-<sub>eq</sub> para ar);
- Toxicidade humana: Trata do aumento potencial do risco de incidência de câncer devido a alteração na concentração ambiental de um ou vários produtos químicos, é expresso como kg 1,4-DCB-<sub>eq</sub> para ar urbano;
- Radiação ionizante: Refere-se a dose coletiva, resultante da emissão de um radionuclídeo e é expressa kBq Cobalt-60-<sub>eq</sub> para o ar;
- Formação de ozônio/oxidante fotoquímico: refere-se a formação de ozônio fotoquímico relacionado à exposição humana, é expresso em kg NO<sub>x</sub>-<sub>eq</sub> para o ar;
- Formação de matéria particulada: Considerou-se a inalação populacional humana de partículas com diâmetro de 2,5 micron e a sua unidade é kg PM2.5-<sub>eq</sub> para o ar;

- Mudanças climáticas: O fator de caracterização selecionado é o potencial de aquecimento global (GWP), que quantifica o forçamento radiativo infravermelho integrado de um gás com o efeito de estufa (GHG), expresso em kg CO<sub>2-eq</sub> para o ar;
- Ecotoxicidade terrestre: Aumento ponderado de toxicidade em solos naturais expresso como kg 1,4-DCB<sub>-eq</sub> para solo industrial;
- Acidificação terrestre: refere-se a alteração da acidez no solo devido a um aumento na concentração de prótons em solos naturais, a unidade dessa categoria é o kg SO<sub>2-eq</sub> para o ar;
- Ocupação de terras agrícolas: é um indicador da ocupação e transformação da terra integrada no tempo, é expresso em m<sup>2</sup> \* ano anual de terras agrícolas;
- Ocupação de áreas urbanas: indicador da ocupação e transformação da terra integrada no tempo, é expresso em m<sup>2</sup> \* ano anual de terras urbanas;
- Transformação natural da terra: indicador da transformação da terra integrada no tempo, é expresso em m<sup>2</sup> \* ano anual de terras urbanas;
- Ecotoxicidade marinha: Aumento ponderado de toxicidade nas águas marinhas expresso em kg 1,4-DCB<sub>-eq</sub> para água marinha;
- Eutrofização marinha: Caracterizado pelo acúmulo excessivo de nutrientes, que produzem eutrofização, prejudicando a qualidade das águas e causando impactos à vegetação marinha, corais, morte de peixes e afetando a saúde humana, expresso em kg P<sub>-eq</sub> para água salgada;
- Eutrofização de água doce: trata do aumento da concentração de fósforo em água doce sendo expresso por kg P<sub>-eq</sub> para água doce;
- Ecotoxicidade de água doce: Aumento ponderado de toxicidade nas águas doces expresso em kg 1,4-DCB<sub>-eq</sub> para água doce;
- Depleção fóssil: Esse indicador é definido como a relação entre o maior valor de aquecimento de um recurso fóssil e o conteúdo energético do petróleo bruto, sendo expresso em kg de óleo<sub>-eq</sub>;
- Depleção de metais: Caracteriza a diminuição geral da concentração de minérios, no mundo devido ao aumento da quantidade de minério extraído. É expresso em kg Cu<sub>-eq</sub>;
- Consumo de água: caracterizado pela relação de m<sup>3</sup> de água consumida por m<sup>3</sup> de água extraída, expresso em m<sup>3</sup> água<sub>-eq</sub> consumida.

As categorias de impacto de nível médio são multiplicadas por fatores de danos e são distribuídas em três categorias de *end-point*, descritas a seguir (HUIJBREGTS *et al.*, 2016):

- Saúde humana: refere-se aos anos de vida perdidos, ou o tempo que uma pessoa é deficiente devido a uma doença ou acidente, além de se relacionar ao aumento do aparecimento de doenças devido ao aumento ou alterações nas categorias de impacto de *mid-point*, é expresso em anos (yr) e mensurado como anos de vida ajustados por invalidez (*Dalys*);
- Ecossistemas: trata da perda de espécies terrestres, aquáticas, marinhas e/ou vegetais devido ao aumento ou alterações nas categorias de impacto de *mid-point*, em relação aos ecossistemas, é expresso como a perda de espécies em uma determinada área, durante um período de tempo, a unidade é de espécies \* anos (*species \* yr*);
- Escassez de recursos: A escassez de recursos representa os custos adicionais envolvidos para a extração de recursos minerais e fósseis futuros, a sua unidade é o dólar por kilo (*US \$/kg*).

As categorias de impactos *end point* e de pontuação única, por utilizarem um fator de danos multiplicador para cada categoria *mid point*, não foram consideradas neste estudo, devido a ausência de fatores multiplicadores desenvolvidos especificamente para o Brasil.

O indicador RECIPE possui três perspectivas de tempo (HUIJBREGTS *et al.*, 2016):

- Individualista (I): que baseia-se no interesse a curto prazo, com o horizonte de tempo de 20 anos, constituída dos tipos de impacto que são incontestados e com otimismo tecnológico no que diz respeito à adaptação humana;
- Hierarquica (H): baseada nos princípios políticos mais comuns no que diz respeito ao calendário e a outras questões, o seu horizonte de tempo é de 100 anos;
- Igualitária (E): essa é a perspectiva mais cautelosa, tendo em vista um horizonte de tempo mais longo, 1.000 anos, e os tipos de impacto que ainda não estão totalmente estabelecidos, porém dos quais há alguma indicação disponível.

### **3.6.1 Auxílio computacional**

Para auxiliar a realização de uma ACV pode-se utilizar um software que contém os diferentes métodos de avaliação dos impactos ambientais. Neste estudo será utilizado o software Simapro 8.0.3.14 desenvolvido pela empresa Pré-Consultants. O software é usado para: modelar ciclos de vida complexos de maneira sistemática e transparente; mensurar o impacto ambiental de produtos e serviços em todos os estágios do ciclo de vida; identificar os pontos de acesso em todos os elos da cadeia de suprimentos, desde a extração de matérias-primas até o descarte final, sendo que as bases de dados do software se encontram organizadas em seis categorias: materiais, energia, transportes, processos, utilizações e estratégias de condicionamento e de processamento de resíduos (SIMAPRO, 2018).

## CAPITULO 4

### ANÁLISE DOS INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA

Este capítulo contém os inventários do ciclo de vida do processo de produção, uso, operação e desmantelamento das tecnologias solares: fotovoltaica (células monocristalinas e policristalinas); de concentração solar de calha parabólica e prato parabólico solar com motor stirling. Essa etapa, segundo a ABNT ISO 14.040 (2009), envolve a coleta dos dados e os procedimentos utilizados para quantificar as entradas (materiais e energéticas) e as saídas (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) ao longo do ciclo de vida do produto.

#### 4.1 Preparação para a coleta de dados

As fronteiras propostas para o estudo foram definidas a partir de trabalhos semelhantes realizados, como por exemplo: Frischknecht *et al.* (2015), Fthenakis *et al.* (2015), Corona (2014), Bravo (2014), Stoppato (2008), Cavallaro e Ciruolo (2006), Borges (2004) entre outros, contudo cada trabalho trata diferentes realidades, então fez-se necessário a realização de um modelo particular para os casos estudados nesta dissertação adotando as condições brasileiras.

#### 4.2 Coleta de dados

Os dados utilizados por este trabalho foram retirados da literatura, a coleta de dados foi dividida de acordo com cada tecnologia solar estudada. Para os dados não encontrado na literatura foi utilizada a base de dados Ecoinvent, disponível no SimaPro 8.0.3.14, adaptando e substituindo as entradas e insumos, por dados de inventários brasileiros, quando possível. A seguir são apresentadas as fontes de dados para cada tecnologia:

- Tecnologia fotovoltaica: Frischknecht *et al.* (2015), Pinto (2016);
- Tecnologia de concentrador solar de calha parabólica: Corona (2014);
- Tecnologia de prato parabólico com motor stirling solar: Bravo (2014), Corona (2014).

### **4.3 Inventário da tecnologia fotovoltaica monocristalina e policristalina**

Os inventários referentes ao processo de beneficiamento do silício até a fabricação do módulo fotovoltaico, foram derivados dos inventários publicados por Frischknecht *et al.* (2015), sendo que o transporte adotado nestes inventários foi desconsiderado. Neste estudo considerou-se que todos os processos de manufatura do silício até a produção do painel foram realizados na cidade de São Paulo-SP, sendo que os painéis finalizados foram trazidos de caminhão até a cidade de Poços de Caldas-MG onde a planta foi construída.

As células fotovoltaicas possuem em sua composição materiais tóxicos e perigosos como cádmio e chumbo, sendo assim é extremamente importante a gestão do fim da vida útil dos módulos e demais componentes das plantas solares, que no Brasil, são classificados como lixo elétrico-eletrônico (REEE) (MIRANDA, LEANDRO E SILVA (2019). Presumindo-se um sistema de logística reversa destes componentes, os resíduos do desmantelamento, serão enviados para a cidade de São Paulo-SP, onde empresas especializadas realizarão a disposição final e reciclagem destes módulos e dos componentes das demais plantas solares abordadas neste estudo. As etapas de reciclagem e destinação final dos resíduos não serão abordadas neste estudo.

O inventário referente a construção e instalação da planta de tecnologia fotovoltaica monocristalina e policristalina usados nesse trabalho são referentes a uma planta nacional fotovoltaica de 3MW, localizada na cidade de Jaíba-MG, apresentada no trabalho de Pinto (2016). As entradas e saídas foram adaptadas para uma planta de 1MW, por meio de uma estimativa de cálculo por escalonamento de acordo com as condições brasileiras (PETERS e TIMMERHAUS, 1991).

Os inventários de cada insumo, energia ou resíduos consumidos ou gerados estão especificados nas Tabelas de 8 a 18, e podem ser consultados nos anexos desta dissertação.



Tabela 8 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício metalúrgico (mg-Si)

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Anexo</b>
Eletricidade	kwh	1,10E+01	O
Madeira	m <sup>3</sup>	3,25E-03	AJ
Coque de carvão	MJ	2,31E+01	AJ
Grafite	kg	1,00E-01	AJ
Carvão	kg	1,70E-01	AJ
Coque de petróleo	kg	5,00E-01	AJ
Areia de sílica	kg	2,70E+00	AJ
Oxigênio líquido	kg	2,00E-02	AJ
Escória de mg-Si	kg	2,50E-02	AJ
Silicone	Un	1,00E-11	AJ
<b>Saídas/Emissões</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
Calor	MJ	7,13E+01	Simapro 8.0.3.14
Arsênico	kg	9,42E-09	Simapro 8.0.3.14
Alumínio	kg	1,55E-06	Simapro 8.0.3.14
Antimônio	kg	7,85E-09	Simapro 8.0.3.14
Boro	kg	2,79E-07	Simapro 8.0.3.14
Cádmio	kg	3,14E-10	Simapro 8.0.3.14
Cálcio	kg	7,75E-07	Simapro 8.0.3.14
CO não fóssil	kg	6,20E-04	Simapro 8.0.3.14
CO fóssil	kg	1,38E-03	Simapro 8.0.3.14
CO <sub>2</sub> não fóssil	kg	1,61E+00	Simapro 8.0.3.14
CO <sub>2</sub> fóssil	kg	3,58E+00	Simapro 8.0.3.14
Cromo	kg	7,85E-09	Simapro 8.0.3.14
Cloro	kg	7,85E-08	Simapro 8.0.3.14
Cianeto	kg	6,87E-06	Simapro 8.0.3.14
Flúor	kg	3,88E-08	Simapro 8.0.3.14
H <sub>2</sub> S	kg	5,00E-04	Simapro 8.0.3.14
HF	kg	5,00E-04	Simapro 8.0.3.14
Ferro	kg	3,88E-06	Simapro 8.0.3.14
Chumbo	kg	3,44E-07	Simapro 8.0.3.14
Mercúrio	kg	7,85E-09	Simapro 8.0.3.14
NMVOC	kg	9,65E-05	Simapro 8.0.3.14
NOx	kg	9,74E-03	Simapro 8.0.3.14
Partículas > 10um	kg	7,75E-03	Simapro 8.0.3.14
Potássio	kg	6,20E-05	Simapro 8.0.3.14
Silicone	kg	7,51E-03	Simapro 8.0.3.14
Sódio	kg	7,75E-07	Simapro 8.0.3.14
SO <sub>2</sub>	kg	1,22E-02	Simapro 8.0.3.14
Estanho	kg	7,85E-09	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 9 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício eletrônico (e-Si)

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Anexo</b>
Água	m <sup>3</sup>	8,14E+01	AJ
Mg-Si	kg	1,05E+00	A
Polietileno	kg	6,79E-04	U
Ácido hidrocloreto	kg	1,43E+00	Z
Hidrogênio líquido	kg	8,97E-02	AJ
Tetrafluoroetileno	kg	6,39E-04	AJ
Hidróxido de sódio	kg	4,63E-01	S
Grafite	kg	7,10E-04	AJ
Calor	MJ	1,74E+02	W
Elettricidade	kWh	1,632E+02	O
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
Plástico	kg	1,32E-03	Simapro 8.0.3.14
Planta de silício	un	1,07E-11	Simapro 8.0.3.14
Calor	MJ	3,92E+02	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para água</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
AOX	kg	1,26E-05	Simapro 8.0.3.14
DBO	kg	2,05E-04	Simapro 8.0.3.14
DQO	kg	2,02E-03	Simapro 8.0.3.14
Cloreto	kg	3,60E-02	Simapro 8.0.3.14
Cobre íon	kg	1,02E-07	Simapro 8.0.3.14
Nitrogênio	kg	2,08E-04	Simapro 8.0.3.14
Fosfato	kg	2,80E-06	Simapro 8.0.3.14
Íon Sódio	kg	3,38E-02	Simapro 8.0.3.14
Íon Zinco	kg	1,96E-06	Simapro 8.0.3.14
Íon Ferro	kg	5,61E-06	Simapro 8.0.3.14
COD	kg	9,10E-04	Simapro 8.0.3.14
TOC	kg	9,10E-04	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 10 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de Silício solar (sol-Si)

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Anexo</b>
Mg-Si	kg	1,13E+00	A
Ácido hidrolórico	kg	1,60E+00	Z
Hidrogênio líquido	kg	5,01E-02	AJ
Hidróxido de sódio	kg	3,48E-01	S
Eletricidade	kWh	1,1E+01	O
Calor	MJ	1,85E+02	W
Planta de silício	Un	1,00E-11	AJ
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
Calor	MJ	3,51E+02	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para água</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
AOX	kg	1,26E-05	Simapro 8.0.3.14
DBO	kg	2,05E-04	Simapro 8.0.3.14
DQO	kg	2,02E-03	Simapro 8.0.3.14
Cloreto	kg	3,60E-02	Simapro 8.0.3.14
Cobre íon	kg	1,02E-07	Simapro 8.0.3.14
Nitrogênio	kg	2,08E-04	Simapro 8.0.3.14
Fosfato	kg	2,80E-06	Simapro 8.0.3.14
Íon Sódio	kg	3,38E-02	Simapro 8.0.3.14
Íon Zinco	kg	1,96E-06	Simapro 8.0.3.14
Íon Ferro	kg	5,61E-06	Simapro 8.0.3.14
COD	kg	9,10E-04	Simapro 8.0.3.14
TOC	kg	9,10E-04	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 11 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Anexo</b>
m-Si	kg	1	-	D
p-Si	kg	-	1	E
Eletricidade	kWh	6,82E+01	1,55E+01	O
Gás natural	MJ	5,82E+01	-	Q
Água resfriamento	m <sup>3</sup>	5,09E+00	-	AJ
Água	kg	9,41E+01	9,43E-01	AJ
Água deionizada	kg	4,01E+00	-	AJ
Silício mix de produção	kg	7,81E-01	7,00E-01	AJ
Argônio	kg	1,00E+00	2,52E-01	AJ
Hélio	kg	-	7,76E-05	AJ
HF	kg	1,00E-02	-	AJ
Ácido nítrico	kg	6,68E-02	-	AJ
Hidróxido de sódio	kg	4,15E-02	5,00E-03	S
Nitrogênio líquido	kg	-	3,04E-02	AJ
Ladrilhos cerâmicos	kg	1,67E-01	2,14E-01	AJ
Cal hidratada	kg	2,22E-02	-	AJ
Planta de silício	un	1,00E-11	1,00E-11	AJ
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Si wafer	kg	1,67E-01	-	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Calor	MJ	2,46E+02	5,58E+01	Simapro 8.0.3.14
Hidróxido	kg	3,67E-01	-	Simapro 8.0.3.14
DBO	kg	1,30E-01	-	Simapro 8.0.3.14
DQO	kg	1,30E-01	-	Simapro 8.0.3.14
COD	kg	4,05E-02	-	Simapro 8.0.3.14
TOC	kg	4,05E-02	-	Simapro 8.0.3.14
NOx	kg	3,39E-02	-	Simapro 8.0.3.14
Nitrato	kg	8,35E-02	-	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 12 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m<sup>2</sup> de bolacha de sílicio: m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Anexo</b>
m-Si	m <sup>2</sup>	1	-	D
p-Si	m <sup>2</sup>	-	1	E
Eletricidade	kWh	2,57E+01	2,08E+04	O
Gás natural	MJ	4,00E+00	4,00E+00	Q
Água	kg	6,00E-03	1,64E+02	AJ
Água deionizada	kg	1,80E+01	-	AJ
p-Si fundido	kg	-	1,02E+00	E
m-Si CZ	kg	1,58E+00		D
Carboneto de sílicio	kg	6,20E-01	6,20E-1	AJ
Carboneto de sílicio reciclado	kg	1,41E+00	1,41E+00	AJ
Vidro plano	kg	9,99E-03	4,08E-02	V
Hidróxido de sódio	kg	1,50E-02	1,50E-02	S
Ácido Hidroclórico	kg	2,70E-03	2,70E-03	Z
Ácido acético	kg	3,90E-02	3,90E-02	AJ
Trietileno glicol	kg	2,18E-01	2,18E-01	AJ
Trietileno glicol reciclado	kg	1,95E+00	1,95E+00	AJ
Éter monometílico de dipropileno glicol	kg	3,00E-01	3,00E-01	AJ
Sulfonato de alquilbenzeno	kg	2,40E-01	2,40E-01	AJ
Ligante acrílico	kg	2,00E-03	3,85E-03	AJ
Latão	kg	7,44E-03	7,44E-03	AJ
Aço	kg	7,97E-01	7,97E-01	AC
Alma de aço	kg	8,05E-01	8,05E-01	AC
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Desperdício de sílicio	kg	1,10E-01	1,70E-01	Simapro 8.0.3.14
Fator Wafer	un	4,00E-06	4,00E-06	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	
Calor	MJ	9,25E+01	7,49E+01	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para água</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	
DBO	kg	2,95E-02	2,95E-02	Simapro 8.0.3.14
DQO	kg	2,95E-02	2,95E-02	Simapro 8.0.3.14
COD	kg	1,11E-02	1,11E-02	Simapro 8.0.3.14
TOC	kg	1,11E-02	1,11E-02	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 13 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m<sup>2</sup> de células de silício: m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Anexo</b>
Célula m-Si	m <sup>2</sup>	1	-	D
Célula p-Si	m <sup>2</sup>	-	1	E
Elettricidade	kWh	1,44E+01	1,44E+01	O
Gás natural	MJ	6,08E-02	2,47E-01	Q
Água	Kg	1,71E+02	2,51E+02	AJ
Óleo leve	MJ	1,80E+01	-	
Fator célula fotovoltaica	Um	4,00E-07	4,00E-07	AJ
Wafer p-Si	m <sup>2</sup>	-	1,04E+00	F
WAfer m-Si	m <sup>2</sup>	1,03E+03	-	F
Pasta de metalização dianteira	Kg	5,75E-03	9,12E-03	AJ
Pasta de metalização traseira	Kg	3,84E+00	5,34E-03	AJ
Pasta de metalização traseira (Al)	Kg	5,59E-02	5,96E-02	AJ
Amônia	Kg	2,19E-02	8,92E-03	AJ
Ácido fosfórico	Kg	-	8,36E-03	Y
Cloreto de fosforila	Kg	1,33E-02	2,74E-02	AJ
Isopropanol	Kg	1,77E-01	8,10E-04	AJ
Solvente orgânico	Kg	-	1,13E-02	AJ
Cloreto de cálcio (CaCl <sub>2</sub> )	Kg	-	3,15E-02	AJ
Ácido hidroclórico	Kg	6,29E-04	8059E-03	Z
HF	Kg	6,45E-04	4,03E-01	AJ
Ácido nítrico	Kg	-	2,93E-01	AJ
Hidróxido de sódio	Kg	6,04E-01	7,07E-02	S
Cal hidratada	Kg	1,51E-02	2,18E-01	
Peróxido de hidrogênio	Kg	-	4,52E-04	AJ
Ácido sulfúrico	Kg	-	1,01E-01	AA
Gás refrigerante R134a	Kg	3,12E-05	2,73E-05	AJ
Hidróxido de potássio	Kg	-	3,00E-02	AJ
Sulfato de amônia	Kg	-	2,10E-02	AJ
Oxigênio líquido	Kg	-	8,22E-03	AJ
Nitrogênio líquido	Kg	1,15E+00	1,35E+00	AJ
Tetrahidreto de silício	Kg	2,91E-03	2,61E-03	AJ
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Desperdício de <i>wafer</i> de silício	Kg	2,33E+00	2,74E+00	Simapro 8.0.3.14
Mistura de solventes	Kg	1,72E-01	1,08E-02	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	
Calor	MJ	5,18E+01	5,18E+01	Simapro 8.0.3.14
Alumínio	Kg	7,73E-06	7,73E-06	Simapro 8.0.3.14
HF	Kg	1,38E-04	6,90E-04	Simapro 8.0.3.14
Estanho	Kg	7,73E-06	7,73E-06	Simapro 8.0.3.14
Silício	Kg	3,17E-08	3,17E-08	Simapro 8.0.3.14
Prata	Kg	7,73E-06	7,73E-06	Simapro 8.0.3.14

Titânio	Kg	7,73E-06	7,73E-06	Simapro 8.0.3.14
Amônia	Kg	3,73E-05	5,22E-04	Simapro 8.0.3.14
CO2 fóssil	Kg	1,67E-01	6,82E-01	Simapro 8.0.3.14
Cloro	Kg	4,60E-05	-	Simapro 8.0.3.14
Hidrogênio	Kg	1,10E-02	4,44E-04	Simapro 8.0.3.14
2-Propanol	Kg	1,47E-02	-	Simapro 8.0.3.14
Acetaldeído	Kg	6,33E-04	-	Simapro 8.0.3.14
Etano, 1,1,1,2-tetrafluoro, HFC-134a	Kg	3,12E-05	2,73E-05	Simapro 8.0.3.14
Silício	Kg	2,963E-03	1,53E-04	Simapro 8.0.3.14
NMVOG	Kg	1,26E-02	3,53E-04	Simapro 8.0.3.14
Água	Kg	1,16E+01	5,96E+00	Simapro 8.0.3.14
Ácido Nítrico	Kg	-	1,19E-04	Simapro 8.0.3.14
NOx	Kg	-	1,604E-02	Simapro 8.0.3.14

---

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 14 – Inventário da fase de extração e fabricação da laminação de 1m<sup>2</sup> de painéis m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Laminação m-Si</b>	<b>Laminação p-Si</b>	<b>Anexo</b>
Laminação de m-Si	m <sup>2</sup>	1	-	H
Laminação de p-Si	m <sup>2</sup>	-	1	I
Eletricidade	kWh	3,73E+00	3,73E+00	O
Diesel	MJ	8,75E-03	8,75E-03	P
Fator painel fotovoltaico	un	4,00E-06	4,00E-06	AJ
Água	kg	5,03E+00	5,03E+00	AJ
Vidro plano temperado	kg	8,81E+00	8,81E+00	V
Desenho do fio cobre	kg	1,03E-01	1,03E-01	AJ
Célula fotovoltaica p-Si	kg	-	9,35E-01	G
Célula fotovoltaica m-Si	kg	9,35E-01	-	G
Liga de alumínio AlMg <sub>3</sub>	kg	2,13E+00	-	T
Estanho	kg	1,29E-02	1,29E-02	AJ
Chumbo	kg	7,25E-04	7,25E-04	AJ
Diodo	kg	2,81E-03	2,81E-03	AJ
Polietileno, HDPE, granulado	kg	2,38E-02	2,38E-02	U
Vidro solar baixo teor de ferro	kg	8,81E+00	8,81E+00	AJ
Cobre	kg	1,03E-01	1,03E-01	AJ
Fibra de vidro reforçada com poliamida	kg	2,95E-01	2,95E-01	AJ
Folha de acetato de vinil etílico (EVA)	kg	8,75E-01	8,75E-01	AJ
Filme de fluoreto de polivinila	kg	1,12E-01	1,12E-01	AJ
Tereftalato de polietileno granulado	kg	3,46E-01	3,46E-01	V
Silicone	kg	1,22E-01	1,22E-01	AJ
Papelão ondulado	kg	7,63E-01	7,63E-01	AJ
1-propanol	kg	1,59E-02	1,59E-02	AJ
Paleta plano	kg	5,00E-02	5,00E-02	AJ
HF	kg	6,24E-02	6,24E-02	AJ
Isopropanol	kg	1,47E-04	1,47E-04	AJ
Hidróxido de potássio	kg	5,14E-02	5,14E-02	AJ
Sabão	kg	1,16E-02	1,16E-02	AJ
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Resíduo sólido	kg	3,00E-02	3,00E-02	Simapro 8.0.3.14
Fluoreto de polivinila	kg	1,12E-01	1,12E-01	Simapro 8.0.3.14
Mistura de plásticos	kg	1,64E+00	1,64E+00	Simapro 8.0.3.14
Óleo mineral	kg	1,61E-03	1,61E-03	Simapro 8.0.3.14
Tratamento de esgoto	m <sup>3</sup>	5,03E-03	5,03E-03	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade m-Si</b>	<b>Quantidade p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Calor	MJ	1,34E+01	1,34E+01	Simapro 8.0.3.14
Compostos de origem inespecífica	kg	8,06E-03	8,06E-03	Simapro 8.0.3.14
CO <sub>2</sub> fóssil	kg	2,18E-02	2,18E-02	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)



Tabela 15 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m<sup>2</sup> de painéis m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Painel m-Si</b>	<b>Painel p-Si</b>	<b>Anexo</b>
Painel fotovoltaico m-Si	m <sup>2</sup>	1	-	H
Painel fotovoltaico p-Si	m <sup>2</sup>	-	1	I
Eletricidade	kWh	3,73E+00	3,73E+00	O
Diesel	MJ	8,75E-03	8,75E-03	P
Fator painel fotovoltaico	Um	4,00E-06	4,00E-06	AJ
Água	Kg	5,03E+00	5,03E+00	AJ
Vidro plano temperado	Kg	8,81E+00	8,81E+00	V
Desenho do fio cobre	Kg	1,03E-01	1,03E-01	AJ
Célula fotovoltaica p-Si	Kg	-	9,35E-01	G
Célula fotovoltaica m-Si	Kg	9,35E-01	-	G
Liga de alumínio AlMg <sub>3</sub>	kg	2,13E+00	-	T
Estanho	kg	1,29E-02	1,29E-02	AJ
Chumbo	kg	7,25E-04	7,25E-04	AJ
Diodo	kg	2,81E-03	2,81E-03	AJ
Polietileno, HDPE, granulado	kg	2,38E-02	2,38E-02	U
Vidro solar baixo teor de ferro	kg	8,81E+00	8,81E+00	AJ
Cobre	kg	1,03E-01	1,03E-01	AJ
Fibra de vidro reforçada com poliamida	kg	2,95E-01	2,95E-01	AJ
Folha de acetato de vinil etílico (EVA)	kg	8,75E-01	8,75E-01	AJ
Filme de fluoreto de polivinila	kg	1,12E-01	1,12E-01	AJ
Tereftalato de polietileno granulado	kg	3,46E-01	3,46E-01	AJ
Silicone	kg	1,22E-01	1,22E-01	U
Papelão ondulado	kg	7,63E-01	7,63E-01	AJ
1-propanol	kg	1,59E-02	1,59E-02	AJ
Paleta plano	kg	5,00E-02	5,00E-02	AJ
HF	kg	6,24E-02	6,24E-02	AJ
Isopropanol	kg	1,47E-04	1,47E-04	AJ
Hidróxido de potássio	kg	5,14E-02	5,14E-02	AJ
Sabão	kg	1,16E-02	1,16E-02	AJ
<b>Resíduos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Painel m-Si</b>	<b>Painel p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Resíduo sólido	kg	3,00E-02	3,00E-02	Simapro 8.0.3.14
Fluoreto de polivinila	kg	1,12E-01	1,12E-01	Simapro 8.0.3.14
Mistura de plásticos	kg	1,64E+00	1,64E+00	Simapro 8.0.3.14
Óleo mineral	kg	1,61E-03	1,61E-03	Simapro 8.0.3.14
Tratamento de esgoto	m <sup>3</sup>	5,03E-03	5,03E-03	Simapro 8.0.3.14
<b>Emissões para ar</b>	<b>Unidade</b>			Simapro 8.0.3.14
Calor	MJ	1,34E+01	1,34E+01	Simapro 8.0.3.14
Compostos de origem inespecífica	kg	8,06E-03	8,06E-03	Simapro 8.0.3.14
CO <sub>2</sub> fóssil	kg	2,18E-02	2,18E-02	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de FTHENAKIS *et al.* (2015)

Tabela 16 – Inventário da fase de construção da Planta Fotovoltaica Monocristalina e Policristalina

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica m-Si</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica p-Si</b>	<b>Anexo</b>
Painel fotovoltaico m-Si	m <sup>2</sup>	5.715,20	-	H
Painel fotovoltaico p-Si	m <sup>2</sup>	-	5.645,50	I
Concreto	kg	1.899.458,98	1.899.458,98	AH
Brita	kg	1.010.142,84	1.010.142,84	AF
Areia	kg	766.130,64	766.130,64	AE
Aço galvanizado	kg	103.584,86	103.584,86	AC
Aço zincado	kg	261,32	261,32	AC
Aço estrutural	kg	13.342,40	13.342,40	AC
Argamassa (Reboco)	kg	5.029,10	5.029,10	AI
Argamassa (Impermeabilização)	kg	10.058,19	10.058,19	AI
Argamassa (Chapisco)	kg	20,116,39	20,116,39	AI
Peso dos painéis fotovoltaicos m-Si	kg	66.082	-	-
Peso dos painéis fotovoltaicos p-Si	kg	-	82.263	-
Transporte	tkm	1.026.633,94	1.030.921,90	AD

Fonte: Adaptado de PINTO (2016)

O consumo de água para a limpeza dos módulos fotovoltaicos foi adaptado de Airlight S.A (2019) para as condições urbanas de Poços de Caldas-MG, dessa forma, o consumo foi definido como sendo 0,37 l de água para a limpeza de 1 m<sup>2</sup> de painel a cada três meses. A utilização de água para a manutenção dos módulos é mostrada na Tabela 17.

Tabela 17 – Inventário da fase de operação e manutenção Plantas Fotovoltaicas m-Si e p-Si – 25 anos

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica m-Si</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Área total	m <sup>2</sup>	5.815	6.250	RETSscreen
Consumo trimestral	l	2.152,55	2.312,50	Calculado
Consumo anual	l	8.610,20	9.250	Calculado
Consumo total (25 anos)	l	215.255	231.250	Calculado

Fonte: Adaptado de Fonte: Adaptado de Airlight S.A (2019)

Tabela 18 – Inventário da fase de desmantelamento das Plantas Fotovoltaicas m-Si e p-Si

<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica m-Si</b>	<b>Planta Solar Fotovoltaica p-Si</b>	<b>Fonte</b>
Transporte	tkm	1.026.633,94	1.030.921,90	Simapro 8.0.3.14

Fonte: Adaptado de PINTO (2016)

## 4.4 Inventário da tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica

O inventário da tecnologia de concentrador solar térmico de calha parabólica usado nesse trabalho é referente a uma planta de 50 MW do trabalho de Corona (2014), o qual teve as suas entradas e saídas adaptadas para uma planta de 1 MW, por meio de uma estimativa de cálculo por escalonamento, conforme Peters e Timmerhaus (1991), sendo mostrado nas Tabelas 19 a 22.

Do inventário original foram excluídas as informações referentes ao sistema de armazenamento térmico de sais fundidos, já que a planta em estudo não terá armazenamento térmico, além das informações a respeito da ocupação e transformação da terra, devido à ausência dessas informações nos inventários das outras tecnologias solares estudadas.

Os dados de transporte presentes durante as várias fases do inventário de Corona *et al.* (2014), também foram desconsiderados, partindo do pressuposto de que todos os materiais e equipamentos serão fabricados em São Paulo-SP e serão enviados até a cidade de Poços de Caldas-MG por transporte rodoviário. Na fase de desmantelamento foi considerado que todos os materiais resultantes da desativação da planta serão enviados para a cidade de São Paulo-SP, para o descarte adequado.

Os inventários de cada insumo, energia ou resíduos consumidos ou gerados estão especificados nas tabelas, e podem ser consultados nos anexos desta dissertação.

Tabela 19 – Inventário da fase de extração e fabricação da planta de calha parabólica de 1MW

Elemento	Entradas	Unidade	Quantidade CSP	Anexo
Bloco de energia	Aço carbono	kg	2100	AC
Caldeira	Refratário	kg	6.512,76	AJ
	Isolamento (lã de rocha)	kg	478,18	AJ
	Isolamento (Alumínio)	kg	64,55	AJ
	Vidro plano	kg	528,29	V
Campo Solar	Resina epóxi	kg	0,1023	AJ
	Cobre	kg	0,424	AJ
	Prata	kg	0,2487	AJ
	Aço inox	kg	39,41	AC
	Revestimento anti-reflexo	kg	78,18	AJ
	Tubo de vidro	kg	23,74	V

Armação do coletor	Aço Carbono	kg	231.911,7	AC	
	Aço inox	kg	8.790,79	AC	
	Grafite	kg	17,88	AJ	
Sistema de seguidor solar	Aço carbono	kg	16.518,31	AC	
	Níquel	kg	4,42	AJ	
	Aço inox	kg	4,42	AC	
	Óleo lubrificante	kg	795,78	X	
	Polietileno	kg	2.609,44	U	
Fundação	Concreto	kg	492,33	AH	
	Aço carbono	kg	565.600,8	AC	
Sistema fluido de trabalho	Óleo sintético	kg	95.635,25	AJ	
	Nitrogênio	kg	100.587,7	AJ	
Tanque de armazenamento	Aço carbono	kg	16.257,99	AC	
Tanque de gás natural	Aço carbono	kg	5.738,11	AC	
Tanque de expansão	Aço carbono	kg	3.060,33	AC	
Tubos	Aço carbono	kg	30.329,38	AC	
Prédio principal		m <sup>2</sup>	153,02		
	Aço carbono	kg	1.767,34	AC	
	Concreto	kg	5.027,55	AH	
	Eletricidade	GJ	3.605,98	O	
	Óleo leve	kg	86.482,52	AJ	
Estradas		m <sup>2</sup>	8.368,03		
Transporte		tkm	317.790,63	AD	
<b>Emissões para o ar</b>		<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fonte</b>
	Partículas	kg	327,84	Simapro 8.0.3.14	
	Óxidos de enxofre	kg	1.600,78	Simapro 8.0.3.14	
	Óxidos de nitrogênio	kg	1.139,94	Simapro 8.0.3.14	
	Monóxido de Carbono	kg	386,32	Simapro 8.0.3.14	
	Hidrocarbonetos	kg	6,20	Simapro 8.0.3.14	
	Metano biogênico	kg	2,78	Simapro 8.0.3.14	
	Dióxido de carbono	kg	368,67	Simapro 8.0.3.14	

Fonte: Adaptado de CORONA *et al.* (2014)

Tabela 20 – Inventário da fase de construção da planta CSP de calha parabólica de 1MW

Elemento	Unidade	Anexos
Cascalho	Kg	1.017.208,37
Soldadura das tubulações	m	91,52
Guindaste – Coletores	Hr	17,90
Guindaste - Sistema de armazenamento	Hr	0,27
Betoneira	Hr	492,33
Guindaste - Sistema HTF	Hr	0,335
Soldadura dos tubos	m	472,64

Atividades de escavação	m <sup>3</sup>	5.907,10	AJ
Atividades de enchimento	m <sup>3</sup>	5.924,51	AJ
Consumo da máquina de construção	MJ	841.590,20	AJ
Transporte (São Paulo-SP x Poços de Caldas - MG)	tkm	269.560,22	AD

Fonte: Adaptado de CORONA *et al.* (2014)

Tabela 21 – Inventário da fase de manutenção da planta CSP de calha parabólica de 1MW

Elemento	Unidade	Quantidade CSP	Anexo
Óleo lubrificante	Kg	793,77	X
Substituição de HTF	Kg	956,35	AJ
Água para resfriamento	m <sup>3</sup>	1.980.689,42	AJ
Água para ciclo rankine	Kg	25.748.962,42	AJ
Água para lavar	Kg	11.525.563,44	AJ
Substituição de coletores	U	0,5968	AJ
Lavador de coletores	Tkm	97.189,80	AJ
Gás natural para anti-congelamento e manutenção	MJ	15.011.540,89	Q
Eletricidade da rede	MWh	1.309,06	O
Transporte (São Paulo-SP x Poços de Caldas - MG)	tkm	9.878.213,15	AD

Fonte: Adaptado de CORONA *et al.* (2014)

Tabela 22 – Inventário da fase de transporte da planta CSP de calha parabólica de 1MW

Elemento	Unidade	Quantidade CSP	Anexo
Transporte (Poços de Caldas - MG x São Paulo-SP)	tkm	10.465.564	AD

Fonte: Adaptado de CORONA *et al.* (2014)

## 4.5 Inventário da tecnologia de concentrador solar de prato parabólico acoplado com motor stirling

O inventário da tecnologia de concentrador solar térmico de prato parabólico usado nesse trabalho é referente ao trabalho de Bravo *et al.* (2014) de uma unidade de 10kW, o qual teve as suas entradas e saídas adaptadas por meio do cálculo das unidades necessárias para uma capacidade de potência instalada de 1 MW, e encontra-se detalhado na Tabela 23 a 26.

No inventário de Bravo *et al.* (2014), não haviam dados disponíveis a respeito das fases de construção da planta, manutenção e desmantelamento as quais foram adaptadas do trabalho de Corona *et al.* (2014), devido as semelhanças entre a tecnologia de calha parabólica e prato parabólico acoplado com motor stirling.

Os equipamentos e materiais necessários para a montagem da planta, foram transportados da cidade de São Paulo-SP até Poços de Caldas-MG, por transporte

rodoviário, bem como os materiais resultantes do desmantelamento da planta que seguiram o caminho inverso. Os inventários de cada insumo, energia ou resíduos consumidos ou gerados estão especificados na Tabela 23, e podem ser consultados nos anexos desta dissertação.

Tabela 23 – Inventário da fase de fabricação da planta CSP de prato parabólico de 1MW

<b>Elemento</b>	<b>Entradas</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade utilizada</b>	<b>Anexos</b>
<b>Estrutura metálica</b>	Aço	Kg	370.000	AC
<b>Espelhos</b>	Fibra de vidro	Kg	11.340	AJ
Motor				
<b>Trocador de calor</b>	Liga de níquel	Kg	1.200	AJ
<b>Cilindro/ pistão</b>	Aço	Kg	20.000	AC
<b>Bielas</b>	Aço	Kg	10.000	AC
<b>Gerador elétrico</b>				
	Aço	Kg	5.000	AC
	Cobre	Kg	5.000	AJ
<b>Regenerador</b>	Aço	Kg	3.000	AC
<b>Cavidade cerâmica</b>	Cerâmica	kg	1.500	AJ
<b>Gás de trabalho</b>	Hélio	L	137,89	AJ
<b>Lubrificação</b>	Óleo lubrificante	kg	26,94	X
<b>Transporte</b>	Caminhão	tkm	4.088.165,60	AD

Fonte: Adaptado de BRAVO *et al.* (2014); CORONA *et al.* (2014)

Tabela 24 – Inventário da fase de construção da planta CSP de prato parabólico de 1MW

<b>Elemento</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade Utilizada</b>	<b>Anexos</b>
Concreto	kg	15.000.000	AH
Betoneira	Hr	492,33	AJ
Atividades de escavação	m <sup>3</sup>	5907,10	AJ
Atividades de enchimento	m <sup>3</sup>	5924,51	AJ
Consumo da máquina de construção	MJ	841590,20	AJ
Transporte	tkm	3.975.000	AD

Fonte: Adaptado de BRAVO *et al.* (2014); CORONA *et al.* (2014)

Tabela 25 – Inventário da fase de manutenção da planta CSP de prato parabólico de 1MW

<b>Elemento</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade Utilizada</b>	<b>Anexos</b>
Troca de óleo lubrificante	kg	1315	X
Substituição de gás de trabalho (hélio)	kg	956,35	AJ
Água para resfriamento	m <sup>3</sup>	990.344,7	AJ
Água para limpeza (25 anos)	l	209.790	Airlight (2019)
Substituição de coletores	U	0,5968	AJ
Lavador de coletores	Tkm	48594,9	AJ
Gás natural para anti-congelamento e manutenção	MJ	15011541	Q

Eletricidade da rede	MWh	1309,06	O
Transporte	tkm	601,91	AD

Fonte: Adaptado de BRAVO *et al.* (2014); CORONA *et al.* (2014)

Tabela 26 – Inventário da fase de desmantelamento da planta CSP de prato parabólico de 1MW

Elemento	Unidade	Quantidade Utilizada	Anexo
Transporte	tkm	8.063.767,51	AD

Fonte: Adaptado de BRAVO *et al.* (2014); CORONA *et al.* (2014)

## 4.6 Modelagem e viabilidade econômica

Para a determinação da viabilidade econômica e estimar a produção anual de eletricidade, foi utilizado um software de simulação canadense de gerenciamento de energia limpa chamado RETScreen Expert. Este software avalia e analisa a produção de energia, os custos do projeto durante seu ciclo de vida e a emissão de gases de efeito estufa, sendo utilizado para a implementação de projetos que utilizem energias renováveis ou não renováveis, por meio da análise de projetos de energia eólica, sistemas fotovoltaicos, pequenas hidrelétricas, usinas solares térmicas, usinas de cogeração, biomassa, entre outras.

O RETScreen permite identificar, avaliar e otimizar rapidamente a viabilidade técnica e financeira de projetos potenciais de energia limpa (RETScreen, 2018). O software utiliza o modelo de análise exposto na Figura 28.



Figura 28 – Modelo de análise do software RETScreen Expert  
Fonte: RETScreen Expert (2018)

Este simulador possui em sua base de dados informações de irradiação solar, dados climáticos, entre outros da cidade de Poços de Caldas-MG, viabilizando a sua utilização neste estudo. Devido à ausência de dados econômicos referentes ao custo nacional das tecnologias de concentração solar de prato parabólico acoplado com motor stirling solar e da tecnologia de calha parabólica, será utilizado o cálculo de viabilidade econômica e geração de energia elétrica por meio dos valores disponibilizados pelo software RETScreen Expert.

As taxas e tributações consideradas para o cálculo da viabilidade econômica das plantas solares são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 – Taxas e tributações para o cálculo da viabilidade econômica

Taxas	FV		CSP Calhas parabólicas	CSP Pratos Parabólicos
	monocristalina	Policristalina		
Inflação (%)		3,75		
Selic (%)		6,50		
Custo de geração (R\$)	0,1181		1,70	
Venda de eletricidade (R\$)	0,497		2,21	
Financiamento BNDES	80% do total; Taxa anual de 7,5 %; Prazo de pagamento: 20 anos			

Fonte: IBGE (2019); COPOM (2019); DME (2019)

Tendo por base essas diretrizes foram realizados os cálculos de viabilidade financeira para as diferentes tecnologias, usando os seguintes indicadores econômicos:

- Fluxo de caixa, que trata-se de um instrumento de gestão financeira que projeta para períodos futuros todas as entradas e as saídas de recursos financeiros da empresa, indicando como será o saldo de caixa para o período projetado;
- Valor presente líquido que é capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Se o VPL for maior que 0 o investimento é viável, menor que zero inviável e igual a zero é indiferente realizar ou não o projeto;
- Taxa mínima de atratividade (TMA) representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento, ou o máximo que uma pessoa se propõe a pagar quando faz um financiamento.
- Taxa interna de retorno (TIR) ou taxa interna de rentabilidade é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa, faz com que os valores das



despesas, trazidos ao valor presente, seja igual aos valores dos retornos dos investimentos, também trazidos ao valor presente;

- Taxa interna de retorno modificada (TIRM) que trata-se de um método de análise de projetos de investimentos, que consiste em trazer os fluxos de caixa negativos para valor presente e levar os fluxos de caixa positivos para valor futuro, resultando em um novo fluxo de caixa convencional e eliminando assim alguns dos problemas da TIR, quando estimada na sua maneira tradicional.;
- Tempo de retorno de investimento, para se encontrar o período de retorno de determinado investimento, bastando somar os valores dos rendimentos acumulados, período após período, até que o valor total se iguale a quantia do investimento inicial.

Os dados da cidade de Poços de Caldas-MG, disponíveis no banco de dados do software RETScreen Expert são mostrados na Tabela 28.

Tabela 28 – Dados da cidade de Poços de Caldas-MG

Município	Poços de Caldas-MG
Latitude	-21,8
Longitude	-46,6
Origem dos dados climatológicos	NASA
Irradiação direta (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	2,2
Irradiação global (kWh/m <sup>2</sup> /dia)	5,09
Temperatura média (°C)	20,9

Fonte: RETScreen Expert (2018); CEMIG (2012)

#### 4.6.1 Planta Fotovoltaica Monocristalina

De acordo com dados de IRENA (2017) o custo total por capacidade instalada da tecnologia fotovoltaica chegou a R\$ 5.545,06/KW, no ano de 2017. Os dados utilizados para o cálculo financeiro e para a estimativa de produção energética os dados apresentados na Tabela 29:

Tabela 29 – Dados financeiros para a planta fotovoltaica monocristalina

Conversão de moeda (Cotação 15/05/2019)	1 USD	R\$ 3,995
Custo de produção	0,025 USD/kWh	R\$ 0,12/kWh
Custos Iniciais	1.388,00 USD \$/kW	R\$ 5.545,06/kW
Custo de O & M	15,00 USD/kW-ano	R\$ 59,93/kW-ano
Preço da eletricidade exportada	0,125 USD/kWh	R\$ 0,4977/kWh

LCOE atual (Mundial)                      0,10 USD/kWh                      R\$ 0,3995/kWh

Fonte: RETScreen Expert (2018); CCEE (2018); IRENA (2017); WEO (2017)

Para a simulação desta planta foi considerado que os módulos fotovoltaicos possuem estrutura fixa, sem sistema seguidor do sol, os dados técnicos da planta simulada são mostrados na Tabela 30.

Tabela 30 – Dados técnicos da planta fotovoltaica monocristalina simulada

Tipo de dado	Descrição	Quantidade
Projeto do sistema	Potência nominal	1 MW
	Potência do Projeto	1.000,16 kW
Módulo	Yingli Energy China	3.572
	YL280D-30b	
	Fator de utilização	18,5 %
	Área total do módulos	5.815 m <sup>2</sup>
	Perdas	1%
Inversor	Modelo genérico	1.250 kW
	Eficiência	95%

Os custos de cada componente da planta foram definidos de acordo com os dados do trabalho de Sylvestrin *et al.* (2018) e são mostrados na Tabela 31.

Tabela 31 – Distribuição de custos de uma planta fotovoltaica

Custos	%	R\$ / kW
Módulos	44	2.439,83
Inversores	12	665,40
Estrutura	13	720,86
Proteções	5,10	282,79
Obras	4,19	232,34
Condutores	2,81	155,82
Projeto e instalação	18,9	1.048,02
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>5.545,06</b>

Fonte: Sylvestrin *et al.* (2018); IRENA (2017)

Os resultados da simulação da planta fotovoltaica monocristalina são apresentados nas Tabela 32:

Tabela 32 – Resultados da Simulação da planta fotovoltaica monocristalina

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
<b>Produção de energia anual</b>	1.639 MWh
<b>Custo total da planta</b>	R\$ 5.545.946,89
<b>Custo da geração de energia</b>	R\$ 0,352/kWh
<b>Receita com eletricidade exportada</b>	R\$ 810.086,13
<b>Taxa de indexação sobre eletricidade exportada</b>	10 %
<b>Capital próprio investido</b>	R\$ 1.109.187,78
<b>Empréstimo BNDES (80 % CT)</b>	R\$ 4.436.759,11
Parcela Empréstimo (Anual)	R\$ 435.211,31
Custo total O&M	R\$ 59.932,99
<b>Custo anual total</b>	R\$ 495.144,295
<b>Redução anual bruta de emissões GEE</b>	1.120 tCO <sub>2</sub> /ano
<b>Redução anual bruta de emissões GEE (25 anos)</b>	27.997 tCO <sub>2</sub>
<b>TIR antes dos impostos</b>	
Capital próprio	54,2 %
Ativos	19,9 %
<b>TIRM antes dos impostos</b>	
Capital próprio	20,8 %
Ativos	13,3 %
<b>Retorno simples</b>	7,3 anos
<b>Retorno capital próprio</b>	2,4 anos
<b>VPL</b>	R\$ 25.009.155,43

#### 4.6.2 Planta Fotovoltaica Policristalina

Para a planta fotovoltaica policristalina com capacidade instalada de 1MW, os dados utilizados para o cálculo financeiro são apresentados na Tabela 33:

Tabela 33 – Dados financeiros para a planta fotovoltaica policristalina

Conversão de moeda	1 USD	R\$ 3,995
(Cotação 15/05/2019)		
Custo de produção	0,03 USD/kWh	R\$ 0,12/kWh
Custos Iniciais	1.388,00 USD \$/kW	R\$ 5.545,06/kW
Custo de O & M	15,00 USD/kW-ano	R\$ 59,93/kW-ano
Preço da eletricidade exportada	0,125 USD/kWh	R\$ 0,4977/kWh
LCOE atual	0,10 USD/kWh	R\$ 0,3995/kWh

Fonte: RETScreen Expert (2018); CCEE (2018); IRENA (2017)

Para a simulação desta planta foi considerado que os módulos fotovoltaicos possuem estrutura fixa, sem sistema seguidor do sol, os dados técnicos da planta simulada são mostrados na Tabela 34.

Tabela 34 – Dados técnicos da planta fotovoltaica policristalina

Tipo de dado	Descrição	Quantidade
Projeto do sistema	Potência nominal	1 MW
	Potência do Projeto	1.000,06 kW
Módulo	Yingli Energy China	3.226
	YL310P-35b	
	Fator de utilização	18,5 %
	Área total do módulos	6.250 m <sup>2</sup>
	Perdas	1%
Inversor	Modelo genérico	1.250 kW
	Eficiência	95%

Os custos de cada componente da planta foram definidos de acordo com os dados do trabalho de Sylvestrin *et al.* (2018), e são mostrados na Tabela 31. Os resultados da simulação da planta fotovoltaica policristalina são apresentados nas Tabela 35.

Tabela 35 – Resultados da Simulação da planta fotovoltaica policristalina

Descrição	Valor
<b>Produção de energia anual</b>	1.638 MWh
<b>Custo total da planta</b>	R\$ 5.545.391,56
<b>Custo da geração de energia</b>	R\$ 0,352/kWh
<b>Receita com eletricidade exportada</b>	R\$ 818.187,98
<b>Taxa de indexação sobre eletricidade exportada</b>	10 %
<b>Capital próprio investido</b>	R\$ 1.109.079,91
<b>Empréstimo BNDES (80 % CT)</b>	R\$ 4.436.315,67
Parcela Empréstimo (Anual)	R\$ 435.167,36
Custo total O&M	R\$ 59.928,99
<b>Custo anual total</b>	R\$ 495.096,36
<b>Redução anual bruta de emissões GEE</b>	1.120 tCO <sub>2</sub> /ano
<b>Redução anual bruta de emissões GEE (25 anos)</b>	27.994 tCO <sub>2</sub>
<b>TIR antes dos impostos</b>	
Capital próprio	54,2 %
Ativos	19,9 %
<b>TIRM antes dos impostos</b>	
Capital próprio	20,8 %

Ativos	13,3 %
<b>Retorno simples</b>	7,3 anos
<b>Retorno capital próprio</b>	2,4 anos
<b>VPL</b>	R\$ 25.006.654,56

Fonte: RETScreen Expert (2018)

#### 4.6.3 Planta de Concentração Solar de Prato Parabólico acoplado a motor Stirling Solar

A planta em análise trata-se de um modelo de concentração solar de prato parabólico acoplado a um motor stirling solar alfa, do tipo SOLO-161, com capacidade instalada de 1 MW, que utiliza somente a radiação solar para a produção de energia elétrica, não possuindo sistema de armazenamento térmico ou hibridização com outras fontes de energia.

De acordo com dados de IRENA (2017) os custos totais por capacidade instalada para a tecnologia CSP no final do ano 2017, chegou a R\$ 22.228,18/kW. Um sistema de tecnologia de prato parabólico acoplado motor stirling com capacidade de 7,5 kW, para as condições brasileiras teria um custo médio total por unidade de R\$ 162.783,00, com um custo de mão de obra e material por kWh de R\$ 0,22 e R\$ 0,16, respectivamente, o que resultaria em um custo por capacidade instalada de R\$ 21.704,40/kW, bem próximo da estimativa de custo publicada pelo IRENA (ROXO, 2007).

Os dados a serem utilizados para a modelagem no RETScreen são apresentados na Tabela 36:

Tabela 36 – Dados financeiros para a planta de prato parabólico

Conversão de moeda (Cotação 15/05/2019)	1 USD	R\$ 3,995
Custo de produção	0,425 USD/kWh	R\$ 1,70/kWh
Custos Iniciais	5.564,00 USD \$/kW	R\$ 22.228,18/kW
Custo de O & M	135,00 USD/kW-ano	R\$ 539,33/kW-ano
Preço da eletricidade exportada	0,553 USD/kWh	R\$ 2,21/kWh
LCOE atual	0,22 USD/kWh	R\$ 0,879/kWh

Fonte: RETScreen Expert (2018); CCEE (2018); IRENA (2017); WEO (2017)

Para a simulação desta planta foi considerado que os módulos de prato parabólico acoplado com motor stirling solar possuem sistema seguidor do sol. Os dados técnicos da planta simulada são mostrados na Tabela 37.

Tabela 37 – Dados técnicos da planta de prato parabólico

Tipo de dado	Descrição	Quantidade
Projeto do sistema	Potência nominal	1 MW
	Potência do Projeto	1.000 kW
Módulos	Motor Solo 161	10 kW
	Quantidade	100
Prato parabólico	Área	56,70 m <sup>2</sup>
Distância entre unidades	(N-S) (L-O)	15 m
	Fator de utilização	25 %
	Área total do módulos	22.500 m <sup>2</sup>

Fonte: RETScreen Expert (2018)

Os custos de cada componente da planta foram definidos de acordo com os dados do trabalho de Roxo (2007), e são mostrados na Tabela 38.

Tabela 38 – Distribuição de custos de uma planta de prato parabólico

Custos	%	R\$/ kW
Concentrador	34,83	7.742,07
Receptor	1,67	371,22
Motor	45,60	10.136,05
Gerador	0,90	200,05
Sistema de refrigeração	0,58	128,92
Sistema elétrico	0,41	91,14
construção	4,15	922,47
Custos de engenharia	8,96	1.991,64
Início de operação	2,90	644,62
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>22.228,18</b>

Fonte: IRENA (2017); Roxo (2007)

Os resultados da simulação da planta de prato parabólico acoplado a motor stirling solar são apresentados nas Tabela 39:

Tabela 39 – Resultados da Simulação da planta de prato parabólico

Descrição	Valor
<b>Produção de energia anual</b>	2.190 MWh
<b>Custo total da planta</b>	22.228.180,00
<b>Custo da geração de energia</b>	R\$ 1,25/kWh
<b>Receita com eletricidade exportada</b>	R\$ 4.838.224,65
<b>Taxa de indexação sobre eletricidade exportada</b>	10 %
<b>Capital próprio investido</b>	R\$ 4.445.636,00
<b>Empréstimo BNDES (80 % CT)</b>	R\$ 17.782.544,00

Parcela Empréstimo (Anual)	R\$ 1.744.328,86
Custo total O&M	R\$ 539.325,00
<b>Custo anual total</b>	<b>2.283.653,86</b>
<b>Redução anual bruta de emissões GEE</b>	<b>1.497 tCO<sub>2</sub>/ano</b>
<b>Redução anual bruta de emissões GEE (25 anos)</b>	<b>37.418 tCO<sub>2</sub></b>
<b>TIR antes dos impostos</b>	
Capital próprio	83,6 %
Ativos	26,6 %
<b>TIRM antes dos impostos</b>	
Capital próprio	22,9 %
Ativos	15,3 %
<b>Retorno simples</b>	<b>5,2 anos</b>
<b>Retorno capital próprio</b>	<b>1,4 anos</b>
<b>VPL</b>	<b>R\$ 155.770.039,80</b>

Fonte: RETScreen Expert

#### 4.6.4 Planta de concentração solar térmica de calha parabólica

A planta em análise trata-se de um modelo de concentração solar de calha parabólica com capacidade instalada de 1 MW, que utiliza somente a radiação solar para a produção de energia elétrica, não possuindo sistema de armazenamento térmico ou hibridização com outras fontes de energia. Os dados a serem utilizados para a modelagem no RETScreen são apresentados na Tabela 40:

Tabela 40 – Dados financeiros para a planta de calhas parabólicas

Conversão de moeda (Cotação 15/05/2019)	1 USD	R\$ 3,995
Custo de produção	0,425 USD/kWh	R\$ 1,70/kWh
Custos Iniciais	5.564,00 USD \$/kW	R\$ 22.228,18/kW
Custo de O & M	135,00 USD/kW-ano	R\$ 539,33/kW-ano
Preço da eletricidade exportada	0,553 USD/kWh	R\$ 2,21/kWh
LCOE atual	0,22 USD/kWh	R\$ 0,879/kWh

Fonte: RETScreen Expert (2018); CCEE (2018); IRENA (2017)

Para esta simulação foi considerado como modelo de referência uma planta da empresa Abengoa Solar, que utiliza o receptor modelo Solel UVAC3, o qual também é utilizado na planta de referência deste estudo. Os dados técnicos da planta simulada são mostrados na Tabela 41.

Tabela 41 – Dados técnicos da planta de calhas parabólicas

Tipo de dado	Descrição	Quantidade
Projeto do sistema	Potência nominal	1 MW
	Potência do Projeto	1.000 kW
Módulos	Euro Trough ET150	
	Comprimento Unidade	150 m
	Área Abertura Un.	817,5 m <sup>2</sup>
	Área Abertura total	4.087,50 m <sup>2</sup>
Distância entre unidades	(Norte-Sul)	15 m
Fluido HTF	Therminol VP-1	
Referência	Planta Solúcar-Sevilha	
	Fator de utilização	16 %
	Área total do módulos	20.234,30 m <sup>2</sup>

Fonte: RETScreen Expert (2018)

Os custos de cada componente da planta foram definidos de acordo com os dados do relatório de custos de Renewables Energy Technologies (2012), e são mostrados na Tabela 42.

Tabela 42 – Distribuição de custos de uma planta de calhas parabólicas

Custos	%	R\$ / kW
<b>Custo do campo solar</b>	<b>17,2</b>	<b>3.823,25</b>
Campo solar	3,1	689,07
Preparação da terra e infraestrutura	5,8	1.289,23
Armação de aço	2,5	555,71
Tubulação	1,8	400,11
Instalações elétricas e outros	4	889,13
<b>Equipamentos: Campo solar e HTF</b>	<b>38,5</b>	<b>8.557,85</b>
Espelhos	6,4	1.422,61
Receptores	7,1	1.578,20
Armação de aço	10,7	2.378,42
Pilares	1,1	244,51
Fundação	2,1	466,79
Rastreadores (hidráulicos e motores elétricos)	0,4	88,91
Articulações giratórias	0,7	155,60
Sistema HTF (tubulação, isolamento, trocador de calor e bombas)	5,4	1.200,32
Fluido de transferência de calor	2,1	466,79



Controles eletrônicos, equipamentos solares e elétricos	2,5	555,70
<b>Sistema de TES</b>	<b>10,5</b>	<b>2.333,96</b>
Sais	5,1	1.133,64
Tanques de armazenamento	1,8	400,11
Material de isolamento	0,2	44,46
Fundação	0,6	133,37
Trocador de calor	1,4	311,19
Bombas	0,4	88,91
BOS	1	222,28
<b>Componentes convencionais da planta</b>	<b>14,3</b>	<b>3.178,63</b>
Bloco de potência	5,7	1.267,00
Equilíbrio da planta (BOP)	5,7	1.267,00
Ligação à rede	2,9	644,63
<b>Outros</b>	<b>19,5</b>	<b>4.334,49</b>
Desenvolvimento do projeto	2,9	644,62
Gerenciamento de projetos (EPC)	7,7	1.711,56
Financiamento	6	1.333,69
Outros custos (subsídios)	2,9	644,62
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>22.228,18</b>

Fonte: IRENA (2017); RENEWABLES ENERGY TECHNOLOGIES (2012)

Os resultados da simulação da planta de calhas parabólicas são apresentados nas Tabela 43:

Tabela 43 – Resultados da Simulação da planta de calhas parabólicas

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
<b>Produção de energia anual</b>	1.402 MWh
<b>Custo total da planta</b>	R\$ 22.228.180,00
<b>Custo da geração de energia</b>	R\$ 1,96/kWh
<b>Receita com eletricidade exportada</b>	R\$ 3.096.464,58
<b>Taxa de indexação sobre eletricidade exportada</b>	10 %
<b>Capital próprio investido</b>	R\$ 4.445.636,00
<b>Empréstimo BNDES (80 % CT)</b>	R\$ 17.782.544,00
Parcela Empréstimo (Anual)	R\$ 1.744.328,86
Custo total O&M	R\$ 539.325,00
<b>Custo anual total</b>	R\$ 2.283.653,86
<b>Redução anual bruta de emissões GEE</b>	958 tCO <sub>2</sub> /ano
<b>Redução anual bruta de emissões GEE (25 anos)</b>	23.948 tCO <sub>2</sub>

---

<b>TIR antes dos impostos</b>	
Capital próprio	45,3 %
Ativos	17,9 %
<b>TIRM antes dos impostos</b>	
Capital próprio	20,2 %
Ativos	12,7 %
<b>Retorno simples</b>	8,7 anos
<b>Retorno capital próprio</b>	3,1 anos
<b>VPL</b>	R\$ 87.656.867,78

---

Fonte: RETScreen Expert

## CAPÍTULO 5

### AValiação dos Impactos do Ciclo de Vida

No presente trabalho foi utilizado o software SimaPro, que é uma ferramenta profissional para analisar e monitorar os dados de desempenho de sustentabilidade de produtos e serviços.

#### 5.1 Seleção e definição dos métodos e das categorias de impacto

Este trabalho utilizará o método RECIPE midpoint (H) – World, que se encontra na base de dados do SimaPro 8.0.3.14. O método ReCiPe foi desenvolvido pela primeira vez em 2008 através da cooperação entre o RIVM, a Universidade Radboud Nijmegen, a Universidade de Leiden e o Pré Consultants (HUIJBREGTS *et al.*, 2016; GOEDKOOP *et al.*, 2008).

Decidiu-se por usar esse método pois ele possui uma abordagem orientada para os problemas (ponto médio), além de possuir categorias de impactos que refletem as emissões causadas pelo ciclo de vida de plantas de geração de energia elétrica. As categorias de impacto de ponto médio escolhidas para o estudo foram: mudanças climáticas, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidante fotoquímico, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação ionizante, ocupação de terras agrícolas, ocupação de áreas urbanas, transformação de terras naturais, depleção de água, depleção de metais e depleção fóssil. Estas categorias foram selecionadas de maneira a atingir o objetivo e o escopo deste estudo.

#### 5.2 Resultados

Nesta etapa do trabalho foram determinados os impactos ambientais de diferentes tecnologias de produção de energia elétrica a partir da radiação solar. Utilizou-se o Eco Indicador RECIPE MIDPOINT (H) V1.10 World, e como ferramenta computacional o software SimaPro 8.0.3.14. A descrição de cada categoria de impacto bem como a avaliação dos resultados será realizada abaixo.

### 5.2.1 Mudanças climáticas

Conforme pode ser visto, na Tabela 44, na categoria mudanças climáticas a tecnologia fotovoltaica policristalina com emissões de 8,71E9 kg de CO<sub>2eq</sub>, se mostrou ambientalmente melhor que as demais tecnologias. O processo de construção da planta e produção dos painéis policristalinos foram responsáveis respectivamente por 80,8% e 25,7% das emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

A tecnologia CSP de prato parabólico com emissão de 1,06E10 kg de CO<sub>2eq</sub>, apresenta o segundo melhor perfil ambiental neste fator de caracterização, sendo que a operação e manutenção da planta foi responsável por 98% das emissões dessa tecnologia.

Em terceiro lugar está a tecnologia fotovoltaica monocristalina com a emissão de 1,08E10 kg de CO<sub>2eq</sub>, sendo que a fase de construção da planta e produção de painéis foram responsáveis respectivamente por 60,9% e 30,1% das emissões de CO<sub>2</sub> dessa tecnologia.

Por último em perfil ambiental nesta categoria, está a tecnologia de concentração solar de calha parabólica que se destaca com a emissão de 4,00E10 kg de CO<sub>2eq</sub>, o que é relativo as suas grandes dimensões, que exigem a maior utilização de materiais que emitem muito CO<sub>2</sub>. A maior parte das emissões, cerca de 77,1 %, se origina na fase de extração e fabricação dos componentes, enquanto na fase de operação e manutenção são emitidos cerca de 22,8% do total de gás carbônico liberado por essa tecnologia.

Tabela 44 – Comparativo de tecnologias: Mudanças climáticas (kg de CO<sub>2eq</sub>)

MUDANÇAS CLIMÁTICAS	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	2,71E+07	4,94E+05	4,46E+05	3,08E+10
Manufatura dos espelhos/painel	2,43E+04	4,24E+09	2,10E+09	1,12E+03
Construção da planta	1,44E+09	6,60E+09	6,60E+09	3,87E+7
Operação e manutenção	9,13E+09	0	0	9,13E+09
Desmantelamento	4,11E+05	1,05E+05	1,05E+05	1,07E+06
TOTAL (kg de CO <sub>2eq</sub> )	1,06E+10	1,08E+10	8,71E+09	4,00E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.2 Depleção de ozônio

Para este fator de caracterização a tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling se destaca em relação as demais tecnologias, por sua baixa emissão, no valor 5,02E00 kg CFC-11 eq. Essa tecnologia utiliza reduzida quantidade de substâncias nocivas ao ozônio estratosférico no seu processo de fabricação, o que justifica o menor

valor das suas emissões em relação as demais tecnologias, sendo que 97,17% das emissões referentes a esse fator de caracterização acontecem durante a fase de operação e manutenção da planta, conforme pode ser visto na Tabela 45.

Em segundo lugar se destacou com menores emissões, a tecnologia fotovoltaica policristalina com 7,90E1 kg CFC-11 eq, com maiores emissões, cerca de 99,25%, referentes ao processo produtivo dos painéis fotovoltaicos, que utilizam muitas substâncias ambientalmente nocivas.

A tecnologia fotovoltaica monocristalina ficou em terceiro lugar com emissão de 1,36E2 kg CFC-11 eq, por utilizar maior quantidade de substâncias químicas e energia no processo de produção dos wafers, células e painéis, emitindo maior quantidade de gases que prejudicam o ozônio estratosférico, principalmente na fase de produção dos painéis, com cerca de 99,6% das emissões nesta categoria.

Por último a tecnologia de calha parabólica com emissões de 1,17E3 kg CFC-11 eq, o que é característica de seu processo de construção mais complexo em relação as demais tecnologias, sendo a fase de extração e fabricação responsável pela emissão de cerca de 99,6% dos gases que destroem o ozônio estratosférico.

Tabela 45 – Comparativo de tecnologias: Depleção de ozônio

DEPLEÇÃO DE OZÔNIO	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,37E-02	4,72E-03	4,27E-03	1,17E+03
Manufatura dos espelhos/painel	1,88E-04	1,36E+02	7,84E+01	4,01E-05
Construção da planta	1,28E-01	5,87E-01	5,87E-01	2,78E-02
Operação e manutenção	4,88E+00	0	0	4,96E+00
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (CFC-11 eq)	5,02E+00	1,36E+02	7,90E+01	1,17E+03

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.3 Acidificação terrestre

Como mostra a Tabela 46, no fator de caracterização de acidificação terrestre a tecnologia que se destaca positivamente é a de prato parabólico acoplado com motor stirling com emissão de 2,01E7 kg SO<sub>2</sub> eq, o que pode ser explicado pela linha de produção dessa tecnologia que não conta com tantos processos químicos em sua constituição, sendo que a emissão dessas substâncias está concentrada na fase de construção da planta com 98,14% das emissões.

A tecnologia fotovoltaica policristalina, destaca se em segundo lugar com emissão de 9,00E7 kg SO<sub>2</sub> eq, devido a utilização de processos químicos na produção de silício

grau solar, bolachas, células, painel solar e construção da planta, sendo este último responsável por 91,2% das emissões.

Em terceiro lugar se encontra a tecnologia fotovoltaica monocristalina com 1,05E8 kg SO<sub>2</sub> eq, que apresenta processos químicos mais complexos que a tecnologia fotovoltaica policristalina, o que eleva as suas emissões, sendo a fase de produção dos painéis e construção da planta responsáveis, respectivamente por 14,3 % e 85,7 % das emissões neste fator de caracterização.

A tecnologia de calha parabólica ficou em quarto lugar no perfil ambiental, com o valor de emissão de 1,26E8 kg SO<sub>2</sub> eq representado pela complexidade de operações realizadas para a instalação da planta solar, sendo a fase de extração e fabricação responsável por 99,6 % das emissões desta tecnologia.

Tabela 46 – Comparativo de tecnologias: Acidificação terrestre

ACIDIFICAÇÃO TERRESTRE	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	3,69E+05	-5,50E+03	-4,98E+03	1,26E+08
Manufatura dos espelhos/painel	1,40E+02	1,51E+07	8,70E+06	8,46E+00
Construção da planta	1,97E+07	9,00E+07	9,00E+07	5,22E+05
Operação e manutenção	2,29E+03	0	0	5,10E+03
Desmantelamento	1,85E+03	4,70E+02	4,72E+02	4,80E+03
TOTAL (kg SO <sub>2</sub> eq)	2,01E+07	1,05E+08	9,87E+07	1,26E+08

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.4 Eutrofização de água doce

Neste fator de caracterização a tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling se destaca com menores emissões da ordem de 1,19E3 kg P<sub>eq</sub>, o que se refere ao processo de extração e fabricação dos materiais e equipamentos constituintes da planta solar, responsáveis por 88,5 % das emissões.

Em segundo lugar a tecnologia fotovoltaica policristalina com emissão de 7,91E5 kg P<sub>eq</sub>, devido aos processos químicos que ocorrem ao longo do processo de produção dos painéis fotovoltaicos, que geram efluentes e substâncias que podem chegar até os cursos de água.

Já a tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissão 1,24E6 kg P<sub>eq</sub>, ficou em terceiro lugar, pela geração de resíduos que podem contaminar águas superficiais ou o solo, principalmente durante a manufatura de painéis monocristalinos.

Por último neste fator de caracterização ficou a tecnologia de calha parabólica com valores de emissão de 8,29E6 kg P<sub>eq</sub>, correspondente aos processos complexos da

produção de seus componentes e geração de resíduos, principalmente durante a fase de extração e fabricação dos componentes da planta, responsável por 99,9 % das emissões, que podem chegar até os cursos de água ou serem arrastados até eles. A comparação entre as diferentes plantas pode ser vista na Tabela 47.

Tabela 47 – Comparativo de tecnologias: Eutrofização de água doce

EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUA DOCE	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,06E+03	7,73E+02	6,98E+02	8,29E+06
Manufatura dos espelhos/painel	1,33E+00	1,24E+06	7,91E+05	5,76E-01
Construção da planta	-2,72E+02	-1,22E+03	-1,22E+03	1,14E+02
Operação e manutenção	4,08E+02	0	0	4,13E+02
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (kg P eq)	1,19E+03	1,24E+06	7,91E+05	8,29E+06

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.5 Eutrofização marinha

Como destaque positivo tem-se a tecnologia de prato parabólico acoplado a motor stirling solar, com valor de emissão de 7,85E5 kg N<sub>eq</sub>, principalmente devido as emissões de nitrogênio durante o processo de fabricação dos equipamentos e construção da planta.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica policristalina com valor de 4,18E6 kg N<sub>eq</sub>, onde se destaca que 84% das emissões são referentes ao processo de construção da planta.

Já a tecnologia fotovoltaica monocristalina, fica em terceiro lugar com emissão de 4,49E6 kg N<sub>eq</sub>, onde 78,2 % das emissões correspondem a fase de construção da planta.

E em quarto lugar, com um perfil ambiental de maiores emissões encontra-se a tecnologia de calha parabólica com valor de 5,92E6 kg N<sub>eq</sub>, referente a fase de extração e fabricação de equipamentos, conforme mostra a Tabela 48.

Tabela 48 – Comparativo de tecnologias: Eutrofização marinha

EUTROFIZAÇÃO MARINHA	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,54E+04	8,30E+02	7,50E+02	5,90E+06
Manufatura dos espelhos/painel	5,87E+00	9,76E+05	6,64E+05	5,28E-01
Construção da planta	7,69E+05	3,51E+06	3,51E+06	2,03E+04
Operação e manutenção	2,60E+02	0	0	4,57E+02
Desmantelamento	1,15E+02	2,94E+01	2,95E+01	2,99E+02
TOTAL (kg N eq)	7,85E+05	4,49E+06	4,18E+06	5,92E+06

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.6 Toxicidade humana

De acordo com a Tabela 49, neste fator a tecnologia fotovoltaica policristalina se destaca com emissão de 1,75E9 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, pela utilização de substâncias tóxicas como o cromo, que apresentam grandes danos à saúde humana, durante a produção de painéis fotovoltaicos.

A tecnologia monocristalina, foi a segunda colocada com valores de 8,08E9 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, também com destaque a utilização de substâncias com alta toxicidade humana, na fase de manufatura dos painéis.

O terceiro lugar em potencial de toxicidade humana ficou com a tecnologia de prato parabólico acoplado a motor stirling solar com valor de 8,15E10 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, devido a utilização de cromo, níquel entre outras substâncias tóxicas na composição, dos materiais usados na fase de operação e manutenção da planta.

A tecnologia de calha parabólica, possui o pior resultado, com emissões de 9,77E10 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>. Devido a grande utilização de substâncias tóxicas como o cromo nos processos de operação e manutenção de equipamentos constituintes da planta de concentração solar, responsáveis por 83,5% das emissões nessa fase.

Tabela 49 – Comparativo de tecnologias: Toxicidade humana

TOXICIDADE HUMANA	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,51E+06	2,12E+06	1,92E+06	1,62E+10
Manufatura dos espelhos/painel	2,12E+04	8,08E+09	1,75E+09	9,08E+02
Construção da planta	-5,58E+05	-2,56E+06	-2,56E+06	1,62E+10
Operação e manutenção	8,15E+10	0	0	8,15E+10
Desmantelamento	5,01E-01	1,28E-01	1,28E-01	1,30E+00
TOTAL (kg 1,4-DB <sub>eq</sub> )	8,15E+10	8,08E+09	1,75E+09	9,77E+10

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.7 Formação de oxidante fotoquímico

Dentre as tecnologias estudadas a de prato parabólico com motor stirling acoplado obteve a menor emissão da ordem de 2,10E7 kg NMVOC, sendo que a fase de construção da planta responde por 98% das emissões, conforme mostra a Tabela 50.

A tecnologia fotovoltaica policristalina, ocupa o segundo lugar com o valor de 1,05E8 kg NMVOC, e a fase de construção da planta é responsável por cerca de 89,5% das emissões destes compostos.



O terceiro maior resultado ficou com a tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissão de 1,13E8 kg NMVOC, destacando também que a fase de construção da planta é responsável pela emissão de 83% de NMVOC.

Já a tecnologia de calha parabólica, teve um resultado muito alto com emissão de 1,62E8 kg NMVOC, sendo a fase de extração e fabricação responsável por 99,6% das emissões.

Tabela 50 – Comparativo de tecnologias: Formação de oxidante fotoquímico

FORMAÇÃO DE OXIDANTE FOTOQUÍMICO	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	3,82E+05	4,37E+03	3,95E+03	1,62E+08
Manufatura dos espelhos/painel	1,30E+02	1,92E+07	1,10E+07	6,96E+00
Construção da planta	9,37E+07	9,37E+07	9,37E+07	5,43E+05
Operação e manutenção	1,32E+05	0	0	1,37E+05
Desmantelamento	3,12E+03	7,95E+02	7,98E+02	8,10E+03
TOTAL (kg NMVOC)	2,10E+07	1,13E+08	1,05E+08	1,62E+08

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.8 Formação de material particulado

Para este estudo a menor emissão de partículas foi correspondente a tecnologia de prato parabólico com motor stirling acoplado com emissão de 6,19E6 kg PM10<sub>eq</sub>, sendo a fase de construção da planta responsável por 98% das emissões, conforme é mostrado na Tabela 51. A tecnologia fotovoltaica policristalina com valor emitido de 3,72E7 kg PM10<sub>eq</sub>, ficou em segundo lugar, com a maior parte das emissões referentes a fase de construção da planta solar, com cerca de 82,2 % do total emitido.

Em terceiro lugar ficou a tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissão de 3,83E7 kg PM10<sub>eq</sub>, sendo a fase de construção da planta responsável por 72,4% das emissões. Já a tecnologia de calha parabólica com emissão de 8,73E7 kg PM10<sub>eq</sub>, ficou em quarto lugar, sendo a fase de extração e fabricação da planta responsável por 99,8 % das emissões.

Tabela 51– Comparativo de tecnologias: Formação de material particulado

FORMAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,15E+05	-2,14E+02	-1,93E+02	8,72E+07
Manufatura dos espelhos/painel	5,03E+01	1,06E+07	5,99E+06	5,81E+00
Construção da planta	6,07E+06	2,77E+07	2,77E+07	1,62E+05
Operação e manutenção	7,86E+02	0	0	2,19E+03
Desmantelamento	8,10E+02	2,07E+02	2,07E+02	2,11E+03
TOTAL (kg PM10 eq)	6,19E+06	3,83E+07	3,37E+07	8,73E+07

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.9 Ecotoxicidade terrestre

Neste fator de caracterização a menor emissão relatada foi da tecnologia de prato parabólico com motor stirling acoplado com o valor emitido de 5,81E2 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, sendo a fase de operação e manutenção responsável por cerca de 91% das emissões.

Em segundo lugar a tecnologia policristalina com emissão de 2,85E5 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, emitida principalmente pela fase de produção de painéis.

Já a tecnologia fotovoltaica monocristalina com valor emitido de 4,89E5 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, ficou em terceiro lugar de maiores emissões na fase de manufatura dos painéis.

Por último a tecnologia de calha parabólica com emissão de 4,22E6 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, com a fase de extração e fabricação da planta responsável pela maior parte das emissões, conforme mostrado na Tabela 52.

Tabela 52 – Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade terrestre

ECOTOXICIDADE TERRESTRE	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	-7,89E+00	5,86E+01	5,29E+01	4,22E+06
Manufatura dos espelhos/painel	2,43E+00	4,89E+05	2,85E+05	5,78E-02
Construção da planta	5,89E+01	2,57E+02	2,57E+02	-1,94E+01
Operação e manutenção	5,28E+02	0	0,00E+00	5,33E+02
Desmantelamento	2,22E-04	5,65E-05	5,68E-05	5,76E-04
TOTAL (kg 1,4-DB eq)	5,81E+02	4,89E+05	2,85E+05	4,22E+06

Fonte: SIMAPRO

## 5.2.10 Ecotoxicidade água doce

Neste fator de caracterização destaca-se a tecnologia fotovoltaica policristalina com emissão de 1,80E8 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, sendo a fase de manufatura dos painéis responsável pela maior parte dessas emissões.

A tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissões de 1,40E9 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, referentes também a fase de produção dos painéis, ficou em segundo lugar.

Em terceiro lugar a tecnologia de prato parabólico que obteve o valor de emissão de 1,69E10 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, referente principalmente a fase de operação e manutenção da planta.

Por último a tecnologia de calha parabólica com valor emitido de 1,87E10 kg 1,4-DB<sub>eq</sub>, sendo a fase de operação e manutenção, responsável por praticamente toda a emissão neste fator de caracterização, de acordo com a Tabela 53.

Tabela 53 – Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade de água doce

ECOTOXICIDADE DE ÁGUA DOCE	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	3,92E+04	1,75E+05	1,58E+05	1,74E+09
Manufatura dos espelhos/painel	8,96E+01	1,40E+09	1,80E+08	2,37E+01
Construção da planta	-1,23E+05	-5,44E+05	-5,44E+05	1,15E+04
Operação e manutenção	1,69E+10	0	0	1,69E+10
Desmantelamento	6,97E-05	1,78E-05	1,78E-05	1,81E-04
TOTAL (kg 1,4-DB eq)	1,69E+10	1,40E+09	1,80E+08	1,87E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.11 Ecotoxicidade marinha

Na Tabela 54 observa-se que a tecnologia que obteve menores emissões neste fator de caracterização foi a fotovoltaica policristalina com o valor de 1,56E8 kg 1,4-DB eq, referente principalmente a fase de produção de painéis.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissão de 1,15E9 kg 1,4-DB eq, com a fase de manufatura dos painéis responsável por praticamente toda a emissão nesse fator de caracterização.

A tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling com valor emitido de 1,35E10 kg 1,4-DB eq, ficou em terceiro lugar, com a fase de operação e manutenção responsável pela maior parte das emissões.

Já a tecnologia de calha parabólica emitiu o valor de 1,51E10 kg 1,4-DB eq, sendo que a fase de operação e manutenção foi a maior responsável por emissões neste fator de caracterização.

Tabela 54 – Comparativo de tecnologias: Ecotoxicidade marinha

ECOTOXICIDADE MARINHA	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	3,59E+04	1,45E+05	1,31E+05	1,56E+09
Manufatura dos espelhos/painel	8,91E+01	1,15E+09	1,56E+08	1,17E+02
Construção da planta	-1,21E+05	-5,50E+05	-5,50E+05	1,08E+04
Operação e manutenção	1,35E+10	0	0	1,35E+10
Desmantelamento	2,08E-05	5,30E-06	5,23E-06	5,40E-05
TOTAL (kg 1,4-DB eq)	1,35E+10	1,15E+09	1,56E+08	1,51E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.12 Radiação ionizante

Observando a Tabela 55, neste fator de caracterização a tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling apresentou emissões de -8,62E3 kBq U235 eq, sendo ambientalmente melhor em relação as demais tecnologias.

Em segundo lugar a tecnologia fotovoltaica policristalina com valor emitido de 3,21E7 kBq U235 eq, principalmente na fase de manufatura dos painéis.

Seguido pela tecnologia monocristalina com emissão de 5,66E7 kBq U235 eq, com a maior emissão referente a fase de manufatura dos painéis.

Em quarto lugar a tecnologia de calha parabólica com emissão de 4,63E8 kBq U235 eq, com a maior parte das emissões na fase de extração e fabricação.

Tabela 55 – Comparativo de tecnologias: Radiação ionizante

RADIAÇÃO IONIZANTE	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	-7,02E+03	1,10E+04	9,92E+03	4,63E+08
Manufatura dos espelhos/painel	-8,22E+01	5,66E+07	3,21E+07	8,52E+00
Construção da planta	-1,60E+03	-9,35E+03	-9,35E+03	-4,69E+04
Operação e manutenção	7,72E+01	0	0	8,55E+02
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (kBq U235 eq)	-8,62E+03	5,66E+07	3,21E+07	4,63E+08

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.13 Ocupação de terras agrícolas

A tecnologia de prato parabólico apresentou um melhor perfil ambiental com valor de perdas de 5,64E4 m<sup>2</sup>a, com a maior parte dos danos referentes a fase de extração e fabricação da planta.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica policristalina, com o valor de 2,19E9 m<sup>2</sup>a, referente ao processo de manufatura dos painéis.

A planta fotovoltaica monocristalina, ficou em terceiro lugar, com o valor de 3,77E9 m<sup>2</sup>a, com a maior parte dos danos referentes ao processo de manufatura dos painéis.

Já a tecnologia de calha parabólica com valor emitido de 3,72E10 m<sup>2</sup>a, ficou em quarto lugar, sendo que a fase de extração e fabricação foi responsável pela maior parte dos danos causados, conforme a Tabela 56.

Tabela 56 – Comparativo de tecnologias: Ocupação de terras agrícolas

OCUPAÇÃO DE TERRAS AGRÍCOLAS	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	5,64E+04	2,64E+04	2,39E+04	3,27E+10
Manufatura dos espelhos/painel	5,48E+02	3,77E+09	2,19E+09	4,42E+02
Construção da planta	-2,43E+03	5,76E+02	5,76E+02	6,35E+04
Operação e manutenção	1,79E+03	0	0	1,96E+03
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (m <sup>2</sup> a)	5,64E+04	3,77E+09	2,19E+09	3,27E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.14 Ocupação de áreas urbanas

A tecnologia de prato parabólico apresentou um melhor perfil ambiental com valor de perdas de 5,01E3 m<sup>2</sup>a, sendo que a fase de extração e fabricação da planta foi responsável pela maior parte das perdas anuais.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica policristalina com o valor de 6,79E8 m<sup>2</sup>a, na qual a fase de produção dos painéis lidera nos valores de perdas anuais de áreas urbanas.

Em terceiro lugar ficou a tecnologia fotovoltaica monocristalina com valor de 1,18E9 m<sup>2</sup>a, com os maiores valores de perdas na fase de manufatura dos painéis solares, conforme Tabela 57.

Por último a tecnologia de calha parabólica com emissões da ordem de 1,01E10 m<sup>2</sup>a, onde a fase de construção da planta é responsável pela maior ocupação de áreas urbanas.

Tabela 57 – Comparativo de tecnologias: Ocupação de áreas urbanas

OCUPAÇÃO DE ÁREAS URBANAS	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	9,45E+03	4,84E+03	4,38E+03	1,01E+10
Manufatura dos espelhos/painel	1,17E+02	1,18E+09	6,79E+08	6,98E+01
Construção da planta	-4,69E+03	-1,96E+04	-1,96E+04	8,58E+03
Operação e manutenção	1,32E+02	0	0	2,21E+02
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (m <sup>2</sup> a)	5,01E+03	1,18E+09	6,79E+08	1,01E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.15 Transformação de terra natural

Conforme a Tabela 58, a tecnologia de prato parabólico apresentou um melhor perfil ambiental com valor de perdas de 9,73E01 m<sup>2</sup>a, onde a maior parte das perdas, cerca de 53%, se relaciona a fase de construção da planta.

Em segundo lugar ficou a tecnologia fotovoltaica policristalina com o valor de 3,29E6 m<sup>2</sup>a, sendo que a maior parte desse valor ficou na fase de produção dos painéis.

A tecnologia fotovoltaica monocristalina, ficou em terceiro lugar, com valor de 5,69E6 m<sup>2</sup>a, com o maior valor deste indicador obtido na manufatura dos painéis fotovoltaicos.

Já a tecnologia de calha parabólica obteve um valor emitido de 4,29E7 m<sup>2</sup>a, referente principalmente a fase de construção da planta.

Tabela 58 – Comparativo de tecnologias: Transformação natural da terra

TRANSFORMAÇÃO NATURAL DA TERRA	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	4,33E+01	2,53E+01	2,29E+01	4,29E+07
Manufatura dos espelhos/painel	1,11E+00	5,69E+06	3,29E+06	3,40E-01
Construção da planta	5,16E+01	2,56E+02	2,56E+02	8,03E+01
Operação e manutenção	1,26E+00	0	0	2,70E+00
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (m <sup>2</sup> a)	9,73E+01	5,69E+06	3,29E+06	4,29E+07

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.16 Depleção de água

A tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling apresentou o melhor perfil ambiental neste estudo com valor consumido de 1,58E07 m<sup>3</sup>, sendo a fase de construção da planta responsável por 76,9% do consumo de água desta tecnologia.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica policristalina com consumo de 4,07E9 m<sup>3</sup>, referente principalmente a fase de produção dos painéis.

Em terceiro lugar ficou a tecnologia fotovoltaica monocristalina com consumo de 8,06E9 m<sup>3</sup>, com a fase de maior consumo de água, a manufatura de painéis.

Por último a tecnologia de calha parabólica com consumo de 5,74E10 m<sup>3</sup> de água, sendo que a extração e fabricação é a fase de maior consumo da tecnologia, como mostra a Tabela 59.

Tabela 59 – Comparativo de tecnologias: Depleção de água

DEPLEÇÃO DE ÁGUA	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	2,90E+06	1,15E+06	1,04E+06	5,74E+10
Manufatura dos espelhos/painel	9,14E+03	7,98E+09	3,99E+09	1,55E+04
Construção da planta	1,21E+07	7,95E+07	7,95E+07	2,32E+06
Operação e manutenção	7,30E+05	2,15E+02	2,31E+02	2,61E+05
Desmantelamento	6,02E-01	1,53E-01	1,54E-01	1,56E+00
TOTAL (m <sup>3</sup> )	1,58E+07	8,06E+09	4,07E+09	5,74E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.17 Depleção de metais

A tecnologia de prato parabólico apresentou melhor desempenho com valor de 3,02E6 kg Fe eq, sendo a fase de operação e manutenção responsável pela emissão de 61% desse fator de caracterização.

Seguido pela tecnologia fotovoltaica policristalina com valor de 1,16E9 kg Fe<sub>eq</sub>, emitido principalmente na fase de produção dos painéis.

Em terceiro lugar ficou a tecnologia fotovoltaica monocristalina com valor de 1,91E9 kg Fe eq, onde a maior quantidade de emissões ocorreu durante as etapas de manufatura dos painéis fotovoltaicos

Por último a tecnologia de calha parabólica com emissão de 1,51E10 kg Fe<sub>eq</sub>, emitido principalmente durante a fase extração e fabricação da planta, como pode ser visto na Tabela 60.

Tabela 60 – Comparativo de tecnologias: Depleção de metais

DEPLEÇÃO DE METAIS	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,17E+06	4,53E+05	4,10E+05	1,51E+10
Manufatura dos espelhos/painel	2,32E+03	1,91E+09	1,16E+09	8,71E+02
Construção da planta	5,46E+03	1,91E+05	1,91E+05	8,05E+05
Operação e manutenção	1,84E+06	0	0	1,84E+06
Desmantelamento	0	0	0	0
TOTAL (kg Fe eq)	3,02E+06	1,91E+09	1,16E+09	1,51E+10

Fonte: SIMAPRO

### 5.2.18 Depleção fóssil

Neste fator a tecnologia de prato parabólico obteve o valor de 6,39E9 kg oil<sub>eq</sub>, emitido principalmente na fase de construção da planta, chegando a 97,7% do total.

Seguido pela de calha parabólica que apresentou o segundo melhor perfil ambiental, com valor de 6,44E9 kg oil<sub>eq</sub>, sendo 97,2% emitido na fase de extração e fabricação da planta.

Em terceiro lugar tem-se a tecnologia fotovoltaica monocristalina com emissão de 3,18E10 kg oil<sub>eq</sub>, sendo que a fase de construção da planta é responsável por 97,4% das emissões.

Seguido pelas tecnologia fotovoltaica policristalina com emissão no valor de 8,45E10 kg oil<sub>eq</sub>, onde cerca de 63,4% das emissões é referente a produção de painéis fotovoltaicos, conforme mostrado na Tabela 61.

Tabela 61 – Comparativo de tecnologias: Depleção fóssil

DEPLEÇÃO FÓSSIL	CSP prato parabólico	Fotovoltaico Monocristalino	Fotovoltaico Policristalino	CSP Calha parabólica
Extração e fabricação	1,58E+08	1,48E+06	1,34E+06	6,27E+09
Manufatura dos espelhos/painel	2,32E+03	8,31E+08	5,35E+10	2,00E+02
Construção da planta	6,77E+09	3,09E+10	3,09E+10	1,77E+08
Operação e manutenção	1,15E+06	0	0	1,13E+06
Desmantelamento	8,84E+01	2,25E+01	2,26E+01	2,30E+02
TOTAL (kg oil eq)	6,39E+09	3,18E+10	8,45E+10	6,44E+09

Fonte: SIMAPRO

### 5.3 Comparação geral entre as plantas solares

O território brasileiro possui vantagens para o estabelecimento de uma indústria solar forte nacionalmente (EPE, 2012).

O comparativo das tecnologias solares realizado no Software Simapro é mostrado na Figura 29. A tecnologia de concentração solar de prato parabólico acoplado a motor stirling apresentou menores valores de emissão em 14 categorias de impacto, sendo elas:

- Fase de extração e fabricação: Depleção de ozônio, ecotoxicidade terrestre, radiação ionizante;
- Fase de manufatura da parábola de espelhos: Acidificação terrestre, eutrofização marinha, formação de oxidante fotoquímico, formação de material particulado, transformação de terras naturais e depleção de metais;
- Fase de construção da planta: Eutrofização de água doce, ocupação de terras agrícolas e ocupação de áreas urbanas;
- Fase de desmantelamento: Depleção de água e depleção fóssil.

Para aplicação na cidade de Poços de Caldas-MG, de acordo com a simulação realizada no Software RETScreen Expert, esta tecnologia apresentou para as condições simuladas uma produção energética anual de 2.190 MWh, e um custo de geração de energia de R\$ 1,25/kWh, correspondente a um perfil ambiental favorável e confirmando a viabilidade econômica da sua instalação nas condições abordadas neste trabalho.

No trabalho de Satiro e Coutinho (2012), os autores reportaram que a tecnologia de prato parabólico apresenta um baixo impacto ambiental sendo que os riscos ambientais seriam relativos ao consumo de água para resfriamento e um possível vazamento de óleo lubrificante, em virtude deste tipo de coletor ser composto por materiais facilmente reciclados, principalmente aço, concreto e cobre, diferente dos módulos fotovoltaicos e de calhas parabólicas compostos de materiais caros e altamente poluentes.

No estudo realizado por Cucumo *et al.* (2012), foi feita uma ACV na Itália, comparando a tecnologia de prato parabólico acoplado a motor stirling solar (PPMS) e a tecnologia fotovoltaica (FV), com uma vida útil de 25 anos, usando o Eco-indicador 99 *endpoint*, com uma abordagem hierárquica. Os resultados para a PPMS na categoria saúde humana foi de 96,03 pt, contra 137 pt da planta FV; na categoria qualidade do ecossistema os resultados foram 29,65 pt e 37 pt, para PPMS e FV; já para a categoria Recursos os



resultado para a tecnologia PPMS foi de 116 pt, enquanto para a tecnologia FV o valor obtido foi de 680 pt. O tempo de retorno para a tecnologia PPMS é de 11 anos para o cenário sem reuso/reciclagem, enquanto que para o cenário com reciclagem o tempo de retorno caiu para 3,78 anos; já para a tecnologia FV no primeiro cenário o tempo de retorno ficou em 12,85 anos, enquanto para o cenário de reciclagem o tempo de retorno ficou em 11,83 anos, o que aponta para a conclusão de que a tecnologia de prato parabólico, em comparação com a tecnologia fotovoltaica, apresenta condições mais favoráveis para fabricação e instalação na região italiana.

A tecnologia fotovoltaica policristalina apresentou para a instalação na cidade, as menores emissões em 4 categorias:

- Mudanças climáticas na fase de desmantelamento;
- Toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e ecotoxicidade marinha na fase de construção da planta;

Na simulação do software RETScreen Expert constatou-se sua viabilidade econômica, com um custo de geração de energia de R\$ 0,35/kWh, 72% menor em relação ao custo de geração da tecnologia de prato parabólico, e uma produção energética anual de 1.622 MWh.

A tecnologia fotovoltaica monocristalina não apresentou melhores resultados gerais, em relação as demais tecnologias, no entanto, em relação a tecnologia CSP de calhas parabólicas apresentou melhores resultados em 17 categorias de impactos sendo elas:

- Mudanças climáticas, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de oxidante fotoquímico, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, radiação ionizante, ocupação de terras agrícolas, ocupação de áreas urbanas, transformação de terras naturais, depleção de água e depleção de metais.

Esta tecnologia também apresentou viabilidade econômica com um custo de geração de energia de R\$ 0,35/kWh, e uma produção anual de 1.622 MWh, apresentando

os mesmos resultados econômicos da tecnologia fotovoltaica policristalina, porém com maiores impactos ambientais .

A tecnologia de concentração solar de calha parabólica não apresentou melhores resultados nas categorias de impacto analisadas, no entanto na categoria depleção fóssil apresentou menores emissões em relação as tecnologias fotovoltaicas.

A tecnologia CSP de calhas parabólicas apresentou viabilidade econômica com um custo de geração de energia de R\$ 1,96/kWh, 56,8 % superior ao custo da tecnologia CSP de prato parabólico, e uma produção de energia elétrica anual de 1.402 MWh, no entanto, os resultados desta tecnologia não se mostraram competitivos com os demonstrados pela tecnologia de prato parabólico e pelas tecnologias fotovoltaicas.

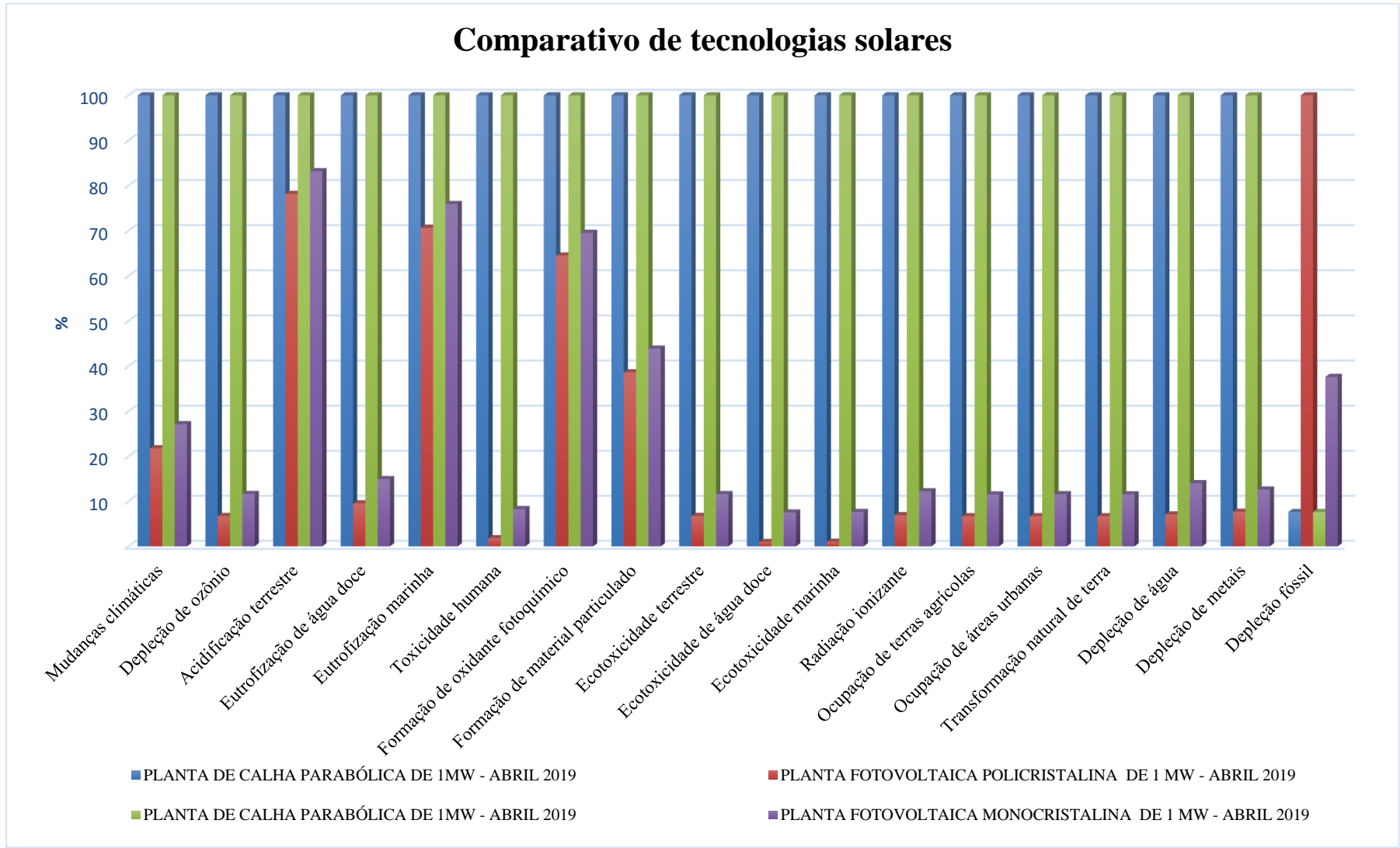


Figura 29 – Comparativo de tecnologias: Método RECIPE Midpoint (H) World - 18 categorias de impacto  
 Fonte: SIMAPRO

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas, conclui-se que não existe apenas uma tecnologia que apresenta um melhor desempenho em todas as categorias de impacto. Havendo assim a necessidade de comparar as diferentes categorias de impacto, devido as vantagens e desvantagens apresentadas por cada sistema em estudo.

A tecnologia de concentração solar de prato parabólico apresentou um melhor perfil ambiental e econômico dentre as tecnologias estudadas, apresentando menores valores de emissão em 14 das 18 categorias de impactos. Porém, essa tecnologia possui status de demonstração, não sendo comercializada ainda para médias ou grandes instalações energéticas.

A tecnologia fotovoltaica policristalina apresentou menores emissões em 4 categorias de impactos ambientais, apresentando o segundo melhor perfil ambiental e econômico para a instalação na cidade. Nacionalmente esta tecnologia se encontra bem difundida, com muitas instalações em funcionamento.

A tecnologia fotovoltaica monocristalina apresentou em relação a tecnologia CSP de calhas parabólicas menores emissões em 17 categorias avaliadas, dessa forma, essa tecnologia apresentou o terceiro melhor perfil ambiental e econômico para as condições abordadas neste estudo.

O quarto perfil ambiental e econômico mais favorável foi ocupado pela tecnologia de concentração solar de calhas parabólicas, que apresentou os maiores valores de emissões comparado as outras tecnologias, em 17 categorias de impactos.

Conclui-se que para as condições adotadas neste estudo a planta energética que apresentou o melhor perfil ambiental e econômico para instalação e operação na cidade de Poços de Caldas-MG, foi a que utilizou a tecnologia de concentração solar de prato parabólico, no entanto, como essa tecnologia encontra-se em desenvolvimento e ainda não possui status comercial, a sua instalação e operação a curto prazo em território nacional enfrentaria grandes problemas.

Sendo assim a tecnologia fotovoltaica policristalina, que se encontra bem difundida nacionalmente, representando cerca de 85% do mercado consumidor mundial, é tecnologia solar que apresenta o melhor perfil ambiental e econômico para a instalação

na cidade de Poços de Caldas-MG ou regiões com condições similares as abordadas neste estudo.

## **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Essa dissertação buscou demonstrar dentre as tecnologias de produção de energia elétrica, que utilizam a radiação solar como fonte renovável de energia, qual tipo apresenta um perfil ambiental mais favorável para instalação nas condições da região sul de Minas Gerais, especificamente para a cidade de Poços de Caldas-MG.

Foi possível demonstrar que a tecnologia de prato parabólico acoplado com motor stirling solar, tem grande potencial para aplicação no Brasil, sendo necessário maiores pesquisas e incentivos no desenvolvimento, disseminação, instalação e uso dessa tecnologia em território nacional. Já a tecnologia fotovoltaica policristalina devido ao seu status comercial, suas características operacionais e a sua popularidade, atualmente é a que apresenta condições mais favoráveis ambiental e economicamente para a instalação na cidade.

Em relação aos inventários brasileiros utilizados, ainda são necessárias muitas informações referentes a materiais, substâncias, equipamentos entre outros, para que seja possível alcançar os objetivos propostos com informações mais precisas, assertivas e confiáveis. No geral, a obtenção de informações a respeito dos inventários das tecnologias abordadas no estudo demandou muito tempo e muitas buscas em diferentes bases de dados, demonstrando assim as dificuldades para a elaboração de um estudo de ACV e reforçando a necessidade de ampliação das bases de dados públicas para melhorar os resultados de pesquisas nacionais e internacionais.

Em relação as plantas energéticas que utilizam diferentes tecnologias de aproveitamento de energia solar, para que as suas eficiências sejam equiparáveis com as tecnologias de produção energética convencionais, no sul de Minas Gerais e em todo o Brasil, são necessários maiores investimentos do governo em pesquisas e desenvolvimento de tecnologia solar nacional, que atenda as condições de irradiação das regiões brasileiras, além do aumento nos incentivos nacionais para a instalação de fontes renováveis, visando reduzir os impactos ambientais causados pelo grande consumo de fontes energéticas fósseis e pela emissão de GEE.

Recomenda-se algumas linhas de ação para a continuação deste trabalho:

- Aprimorar os inventários com a utilização de dados brasileiros mais recentes ou que se aproximem mais da realidade brasileira atual;
- Aprofundar as pesquisas sobre tecnologias que utilizam a concentração solar térmica para a produção de energia elétrica;
- Aplicar o procedimento de ACV para outras plantas energéticas que utilizam a fonte solar com hibridização de diferentes fontes renováveis, para verificar sua viabilidade;
- Realizar a simulação das plantas abordadas neste estudo em diferentes localidades brasileiras, para comparar os seus resultados;
- Realizar um estudo sobre os possíveis subsídios nacionais que deveriam ser aplicados nas plantas solares fotovoltaicas ou de concentração solar térmica para a viabilização da sua implantação em diferentes regiões brasileiras;
- Simular a viabilidade financeira em diferentes softwares, para avaliar o lucro obtido com a construção e operação de plantas solares, em comparação a diferentes tipos de investimentos financeiros existentes ou em comparação a diferentes plantas de geração de energia elétrica;

## REFERÊNCIAS

- ABENGOA SOLAR. 2018. Solar plants. Our plants – Spain. Disponível em: [http://www.abengoasolar.com/web/en/plantas\\_solares/plantas\\_propias/espana/#seccion\\_3](http://www.abengoasolar.com/web/en/plantas_solares/plantas_propias/espana/#seccion_3) Acesso em 25 de set. de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Infográfico ABSOLAR. Disponível em: <<http://absolar.org.br/infografico-absolar-.html>> Acesso em 20 de mar. de 2019.
- AIRLIGHT SA. Disponível em: <<http://www.airlight.biz/>> Acesso em 20 de mar. de 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura – NBR ISO 14040. ABNT: Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações - NBR ISO 14044. ABNT: Rio de Janeiro, 2009.
- ADRIANO, G. L. M. Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- ARAÚJO JUNIOR, P. S. Análise comparativa do balanço energético da energia solar (fotovoltaica e termossolar). Bahia Anál. Dados, v. 27, n. 1, p. 6-26, jan-jun 2017.
- BAITZ, M.; ALBRECHT, S.; BRAUNER, E.; BROADBENT, C.; CASTELLAN, G.; CONRATH, P.; FAVA, J.; FINKBEINER, M.; FISCHER, M.; FULLANA, I. P.; KRINKE, S.; LEROY, C.; LOEBEL, O.; MCKEOWN, P.; MERSIOWSKY, I.; MOGINGER, B.; PFAADT, M.; REBITZER, G.; ROTHER, E.; RUHLAND, K.; SCHANSSEMA, A.; TIKANA, L. LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony? Journal Life Cycle Assess, v. 18, n. 1, p. 5-13, 2013.
- BARROS, R. W. Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis. 2005. 143 f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2017: ANO BASE 2016. Empresa de pesquisa energética (EPE). Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- BAUER, P. E. Metodologia e Procedimentos para a Consideração Ambiental no projeto de Processos Químicos. 2003. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2003.
- BEZERRA, J. L.; LIRA, M. A. T.; SILVA, E. A. Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. Congresso Brasileiro de Energia Solar, v. 7, 2018.

BEZERRA, P. H. S. Energia solar concentrada: simulação do desempenho de heliostatos de pequeno porte. 2017. 208 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2017.

BORGES, F. J. Inventário do Ciclo de Vida do PVC produzido no Brasil. 2004. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

BRAVO, Y.; CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; MONNÉ, C.; ALONSO, S.; MORENO, F.; MUÑOZ, M. Dish-Stirling technology for power generation. Environmental evaluation. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Dubrovnik conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Dubrovnik, Croacia, Set. 25-29, 2011.

BRAVO, Y.; CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; MONNÉ, C.; ALONSO, S.; MORENO, F.; MUÑOZ, M. Environmental evaluation of dish-Stirling technology for power generation. Solar Energy. v. 86, p. 2811-2825, 2012.

BRAVO, Y.; MONNÉ, C.; BERNAL, N.; CARVALHO, M.; MORENO, F.; MUÑOZ, M. Hybridization of Solar Dish-Stirling Technology: Analysis and Design. Environmental Progress & Sustainable Energy. v. 33, n. 4, p. 1459-1466, 2014.

PROLO, C. O que falta para o acordo de Paris funcionar? Proclima Cetesb. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/2018/11/14/o-que-falta-para-o-acordo-de-paris-funcionar/>> Acesso em Jan. 2019.

CAVALLARO, F.; L. CIRAIOLO. A Life Cycle Assessment (LCA) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System. ISEIMA. First international Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area. Corté-Ajaccio. V. 1, p.260–265, 2006.

CCEE 2018. 27º Leilão de Energia Nova contrata projetos renováveis com menores preços da história. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/noticias-opiniao/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE\\_640125&afrLoop=360498010524875&\\_adf.ctrlstate=h62jmijzk\\_1&\\_afrLoop=307594429386807#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE\\_640125%26\\_afrLoop%3D307594429386807%26afrLoop%3D360498010524875%26\\_adf.ctrl-state%3Dh62jmijzk\\_5](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE_640125&afrLoop=360498010524875&_adf.ctrlstate=h62jmijzk_1&_afrLoop=307594429386807#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE_640125%26_afrLoop%3D307594429386807%26afrLoop%3D360498010524875%26_adf.ctrl-state%3Dh62jmijzk_5)> Acesso em: set. 2018

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO BRITO (CRESESB). Potencial solar – SunData v 3.0. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>> Acesso em maio 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO BRITO (CRESESB). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro. Março de 2014.



CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. Diálogos Setoriais Brasil e União Européia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia-IBICT, Brasília: 2015.

CODEMGE. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais. Disponível em:< <http://www.codemge.com.br/atuacao/turismo/turismo-de-lazer/palace-hotel-pocos-de-caldas/>> Acesso em mar. 2019.

COLTRO, L.; GARCIA, E.E.C.; QUEIROZ, G.C. Life Cycle Inventory for Electric Energy System in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 8, n. 5, p. 290-296, 2003.

COMITÊ DE POLÍTICA MONETÁRIA (COPOM). Histórico das taxas de juros. Disponível em:< <https://www.bcb.gov.br/controlainflacao/historicotaxasjuros>> Acesso jan. 2019.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG). Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2012.

CONSTANTINO, G.; FREITAS, M.; FIDELIS, N.; PEREIRA, M.G. Adoption of photovoltaic systems along a sure path: A life-cycle assessment (LCA) study applied to the analysis of GHG emission impacts. *Energies*. v. 11, p. 2806, 2018.

CORONA B.; SAN MIGUEL G.; CERRAJERO E. Life cycle assessment of concentrated solar power (CSP) and the influence of hybridising with natural gas. *Int J Life Cycle Assess*. v. 19, p. 1264-1275, mar. 2014.

CUCUMO, M.; FERRARO, V.; MARINELLI, V. CUCUMO, S.; CUCUMO, D. LCA Analysis of a solar concentration system for the micro CHP and comparison with a PV plant. *Int J Heat Technol*. v. 30, p. 63-68, 2012.

DENTELLO, R. O. Estudo de geração de energia elétrica em motores Stirling acionados por biogás e/ou energia solar. 2017. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2017.

DESIDERI U.; ZEPPARELLI F.; MORETTINI V.; GARRONI E. Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: technical and environmental evaluations. *Applied Energy*. v. 102, p. 765-784, 2013.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ELETRICIDADE (DME). Tarifas e taxas. Disponível em < <http://www.dme-pc.com.br/atendimento/tarifas>> Acesso jan. 2019.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal process. 2 ed. EUA: John Wiley e Sons Inc., 1980.

ECOINVENT CENTRE - Ecoinvent data and reports v 2.2. D'ubendorf, Switzerland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/>> Acesso em out de 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em ago. de 2018.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. Existem projetos heliotérmicos no Brasil?. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>> Acesso em maio 2019.

FERREIRA, J. V. R. Análise do ciclo de vida dos produtos. 2004, 80 p. Gestão Ambiental. Lisboa. Instituto Politécnico de Viseu, Lisboa, 2004.

FRISCHKNECHT R.; ITTEN R.; SINHA P.; WILD-SCHOLTEN M.; ZHANG J.; FTHENAKIS V.; KIM H. C.; RAUGEI M., STUCKI M. 2015. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-04:2015.

FTHENAKIS, VASILIS, ET AL. 2015. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. International Energy Agency (IEA). p. 86. 2015.

G1 NATUREZA. COP 24 elabora regras para Acordo de Paris sob críticas de falta de ambição e impasse sobre recursos. Disponível em:<<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2018/12/16/cop-24-elabora-regras-para-acordo-de-paris-sob-criticas-de-falta-de-ambicao-e-impasse-sobre-recursos.ghtml>> Acesso em jan. 2019.

GALDIANO, G. D. P. Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 2006.

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

GLOBAL MARKET OUTLOOK (GMO) FOR SOLAR POWER / 2017 – 2021. Intersolar Europe, Global Solar Council (GSC). 2016.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A. J.; ZELM, R. ReCiPe 2008. Holanda: PRé Consultants, University of Leiden, Radboud University (CML) e National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 2008.

GONÇALVES, V. C. de S. O caminho para a viabilidade económica e ambiental da energia fotovoltaica. 2014. 100p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de ciências e tecnologia (FCT), Universidade Nova de Lisboa (UNL), Lisboa, 2014.

GUINÉE, J. HEIJUNGS, R.; HUPPES, G., ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. (2011). Life cycle assessment: Past, presente and future. *Environmental Science e Technology*, v. 45, n.1, p. 90-96, 2011.

HABERLIN, H. *Photovoltaics system design and practice*. Translated by Herbert Eppel. Reino Unido: John Willey e Sons Ltd., 2012.

HUIJBREGTS, M. A. J.; et al. ReCIPE 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. National Institute for public health and the environment. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Brasil em síntese. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/pocos-de-caldas/panorama> > Acesso jan. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 2010. *Technology roadmap: Concentrating solar power*. Paris, França, 2010.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). 2017. *Renewable Power Generation Costs in 2017*. Abu Dhabi. Disponível em: <[http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/IRENA\\_2017\\_Power\\_Costs\\_2018.pdf](http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf)> Acesso em Maio de 2019.

KASSMAYER, K.; FRAXE NETO, H. J. A Entrada em Vigor do Acordo de Paris: o que muda para o Brasil? Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Novembro/ 2016 (Texto para Discussão nº 215). Disponível em: [www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos). Acesso em 26 de julho de 2018.

KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K. A review of photovoltaic system size optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 22, p. 454-465, mar. 2013.

KUENLIN, A.; AUGSBURGER, G.; GERBER, L.; MARÉCHAL, F. Life cycle assessment and environomic optimization of concentrating solar thermal power plants. In: *26th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. v. 26, 2013.

KULAY, L. A. *Uso da Análise de ciclo de vida para a comparação do desempenho ambiental das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados*. 2004. 313 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, Escola politécnica, São Paulo, SP, 2004.

LAMPKOWSKI, M.; SERAPHIM, O. J. Utilização do software Tonatiuh para simulação de usinas de energia solar concentrada (CSP) baseadas em tecnologia de torre central e sua aplicação no agronegócio. In: *Congresso brasileiro de agroinformática*, v.10, 2015.

LARA, S. S. *A abordagem da avaliação do ciclo de vida aplicados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede no município de Cacoal e Pimenta Bueno-RO*. 2018. 75

f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Produção), Fundação Universidade Federal de Rondônia, Cacoal, RO, 2018.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. Concentrating solar power technology. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited, 2012.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic science and engineering. Inglaterra: John Willey e Sons Ltd., 2003.

MAHLANGU N.; TROPIL G. A. Life cycle analysis of external costs of a parabolic trough Concentrated Solar Power plant. Journal of Cleaner Production. v. 195, p. 32-43, 2018.

MANSIRI, K.; SUKCHAI, S.; SIRISAMPHANWONG, C. Investigations to conduct a study about possibilities to use small scale solar dish Stirling engine system in Thailand. Energy Procedia, v. 56, n. C, p. 367–377, 2014.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications. Reino Unido: Elsevier Science Ltd., 2003.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: 2014.

MING, L.; TAY, N. H. S.; BELL, S.; BELUSKO, M.; JACOB, R.; WILL, G.; SAMAN, W.; BRUNO, F. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. v. 53, p. 1411-1432, 2016.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. S.; SILVA, T. C. Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos. Revista brasileira de energias renováveis. v. 8, n. 1, p. 364-383, 2019.

NEPVEU, F.; FERRIERE, A.; BATAILLE F. Thermal model of a dish/stirling systems. Solar Energy. v. 83 p.81-89, jan. 2009.

OLIVEIRA, A. S; RODRIGUES, T. O.; LUZ, S. M. Avaliação do ciclo de vida de um módulo fotovoltaico: efeitos da Logística e da matriz energética da produção na china e no Brasil. Congresso Brasileiro sobre gestão do ciclo de vida. v. 6, p. 301-306, 2018.

ORÓ E., GIL A.; GRACIA, A.; BOER D.; CABEZA L. F. Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 44, p. 166-173, fev. 2012.

PAIVA, M. L. Avaliação da aplicabilidade de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma granja de aves no estado do Mato Grosso e seus impactos ambientais. 2018. 82f. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia ambiental). Universidade tecnológica federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR, 2018.

PEQUENAS EMPRESAS GRANDES NEGÓCIOS (PEGN). Sistema de energia solar inédito pode ser instalado em Pernambuco em 2017. Disponível em:<

<https://revistapegn.globo.com/Startups/noticia/2016/09/sistema-de-energia-solar-inedito-pode-ser-instalado-em-pernambuco-em-2017.html>> Acesso em jan. 2019.

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 Reviews*. v. 19, p. 255-274, 2013.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. Plant design and economics for chemical engineers. 4 ed. McGraw Hill Chemical Engineering Series. 923 p. 1991.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M. da; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. *Revista Gestão Industrial*. v. 8, n. 3, 2012.

PINTO, M. A. Balanço e payback time de carbono de um sistema fotovoltaico. Planta solar Jaíba. 2016. 101 f. (Trabalho de conclusão de curso). Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

PRADO, M. R. Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizadas em uma indústria de refrigerantes do Brasil. 2007. 188 f. Tese (Doutorado). Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

RADAR SOCIOAMBIENTAL. COP 24 Mudanças climáticas. n. 26. Disponível em: <[http://www.bricspolicycenter.org/publicacoes/\\_radar/radar-socioambiental/](http://www.bricspolicycenter.org/publicacoes/_radar/radar-socioambiental/)> Acesso em jan. 2019.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, D.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHMIDT, W. P.; SUH, S.; WEIDEMA, B. P.; PENNINGTON, D. W. Part 1: Framework, goal and scope definition inventory analysis and applications. *Environment International*, v. 30, p. 701-720, 2004.

RENEWABLE ENERGY POLICY FOR THE 21ST CENTURY (REN21) Renewables 2018 – Global status Report. Disponível em: <[http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter\\_01/chapter\\_01/](http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/)> Acesso em set. 2018.

RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIE. Concentrating solar power - Volume 1: Power Sector. 2012. Disponível em: <[https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re\\_technologies\\_cost\\_analysis-csp.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf)> Acesso em set. 2018.

RENO, M. L. G. Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo De Produção De Metanol A Partir Do Bagaço de Cana-de-açúcar. 2011. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2011.

RETSscreen Expert Clean Energy Management Software. Minister of natural resources Canada 1997-2018. Canmet Energy Varennes Research centre. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/energy/retscreen/7465>> Acesso em Jan. 2019.

ROCHA, M. Uso da análise do ciclo de vida para a comparação do desempenho ambiental de quatro alternativas para tratamento para a vinhaça. 2009. 263 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009.

ROSSI, E. Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2013.

ROXO, L. B. Geração de energia elétrica com coletor solar e motor stirling. Disponível em: <[http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art\\_TCC\\_031\\_2007.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_031_2007.pdf)> Acesso em: Maio 2019.

SANTOS, M. L. L. O. Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil. 2008. 165f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2008.

SATIRO, A. R. G.; COUTINHO L. P. Estudo de um motor Stirling movido a energia solar captada por um concentrador solar tipo disco parabólico. 2012. 103 f. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SENER. 2018. Up-to-Date. SENERtrough@-2 and single tank. Disponível em: <[http://www.sener.es/revista-sener/en/up-to-date\\_senertrough-2\\_and\\_single\\_tank.html](http://www.sener.es/revista-sener/en/up-to-date_senertrough-2_and_single_tank.html)>. Acesso em 25 de set. de 2018.

SEYE, O. Análise do ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (*Pennisetum Purpureum* Schaum). 2003. 167 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.

SINGH, A.; PANT, D.; OLSEN, S. I. Life Cycle Assessment of renewable energy sources. Nova York: Springer, 2013.

SILVA, R. M. Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, Fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: <[www.senado.leg.br/estudos](http://www.senado.leg.br/estudos)>. Acesso em ago. 2018.

SIMAPRO. About Simapro. Disponível: <<https://simapro.com/>> Acesso em 27 de julho de 2018.

SOLARGIS. 2018. SolarGIS GeoModel Solar. SolarGIS. Disponível em: <<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em 25 de set. de 2018.

SOLARPACES. Concentrating solar power projects, by technology. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/by-technology>> Acesso em set. 2018.

SOLARPACES Home Page. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>> Acesso em 20 mar. de 2019.

SOLAR THERMAL HEAT & POWER. Parabolic trough technology for Chile. Deutsche Gesellschaft fur international Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Santiago de Chile, December, 2014.

SOLINOVA. Project Smile. Disponível em: < <https://solinova.com.br/projeto-smile>> Acesso em Jan. 2019.

SOUZA, A. Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto-SP. 2012. 121f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

SOUZA, L. S. M.; SILVA, D. A. L. RODRIGUES, T. O.; DIAS, L. G. M. E.; BRAGA, T. Levantamento de publicações científicas brasileiras para incremento do banco nacional de inventários do ciclo de vida (SICV). Congresso Brasileiro sobre gestão do ciclo de vida. v. 6, p. 775-780, 2018.

STIRLING SYSTEMS GMBH. (2011). Technical sheet engine SOLO161. Disponível em: <http://www.buildup.eu/cases/19164> Acesso em 26 de julho de 2018.

STOPPATO, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. Energy, v. 33, n. 2, p.224–232, 2008.

SYLVESTRIN, G. R.; ANDO JUNIOR, O. H.; LEDESMA, J. J. G. Projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede: Estudo de caso empresa de fertilizantes. Acta Iguazu. v. 7, n. 4, p. 94-127, 2018.

UGAYA, C. M. L. (2001), "Análise de Ciclo de Vida: estudo de caso para materiais componentes automotivos no Brasil". (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. 2001.

VIANA, M. M. Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol. 2008. 237f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). World Energy Resources. 2016. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/> Acesso em 26 de julho de 2018.

WORLD ENERGY OUTLOOK (WEO). Disponível em: <<https://www.iea.org/weo2017/>> Acesso em ago. 2018.

YANG, D.; LIU, J.; YANG, J.; DING, N. Life-cycle assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade. Journal of Cleaner Production. v. 94, p. 35-45, 2015.

YINGLI SOLAR. 2018a. Yingli Solar. Disponível em: <<http://www.yinglisolar.com/br/products/monocrystalline/panda-60-cell-series/>> Acesso em: 25 de set. de 2018.

YINGLI SOLAR. 2018b. Yingli Solar. Disponível em: <  
[http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS\\_YGE72CELL%20SERIES%202%20HSF%20SMART-35b\\_40mm\\_EU\\_EN\\_20171030\\_V04.pdf](http://www.yinglisolar.com/static/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE72CELL%20SERIES%202%20HSF%20SMART-35b_40mm_EU_EN_20171030_V04.pdf)>  
Acesso em: 25 de set. de 2018.

YOKOTE, A.Y. Inventário do Ciclo de Vida da Distribuição de Energia Elétrica no Brasil. 2003. 369 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 2003.

ZHANG H. L.; BAEYENS J.; DEGRÈVE J.; CACÈRES G. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 22, p. 466-481, mar. 2013.

ZUCATELLI, P. J.; SALVALIO, L.; PEREIRA, A. L.; MENEGUELO, A. P. Energia distribuída proveniente da concentração de energia solar nas universidades do Brasil: um estudo de caso. *Latin American Journal of Energy Research*. v. 4, n. 2, p. 11 – 22, 2017.



## ANEXOS

### ANEXO A – Inventário do processo de produção de silício grau metalúrgico na Europa

Dados do processo da unidade da produção Silício - Grau metalúrgico na Europa NO (Pág. 26)				
				Location
				Infrastructure Process
				Unit
	name	location	Unit	MG-silicon, at plant
product	MG-silicon, at plant	NO	kg	1
technosphere	electricity, medium voltage, at grid	NO	kwh	1,10E+01
	wood chips, mixed, u=120%, at forest - lascas de madeira, misturadas, u = 120%, na floresta	RER	M <sup>3</sup>	3,25E-03
	hard coal coke, at plant - coque de carvão duro, na planta	RER	MJ	2,31E+01
	graphite, at plant	RER	KG	1,00E-01
	charcoal, at plant - carvão vegetal, na planta	GLO	KG	1,70E-01
	petroleum coke, at refinery	RER	KG	5,00E-01
	silica sand, at plant	DE	KG	2,70E+00
	oxygen, liquid, at plant	RER	KG	2,00E-02
	disposal, slag from MG silicon production, 0% water, to inert material landfill - "eliminação, escória da produção de silício mg, 0% de água, para aterro de materiais inertes"	CH	KG	2,50E-02
	silicone plant - planta de silicone	RER	Unit	1,00E-11
	transport, transoceanic freight ship - transporte, navio de frete transoceânico	OCE	TK M	2,55E+00
	transport, lorry >16t, fleet average - transporte, camião > 16t, média da frota	RER	TK M	1,56E-01
transport, freight, rail - transporte, frete, trilho	RER	TK M	6,90E-02	
emission air, low population density	Heat, waste - Calor, desperdício		MJ	7,13E+01
	Arsenic		KG	9,42E-09

Aluminium		KG	1,55E-06
Antimony		KG	7,85E-09
Boron		KG	2,79E-07
Cadmium		KG	3,14E-10
Calcium		KG	7,75E-07
Carbon monoxide, biogenic		KG	6,20E-04
Carbon monoxide, fossil		KG	1,38E-03
Carbon dioxide, biogenic		KG	1,61E+00
Carbon dioxide, fossil		KG	3,58E+00
Chromium		KG	7,85E-09
Chlorine		KG	7,85E-08
Cyanide		KG	6,87E-06
Fluorine		KG	3,88E-08
Hydrogen sulfide		KG	5,00E-04
Hydrogen fluoride		KG	5,00E-04
Iron		KG	3,88E-06
Lead - Levar		KG	3,44E-07
Mercury		KG	7,85E-09
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin - "COV não, compostos orgânicos voláteis não-metano, origem não especificada"		KG	9,60E-05
Nitrogen oxides		KG	9,74E-03
Particulates, > 10 um		KG	7,75E-03
Potassium		KG	6,20E-05
Silicon		KG	7,51E-03
Sodium		KG	7,75E-07
Sulfur dioxide		KG	1,22E-02
Tin - Lata		KG	7,85E-09

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

## ANEXO B – Inventário do processo de produção de silício grau eletrônico na Europa

Unidade de dados de processo de produção de silício de grau eletrônico na Europa (DE) (Pág. 28)					
				MG-silicon, at plant	
			Location	Europe (DE)	
			Infrastructure Process	0	
			Unit	kg	
	name	location	Unit	silicon, electronic grade, at plant	silicon, electronic grade, off-grade, at
product	silicon, electronic grade, at plant	DE	KG	1,00E+00	0
	silicon, electronic grade, off-grade, at plant	DE	KG		1,00E+00
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin		M <sup>3</sup>	6,29E+01	1,66E+01
technosphere	MG-silicon, at plant	NO	KG	1,05E+00	1,05E+00
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	KG	6,79E-04	1,81E-04
	hydrochloric acid, 30% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	1,43E+00	3,82E-01
	hydrogen, liquid, at plant	RER	KG	8,97E-02	2,39E-02
	tetrafluoroethylene, at plant	RER	KG	6,39E-04	1,70E-04
	sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant	RER	KG	4,63E-01	1,24E-01
	graphite, at plant	RER	KG	7,10E-04	1,89E-04
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	2,15E+00	2,15E+00
	transport, freight, rail	RER	TKM	9,31E-02	2,48E-02
	water, completely softened, at plant - água, completamente amaciado, na planta	RER	KG	1,85E+01	4,94E+00
energy	heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	MJ	1,74E+02	4,65E+01
	electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	KWH	1,24E+02	3,31E+01

	electricity, hydropower, at run-of-river power plant - "eletricidade, energia hidroelétrica, na usina de energia de corrida do Rio "	RER	KWH	3,92E+01	1,05E+01
		RER			
waste	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration - "eliminação, plásticos, mistura, 15,3% de água, para incineração Municipal "	CH	KG	1,32E-03	3,52E-04
	silicone plant	RER	UNIT	1,07E-11	2,84E-12
emission air, high population density	Heat, waste		MJ	3,92E+02	1,05E+02
emission water, river	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl		KG	1,26E-05	3,37E-06
	BOD5, Biological Oxygen Demand		KG	2,05E-04	5,46E-05
	COD, Chemical Oxygen Demand		KG	2,02E-03	5,39E-04
	Chloride		KG	3,60E-02	9,60E-03
	Copper, ion		KG	1,02E-07	2,73E-08
	Nitrogen		KG	2,08E-04	5,53E-05
	Phosphate		KG	2,80E-06	7,48E-07
	Sodium, ion		KG	3,38E-02	9,01E-03
	Zinc, ion		KG	1,96E-06	5,23E-07
	Iron, ion		KG	5,61E-06	1,50E-06
	DOC, Dissolved Organic Carbon		KG	9,10E-04	2,43E-04
	TOC, Total Organic Carbon		KG	9,10E-04	2,43E-04

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

## ANEXO C – Inventário do processo de produção de silício grau solar na Europa

Unidade de dados de processo de produção de silício de classe solar na Europa (RER) (Pág. 30)				
				MG-silicon,at plant
			Location	Europe RER
			Infrastructure Process	0
			Unit	kg
	name	location	Unit	silicon, solar grade, modified Siemens process,
product	silicon, solar grade, modified Siemens process, at plant	RER	KG	1,00E+00
technosphere	MG-silicon, at plant	NO	KG	1,13E+00
	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	RER	KG	1,60E+00
	hydrogen, liquid, at plant	RER	KG	5,01E-02
	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	KG	3,48E-01
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	2,66E+00
	transport, freight, rail	RER	TKM	2,40E+00
	transport, transoceanic freight ship	OCE	TKM	5,30E+00
	electricity, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	KWH	3,58E+01
	electricity, hydropower, at run-of-river power plant - eletricidade, energia hidrelétrica, na usina de energia Run-of-River	RER	KWH	6,17E+01
	electricity, medium voltage, at grid	NO	KWH	1,25E+01
	heat, at cogen 1MWe lean burn, allocation exergy	RER	MJ	1,85E+02
	silicone plant	RER	Unit	1,00E-11
emission air	Heat, waste		MJ	3,51E+02
emission	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl		KG	1,26E-05
water, river	BOD5, Biological Oxygen Demand		KG	2,05E-04
	COD, Chemical Oxygen Demand		KG	2,02E-03
	Chloride		KG	3,60E-02

	Copper, ion		KG	1,02E-07
	Nitrogen		KG	2,08E-04
	Phosphate		KG	2,80E-06
	Sodium, ion		KG	3,38E-02
	Zinc, ion		KG	1,96E-06
	Iron, ion		KG	5,61E-06
	DOC, Dissolved Organic Carbon		KG	9,10E-04
	TOC, Total Organic Carbon		KG	9,10E-04

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

## ANEXO D – Inventário do processo de produção de silício monocristalino na Europa

Dados de processo unitários da produção de silício monocristalino na Europa (RER) (pág 32)				
				Location
				Infrastructure Process
				Unit
	name	location	Unit	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant
product	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	RER	KG	1,00E+00
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin		M <sup>3</sup>	5,09E+00
	Water, river		M <sup>3</sup>	
technosphere	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	KWH	6,82E+01
	natural gas, burned in industrial furnace low-Nox >100kW	RER	MJ	5,82E+01
WATER	tap water, at user	RER	KG	9,41E+01
WATER	water, deionised, at plant	CH	KG	4,01E+00
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	KG	7,81E-01
materials	argon, liquid, at plant	RER	KG	1,00E+00
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	KG	1,00E-02
	nitric acid, 50% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	6,68E-02
	acetic acid, 98% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	
	acetone, liquid, at plant	RER	KG	
	sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant	RER	KG	4,15E-02
	ceramic tiles, at regional storage	CH	KG	1,67E-01
	lime, hydrated, packed, at plant	CH	KG	2,22E-02
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	9,12E-01
	transport, freight, rail	RER	TKM	1,41E+00
nfrastructure	silicone plant	RER	Unit	1,00E-11
	disposal, waste, Si waferprod., inorg, 9.4% water, to residual material landfill	CH	KG	1,67E-01
emission air, high	Heat, waste		MJ	2,46E+02
population density	Fluoride		KG	
	Hydrocarbons, unspecified		KG	
	Hydroxide		KG	3,67E-01
	Acetic acid		KG	
	BOD5, Biological Oxygen Demand		KG	1,30E-01
	COD, Chemical Oxygen Demand		KG	1,30E-01

	DOC, Dissolved Organic Carbon		KG	4,05E-02
	TOC, Total Organic Carbon		KG	4,05E-02
	Nitrogen		KG	
	Nitrogen oxides		KG	3,39E-02
	Nitrate		KG	8,35E-02

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)



## ANEXO E – Inventário do processo de produção de silício policristalino na Europa

Unidade de processo de dados da produção de silício policristalino na Europa (RER) (pág. 33)				
			MG-silicon, at plant	
			Europe RER	
			0	
				Unit
	name	location	Unit	silicon, multi-Si, casted, at plant
product	silicon, multi-Si, casted, at plant	RER	KG	1,00E+00
resource, in water	Water, cooling, unspecified natural origin		M <sup>3</sup>	9,43E-01
	tap water, at user	RER	KG	
technosphere	electricity, medium voltage, production	ENTSO	KWH	1,55E+01
	ENTSO, at grid			
	argon, liquid, at plant	RER	KG	2,52E-01
	helium, at plant	GLO	KG	7,76E-05
	sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant	CH	KG	5,00E-03
	nitrogen, liquid, at plant	RER	KG	3,04E-02
	ceramic tiles, at regional storage	CH	KG	2,14E-01
	silicon, production mix, photovoltaics, at plant	GLO	KG	7,00E-01
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	7,52E-01
	transport, freight, rail	RER	TKM	1,55E-01
	silicone plant	RER	Unit	1,00E-11
emission air	Heat, waste		MJ	5,58E+01

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

ANEXO F – Inventário do processo de produção de wafer de silício monocristalino e policristalino na Europa

Unidade de processo de dados da produção monocristalina da bolacha de silício na Europa (RER) (Pág. 36)					
					MG-silicon,at plant
				Location	Europe RER
				Infrastructure Process	0
				Unit	M <sup>2</sup>
	name	location	Unit	single-Si wafer, photovoltaics, at plant	multi -Si wafer, at plant
product	single-Si wafer, photovoltaics, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
	mul ti-Si wafer, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
technosphere	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	KWH	2,57E+01	2,08E+01
	natural gas, burned in industrial furnace low-NO <sub>x</sub> >100kW	RER	MJ	4,00E+00	4,00E+00
WATER	tap water, at user	RER	KG	6,00E-03	1,64E+02
	water, deionised, at plant	RER	KG	1,80E+01	
MATERIALS	si licon, multi-Si, casted, at plant	RER	KG		1,02E+00
	CZ single crystalline silicon, photovoltaics, at plant	RER	KG	1,58E+00	
	si licon carbide, at plant	RER	KG	6,20E-01	6,20E-01
	si licon carbide, recycling, at plant	RER	KG	1,41E+00	1,41E+00
auxiliary	flat glass, uncoated, at plant	RER	KG	9,99E-03	4,08E-02
material	sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O,	RER	KG	1,50E-02	1,50E-02

	production mix, at plant				
	hydrochloric acid, 30% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	2,70E-03	2,70E-03
	acetic acid, 98% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	3,90E-02	3,90E-02
	triethylene glycol , at plant	RER	KG	2,18E-01	2,18E-01
	triethylene glycol , recycling, at plant	RER	KG	1,95E+00	1,95E+00
	dipropylene glycol monomethyl ether, at plant	RER	KG	3,00E-01	3,00E-01
	alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical, at plant	RER	KG	2,40E-01	2,40E-01
	acrylic binder, 34% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	2,00E-03	3,85E-03
	brass, at plant	CH	KG	7,44E-03	7,44E-03
	steel, low- alloyed, at plant	RER	KG	7,97E-01	7,97E-01
	wire drawing, steel	RER	KG	8,05E-01	8,05E-01
wastes	disposal, waste, silicon wafer production, 0% water, to underground deposit	RER	KG	1,10E-01	1,70E-01
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	9,29E-01	8,46E-01
	transport, freight, rail	RER	TKM	3,84E+00	3,86E+00
Infrastructure	wafer factory	DE	Unit	4,00E-06	4,00E-06
emission air	Heat, waste		MJ	9,25E+01	7,49E+01
emission	COD, Chemical Oxygen Demand		KG	2,95E-02	2,95E-02
water, river	BOD <sub>5</sub> , Biological Oxygen Demand		KG	2,95E-02	2,95E-02
	DOC, Dissolved Organic Carbon		KG	1,11E-02	1,11E-02
	TOC, Total Organic Carbon		KG	1,11E-02	1,11E-02

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

ANEXO G – Inventário do processo de produção de células fotovoltaicas de silício monocristalino e policristalino na Europa

Unidade de dados de processo da produção de células fotovoltaicas na Europa (RER) (pág. 39)					
				Location	
				Infrastructure Process	
				Unit	
	name	location	Unit	photovoltaic cell, single-Si, at plant	photovoltaic cell, multi-Si, at plant
product	photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>	1,00E+00	
	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		1,00E+00
resource, in WATER	tap water, at user	RER	KG	1,71E+02	2,51E+02
technosphere	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	KWH	1,44E+01	1,44E+01
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW - "gás natural, queimado na fornalha industrial baixo-NOx > 100KW "	RER	MJ	6,08E-02	2,47E-01
	light fuel oil , burned in industrial furnace 1MW, nonmodulating - óleo de combustível claro, queimado na fornalha industrial 1mw, nonmodulating	RER	MJ		2,70E-03
infrastructure	photovoltaic cell factory - fábrica fotovoltaica do Cell	DE	Unit	4,00E-07	4,00E-07
wafers	multi-Si wafer, at regional storage	RER	M <sup>2</sup>		1,04E+00
	single-Si wafer, photovoltaics, at regional storage	RER	M <sup>2</sup>	1,03E+00	
materials	metal lization paste, front side, at plant	RER	KG	5,75E-03	9,12E-03
	metal lization paste, back side, at plant	RER	KG	3,84E-03	5,34E-03
	metal lization paste, back side, aluminium, at plant	RER	KG	5,59E-02	5,96E-02
chemicals	ammonia, liquid, at regional storehouse	RER	KG	2,19E-02	8,92E-03
	phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant	GLO	KG		8,36E-03
	phosphoryl chloride, at plant	RER	KG	1,33E-02	2,74E-02

	isopropanol, at plant	RER	KG	1,77E-01	8,10E-04
	solvents, organic, unspecified, at plant	GLO	KG		1,13E-02
	calcium chloride, CaCl <sub>2</sub> , at regional storage	CH	KG		3,15E-02
	hydrochloric acid, 30% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG	6,29E-04	8,59E-03
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	KG	6,45E-04	4,03E-01
	nitric acid, 50% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG		2,93E-01
	sodium hydroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, production mix, at plant	RER	KG	6,04E-01	7,07E-02
	lime, hydrated, packed, at plant	CH	KG	1,51E-02	2,18E-01
	hydrogen peroxide, 50% in H <sub>2</sub> O, at plant	RER	KG		4,52E-04
	sulphuric acid, liquid, at plant	RER	KG		1,01E-01
	refrigerant R134a, at plant	RER	KG	3,12E-05	2,73E-05
	potassium hydroxide, at regional storage	RER	KG		3,00E-02
	ammonium sulphate, as N, at regional storehouse	RER	KG		2,10E-02
gases	oxygen, liquid, at plant	RER	KG		8,22E-03
	nitrogen, liquid, at plant	RER	KG	1,15E+00	1,35E+00
	silicon tetrahydride, at plant	RER	KG	2,91E-03	2,61E-03
packaging	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	2,74E-01	5,22E-01
	transport, freight, rail	RER	TKM	1,52E+00	3,94E-01
	treatment, PV cell production effluent, to wastewater treatment, class 3	CH	M <sup>3</sup>	1,59E-01	7,89E-02
	disposal, waste, Si waferprod., inorg, 9.4% water, to residual material landfill	CH	KG	2,33E+00	2,74E+00
	disposal, solvents mixture, 16.5% water, to hazardous waste incineration	CH	KG	1,72E-01	1,08E-02
	transport, transoceanic freight ship	OCE	TKM	3,06E-02	
emission air, high population density	Heat, waste		MJ	5,18E+01	5,18E+01
	Aluminium		KG	7,73E-06	7,73E-06
	Hydrogen fluoride		KG	1,38E-04	6,90E-04
	Lead		KG	7,73E-06	7,73E-06
	Silicon		KG	3,17E-08	3,17E-08
	Silver		KG	7,73E-06	7,73E-06
	Tin		KG	7,73E-06	7,73E-06
	Ammonia		KG	3,73E-05	5,22E-04

	Carbon dioxide, fossil		KG	1,67E-01	6,82E-01
	Chlorine		KG	4,60E-05	
	Hydrogen		KG	1,10E-02	4,44E-04
	2-Propanol		KG	1,47E-02	
	Acetaldehyde		KG	6,33E-04	
	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a		KG	3,12E-05	2,73E-05
	Silicon		KG	3,33E-04	1,47E-04
	Silicon		KG	2,63E-03	6,00E-06
	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		KG	1,26E-02	3,53E-04
	Water		KG	1,16E+01	5,96E+00
	Nitric acid		KG		1,19E-04
	Nitrogen oxides		KG		1,24E-02
	Nitrogen oxides		KG		3,64E-03

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

ANEXO H – Inventário do processo de laminação e produção de painéis monocristalinos na Europa

8 - Unidade de dados do processo de laminação e produção de painéis fotovoltaicos na Europa (RER) (pág. 44)					
				MG-silicon, at plant	
			Location	Europe RER	
				Unit	
	name	location	Unit	photovoltaic panel, single-Si, at plant	photovoltaic laminate, single-Si, at plant
product	photovoltaic laminate, single-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		1
resource, in water	photovoltaic panel, single-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>	1	
	photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
	photovoltaic panel, multi-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
technosphere	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	KWH	3,73E+00	3,73E+00
	diesel, burned in building machine	GLO	MJ	8,75E-03	8,75E-03
infrastructure	photovoltaic panel factory	GLO	Unit	4,00E-06	4,00E-06
	tap water, at user	RER	KG	5,03E+00	5,03E+00
	tempering, flat glass	RER	KG	8,81E+00	8,81E+00
	wire drawing, copper	RER	KG	1,03E-01	1,03E-01
cells	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	RER	KG		
	photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	KG	9,35E-01	9,35E-01
materials	aluminium alloy, AlMg3, at plant	RER	KG	2,13E+00	
	tin, at regional storage	RER	KG	1,29E-02	1,29E-02
	lead, at regional storage	RER	KG	7,25E-04	7,25E-04
	diode, unspecified, at plant	GLO	KG	2,81E-03	2,81E-03
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	KG	2,38E-02	2,38E-02
	solar glass, low-iron, at regional storage	RER	KG	8,81E+00	8,81E+00
	copper, at regional storage	RER	KG	1,03E-01	1,03E-01
	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	RER	KG	2,95E-01	2,95E-01
	ethylvinylacetate, foil, at plant	RER	KG	8,75E-01	8,75E-01
	polyvinylfluoride film, at plant	US	KG	1,12E-01	1,12E-01
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	RER	KG	3,46E-01	3,46E-01
	silicone product, at plant	RER	KG	1,22E-01	1,22E-01
materials	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	KG	7,63E-01	7,63E-01
	1-propanol, at plant	RER	KG	1,59E-02	1,59E-02
	EUR-flat pallet	RER	KG	5,00E-02	5,00E-02
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	KG	6,24E-02	6,24E-02

	isopropanol, at plant	RER	KG	1,47E-04	1,47E-04
	potassium hydroxide, at regional storage	RER	KG	5,14E-02	5,14E-02
	soap, at plant	RER	KG	1,16E-02	1,16E-02
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	5,85E+00	5,64E+00
	transport, freight, rail	RER	TKM	4,25E+01	4,12E+01
	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	CH	KG	3,00E-02	3,00E-02
	disposal, polyvinylfluoride, 0.2% water, to municipal incineration	CH	KG	1,12E-01	1,12E-01
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	KG	1,64E+00	1,64E+00
	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	CH	KG	1,61E-03	1,61E-03
	treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2	CH	M <sup>3</sup>	5,03E-03	5,03E-03
emission air	Heat, waste		MJ	1,34E+01	1,34E+01
	compounds, unspecified origin		KG	8,06E-03	8,06E-03
	Carbon dioxide, fossil		KG	2,18E-02	2,18E-02

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)



ANEXO I – Inventário do processo de laminação e produção de painéis policristalinos na Europa

Unidade de dados do processo de laminação e produção de painéis fotovoltaicos na Europa (RER) (pág. 44)					
					MG-silicon, at plant
				Location	Europe RER
	name	location	Unit	photovoltaic panel, multi-Si, at plant	photovoltaic laminate, multi-Si, at plant
product	photovoltaic laminate, single-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
resource, in water	photovoltaic panel, single-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		
	photovoltaic laminate, multi-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>		1,00E+00
	photovoltaic panel, multi-Si, at plant	RER	M <sup>2</sup>	1	
technosphere	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	KWH	3,73E+00	3,73E+00
	diesel, burned in building machine	GLO	MJ	8,75E-03	8,75E-03
infrastructure	photovoltaic panel factory	GLO	Unit	4,00E-06	4,00E-06
	tap water, at user	RER	KG	5,03E+00	5,03E+00
	tempering, flat glass	RER	KG	8,81E+00	8,81E+00
	wire drawing, copper	RER	KG	1,03E-01	1,03E-01
cells	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	RER	KG	9,35E-01	9,35E-01
	photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	KG		
materials	aluminium alloy, AlMg3, at plant	RER	KG	2,13E+00	
	tin, at regional storage	RER	KG	1,29E-02	1,29E-02
	lead, at regional storage	RER	KG	7,25E-04	7,25E-04
	diode, unspecified, at plant	GLO	KG	2,81E-03	2,81E-03
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	KG	2,38E-02	2,38E-02
	solar glass, low-iron, at regional storage	RER	KG	8,81E+00	8,81E+00
	copper, at regional storage	RER	KG	1,03E-01	1,03E-01
	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	RER	KG	2,95E-01	2,95E-01
	ethylvinylacetate, foil, at plant	RER	KG	8,75E-01	8,75E-01
	polyvinylfluoride film, at plant	US	KG	1,12E-01	1,12E-01
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	RER	KG	3,46E-01	3,46E-01
	silicone product, at plant	RER	KG	1,22E-01	1,22E-01

materials	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	KG	7,63E-01	7,63E-01
	1-propanol, at plant	RER	KG	1,59E-02	1,59E-02
	EUR-flat pallet	RER	KG	5,00E-02	5,00E-02
	hydrogen fluoride, at plant	GLO	KG	6,24E-02	6,24E-02
	isopropanol, at plant	RER	KG	1,47E-04	1,47E-04
	potassium hydroxide, at regional storage	RER	KG	5,14E-02	5,14E-02
	soap, at plant	RER	KG	1,16E-02	1,16E-02
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	TKM	5,85E+00	5,64E+00
	transport, freight, rail	RER	TKM	4,25E+01	4,12E+01
	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	CH	KG	3,00E-02	3,00E-02
	disposal, polyvinylfluoride, 0.2% water, to municipal incineration	CH	KG	1,12E-01	1,12E-01
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	KG	1,64E+00	1,64E+00
	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	CH	KG	1,61E-03	1,61E-03
	treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2	CH	M <sup>3</sup>	5,03E-03	5,03E-03
emission air	Heat, waste		MJ	1,34E+01	1,34E+01
	compounds, unspecified origin		KG	8,06E-03	8,06E-03
	Carbon dioxide, fossil		KG	2,18E-02	2,18E-02

Fonte: FRISCHKNECHT *et al.* (2015)

## ANEXO J – Dados dos materiais de construção utilizados na planta Jaíba - MG

Dados de construção planta Jaíba-MG		
Material	Unidade	Quantidade
Aço galvanizado	kg	200248,4
Aço zincado	kg	505,18
Aço estrutural	kg	25793,29
Argamassa (Reboco)	kg	9722,16
Argamassa (Impermeabilização)	kg	19444,32
Argamassa (Chapisco)	kg	38888,64
Concreto	kg	3672000
Brita	kg	1952790
Areia	kg	1481070

Fonte: PINTO (2016)

ANEXO K – Inventário da tecnologia de concentração solar de calha parabólica de uma planta de 50MW, localizada na Espanha.

INVENTÁRIO ORIGINAL 50MW				
Dados de inventário da fase de extração e fabricação				
System	Element/material			Unit
Power block	Power block		0,625	p
	Boiler 5MWt	Carbon steel	11000	kg
			11000	kg
		Refractory	68100	kg
		Insulation	5000	kg
		Insulation alumínio	675	kg
		Transport	675	
	Boiler 10 MWt	Carbon steel	22000	kg
			22000	kg
		Refractory	136200	kg
		Insulation	10000	kg
			1350	kg
		Transport	33910	tkm
Solar Field	Mirror (624 u)	Flat glass	5524	kg
		Epoxy resin	1,07	kg
		Copper	2,22	kg
			2,22	kg
		Silver	2,6	kg
		Stainless steel	206,04	kg
			206,04	kg
		Gass coating	817,5	m2
		Glass tube	248,2	kg
			Collector frame	Carbon steel
			1212480	kg
		Stainless steel	45960	kg
			45960	kg
		Graphite	187	kg
	Solar tracking system	Carbon steel	86361	kg
			86361	kg
		Nickel	46,17	kg
		Stainless steel	46,17	kg
		Lubricating oil	8321	kg
		Polyethylene	27281,2	kg
	Founda-tions	Concrete	5148	m3

		Carbon steel	2957073	kg
			2957073	kg
	Transport			tkm
	Washing vehicle		01/abr	p
HTF System	Synthetic oil		1000000	kg
			73,5	%
			26,5	%
	Nitrogen		1051785	kg
	2 Overflow tanks		170000	kg
	Liquefied natural gas tank		60000	kg
	Expansion tank		32000	kg
	Pipes		317136	kg
	Transport			tkm
	Transport HTF		1700000	tkm
	Transport pipes HTF		63427,2	tkm
	Transport overflow tank		34000	tkm
	Transport tank GN		12000	tkm
	Transport expansion tank		6400	tkm
Facilities	Water treatment facility		1	p
	Main building		1600	m2
		Materials	18480	kg
			52570	kg
			37705,59	GJ
			904295,4	kg
	Transport			tkm
		Emissions to air	3428	kg
			16738,4	kg
			11919,68	kg
			4039,52	kg
			64,8	kg
			29,12	kg
			3855	kg
	Roads		87500	m2a
	Transporte total			

Storage system	Salts	NÃO UTILIZADO	28000	t
		A PLANTA EM ESTUDO FOI CONSIDERADA SEM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO	60	%
			40	%
	Tanks		1900000	kg
			3560,8	kg
			1271757	kg
			10420	kg
			634900	tkm
	Heat exchanger		20000	kg
			4000	tkm
	Salts' transport		14000000	tkm
			369505360	tkm
	Sand		417726	kg
			83400	tkm
		Dados de inventário da fase de construção	50 MW	
		Gravel - cascalho	10636333	Kg
		Pipes welding - Soldadura das tubulações	957	M
		Crane collectors - Coletores do guindaste	187,2	Hr
		Crane storage system - Sistema de armazenamento do guindaste	2,8	Hr
		Concrete mixer - Betoneira	5148	Hr
		Crane HTF system - Guindaste sistema HTF	3,5	Hr
		Tubes welding - Soldadura dos tubos	4942,1	M
		Excavation activities - Atividades de escavação	61767	m3
		Filling activities - Atividades de enchimento	61949	m3
		Building machine consumes - Máquina de construção consome	8800000	MJ
		Transport	50900000	Tkm

Fonte: CORONA *et al.* (2014)

ANEXO L – Inventário de operação e manutenção da tecnologia de concentração solar de calha parabólica de uma planta de 50MW, localizada na Espanha.

Dados de inventário da operação e da fase de manutenção		
Planta de 50 MW		
Lubricating oil	8300	Kg
HTF Replacement	10000	Kg
Cooling water	20710872	m3
Rankine water	269241336	Kg
Washing water	120515850	Kg
Collectors Replacement	6,24	U
Washing of collectors	1016255	Tkm
Natural Gas for electricity generation	0	MJ
Natural gas anti-freeze and maintenance	156966609	MJ
Electricity from the grid	13688	MWh
Transport		Tkm
Dados de inventário da fase de desmantelamento		
	50 MW	
Diesel	8800000	MJ
Transport	50900000	Tkm
Dados do inventário da ocupação e da transformação da terra		
	50MW	
Occupation, construction site	7750000	m2a
Occupation, industrial área	34247500	m2a
Occupation, traffic area, road network	87500	m2a
Occupation, traffic area, road embankment	15000000	m2a
Transformation, from heterogeneous, agricultural	1950000	m2
Transformation, to industrial area, vegetation	1950000	m2

Fonte: CORONA *et al.* (2014)

ANEXO M – Inventário de uma unidade de prato parabólico acoplado com motor stirling solar de 10 kw, localizado na Espanha

Planta de concentração solar de 10KW			
RECEPTOR DE PRATO DISH 10KW			
Espelhos	Fibra de vidro	kg	113,4
Estrutura metálica	Aço	kg	3700
Fundação	Concreto	kg	150000
MOTOR			
Trocador de calor	liga de níquel	kg	12
Cilindro/Pistão	Aço	kg	200
Bielas	Aço	kg	100
GERADOR ELÉTRICO			
	Aço	kg	50
	cobre	kg	50
Regenerador	Aço	kg	30
Cavidade cerâmica	cerâmica	kg	15

Fonte: CORONA *et al.* (2014)



ANEXO N – Inventário dos dados adaptados da planta de concentração solar de calha parabólica para a planta de prato parabólico acoplado com motor stirling solar de 1 MW

Adaptado da planta de concentração solar de calha parabólica			
Material	Quantidade da Calha parabólica	Unidade	Quantidade do prato parabólico
Crane collectors - Coletores do guindaste	187,2	Hr	17,9029188
Crane storage system - Sistema de armazenamento do guindaste	2,8	Hr	0,2677787
Concrete mixer - Betoneira	5148	Hr	492,3302669
Excavation activities - Atividades de escavação	61767	m3	5907,102485
Filling activities - Atividades de enchimento	61949	m3	5924,508101
Building machine consumes - Máquina de construção consome	8800000	MJ	841590,1998
OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO			
Lubricating oil (IDEM)		Kg	1315
HTF Replacement (COLOCAR HÉLIO PARA DISH)	10000	Kg	956,3524998
Cooling water (0,5 * CALHA)	20710872	m3	990344,7105
Rankine water		Kg	0
Washing water		Kg	0
Collectors Replacement (IDEM CALHA)	6,24	U	0,59676396
Washing of collectors (0,5*CALHA)	1016255	Tkm	48594,90048
Natural Gas for electricity generation	0	MJ	0
Natural gas anti-freeze and maintenance (IDEM)	156966609	MJ	15011540,89
Electricity from the grid (IDEM)	13688	MWh	1309,055302
Transport		TKM	601,9084124

Fonte: CORONA *et al.* (2014)

## ANEXO O – Inventário da energia elétrica produzida no Brasil

Energia elétrica consumida no Brasil	Unidade	1,0 kWh de energia
Parâmetro		Eletricidade
<b>Entradas</b>		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	4,36E-03
Carvão	kg	4,62E-02
Gás natural	kg	2,74E-03
Água	kg	4,20E+02
Reservas bióticas	kg	1,75E-02
Urânio	kg	6,48E-07
Energia não especificada	MJ	5,70E-03
Uso do solo	mm <sup>2</sup>	9,00E+02
<b>Saídas</b>		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO <sub>2</sub>	kg	1,24E-01
CO	kg	5,38E-04
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> - Hidrocarbonetos	kg	2,70E-06
Vapor de H <sub>2</sub> O	kg	8,29E-01
CH <sub>4</sub>	kg	1,94E-03
NH <sub>3</sub>	kg	2,16E-11
Metais	kg	3,60E-11
N <sub>2</sub> O	kg	3,96E-05
NO <sub>x</sub>	kg	2,07E-03
COV - exceto metano	kg	2,62E-05
Material particulado	kg	2,42E-04
SO <sub>2</sub>	kg	4,19E-04
HCl	kg	1,08E-10
Radioatividade	kBq	3,52E-02
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	2,52E-07
DQO	kg	4,68E-07
Metais pesados	kg	6,48E-10
Hidrocarbonetos	kg	1,08E-07
Ácidos H <sup>+</sup>	kg	6,12E-10
Óleos e graxas	kg	5,04E-07
Sólidos dissolvidos totais	kg	1,80E-07
Sólidos suspensos totais	kg	3,60E-07
Compostos de enxofre	kg	1,62E-09
Compostos de nitrogênio	kg	1,62E-08
Cl <sup>-</sup>	kg	2,16E-10
Carbono Orgânico Dissolvido	kg	1,80E-07

Metais	kg	3,60E-08
Radioatividade	kBq	5,42E-02
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	3,85E-02
Resíduo para aterro sanitário	dm <sup>3</sup>	4,81E-02

Fonte: COLTRO e QUEIROZ (2003)

## ANEXO P – Inventário de 1kg de óleo diesel consumido no Brasil

Parâmetros	Unidade	Quantidade 1kg Óleo diesel
Entradas		
Bauxita	mg	319
Petróleo	g	1,04
Energia (não especificada)	MJ	2,57
Gás natural	g	44,1
Água	g	7,36
Saídas		
Emissões para o ar		
Aldeídos	µg	73,5
Amônia	µg	36,8
CO	mg	268
CO <sub>2</sub>	g	230
CH <sub>4</sub>	mg	4
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	g	1,56
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> afilático	mg	517
MP	mg	2
H <sub>2</sub>	mg	199
H <sub>2</sub> S	mg	6,81
HCL	mg	2,31
Metais	µg	7,75
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> afilático	µg	217
Metilmercaptana	mg	2,3
N <sub>2</sub> O	µg	88,2
NMCOV	mg	203
NOX	g	3,13
SO <sub>2</sub>	g	1,32
Fuligem	mg	2,04
SO <sub>x</sub>	mg	49,5
COV	mg	3,77
Emissões para a água		
DBO	µg	11
Cl <sup>-</sup>	-	4,22 mg
DQO	mg	2,32
Petróleo	mg	30,5
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	µg	435
SSD	mg	23,3
SDT	mg	
Íons metálicos	mg	3,98
Na	mg	3
Óleo	-	1,53 mg
Fenol	µg	775
SST	µg	11
Resíduos sólidos		
Resíduos minerais	mg	883
Óleo	mg	300
Resíduos não inertes	mg	2,87
Escória	mg	7,79

Fonte: BORGES (2004)

## ANEXO Q – Inventário do ciclo de vida de 1kJ de gás natural extraído em alto mar no Brasil

ENTRADAS	Un	Valor
Sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> )	kg	4,06E-05
Bauxita (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	kg	1,30E-07
Bentonite (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 4SiO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O)	kg	3,84E-06
Cromo (Cr)	kg	7,81E-09
Argila	kg	7,58E-06
Cobre (Cu)	kg	3,97E-08
Ferro (Fe)	kg	1,20E-04
Chumbo (Pb)	kg	1,24E-08
Carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> )	kg	4,79E-05
Manganês (Mn)	kg	4,55E-09
Gás natural	kg	2,50E-02
Níquel (Ni)	kg	2,64E-09
Petróleo	kg	7,13E-05
Areia	kg	1,20E-06
Prata (Ag)	kg	1,97E-10
Cloreto de sódio (NaCl)	kg	2,84E-07
Zinco (Zn)	kg	2,89E-10
Eletricidade	KJ	1,50E-02
Água (consumo total)	kg	9,30E-03
Madeira	kg	1,43E-06
SAÍDAS		
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS		
Acetaldeídos (CH <sub>3</sub> CHO)	g	1,06E-06
Ácido acético (CH <sub>3</sub> COOH)	g	1,50E-04
Acetona (CH <sub>3</sub> COOH <sub>3</sub> )	g	1,78E-07
Aldeídos (não especificados)	g	5,33E-07
Alcanos (não especificados)	g	2,85E-03
Alcenos (não especificados)	g	6,26E-06
Alcinos (não especificados)	g	6,62E-08
Alumínio	g	2,77E-06
Amônia (NH <sub>3</sub> )	g	1,08E-06
Arsênico (As)	g	2,99E-08
Bário (Ba)	g	3,85E-08
Benzaldeído (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO)	g	1,20E-11
Benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	g	4,02E-04
Benzopireno (C <sub>30</sub> H <sub>12</sub> )	g	1,50E-08
Berílio (Be)	g	1,65E-10
Boro (B)	g	1,34E-06
Bromo (Br)	g	1,29E-07
Butano (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	g	8,16E-04

Buteno (1-CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> )	g	2,72E-07
Cádmio (Cd)	g	4,52E-08
Cálcio (Ca)	g	6,55E-06
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> fóssil)	g	6,08E+02
Monóxido de carbono (CO)	g	1,96E-02
Tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> )	g	9,61E-09
Cromo (Cr <sup>3+</sup> ; Cr <sup>6+</sup> )	g	1,58E-07
Cobalto (Co)	g	3,38E-08
Cobre (Cu)	g	2,39E-07
Cianida (CN)	g	3,17E-08
Dioxinas (não especificado)	g	4,48E-13
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	g	2,94E-03
Etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	g	1,17E-07
Etilbenzeno (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	g	2,71E-07
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	g	1,22E-02
Formaldeído (CH <sub>2</sub> O)	g	1,01E-04
Halon 1301(CF <sub>3</sub> Br)	g	2,71E-08
Heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	g	1,26E-06
Hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	g	2,64E-06
CxHy (exceto CH <sub>4</sub> )	g	1,33E-02
Ácido clorídrico (HCl)	g	2,54E-05
Ácido fluorídrico (HF)	g	3,60E-06
Gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	g	3,84E-04
Iodo (I)	g	6,29E-08
Ferro (Fe)	g	8,68E-06
Chumbo (Pb)	g	8,38E-07
Magnésio (Mg)	g	1,24E-06
Manganês (Mn)	g	5,58E-06
Mercúrio (Hg)	g	1,97E-07
Metano (CH <sub>4</sub> )	g	6,32E-02
Metanol (CH <sub>3</sub> OH)	g	1,28E-07
Níquel (Ni)	g	1,02E-06
Óxidos de nitrogênio (Nox expresso com NO <sub>2</sub> )	g	3,09E-02
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	g	1,24E-04
Material particulado não especificado	g	1,48E-03
Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	g	1,21E-03
Fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	g	9,17E-11
Fósforo (P)	g	4,11E-08
Hidrocarbonetos aromáticos plicídicos (PAH não especificados)	g	1,01E-05
Potássio (K)	g	2,08E-05
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	g	8,80E-04
Propionaldeído (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO)	g	3,29E-11
Ácido propiônico (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH)	g	4,34E-08
Propileno (CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub> )	g	3,97E-07

Selênio (Se)	g	3,54E-07
Silício (Si)	g	7,60E-06
Sódio (Na)	g	5,33E-07
Estrôncio (Sr)	g	1,00E-08
Óxidos de enxofre (SOx expresso como SO <sub>2</sub> )	g	1,45E-02
Titânio (Ti)	g	2,58E-08
Tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> )	g	2,01E-04
Vanádio (V)	g	8,80E-07
Xileno (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	g	1,16E-06
Zinco (Zn)	g	3,28E-06
<b>EFLUENTES LÍQUIDOS</b>		
Aldeídos (não especificados)	g	2,22E-07
Alcanos (não especificados)	g	5,73E-06
Alcenos (não especificados)	g	5,22E-07
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	g	2,51E-04
Amônia (NH <sup>4+</sup> , NH <sub>3</sub> as N)	g	6,71E-06
AOX (Orgânicos halogenados adsorvíveis)	g	2,05E-08
CxHy aromáticos (não especificados)	g	4,09E-05
Arsênio (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> )	g	4,96E-07
Bário (Ba <sup>2+</sup> )	g	3,79E-05
Barita	g	7,34E-03
Benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	g	5,75E-06
DBO (demanda bioquímica de oxigênio)	g	3,11E-05
Boro (B <sup>3+</sup> )	g	7,23E-07
Cádmio (Cd <sup>2+</sup> )	g	3,16E-08
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	g	2,25E-03
Cloretos (Cl)	g	7,32E-03
Material clorado (expresso como Cl)	g	1,17E-03
Clorofórmio (CHCl <sub>3</sub> )	g	1,25E-09
Cromo (Cr <sup>3+</sup> )	g	5,44E-06
Cromo (Cr <sup>6+</sup> )	g	1,02E-10
Cobalto (Co <sup>1+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Co <sup>3+</sup> )	g	3,36E-07
DQO (Demanda química de oxigênio)	g	3,71E-04
Cobre (Cu <sup>1+</sup> , Cu <sup>2+</sup> )	g	1,19E-06
Cianida (CN)	g	5,15E-07
Sólidos dissolvidos (não especificados)	g	9,17E-05
Carbono orgânico dissolvido (COD)	g	4,13E-04
Etilbenzeno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	g	8,40E-08
Fluoretos (F)	g	6,53E-05
Formaldeídos (CH <sub>2</sub> O)	g	1,59E-11
Hexacloroetano (C <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> )	g	2,21E-15
Hipoclorito (ClO)	g	3,76E-07
Ácido hipocloroso (HClO)	g	3,76E-07
Iodo (I)	g	3,57E-08

Ferro (Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> )	g	2,44E-04
Chumbo (Pb <sup>2+</sup> , Pb <sup>4+</sup> )	g	3,36E-06
Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	g	2,44E-04
Manganês (Mn <sup>2+</sup> , Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>7+</sup> )	g	5,99E-06
Cloreto de metila (CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	g	3,56E-06
Níquel (Ni <sup>2+</sup> , Ni <sup>3+</sup> )	g	1,28E-06
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	g	4,57E-06
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	g	9,34E-08
Material nitrogenado (expresso como N)	g	8,17E-06
Óleos (não especificados)	g	1,05E-03
Fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)	g	5,86E-06
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , expressos em P)	g	3,01E-06
Fósforo (P)	g	1,45E-07
Hidrocarbonetos aromáticos plicídicos (PAH não especificados)	g	4,70E-08
Potássio (K <sup>+</sup> )	g	1,54E-04
Sais (não especificados)	g	1,41E-04
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	g	1,29E-06
Sódio (Na <sup>+</sup> )	g	2,41E-03
Estrôncio (Sr <sup>2+</sup> )	g	2,49E-05
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	g	3,02E-03
Sulfetos (S <sup>2-</sup> )	g	1,27E-07
Sulfitos (SO <sub>3</sub> ) <sup>2-</sup>	g	6,18E-09
Sólidos suspensos (não especificados)	g	2,58E-02
Tetracloroetileno (C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )	g	5,40E-12
Titânio (Ti <sub>3</sub> <sup>3+</sup> , Ti <sup>4+</sup> )	g	1,35E-05
Carbono orgânico total (TOC)	g	5,91E-03
Tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> )	g	5,18E-06
Tricloroetano (1,1,1-CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	g	1,22E-11
Tricloroetileno (C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub> )	g	3,35E-10
Trietilen glicol (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub> )	g	4,13E-04
Xileno (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	g	4,16E-06
Zinco (Zn <sup>2+</sup> )	g	1,05E+02
<b>RESÍDUOS SÓLIDOS</b>		
Alumínio (Al)	g	5,18E-04
Arsênico (As)	g	2,07E-07
Cádmio (Cd)	g	9,37E-11
Cálcio (Ca)	g	2,07E-03
Carbono (C)	g	1,55E-03
Cromo (Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>6+</sup> )	g	2,59E-06
Cobalto (Co)	g	9,50E-11
Cobre (Cu)	g	4,76E-10
Ferro (Fe)	g	1,03E-03
Chumbo (Pb)	g	2,17E-09
Manganês (Mn)	g	2,07E-05



Mercúrio (Hg)	g	1,73E-11
Níquel (Ni)	g	7,14E-10
Nitrogênio (N)	g	8,11E-09
Óleos (não especificados )	g	3,07E-06
Fósforo (P)	g	2,59E-05
Enxofre (S)	g	3,11E-04
Zinco (Zn)	g	7,78E-06

Fonte: KULAY (2004)

## ANEXO R – Inventário do ciclo de vida de 1kg de gás natural consumido no Brasil

Gás natural beneficiado	Unidade	1,0 kg de gás de natural
Parâmetro		
Entradas		
<i>Entrada de recursos</i>		
Gás natural	kg	1,03E+00
Água	kg	1,97E-02
Energia (gás natural)	MJ	4,34E-03
Saídas		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO <sub>2</sub>	kg	8,36E-02
CO	kg	2,82E-07
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> - Hidrocarbonetos	kg	1,83E-07
CH <sub>4</sub>	kg	1,50E-03
NO <sub>X</sub>	kg	2,67E-04
SO <sub>X</sub>	kg	9,65E-04
H <sub>2</sub> S	kg	3,15E-10
Material particulado	kg	1,63E-05
<i>Emissões para a água</i>		
Compostos de enxofre	kg	1,63E-07
Compostos de nitrogênio	kg	1,17E-09
<i>Resíduos sólidos</i>		
Enxofre	kg	2,02E-08
<i>Emissões energéticas</i>		
Vapor	MJ	1,08E-03

Fonte: RIBEIRO (2009)

ANEXO S – Inventário do ciclo de vida de 1kg de hidróxido de sódio NaOH (soda cáustica) consumida no Brasil

Parâmetros	Unidade	Quantidade 1kg De NaOH
Entradas		
Energia térmica	MJ	3,86
Água (termelétrica -evaporada)	kg	1,18
Água utilizada (hidroelétrica)	kg	0,591
Bauxita	kg	4,97E-05
Carvão	kg	0,0652
Petróleo	kg	0,161
Energia não especificada	MJ	0,400
Gás natural	kg	0,0108
Material secundário	m <sup>3</sup>	0,591
Óleo	kg	0,00614
Reservas bióticas	kg	0,0247
Sal gema	kg	0,804
Sal marinho	kg	0,000117
Urânio	kg	9,14E-07
Água	kg	0,236
Saídas		
Emissões para o ar		
Aldeídos	kg	2,01E-08
Amônia	kg	1,01E-08
CFC	kg	6,83E-06
CH <sub>4</sub>	kg	0,000279
CH <sub>4</sub> renovável	kg	0,00246
Cl <sub>2</sub>	kg	2,19E-06
CO	kg	0,000951
CO <sub>2</sub>	kg	1,38
CO <sub>2</sub> (não fóssil)	kg	0,0838
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	kg	0,000592
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> alifático	kg	0,000079
Diclorometano	kg	2,34E-06
MP	kg	0,000784
H <sub>2</sub>	kg	0,000409
H <sub>2</sub> S	kg	3,56E-07
HCl	kg	1,18E-06
Hg	kg	2,91E-07
Metais	kg	5,94E-08
Metilmercaptana	kg	4,68E-08
N <sub>2</sub> O	kg	5,58E-05
NO <sub>2</sub>	kg	0,000992
NMCOV	kg	8,21E-05
NO <sub>x</sub>	kg	0,00405
Radioatividade para o ar	Bq	49,6
SO <sub>2</sub>	kg	0,00177
Fuligem	kg	4,64E-05
SO <sub>x</sub>	kg	0,00256
Tetraclorometano	kg	2,41E-06
COV	kg	1,03E-06
Água	kg	1,17
Emissões para a água		
Ácidos	kg	8,63E-10
Asbestos	kg	1,04E-05

DBO	kg	3,58E-07
Br	kg	3,05E-06
Cl <sup>-</sup>	kg	0,000154
DQO	kg	1,02E-06
Composto de enxofre	kg	2,28E-09
Composto de nitrogênio	kg	2,28E-08
Petróleo	kg	4,78E-06
CxHy	kg	2,71E-07
COD	kg	2,54E-07
EOCL	kg	3,53E-07
Fe	kg	1,42E-05
Hg	kg	1,9E-08
Metais Pesados (Cr, Pb)	kg	9,14E-10
Íons metálicos	kg	6,72E-07
Na	kg	7,4E-07
Petróleo	kg	1,07E-06
Fenol	kg	1,18E-07
Radioatividade para a água	Bq	76,5
SDT	kg	6,33E-05
SST	kg	5,11E-07
Emissões não especificadas	kg	3,54E-05
Resíduos sólidos		
Asbestos	kg	6,31E-05
Resíduos minerais	kg	0,000138
Óleo	kg	0,000082
Resíduos processuais	kg	0,0544
Resíduo sólido (não inerte)	kg	0,125
Resíduo do solo	m <sup>3</sup>	6,79E-05
Escória	kg	1,19E-06

Fonte: BORGES (2004)

## ANEXO T – Inventário do ciclo de vida de 1kg de alumínio primário no Brasil

	Unidade	Primário
<b>Entradas</b>		
Minério de ferro	kg	1,35
Sucata	kg	0,285
Ferro liga	kg	1,19E-02
Ferro gusa	kg	0,776
Ferro esponja	kg	0,012
Calcário	kg	0,197
Carvão mineral	kg	0,400757
Carvão vegetal	kg	0,238701
Óleo diesel	kg	7,64E-04
Óleo combustível	kg	7,68E-03
Eletricidade	kWh	0,517231
Minério de manganês	kg	0,009
Dolomita	kg	0,053
Zinco	kg	0,002
Água	litros	133,5
<b>Saídas para 1kg Aço primário</b>		
Aço	g	1000
Água	litros	133,5
Recirculada	litros	37,38
Perdida	litros	96,12
Material particulado	g	2,99
Amônia	g	0,109
CO <sub>2</sub>	g	527,7
CO	g	72,3
SO <sub>x</sub>	g	6,48
MnO	g	6,74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	g	10,9
SiO <sub>2</sub>	g	0,24
Resíduos sólidos	g	550
Ato forno	g	250
Aciaria	g	120
Aterro	g	180
<b>1kg Aço Secundário</b>		
<b>Entradas</b>		
Sucata	kg	1,150
Energia	-	30% aço primário
<b>Saídas – Reação de oxidação na aciaria</b>		
Resíduos sólidos	g	200
CO	g	72,3
SO <sub>x</sub>	g	1,92
MnO	g	6,74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	g	10,9
SiO <sub>2</sub>	g	0,24

Fonte: UGAYA (2001)

ANEXO U – Inventário do ciclo de vida para a produção de 1 tonelada de polietileno tereftalato (pet) no Brasil

RECURSOS NATURAIS	PETRÓLEO	REFINO DE PETRÓLEO	FABRICAÇÃO DE RESINA
Água	2300,00	1050,00	221,60
Petróleo	1388,90		
Energia (MJ)	41000,00	55000,00	7562,00
TOTAL	3688,90	1050,00	221,60
MATÉRIA PRIMA SECUNDÁRIA			
Petróleo		1809,42	
DMT			891,20
MEG			423,91
Metanol		252,00	
Óleo diesel	276,80	242,00	104,90
TOTAL	276,80	2303,42	1420,01
TOTAL DE ENTRADAS	3965,70	3353,42	1641,61
EMISSÕES ATMOSFÉRICAS			
MP	2,39	7,97	0,55
CO <sub>2</sub>	9,98	28,71	12,23
CO	6,30	12,30	0,6393
SO <sub>2</sub>	5,4670	14,60	0,2880
NOX	4,07	13,68	0,58
HCl			0,0020
HC	14,99	28,70	0,3330
VOC	2,60	44,18	
TOTAL	45,7970	150,14	14,6223
EFLUENTES LÍQUIDOS			
Águas residuárias	2318,80	1224,80	221,60
Metanol			252,00
Água da reação			102,00
NH <sub>3</sub>	0,6230	1,7950	0,1377
TOTAL	2319,4230	1226,5950	575,7377
RESÍDUOS SÓLIDOS			
Cinzas			3,66
Industrial	100,84	450,58	22,93
Mineral	448,44	492,1050	
Inerte	51,20	34,00	24,66
TOTAL	600,48	2353,42	641,61
TOTAL SAÍDAS	2965,70	2353,42	641,61
BALANÇO GLOBAL			
ENTRADAS	3965,70	3353,42	1641,61
SAÍDAS	2965,70	2353,42	641,61
TOTAL	1000,00	1000,00	1000,00

Fonte: PRADO (2007)

## ANEXO V - Inventário do ciclo de vida da produção de 1 tonelada de vidro no Brasil

FABRICAÇÃO DE VIDRO	QUANTIDADE (kg)
Água	101,000
Areia	712,05
Barrilha	82,00
Calcário	70,70
Dolomita	85,85
Feldspato	141,40
Energia (MJ)	38000,00
TOTAL	1193,00
MATÉRIA PRIMA SECUNDÁRIA	
GLP	2,39
Metais	0,0030
Óleo cru	10,10
Óleo diesel	23,66
NaCl	45,75
NaOH	219,20
TOTAL	301,1030
TOTAL DE ENTRADAS	1494,1030
EMISSIONES ATMOSFÉRICAS	
CO	0,8980
CO <sub>2</sub>	8,27
HCl	0,0100
N <sub>2</sub> O	0,0005
NH <sub>3</sub>	0,0377
VOC	0,0704
NO <sub>x</sub>	0,8953
MP	20,75
SO <sub>2</sub>	0,13
HC	0,0411
TOTAL	31,1030
EFLUENTES LÍQUIDOS	
Águas residuárias	101,000
NaOH	0,55
NH <sub>3</sub>	10,80
TOTAL	112,35
RESÍDUOS SÓLIDOS	
Cinzas	49,65
Industrial	255,00
Mineral	10,20
Inerte	35,80
TOTAL	494,1030
BALANÇO GLOBAL	
ENTRADAS	1494,1030
SAÍDAS	494,1030
TOTAL	1000,00

Fonte: PRADO (2007)

## ANEXO X - Inventário de lubrificante consumido no Brasil

Óleo lubrificante consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de óleo lubrificante
Parâmetro		
<b>Entradas</b>		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	1,10E+00
Gás natural	kg	4,69E-02
Água	kg	7,83E-03
Bauxita	kg	3,38E-04
Energia não especificada	MJ	2,73E+00
Uso do solo	mm <sup>2</sup>	1,73E+01
<b>Saídas</b>		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO2	kg	2,06E-01
CO	kg	2,93E-04
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	1,65E-03
CH4	kg	4,04E-05
NH3	kg	3,65E-08
Metais	kg	2,16E-07
N2O	kg	8,75E-08
NOX	kg	3,24E-03
SOX	kg	5,66E-05
Metil mercaptana	kg	1,25E-08
H2S	kg	2,62E-06
COV - exceto metano	kg	1,02E-03
Material particulado	kg	5,16E-06
Petróleo	kg	2,85E-04
COV	kg	3,74E-06
Fuligem	kg	2,03E-06
Material particulado suspenso	kg	2,17E-04
SO2	kg	1,32E-03
Aldeído - RCHO	kg	7,30E-08
CxHy alifáticos insaturados	kg	5,45E-04
H2	kg	7,17E-06
HCl	kg	8,25E-06
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	1,10E-08
DQO	kg	2,45E-06
Hidrocarbonetos	kg	4,32E-07
Íons metálicos	kg	4,23E-06
Óleos e graxas	kg	7,70E-06



Sólidos dissolvidos totais	kg	2,31E-05
Sólidos suspensos totais	kg	1,10E-08
Na+	kg	1,74E-05
Cl-	kg	2,61E-05
Petróleo	kg	3,23E-05
H2	kg	2,62E-05
Fenol	kg	8,25E-07
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos oleosos	kg	2,99E-04
Resíduos minerais	kg	9,37E-04
Resíduos sólidos não inertes	kg	2,85E-06
Escória	kg	8,29E-06

Fonte: BORGES (2004)

## ANEXO W - Inventário de vapor consumido no Brasil

Vapor	Unidade	1,0 MJ de Vapor	1,0 MJ de Vapor	1,0 MJ de Vapor
Parâmetro		Diesel	Gás Natural	Óleo Combustível
Entradas				
<i>Entrada de recursos</i>				
Petróleo	kg	2,43E-02	0,00E+00	2,30E-02
Gás natural	kg	1,04E-03	2,40E-02	9,76E-04
Água	kg	1,73E-04	0,00E+00	1,63E-04
Bauxita	kg	7,48E-06	0,00E+00	7,04E-06
Energia elétrica	MJ	0,00E+00	3,99E-03	2,99E-03
Energia não especificada	MJ	6,04E-02	0,00E+00	5,69E-02
Uso do solo	mm <sup>2</sup>	3,82E-01	0,00E+00	3,60E-01
Saídas				
<i>Emissões para o ar</i>				
CO <sub>2</sub>	kg	7,82E-02	5,60E-02	7,83E-02
CO	kg	4,56E-04	2,10E-06	1,01E-05
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	3,66E-05	0,00E+00	3,44E-05
CH <sub>4</sub>	kg	5,89E-06	2,00E-06	1,84E-06
NH <sub>3</sub>	kg	8,07E-10	0,00E+00	1,51E-07
Metais	kg	4,77E-09	0,00E+00	4,49E-09
N <sub>2</sub> O	kg	6,00E-06	1,00E-07	6,02E-07
NO <sub>X</sub>	kg	1,74E-03	1,79E-05	1,18E-04
SO <sub>X</sub>	kg	2,01E-04	0,00E+00	1,18E-06
Metil mercaptana	kg	2,76E-10	0,00E+00	2,57E-10
H <sub>2</sub> S	kg	5,78E-08	0,00E+00	5,45E-08
COV - exceto metano	kg	6,74E-05	0,00E+00	2,13E-05
Material particulado	kg	1,70E-04	2,00E-07	2,07E-07
Petróleo	kg	6,30E-06	0,00E+00	5,92E-06
COV	kg	8,28E-08	0,00E+00	7,79E-08
Fuligem	kg	4,48E-08	0,00E+00	4,24E-08
Material particulado suspenso	kg	4,81E-06	0,00E+00	4,52E-06
SO <sub>2</sub>	kg	2,93E-05	5,50E-07	7,44E-05
Aldeído - RCHO	kg	1,62E-09	0,00E+00	1,52E-09
CxHy alifáticos insaturados	kg	1,21E-05	0,00E+00	1,18E-05
H <sub>2</sub>	kg	1,59E-07	0,00E+00	1,49E-07
HCl	kg	1,82E-07	0,00E+00	2,66E-07
HF	kg	0,00E+00	0,00E+00	9,00E-09
Merúrio	kg	0,00E+00	3,00E-11	5,00E-10
Acetaldeído	kg	0,00E+00	1,01E-09	0,00E+00
Ácido acético	kg	0,00E+00	1,50E-07	0,00E+00

Benzeno	kg	2,00E-08	4,00E-07	1,50E-08
Benzopireno	kg	1,00E-10	1,00E-11	2,80E-11
Butano	kg	0,00E+00	7,00E-07	3,15E-07
Dioxinas	kg	0,00E+00	3,00E-17	4,50E-16
Formaldeído	kg	0,00E+00	1,00E-07	9,00E-07
PAH	kg	0,00E+00	1,00E-08	5,80E-10
Pentano	kg	0,00E+00	1,20E-06	2,10E-07
Propano	kg	0,00E+00	2,00E-07	2,10E-08
Ácido propiônico	kg	0,00E+00	2,00E-08	0,00E+00
Tolueno	kg	0,00E+00	2,00E-07	3,00E-08
Zinco	kg	0,00E+00	0,00E+00	7,00E-07
<i>Emissões para a água</i>				
DBO	kg	2,43E-10	0,00E+00	2,28E-10
DQO	kg	5,40E-08	0,00E+00	5,10E-08
Hidrocarbonetos	kg	9,56E-09	0,00E+00	8,99E-09
Íons metálicos	kg	9,37E-08	0,00E+00	8,82E-08
Óleos e graxas	kg	1,70E-07	0,00E+00	1,60E-07
Sólidos dissolvidos totais	kg	5,12E-07	0,00E+00	4,82E-07
Sólidos suspensos totais	kg	2,43E-10	0,00E+00	2,28E-10
Na+	kg	3,85E-07	0,00E+00	3,60E-07
Cl-	kg	5,78E-07	0,00E+00	5,45E-07
Petróleo	kg	7,15E-07	0,00E+00	6,74E-07
H2	kg	5,81E-07	0,00E+00	5,45E-07
Fenol	kg	1,82E-08	0,00E+00	1,72E-08
<i>Resíduos sólidos</i>				
Resíduos oleosos	kg	6,61E-06	0,00E+00	6,22E-06
Resíduos minerais	kg	2,07E-05	0,00E+00	1,95E-05
Resíduos sólidos não inertes	kg	6,30E-08	0,00E+00	5,94E-08
Escória	kg	1,83E-07	0,00E+00	1,73E-07
<i>Emissões energéticas</i>				
Energia térmica	MJ	1,07E+00	1,10E+00	1,03E+00

Fonte: BORGES (2004)

## ANEXO Y - Inventário de ácido fosfórico consumido no Brasil

Ácido Fósforo consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de H3PO4
Parâmetro		
Entradas		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	1,92E-04
Carvão	kg	1,93E-04
Gás natural	kg	1,66E-05
Combustíveis renováveis	kg	3,81E-09
Água	kg	2,94E+01
Ar	kg	7,22E+00
Urânio	kg	2,70E-09
Rocha fosfática bruta	kg	1,06E+01
Enxofre elementar	kg	4,79E-01
Sal marinho	kg	1,80E-03
Energia elétrica	MJ	5,10E-01
Vapor	MJ	1,03E+01
Energia não especificada	MJ	2,38E-02
Energia (gás natural)	MJ	7,38E-01
Saídas		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO2	kg	2,00E-02
CO	kg	2,69E-06
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	2,56E-07
Vapor de H2O	kg	3,49E-06
CH4	kg	1,14E-06
NH3	kg	8,98E-14
Metais	kg	3,76E-12
N2O	kg	1,66E-07
NOX	kg	1,14E-05
SOX	kg	3,86E-03
Metil mercaptana	kg	1,17E-12
H2S	kg	2,45E-11
COV - exceto metano	kg	2,33E-07
Material particulado	kg	1,64E-03
H2	kg	9,74E-08
Cl2	kg	2,57E-08
Diclorometano	kg	3,60E-08
Fluoretos	kg	2,50E-04
Radioatividade	kBq	1,46E-04
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	3,70E-04

DQO	kg	3,03E-06
Metais pesados	kg	3,24E-12
Hidrocarbonetos	kg	7,48E-10
Ácidos H <sup>+</sup>	kg	2,55E-12
Efluentes líquidos não especificados	kg	3,78E-12
Água residual	kg	3,66E-10
Íons metálicos	kg	1,81E-11
Óleos e graxas	kg	2,10E-09
Sólidos dissolvidos totais	kg	7,50E-10
Sólidos suspensos totais	kg	1,40E-08
Compostos de enxofre	kg	6,75E-12
Compostos de nitrogênio	kg	7,10E-11
Na <sup>+</sup>	kg	1,91E-09
Cl <sup>-</sup>	kg	8,01E-09
Metais	kg	1,50E-10
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	kg	5,90E-05
Magnésio	kg	2,50E-06
Fosfato	kg	5,70E-08
Mercúrio	kg	2,93E-10
Alumínio (Al <sup>3+</sup> )	kg	1,60E-06
Ferro (Fe <sup>3+</sup> )	kg	1,70E-06
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (Ácido fluorsilícico)	kg	4,20E-07
Radioatividade	kBq	2,26E-04
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	1,60E-04
Resíduos oleosos	kg	5,90E-07
Enxofre	kg	1,10E-02
Catalisador não usado	kg	8,42E-02
Resíduos sólidos não inertes	kg	7,95E-09
Resíduos no solo	dm <sup>3</sup>	2,01E-04
Magnetita	kg	1,34E-03
Lama	kg	1,41E-03
Resíduos não apatíticos	kg	4,51E-03
Fosfato	kg	1,28E-02
Sulfato de cálcio	kg	2,51E+00
SiO <sub>2</sub>	kg	2,55E-02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	kg	2,38E-03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	kg	1,19E-03
Flúor	kg	2,45E-02
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	1,09E-07

Fonte: KULAY (2004)

## ANEXO Z - Inventário de ácido clorídrico consumido no Brasil

Ácido clorídrico consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de HCl
Parâmetro		
Entradas		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	9,94E-02
Carvão	kg	6,37E-02
Gás natural	kg	7,66E-03
Água	kg	1,39E+00
Bauxita	kg	2,61E-05
Urânio	kg	8,93E-07
Sal marinho	kg	8,35E-01
Barita	kg	4,01E-05
Cloreto de cálcio	kg	2,04E-04
Energia não especificada	MJ	7,42E-01
Uso do solo	mm <sup>2</sup>	1,24E+03
Saídas		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO <sub>2</sub>	kg	7,48E-01
CO	kg	4,91E-01
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> - Hidrocarbonetos	kg	3,68E-04
Vapor de H <sub>2</sub> O	kg	1,15E+00
CH <sub>4</sub>	kg	2,68E-03
NH <sub>3</sub>	kg	3,49E-08
Metais	kg	2,06E-07
N <sub>2</sub> O	kg	5,47E-05
NO <sub>x</sub>	kg	4,37E-03
SO <sub>x</sub>	kg	1,46E-03
Metil mercaptana	kg	8,17E-10
H <sub>2</sub> S	kg	2,68E-07
COV - exceto metano	kg	1,03E-04
Petróleo	kg	3,01E-05
COV	kg	3,57E-06
Fuligem	kg	2,82E-05
Material particulado suspenso	kg	5,23E-04
SO <sub>2</sub>	kg	1,83E-03
Aldeído - RCHO	kg	6,97E-08
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> alifáticos insaturados	kg	5,77E-05
H <sub>2</sub>	kg	3,90E-01
HCl	kg	1,70E-04
Cl <sub>2</sub>	kg	2,33E-05

Diclorometano	kg	3,85E-06
Pentaclorofluoretano (CFC-111)	kg	5,70E-06
Mercúrio	kg	3,44E-07
Tetraclorometano (CFC-10)	kg	2,06E-06
NO <sub>2</sub>	kg	5,65E-04
Radioatividade	kBq	4,85E-02
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	3,58E-07
DQO	kg	9,51E-07
Hidrocarbonetos	kg	5,62E-07
Ácidos H <sup>+</sup>	kg	8,44E-10
Íons metálicos	kg	3,75E-07
Óleos e graxas	kg	1,33E-06
Sólidos dissolvidos totais	kg	3,81E-05
Sólidos suspensos totais	kg	5,07E-07
Compostos de enxofre	kg	9,03E-05
Compostos de nitrogênio	kg	2,24E-08
Na <sup>+</sup>	kg	1,14E-06
Cl <sup>-</sup>	kg	3,01E-04
Petróleo	kg	2,82E-06
H <sub>2</sub>	kg	2,00E-06
Fenol	kg	4,45E-08
Carbono Orgânico Dissolvido	kg	2,48E-07
Mercúrio	kg	3,16E-08
Ferro (Fe <sup>+3</sup> )	kg	3,95E-06
Bromato	kg	3,16E-06
Brometo	kg	2,55E-06
Clorato	kg	2,40E-06
Cromo	kg	8,93E-10
Radioatividade	kBq	7,47E-02
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	5,31E-02
Resíduos oleosos	kg	2,85E-04
Resíduos minerais	kg	7,77E-05
Resíduos sólidos não inertes	kg	2,61E-02
Escória	kg	4,86E-07
Resíduo para aterro sanitário	dm <sup>3</sup>	6,64E-02
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	1,15E-01

Fonte: VIANA (2008)

## ANEXO AA - Inventário de ácido sulfúrico consumido no Brasil

Ácido sulfúrico consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Parâmetro		
Entradas		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	3,01E-06
Carvão	kg	3,20E-05
Gás natural	kg	1,89E-06
Água	kg	1,74E+00
Ar	kg	4,98E+00
Urânio	kg	4,48E-10
Enxofre elementar	kg	3,30E-01
Vapor	MJ	5,18E+00
Energia não especificada	MJ	3,94E-03
Saídas		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO <sub>2</sub>	kg	4,44E-05
CO	kg	3,27E-07
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> - Hidrocarbonetos	kg	1,87E-09
Vapor de H <sub>2</sub> O	kg	5,74E-07
CH <sub>4</sub>	kg	1,36E-07
NH <sub>3</sub>	kg	1,49E-14
Metais	kg	2,49E-14
N <sub>2</sub> O	kg	2,74E-08
NO <sub>x</sub>	kg	1,43E-06
SO <sub>x</sub>	kg	2,66E-03
COV - exceto metano	kg	1,81E-08
Material particulado	kg	1,67E-07
Radioatividade	kBq	2,43E-05
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	1,74E-10
DQO	kg	3,24E-10
Metais pesados	kg	4,48E-13
Hidrocarbonetos	kg	7,47E-11
Ácidos H <sup>+</sup>	kg	4,23E-13
Óleos e graxas	kg	3,49E-10
Sólidos dissolvidos totais	kg	1,25E-10
Sólidos suspensos totais	kg	2,49E-10
Compostos de enxofre	kg	1,12E-12
Compostos de nitrogênio	kg	1,12E-11
Cl <sup>-</sup>	kg	1,49E-13



Metais	kg	2,49E-11
Radioatividade	kBq	3,75E-05
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	2,66E-05
Enxofre	kg	7,59E-03
Catalisador não usado	kg	5,81E-02
Resíduos no solo	dm <sup>3</sup>	3,33E-05

Fonte: VIANA (2008)

## ANEXO AB - Inventário de óleo combustível consumido no Brasil

Óleo combustível consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de Óleo combustível
Parâmetro		
<b>Entradas</b>		
<i>Entrada de recursos</i>		
Petróleo	kg	9,81E-01
Gás natural	kg	4,17E-02
Água	kg	6,97E-03
Bauxita	kg	3,01E-04
Energia não especificada	MJ	2,43E+00
Uso do solo	mm <sup>2</sup>	1,54E+01
<b>Saídas</b>		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO <sub>2</sub>	kg	1,83E-01
CO	kg	2,61E-04
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> - Hidrocarbonetos	kg	1,47E-03
CH <sub>4</sub>	kg	3,59E-05
NH <sub>3</sub>	kg	3,25E-08
Metais	kg	1,92E-07
N <sub>2</sub> O	kg	7,79E-08
NO <sub>x</sub>	kg	2,89E-03
SO <sub>x</sub>	kg	5,04E-05
Metil mercaptana	kg	1,10E-08
H <sub>2</sub> S	kg	2,33E-06
COV - exceto metano	kg	9,10E-04
Material particulado	kg	4,59E-06
Petróleo	kg	2,53E-04
COV	kg	3,33E-06
Fuligem	kg	1,81E-06
Material particulado suspenso	kg	1,93E-04
SO <sub>2</sub>	kg	1,18E-03
Aldeído - RCHO	kg	6,50E-08
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> alifáticos insaturados	kg	4,85E-04
H <sub>2</sub>	kg	6,38E-06
HCl	kg	7,34E-06
<i>Emissões para a água</i>		
DBO	kg	9,75E-09
DQO	kg	2,18E-06
Hidrocarbonetos	kg	3,84E-07
Íons metálicos	kg	3,77E-06
Óleos e graxas	kg	6,85E-06

Sólidos dissolvidos totais	kg	2,06E-05
Sólidos suspensos totais	kg	9,75E-09
Na+	kg	1,54E-05
Cl-	kg	2,33E-05
Petróleo	kg	2,88E-05
H2	kg	2,33E-05
Fenol	kg	7,34E-07
<i>Resíduos sólidos</i>		
Resíduos oleosos	kg	2,66E-04
Resíduos minerais	kg	8,34E-04
Resíduos sólidos não inertes	kg	2,54E-06
Escória	kg	7,38E-06

Fonte: BORGES (2004)

## ANEXO AC - Inventário do aço consumido no Brasil

Aço consumido no Brasil	Unidade	1,0 kg de aço primário
Parâmetro		
<b>Entradas</b>		
<i>Entrada de recursos</i>		
Minério de ferro	kg	1,35
Sucata	kg	0,285
Ferro liga	kg	1,19E-02
Ferro gusa	kg	0,776
Ferro esponja	kg	0,012
Calcário	kg	0,197
Carvão mineral	kg	0,400757
Carvão vegetal	kg	0,238701
Óleo diesel	kg	7,68E-03
Óleo combustível	kg	7,68E-3
Eletricidade	kWh	0,517231
Minério de manganês	kg	0,009
Dolomita	kg	0,053
Zinco	kg	0,002
Água	l	133,5
<b>Saídas para 1kg de aço primário</b>		
<i>Emissões para o ar</i>		
Aço	kg	1
Água	l	133,5
Recirculada	l	37,38
Perdida	l	96,12
Material particulado	g	2,99
Amônia	g	0,109
CO2	g	527,7
CO	g	72,3
SOx	g	6,48
MnO	g	6,74
P2O5	g	10,9
SiO2	g	0,24
Resíduos sólidos	g	550
Alto forno	g	250
Aciaria	g	120
Aterro	g	180

Fonte: UGAYA (2001)

## ANEXO AD - Inventário do transporte de 1000kg por 1 km

Transporte	Unidade	1 tkm
Parâmetro		
Entradas		
<i>Entrada de recursos</i>		
Óleo diesel	kg	0,0203
<i>Saídas- Emissões para o ar</i>		
Sulfur oxides	kg	1,96E-05
Nitrogen oxides	kg	0,00067
Carbon dioxide, fossil	kg	0,0635
Carbon monoxide, fossil	kg	0,000374
Dinitrogen monoxide	kg	0,000109
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	1,45E-05
Methane, fossil	kg	6,01E-05
Particulates, < 10 um (mobile)	kg	3,04E-05

Fonte: VIANA (2008)

## ANEXO AE - Inventário da areia utilizada na construção das plantas

Extração, beneficiamento e armazenagem	Unidade	1 m <sup>3</sup> de areia			
		Parâmetro			
<b>Entradas</b>					
<i>Entrada de recursos</i>					
		Extração	Beneficiamento	Armazenagem	Total
Água	kg	6,50E+02	6,50E+02		1,30E+03
Diesel	kg	1,70E+00	1,70E+00	3,00E-01	3,70E+00
<b>Saídas</b>					0,00E+00
<i>Emissões para o ar</i>					
CO <sub>2</sub>	kg	5,20E+00	5,20E+00	8,00E-01	1,12E+01
CO	kg	1,20E-03	1,20E-03	1,80E-04	2,58E-03
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	4,80E-05	4,80E-05	7,20E-06	1,03E-04
CH <sub>4</sub>	kg	6,00E-05	6,00E-05	9,00E-07	1,21E-04
N <sub>2</sub> O	kg	2,60E-05	2,60E-05	4,00E-06	5,60E-05
NO <sub>x</sub>	kg	1,40E-03	1,40E-03	2,10E-04	3,01E-03
SO <sub>x</sub>	kg	4,70E-04	4,70E-04	3,60E-05	9,76E-04
Material particulado	kg	2,40E-04	2,40E-04	2,40E-04	7,20E-04
Água residual	kg	4,05E+02	4,05E+02		8,10E+02

Fonte: SOUZA (2012)

## ANEXO AF - Inventário da brita utilizada na construção das plantas

Extração, beneficiamento/ transporte	Unid	1,0 m <sup>2</sup> de construção					
Parâmetro							
<b>Entradas</b>							
<i>Entrada de recursos</i>							
		Extração	Transporte ao Beneficiamento	Beneficia- mento	Transporte do beneficiamento aos caminhões	Transporte ao centro consumidor (50km)	Total
Basalto	kg	5,58E+02	0	0	0	0	5,58E+02
Explosivo							
Nitrato de amônio	kg	1,33E-04	0	0	0	0	1,33E-04
Metileno	kg	7,75E-06	0	0	0	0	7,75E-06
Perfuratriz							
Diesel	kg	2,69E-02	0	0	0	0	2,69E-02
Escavadeira			Caminhão Scania	Equipamen- tos de britagem	Pá carregadeira	Caminhão Mercedes 250CV	
Diesel	kg	9,75E-03	2,62E-03	0	1,45E-02	1,58E-03	2,85E-02
Aditivo para radiador	kg	2,14E-04	1,43E-04	1,43E-04	0	0	5,00E-04
Óleo lubrificante			0				
Óleo de transmissão SAE 90	kg	9,32E-04	0	6,99E-04	0	0	1,63E-03
Óleo 15W40	kg	1,61E-03	0	3,08E-03	0	0	4,69E-03
Óleo lubrificante 220	kg	2,99E-03	0	0	0	0	2,99E-03
Óleo T50	kg	0	0	4,58E-03	0	0	4,58E-03
Óleo 85W140	kg	0	0	4,69E-04	0	0	4,69E-04
Óleo 90 LS	kg	0	0	1,50E-02	0	0	1,50E-02
Óleo AT	kg	0	0	2,30E-04	0	0	2,30E-04
Consumo de energia							
Diesel	kwh	9,87E-02	0	0	4,57E-02	4,99E-03	1,49E-01
Água	kg	0,00E+00	7,73E+00	1,29E+00	0	0	9,02E+00
<b>Saídas</b>							
<i>Emissões para o ar</i>							
Nitrogênio	kg	4,66E-05	0	0	0	0	4,66E-05
CO2	kg	1,23E-01	8,80E-03	0	4,85E-02	5,30E-03	1,86E-01
CO	kg	2,65E-03	1,90E-04	0	1,05E-03	1,15E-04	4,01E-03
CH4	kg	7,89E-06	5,72E-07	0	3,16E-06	3,45E-07	1,20E-05
NOX	kg	3,40E-03	2,44E-04	0	1,35E-03	1,47E-04	5,14E-03
óxido nitroso	kg	9,65E-07	6,91E-08	0	3,82E-07	4,17E-08	1,46E-06
Benzeno	kg	7,87E-09	5,64E-10	0	3,11E-09	3,40E-10	1,19E-08

Formaldeído	kg	1,05E-07	7,55E-09	0	4,17E-08	4,55E-09	1,59E-07
Material particulado	kg	1,56E-05	1,12E-06	0	6,17E-06	6,73E-07	2,36E-05
HCL	kg	5,87E-07	4,21E-08	0	1,32E-07	2,53E-08	7,86E-07
HF	kg	7,35E-08	5,26E-09	0	2,90E-08	3,17E-09	1,11E-07
Amônia	kg	5,84E-12	4,19E-13	0	2,31E-12	2,52E-13	8,82E-12
Óxido sulfúrico	kg	1,72E-04	1,23E-05	0	6,79E-05	7,42E-06	2,60E-04
NM VOC	kg	6,46E-04	4,63E-05	0	2,55E-04	2,79E-05	9,75E-04
Resíduos sólidos							
Aditivo de descarte	kg	2,14E-04	1,43E-04	1,43E-04	0	0	5,00E-04
Óleo de descarte	kg	4,85E-03	0	2,41E-02	0	0	2,90E-02

Fonte: ROSSI (2013)



## ANEXO AG - Inventário do cimento utilizado na construção das plantas

<b>Produção de 1 tonelada de cimento portland CPIIE40</b>	<b>Unidade</b>	<b>1 tonelada de cimento</b>
<b>Parâmetro</b>		
<b>Entradas</b>		
<i>Entrada de recursos</i>		
Calcário	kg	1,65E+03
Argila	kg	4,00E+02
gesso	kg	4,00E+01
Escória	kg	3,40E+02
carvão	kg	1,32E+02
pneu	kg	2,11E+01
<i>Energia elétrica</i>		
Moagem da escória	kJ	71.506,08
Britagem do calcário	kJ	9,31E+03
Moagem da argila	kJ	2,28E+03
Moagem do cru	kJ	7,50E+04
Homogeneização	kJ	10.713,60
Alimentação e exaustão do forno rotativo	kJ	39.506,40
Acionamento do forno	kJ	6.696,00
Acionamento do soprador de ar primário	kJ	2.151,65
Resfriador de clínquer	kJ	14.508,00
Transporte de clínquer	kJ	5.624,64
Moagem de clínquer	kJ	99.819,50
Precipitador eletrostático	kJ	1.450,80
<b>Saídas</b>		
<i>Emissões para o ar</i>		
CO2	kg	6,40E+02

Fonte: BORGES *et al.* (2014)

## ANEXO AH - Inventário do concreto utilizado na construção das plantas

<b>Produção de 2.396 kg de concreto tradicional (2400kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Unidade</b>	<b>2.396 kg de concreto</b>
<b>Parâmetro</b>		
<b>Entradas</b>		
Entrada de recursos		
Cimento	kg	4,22E+02
Areia	kg	7,30E+02
Brita	kg	1,05E+03
Água	l	1,93E+02
Aditivo plastificante	kg	3,10E+00
<i>Energia elétrica</i>		
Produção de aditivo plástico	MJ	19,84
<b>Saídas</b>		
Emissões para o ar		
CO2	kg	1,18E+00

Fonte: BORGES *et al.* (2014)

## ANEXO AI - Inventário da argamassa utilizada na construção das plantas

<b>Argamassa (1:1:6) Usada em alvenaria de vedação e estrutural</b>	<b>Unida de</b>	<b>4,06 kg de argamassa</b>
<b>Parâmetro</b>		
<b>Entradas</b>		
Entrada de recursos		
		Extração
Cimento	g	3,33E+02
Cal	g	2,10E+02
Areia	g	2,89E+03
Água	g	6,23E+02
Máquina industrial pesada, não especificada	kg	2,78E-02
Eletricidade	kwh	1,13E+02

Fonte: SANTOS (2008); ECOINVENT V. 3.01- *Cement mortar production CH* - (2013)

## ANEXO AJ – Substâncias utilizadas da base de dados Ecoinvent v 3.01 - SIMAPRO

Substância	Autor/processo/ Fases inclusas	Substituições de matéria prima para dados brasileiros
Acetic acid production, product in 98% solution state RoW.	Hans-Jörg Althaus. The process stands for the Monsanto process in which methanol reacts with carbon monoxide under the influence of a rhodium catalyst. It is assumed that 50% of the off-gas is burned as fuel, thus VOC emissions are reduced and CO <sub>2</sub> is higher. The production including refining.	Metanol, vapor gerado por gás natural, eletricidade
Acrylic binder production, product in 34% solution state RER	Maggie Osses. Manufacturing process is considered with consumption of raw materials, energy, infrastructure and land use, as well as generation of solid wastes and emissions into air and water. Transport of the raw materials and solid wastes is included. No by-product is generated in the process. Transportation and consumption of auxiliaries are not included due to the lack of data. Transport and storage of the final product are not included. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Solid wastes are assumed to be sent to hazardous waste incineration. Inventory refers to 1 kg 100% acrylic binder. The literature source is von Däniken <i>et al.</i> 1995.	Vapor gerado por gás natural, eletricidade
Aluminium fluoride production RER	Roland Hischer. Process data based on stoichiometric calculations of few literature sources. Energy demand based on approximation from large chemical plant. Process emissions based on estimations only. The functional unit represent 1 kg of solid aluminium fluoride. Large uncertainty of the process data due to weak data on the production process and missing data on process emissions.	Eletricidade
Aluminium hydroxide production GLO	Samantha Jones. Data on Al(OH) <sub>3</sub> extraction and calcination to Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> was aggregated on original source (IAI 2010, IAI personal communication 2011). In- and outputs of Al(OH) <sub>3</sub> are calculated according to the stoichiometry (1.530 kg Al(OH) <sub>3</sub> --> 1.000 kg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 0.530 kg H <sub>2</sub> O). Separate energy data was provided by IAI for production of hydrate and calcination processes. The Al(OH) <sub>3</sub> extraction process involves adding milled bauxite to a hot caustic soda (NaOH) solution, dissolving the aluminium-bearing minerals (gibbsite, böhmite and diaspor) present to form a sodium aluminate supersaturated solution or “pregnant liquor”. Flocculants are added to aid settling	Soda cáustica, vapor gerado por gás natural, eletricidade

	<p>and the solution is progressively cooled causing aluminium hydroxide crystals to precipitate. Further information can be found at <a href="http://bauxite.world-aluminium.org/refining/process.html">http://bauxite.world-aluminium.org/refining/process.html</a>.</p> <p>Included activities start: Unit process starts with the unloading of the process materials to their storage areas on site.</p> <p>Included activities end: Includes transport of bauxite and other inputs to the calcination plant, the extraction of Al(OH)<sub>3</sub> (grinding, digestion and precipitation) and the disposal of the wastes. Also includes maintenance and repair of plant and equipment and treatment of process air, liquids and solids.</p>	
Aluminium oxide production GLO	<p>Samantha Jones.</p> <p>Data on Al(OH)<sub>3</sub> extraction and calcination to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was aggregated on original source (IAI 2010, IAI personal communication 2011). In- and outputs of Al(OH)<sub>3</sub> are calculated according to the stoichiometry (1.530 kg Al(OH)<sub>3</sub> --&gt; 1.000 kg Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0.530 kg H<sub>2</sub>O). Separate energy data was provided by IAI for production of hydrate and calcination processes.</p> <p>Included activities start: Unit process starts with the receiving of the aluminium hydroxide, produced onsite.</p> <p>Included activities end: Includes calcination of Al(OH)<sub>3</sub> to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and it's infrastructure. No transports are included because Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is produced in the same plant as Al(OH)<sub>3</sub>.</p>	Vapor gerado por gás natural e eletricidade
Ammonium sulfate production RER	<p>Refers to 1 kg N, resp. 4.76 kg ammonium sulphate with a N-content of 21.0%.</p> <p>Included activities end: The unit process inventory takes into account the use of energy resources cited in Kongshaug (1998), needed for the production of ammonium sulphate as by-product during the manufacture of nylon (caprolactam). These values must be considered as uncertain, because the system boundaries were not clearly defined by Kongshaug. Infrastructure was included by means of a proxy module.</p>	Vapor gerado por gás natural e eletricidade
Ammonia production, partial oxidation, liquid RER	<p>Maggie Osses. Manufacturing process starting with heavy fuel oil, air and electricity is considered, plus auxiliaries, energy, transportation, infrastructure and land use, as well as wastes and emissions into air and water. Transport of the raw materials, auxiliaries and wastes is included, transport and storage of the product are not included. Carbon Dioxide is the byproduct generated. Transcient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in</p>	Eletricidade

	<p>a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Values are taken principally from EFMA 2000 and Frischknecht 1999 (see report). Inventory refers to 1 kg 100% ammonia, at plant.</p>	
<p>Anti-reflex-coating, etching, solar glass DK</p>	<p>Niels Jungbluth. The filter cake contains silicone-sodium-fluoride and calcium carbonates or oxides. They can be disposed with the normal household wastes. Standard distances have been assumed for the transport. The exhausts from the treatment chambers go through a so-called air-scrubber (air/water cleaner). The waste material from the scrubber is collected with the water from rinsing of the glasses between the different operations of the treatment and from the final cleaning. This liquid is then passed through a waste water treatment system, resulting in clean water, to be used again in process. The dry matters from the filter press consist of non-aggressive and non-toxic materials, mainly silica-, sodium-, fluoride- and calcium- carbonates and oxides. Included activities end: Gate to gate inventory for the process including cleaning, etching and clarification and drying. Losses of glass are not included.</p>	<p>Vapor gerado por gás natural, eletricidade</p>
<p>Argon production, liquid RER</p>	<p>Alex Primas. This dataset represents the production of liquid argon by means of the cryogenic air distillation process and further crude argon purification. As a resource hydrogen (Process: hydrogen, liquid, at plant, RER) is used to purify the liquefied crude argon. For further compressing, distilling and cooling, electricity (process: electricity, medium voltage, production UCTE, at grid) was used. Included activities start: From crude liquid argon containing hydrogen obtained in an air distillation plant. Included activities end: This activity ends with the obtention of liquid purified argon. The dataset includes the electricity for process, hydrogen for catalytic burning of oxygen. An approximation for additional Infrastructure is made.</p>	<p>Eletricidade</p>
<p>Autoclaved aerated concrete block production CH</p>	<p>Daniel Kellenberger. Hardening is assumed to be by air-drying. It is assumed that there is wastewater and solid waste, but as no exact description on the composition of the wastewater and solid waste is available a proxy for each ("treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3" and "disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal</p>	<p>Areia, aluminio, óleo diesel, vapor gerado por gás natural, eletricidade</p>

	<p>incineration") is used. The lifespan of the plant is assumed to be 50 years.</p> <p>Included activities end: includes the raw materials, their transport to the finishing plant, the energy for the autoclaving process, the packaging, the infrastructure and the disposal of wastewater and some solid household (e.g. packing material) waste</p>	
Benzene production RER	<p>Roland Hischier.</p> <p>Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N2 / O2 consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.</p> <p>Included activities end: Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant</p>	Enxofre, areia, alumínio
Brass production CH	<p>Hans-Jörg Althaus.</p> <p>This dataset describes the processing of copper and zinc, up to production of 1 kg of molten brass.</p> <p>Included activities start: From reception of copper at the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with the melting of copper and zinc.</p>	Vapor de gás natural e eletricidade
Hydrated lime CH	<p>Data is based on a Swiss company. This dataset represents the production of 1 kg of hydrated lime. The infrastructure data is estimated based on a tour and sketches of the process, and normalized with a annual production capacity of about 20'000 tons of product per year. There are no significant dust emissions as a dust control system is installed.</p>	Eletricidade
Market for building, hall, steel construction GLO	<p>support@ecoinvent.org</p> <p>extrapolations: This dataset has been extrapolated from year 2011 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.</p>	
Soda production, solvay process RER	<p>Maggie OsseS.</p> <p>The multioutput process "soda production, Solvay process, at plant" delivers the co-products "soda, powder, at plant" and "calcium chloride, CaCl<sub>2</sub>, at plant". An allocation to the two products is done by using the prices, resulting in soda 33% and calcium chloride 67%.</p> <p>Included activities end: Manufacturing process by means of the Solvay technique is considered, including the consumption of raw materials, auxiliaries, energy, infrastructure and land use, as well as transport of the raw materials, auxiliaries and wastes. The system</p>	Eletricidade

	<p>also includes the generation of wastes and emissions into air and water. Transport and storage of the final product soda are not included. No byproducts or coproducts are considered. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Solid wastes are assumed to be sent to landfill. Most data are from a German study based on measurements in two German plants. A Finnish study bases also on data from one plant, but no background information about the data is available. The other sources are literature data and estimations. Highest value is taken (conservative criterion). Inventory refers to 1 kg 100% soda, powder, at plant. The production of light soda is considered; the process to obtain heavy soda from light soda is not included.</p>	
Chlorine production, liquid GLO	<p>Gregor Wernet. A simple dataset modelling the liquefaction of gaseous chlorine. This is based on the old dataset of the liquid chlorine production mix inecoinvent v2.x. Further background information is available in the main source. Included activities end: Only the liquefaction step is included.</p>	Eletricidade
Dummy_Skidding, grapple skidder, >140 HP/hr/RNA	Unspecified	
Corrugated board box production RER	<p>Bo Weidema. sampling procedure: Data were collected from the producers by FEFCO and checked by technical experts. The data on corrugated board production are based on 236 plants in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Great Britain, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Lithuania, the Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Spain, Sweden and Switzerland. Together they produce 9.051.000 tonnes net saleable product, which is 42% of the total annual production of corrugated board in Europe. Included activities start: The process starts as reels of Fluting Medium and Linerboard are fed into a machine called a Corrugator. The Fluting Medium paper is conditioned with heat and steam and fed between large corrugating rolls that give the paper its fluted shape in the Single Facer. Starch is applied to the tips of the flutes on one side and the inner liner is glued to the fluting. The corrugated fluting medium with the liner attached to it is called single face web and travels along the machine towards the Double</p>	Gás natural, óleo diesel, vapor gerado por óleo combustível, eletricidade



	<p>Backer where the single face web meets the outer liner and forms corrugated board. A number of layers of single faced web may be built up to produce double and triple wall corrugated board. The corrugated board is slit into the required widths and cut into sheets which are then stacked or palletised.</p> <p>Included activities end: The final stage of the process consists of printing and then slotting, folding and gluing the corrugated board to manufacture a corrugated box.</p>	
Cryolite production RoW	<p>sampling procedure: Process data based on stoichiometric calculations of few literature sources. Energy demand based on approximation from large chemical plant. Process emissions based on estimations only.</p> <p>Included activities end: Raw materials and chemicals used for production, transport of materials to manufacturing plant, estimated emissions to air and water from production (incomplete), estimation of energy demand and infrastructure of the plant (approximation). Solid wastes omitted.</p>	Soda cáustica, eletricidade
Diesel, burned in building machine GLO	<p>Daniel Kellenberger.</p> <p>sampling procedure: Some data from the LCA study Oekoinventare von Energiesystemen 1996 and emissions from the Swiss "Offroad" database.</p> <p>Included activities end: Includes the inputs "building machine" for infrastructure, lubricating oil and fuel consumption, and some measured air emissions as output.</p>	Óleo diesel
Diphenylether-compound production RER	<p>Jürgen Sutter. This dataset represents the production of diphenylether-compounds (1 kg of active ingredient). Raw materials are modelled with a stoichiometric calculation. Energy consumption is modelled with data from a similar process. The emissions are estimated. Infrastructure is included with a default value.</p> <p>Included activities start: From reception of precursors (acetaldehyde, ammonia, 2-butanol, carbon monoxide, chlorine, ethylene, hydrochloric acid, hydrogen, hydrogen fluoride, hydrogen peroxide, nitric acid, o-dichlorobenzene, oxygen, p-dichlorobenzene, phenol, propylene, sodium hydroxide, sulfur, sulfur dioxide, toluene, and water decarbonised) at the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with diphenylether-compounds at the factory gate. The dataset includes the input materials, energy uses, infrastructure and emissions. The dataset doesn't include emulsives, additives etc.</p>	Soda cáustica, ácido clorídrico, etileno, vapor de gás natural, eletricidade

Dolomite production RER	<p>Roland Hischer.</p> <p>Raw material, energy and water consumption, infrastructure for the site and machineries, land use, and emissions to air are a first approximation based on limestone production. Included activities start: From dolomite in ground.</p> <p>Included activities end: This activities ends with the production of 1 kg of dolomite. The dataset includes raw materials, machineries, energy consumption, emissions to air, and infrastructure of the site. The dataset doesn't include emissions to water.</p>	<p>Calcário, óleo diesel, vapor gerado por gás natural, eletricidade</p>
Drawing of pipe, steel RER	<p>Silvio Blaser.</p> <p>Seamless tube production consists basically of the following manufacturing steps: Heating of the input, Piercing (press-piercing or oblique rolling), Elongation/Stretching, Final Rolling and Heat Treatment.</p> <p>Included activities end: The module describes the manufacturing of seamless tubes. It is not representative for welded tubes. It includes 110% of the wire drawing process. Does not include the material being rolled</p>	
Epoxy resin production, liquid RER	<p>Niels Jungblut. This dataset has been extrapolated from year 1995 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.</p> <p>Included activities end: Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant</p>	
Ethylvinylacetate production, foil RER	<p>Roland Hischer.</p> <p>extrapolations: This dataset has been extrapolated from year 1997 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.</p> <p>Included activities end: This process contains the plastic amount and the transport of the plastic from the production site to the converting site as well as the dataset "extrusion, plastic film"</p>	
Excavation, hydraulic digger RER	<p>Daniel Kellenberger. sampling procedure: Some data from the LCA study Oekoinventare von Energiesystemen 1996 and emissions from the Swiss "Offroad" database.</p> <p>Included activities end: Includes the inputs "hydraulic digger" for infrastructure, lubricating oil and fuel consumption, and some measured air emissions as output.</p>	<p>Óleo diesel</p>
Excavation, skid-steer loader RER	<p>Daniel Kellenberger. sampling procedure: Some data from the LCA study Oekoinventare von Energiesystemen 1996 and emissions from the Swiss "Offroad" database.</p>	<p>Óleo diesel</p>

	Included activities end: Includes the inputs "building machine" for infrastructure, lubricating oil and fuel consumption, and some measured air emissions as output.	
Feldspar production RoW	Roland Hischer. sampling procedure: Data based on filled in formulaire of one single company - expanded with general data for mining activities. Included activities start: From cradle, i.e. including all upstream activities.	
Flat glass production, coated RER	Daniel Kellenberger. All data are based on the environmental report of the company "Interpane" (DE) for the year 2000. The Targets used for sputtering are bismuth, silver and nickel-chromium. Only nickel-chromium is modelled for missing silver and bismuth modules in the database. Included activities end: Includes all measured In- and Output materials and energy carriers reported for a German glass coating plant during ist operation (coating process, internal transports, packing and administration).	Eletricidade, vapor gerado por gás natural
Flat glass production, uncoated RER	Daniel Kellenberge. This dataset represents the production of 1 kg of uncoated flat glass. The amount of raw materials is calculated based on the composition of flat glass. The total amount of energy is partitioned in 58% from natural gas, 38% heavy fuel oil and 5% electrical. The amount of tin yearly added to the tin bath is assumed to leave the system by air, as part of the particulates. The same with lead. Both emissions are double counted: as particulate and as emission to air. Most other emissions are a mean value of plants with and plants without abatment. It is assumed that half of water evaporates and other half is treated. Included activities end: includes the whole manufacturing process to produce flat glass (raw material provision, cullet addition, melting process, forming process (on float bath), cooling process (annealing lehr), cutting process and storage), internal processes (transport, etc.) and infrastructure. No administration and packing is included.	Aço, vapor gerado por gás combustível, eletricidade
EUR-flat pallet production RER	Daniel Kellenberger. [This is a dataset that was already contained in ecoinvent database version 2 that was not extensively or individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. It was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2 and it may not in all aspects meet the additional requirements of the ecoinvent data quality guidelines for version 3. It was updated in a series of central changes described in the ecoinvent version 3 change report	Aço

		<p>(<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>) that were aiming to fulfill most new requirements, and the results of the central updates were reviewed extensively. The documentation of this dataset refers to the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website, and the change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p> <p>Included activities end: Includes only the materials and not the process of construction. The examined system is from gate to gate and as in most cases the paletts have a long life-span the waste treatment is not included. It must be included in the packing module</p>	
Refrigerant production RER	R134a	<p>Thomas Heck . This dataset represents the production of 1 kg refrigerant R134a. This dataset is based on data given in Frischknecht 1999. It is assumed that the amount of R134a is compounded of 50% of trichloroethylene and of 50% of tetrachloroethylene. According to WPZ a range of different refrigerants are used in heat pumps. R134a is used in heat pumps both in pure form and in widespread refrigerant mixtures.</p> <p>Included activities start: From reception of trichloroethylene and tetrachloroethylene at the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with the production of refrigerant R134a. Emissions during production process are included. This dataset doesn't include hydrochloric acid, however 1.07 respectively 2,2 kg of hydrochloric acid are produced both with the trichloroethylene and with the tetrachloroethylene process.</p>	Eletricidade
Glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded RER		<p>Niels Jungbluth. This is a dataset that was already contained in ecoinvent database version 2 that was not extensively or individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. It was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2 and it may not in all aspects meet the additional requirements of the ecoinvent data quality guidelines for version 3. It was updated in a series of central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>) that were aiming to fulfill most new requirements, and the results of the central updates were reviewed extensively. The documentation of this dataset refers to the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website, and the change report linked above</p>	

	<p>covers all central changes that were made during the conversion process.</p> <p>Included activities end: Gate to gate inventory for the injection moulding of glass fibre with polyamide resin including material inputs, process and infrastructure.</p>	
Graphite production RER	<p>Roland Hischer.</p> <p>This dataset represents the production of 1 kg of graphite from metamorphous rock in ground containing graphite.</p> <p>Included activities start: From metamorphous rock in the ground containing graphite.</p> <p>Included activities end: This activity ends with the production of 1 kg of graphite. The dataset includes raw materials, machineries, energy consumption, emissions to air, and infrastructure of the site. The dataset doesn't include emissions to water.</p>	<p>Calcário, óleo diesel, vapor gerado por gás natural, eletricidade</p>
Helium purification GLO	<p>Tereza Levova.</p> <p>This dataset represents purification of helium, crude to helium Grade - A and its liquefaction. The technology used for helium purification is pressure swing adsorption (PSA) and liquefaction unit. The dataset is based on literature and estimates. The uncertainty of the data is rather high.</p> <p>Included activities start: This activity boundaries are given by the boundaries of the technology - the PSA (pressure swing adsorption) and liquefaction unit. The activity starts when helium, crude enters this technology.</p> <p>Included activities end: This activity ends when purified, liquified Grade - A helium (99.995% of helium) leaves the technology.</p>	<p>Eletricidade</p>
Hydrogen fluoride production GLO	<p>Niels Jungbluth. This dataset has been extrapolated from year 2006 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.</p> <p>Included activities end: Production of hydrogen fluoride from fluorspar and sulphuric acid.</p>	<p>Ácido sulfúrico, eletricidade, vapor gerado por gás natural</p>
Hydrogen cracking, APME RER	<p>Roland Hischer. This data represents the production of 1 kg of liquid hydrogen via the cracking of fossil fuels. Raw materials and emissions are modelled with literature values representing an aggregation of data from 17 production plants. Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water.</p> <p>Included activities start: From the reception of fossil fuels at the factory gate.</p>	

	Included activities end: This activity ends with the production of 1 kg of liquid hydrogen, 100% at the factory gate. The dataset includes the input materials and emissions.	
Hydrogen peroxide production, product in 50% solution state RER	Roland Hischier. Data based on a study, performed by EMPA and Boustead Consulting, commissioned by CEFIC. Included activities end: This module contains material and energy input, production of waste and emissions for the production of hydrogen peroxide by the anthraquinone process. Transport and infrastructure have been estimated. The input of 215 g air is not reported in the data according to the methodology of the study.	Soda cáustica, vapor gerado por gás natural, eletricidade
Inverter production, 2.5kW RER	Matthias Tuchschnid. Production of an inverter (2500W) with an efficiency of 93.5% (total efficiency factor which includes MPP-Tracking) for photovoltaic plant. Total weight about 18.5 kg. Included activities end: Materials, packaging and electricity use for the production of an inverse rectifier. Disposal of the product after use.	Aço, alumínio, transporte, eletricidade,
Isopropanol production RER	Roland Hischie. The functional unit represent 1 kg of liquid isopropanol. Large uncertainty of the process data due to weak data on the production process and missing data on process emissions. Included activities end: Raw materials and chemicals used for production, transport of materials to manufacturing plant, estimated emissions to air and water from production (incomplete), estimation of energy demand and infrastructure of the plant (approximation). Solid wastes omitted.	Ácido sulfúrico, vapor gerado por gás natural, eletricidade
Isopropyl acetate production RER	Jürgen Sutter. The process "isobutyl acetate, at plant, RER" is modelled for the production of isopropyl acetate from isopropanol in Europe. Raw materials are modelled with a stoichiometric calculation. Energy consumptions are modelled with data from a similar process. The emissions are estimated. Infrastructure and transports are calculated with standard values. Included activities end: Production of isopropyl acetate including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Vapor gerado por gás natural, eletricidade
Lead stockpiling GLO	Sofia Parada. This dataset describes the stockpiling of lead following its extraction during mining. It represents a combined production, with the treatment of lead for stockpiling and the provision of lead. Land	Aço, brita

	<p>occupation is adapted from storage of sulfur due to lack of specific data. No emissions are considered.</p> <p>Included activities start: Activity starts with the arrival of lead at the stockpile</p> <p>Included activities end: The activity ends with the provision of lead after stockpiling</p>	
Petroleum refinery operation CH	<p>Niels Jungbluth.</p> <p>Description of all flows of materials and energy due to the throughput of 1kg crude oil in the refinery. The multioutput-process 'crude oil, in refinery' delivers the co-products petrol, unleaded, bitumen, diesel, light fuel oil, heavy fuel oil, kerosene, naphtha, propane/ butane, refinery gas, secondary sulphur and electricity. The impacts of processing are allocated to the different products.</p> <p>Included activities end: All processes on the refinery site excluding the emissions from combustion facilities, including waste water treatment, process emissions and direct discharges to rivers.</p>	<p>Petróleo, eletricidade, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, vapor gerado por gás natural, eletricidade, vapor gerado por óleo combustível</p>
Lubricating oil production RER	<p>Roland Hischier.</p> <p>sampling procedure: Process data based on stoichiometric calculations of few literature sources. Energy demand based on approximation from large chemical plant. Process emissions based on estimations only.</p> <p>Included activities start: From the reception of diesel at the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with 1 kg of lubricating oil at the factory gate. The dataset includes the input materials, energy uses, infrastructure and emissions.</p>	<p>Óleo diesel, vapor gerado pelo gás natural, eletricidade</p>
Metallization paste production, back side, aluminium RER	<p>Mariska J. de Wild-Scholten. Chemical composition of typical pastes taken from Material Safety Data Sheets. Energy use and infrastructure estimated with data for solder production.</p> <p>Included activities end: Production of paste used in production of photovoltaic cells.</p>	<p>Areia, alumínio, eletricidade, vapor gerado por gás natural</p>
Metallization paste production, back side RER	<p>Mariska J. de Wild-Scholten. Chemical composition of typical pastes taken from Material Safety Data Sheets. Energy use and infrastructure estimated with data for solder production.</p> <p>Included activities end: Production of paste used in production of photovoltaic cells.</p>	<p>Eletricidade, vapor gerado por gás natural</p>
Metallization paste production, front side RER	<p>Mariska J. de Wild-Scholten. Chemical composition of typical pastes taken from Material Safety Data Sheets. Energy use and infrastructure estimated with data for solder production.</p>	<p>Eletricidade, vapor gerado por gás natural</p>

	Included activities end: Production of paste used in production of photovoltaic cells.	
Market for nickel, 99.5% GLO	support@ecoinvent.org extrapolations: This dataset has been extrapolated from year 2011 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.	Transporte
Nitric acid production, product in 50% solution state RER	<p>Maggie Osses. This data represents the production of 1 kg of nitric acid, 50% in solution state via the oxidation of ammonia. Raw materials, energy consumption, auxiliaries and emissions are modelled with available literature data. Infrastructure is included with a default value.</p> <p>Included activities start: From the reception of ammonia at the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with 1 kg of nitric acid, 50% in solution state at the factory gate. The dataset includes the input materials, auxiliaries, energy uses, infrastructure and emissions.</p>	Eletricidade
Air separation, cryogenic RER	<p>Alex Prima.</p> <p>This dataset represents the production of liquefied nitrogen, oxygen and argon by cryogenic air separation. The liquefaction process of air represents an average cryogenic air separation process. Air as main resource for air liquefaction was not accounted because of inexhaustibility and the short recycling time of the withdrawn products (especially for argon and nitrogen, less for oxygen). A resource of minor importance is cooling water. No gaseous product is considered. Emissions to the air are already included in the preceding processes, especially in the electricity production, and are therefore not considered here. The separated CO<sub>2</sub> and water vapour from the separation process were not accounted as emissions. The reason is that these components were already contained in the air input, so that they do not represent effective emissions. As wastewater, there is the unevaporated share of the make-up cooling water, but it was not listed because only minor emissions from this source were expected. For the liquefaction process the functional unit is 1 kg of liquefied air in this dataset.</p> <p>Included activities start: From the cryogenic air separation into an "air separation facility".</p> <p>Included activities end: This activity ends with the production of liquefied nitrogen, oxygen and argon by cryogenic air separation. The dataset includes as input the electricity for process, cooling water and infrastructure for air separation plant. This dataset does not include the extraction of noble gases from the liquid gases (e.g. Xenon and Krypton from the</p>	Eletricidade



	liquid oxygen). It does not include, furthermore, the air and its components as a resource, neither the air and water emissions, which were neglected.	
Air separation, cryogenic RER	Alex Primas. This dataset represents the production of liquefied nitrogen, oxygen and argon by cryogenic air separation. The liquefaction process of air represents an average cryogenic air separation process. Air as main resource for air liquefaction was not accounted because of inexhaustibility and the short recycling time of the withdrawn products (especially for argon and nitrogen, less for oxygen). A resource of minor importance is cooling water. No gaseous product is considered. Emissions to the air are already included in the preceding processes, especially in the electricity production, and are therefore not considered here. The separated CO <sub>2</sub> and water vapour from the separation process were not accounted as emissions. The reason is that these components were already contained in the air input, so that they do not represent effective emissions. As wastewater, there is the unevaporated share of the make-up cooling water, but it was not listed because only minor emissions from this source were expected. For the liquefaction process the functional unit is 1 kg of liquefied air in this dataset.	Eletricidade
Polyvinylfluoride production US	Niels Jungbluth. This dataset has been extrapolated from year 2006 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly. Included activities end: Pre-products, energy use, infrastructure, some air emissions and transports. No full information on all air and water emissions available.	Vapor gerado por gás natural, eletricidade
Potassium chloride production RER	Thomas Nemecek. Refers to 1 kg K <sub>2</sub> O, resp. 1.67 kg potassium chloride with a K <sub>2</sub> O-content of 60.0% Included activities end: Starting from mining of potash salts, the processes of concentration of the potassium chloride, conditioning, drying and transport to the regional storage were included. The use of the resource sylvinit was accounted for as well as the disposal of the salt residues on heaps and to rivers. Treatment of other wastes was included. Coating and packaging of the final fertiliser products were not included. Infrastructure was included by means of a proxy module.	Óleo diesel, vapor gerado por gás natural
Potassium hydroxide production RER	Mike Chudacoff. Potassium hydroxide is manufactured by the electrolysis of potassium chloride brine in electrolytical cells.	Vapor gerado por gás natural, eletricidade

	Included activities end: cradle-to-gate, including all precursors, ancillary materials and transports	
Refractory production, fireclay, packed DE	Tina Künniger. This dataset represents the production of 1 kg of refractory fireclay bricks. Included activities start: From chamotte and clay, at the factory gate. Included activities end: The activity ends with the packed product, at factory. This dataset includes the whole manufacturing process, internal processes (transport, etc.), packing and infrastructure. This dataset doesn't include the administration.	Óleo diesel, eletricidade, vapor gerado por gás natural
Reinforcing steel production RER	Hans-Jörg Althaus. Represents Average of World and European production mix. This is assumed to correspond to the consumption mix in Europe. Included activities end: Mix of differently produced steels and hot rolling	Aço
Road construction, company, internal CH	Michael Spielmann. All data is referred to meter2*year. Construction data is based on material expenditures for Swiss 2nd class roads. Included activities end: Inventory for construction and operation of the traffic area (roads and parking) on company sites. The inventory includes processes for the supply of used materials such as gravel and bitumen . NMVOC emissions from bitumen are included. Transport of materials to the constructions site has been taken into account. Also, de-icing with sodium chlorid is accounted for. Energy cosumption due to lighting is excluded as well as weed control and marking.	Eletricidade, óleo diesel
Rock wool production, packed CH	Hans-Jörg Althaus. With functional unit kg, this module can be used for rock wool products with different densities. For the calculation of the packaging material demand, 100 kg/m3 are assumed (volume: 2.4m3, load weight: 250 kg). Inputs and outputs are not balanced in the unit process since some are included in the unit process "rock wool, at plant". Included activities end: Includes mechanical packing and the administration of the rock wool factory.	Vapor gerado por gás natural, eletricidade
Sheet rolling, aluminium RER	Silvio Blaser. Aluminium ingots of 500-700 mm thickness and up to 25 tonnes weight, are rolled, first hot, then cold, to a final sheet thickness ranging from 0.2 to 6 mm. The module can be applied also for section bar rolling of aluminium. Included activities end: All the process steps, which can be attributed to semi-fabrication	Alumínio, aço, eletricidade, vapor gerado por gás natural

	(sawing, scalping, hot rolling, cold rolling, solution heat treatment, finishing and packaging), are included. Does not include the material being rolled, only the amount of scrap lost in waste is balanced as primary aluminium input. Includes the transport of the materials to the plant, but does not include the transport of the product to the customer.	
Sheet rolling, steel RoW	<p>Silvio Blaser.</p> <p>This process is to be used only for un- and low-alloyed steel. For many applications, the products of hot rolling are unsatisfactory, e.g., with respect to cross section, surface quality, dimensional accuracy, and general finish, so that cold rolling is necessary. Cold rolled products are mainly strips and sheets with high quality surface finish and precise metallurgical properties for use in high specification products.</p> <p>Included activities end: Includes the process steps continuous pickling line, cold rolling, annealing, tempering, inspecting and finishing, packing coils or sheets, roll maintenance. Does not include the material being rolled</p>	Ácido sulfúrico, ácido clorídrico, aço, vapor gerado por gás natural, eletricidade
Silicon carbide production RER	<p>Mariska J. de Wild-Scholten.</p> <p>Life cycle inventory for the production process based on raw material inputs and data for energy use and emissions.</p> <p>Included activities end: Gate to gate inventory for production of silicon carbide from silica sand. Including materials and electricity use. Some emissions to air from the process.</p>	Areia, petróleo, eletricidade
Silicon hydrochloration GLO	<p>Niels Jungbluth.</p> <p>This multi-output dataset represents the production of silicon tetrahydride by hydrochloration of silicon to trichlorosilane and disproportionation of trichlorosilane. The functional unit is 1 kg MG-silicon. The system includes the process with consumption of raw materials, energy, infrastructure, and land use, as well as the generation of emissions to air and water. It also includes transportation of the raw materials. Transient or unstable operations like starting-up or shutting-down, are not included, but the production during stable operation conditions. Storage and transportation of the final product are also not included. It is assumed that the manufacturing plants are located in an urban/industrial area and consequently the emissions are categorised as emanating in a high population density area. The emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Within the catalytic disproportionation of trichlorosilane, silicon tetrahydride and tetrachlorosilane are derived as co-products.</p>	Sílicio metalúrgico, ácido clorídrico, vapor gerado por gás natural, eletricidade

	<p>Included activities start: From the reception of MG-silicon and hydrochloric acid to the factory gate.</p> <p>Included activities end: This activity ends with the trichlorosilane hydrogenation process including materials, energy uses, infrastructure and emissions.</p>	
Silicone product production RER	<p>Niels Jungbluth.</p> <p>Average of about 2000 products. The inventory has been calculated as a weighted mean of two production facilities which produce both a range of different products.</p> <p>Included activities end: Gate to gate inventory for the production of average silicon products.</p>	Soda cáustica, silício metalúrgico, ácido sulfúrico, metanol, etileno, polietileno, eletricidade, vapor gerado por gás natural
Market for silver GLO	<p>support@ecoinvent.org.</p> <p>extrapolations: This dataset has been extrapolated from year 2011 to the year of the calculation (2013). The uncertainty has been adjusted accordingly.</p>	Transporte
Sodium chloride production, powder RER	<p>Roland Hischer.</p> <p>sampling procedure: questionnaire from one European solution mining site</p> <p>Included activities end: this module includes the solution mining process of sodium chloride, its cleaning from impurities, and the drying step. It is sold as bulk and therefore no packaging materials are included.</p>	Eletricidade, vapor gerado pelo gás natural
Sodium nitrate production RER	<p>Jürgen Sutter. Sodium nitrate (NaNO<sub>3</sub>; CAS 7631-99-4), Chile saltpeter, Chilean nitrate) forms colourless crystals.</p> <p>Included activities end: production of sodium nitrate including materials, energy uses, infrastructure, and emissions</p>	Eletricidade
Solar glass production, low-iron RER	<p>Niels Jungbluth.</p> <p>Assumption with inventory data for normal glass. This glass differs from normal glass mainly due to the type of raw materials, which is considered with a higher transport distance. Additional transports for importing it to Europe are included in the inventory.</p> <p>Included activities end: Gate to gate inventory for the process including transport to RER</p>	
Solvent production, organic GLO	<p>Sofia Parada. This inventory substitutes the obsolete production mix for solvent, organic. It describes the production of a generic solvent, which can be used in cases where the specific solvent is not known. The functional unit represent 1 kg of an equal mixture of 15 of the most often used solvents (according to The Ullmann Encyclopedia, 2000). Further, each of these solvents have their own dataset in the database. As there are only production volumes for a small part of these substances, an</p>	Metanol

	<p>unweighted average of the substances is used for constructing this inventory. No process emissions or inputs other than these chemicals, are considered. Large uncertainty due to the unweighted and randomly choice of included solvents because it is not possible to estimate how good this unweighted average is, compared to a weighted average. This dataset should be revised as soon as production volumes data are available.</p> <p>Included activities start: The activity starts with the application of 15 chemicals</p> <p>Included activities end: Mix of the 15 of the most often used organic solvents, having their own dataset within the database. Only input of the mentioned solvents is taken into account.</p>	
Steel production, chromium steel 18/8, hot rolled RER	<p>Hans-Jörg Althaus. Represents Average of World and European production mix. This is assumed to correspond to the consumption mix in Europe.</p> <p>Included activities end: Mix of differently produced steels and hot rolling</p>	
Tempering, flat glass RER	<p>Niels Jungbluth. Basic assumption of unit process raw data for the tempering of glass. Tempering or toughening is a special process of solidification of a glass sheet in order to make it particularly resistant to breakages. The process may be physical (thermal) or chemical. Here a thermal tempering is assumed. The result is a sheet of glass which is two or three times stronger than untempered glass.</p> <p>Included activities end: Gate to gate inventory for the process not including infrastructure and emissions.</p>	Vapor gerado por gás natural
Tin production RER	<p>Hans-Jörg Althaus. Most data are calculated based on assumptions and theoretical models. Their overall quality is poor.</p> <p>Included activities end: The cradle to gate inventory of world-wide primary tin production includes mining, beneficiation, smelting and refining of tin ore and tin respectively. Also included are the transports from the major producers to Europe.</p>	Calcário, óleo diesel, eletricidade, vapor gerado por gás natural
Water production, deionised, from tap water, at user CH	<p>Alex Primas. Large uncertainties exist due to influence of raw water quality and operation mode on regeneration chemical demand and electricity used.</p> <p>Included activities end: Energy for operation, chemicals used for regeneration, transport of chemicals to plant, emissions from regeneration chemicals, infrastructure of plant and replacement of spent exchange resin. Process does not include very small units (cartridges) or very large units with &gt;&gt;100</p>	Ácido clorídrico, soda cáustica, eletricidade

	m <sup>3</sup> /h (power stations). Other production methods as reverse osmosis electro dialysis or distillation are not covered with this process (only ion exchange).	
Welding, gas, steel RER	Hans-Jörg Althaus. Based partly on rather rough estimates and on input data of poor quality (acetylene). Not to be used if welding is of importance in the system considered. Included activities end: Includes the acetylene welding of non alloyed steel and the transports of the filler rod and the protective gas to the place of use.	Aço
Wire drawing, copper RER	Silvio Blaser. Wire rod production is comparable to sheet rolling leading to another final shape. Further drawing leads to wires with cross sections ranging from 1.6 to 3.5 mm and higher. Included activities end: Includes the production of wire rod and the further drawing of this to wire. Does not include the material being rolled or drawn; only the amount of scrap lost in waste is balanced as primary copper input . Includes the transport of the materials to the plant, but does not include the transport of the product to the customer.	Aço, vapor gerado por gás natural, eletricidade
Wire drawing, steel RER	Silvio Blaser. Wire drawing is a process in which wire rods/wires are reduced in diameter by drawing them through cone-shaped openings of a smaller cross section, so called dies. The input usually is wire rod of diameters ranging from 5.5 to 16 mm obtained from hot rolling mills in form of coils. The final diameter size of dry drawn wire is between one and two millimetres, wet drawn wire has an even smaller diameter. Included activities end: Includes the process steps pre-treatment of the wire rod (mechanical descaling, pickling), dry or wet drawing (usually several drafts with decreasing die sizes), in some cases heat treatment (continuous-/discontinuous annealing, patenting, oil hardening) and Finishing. Does not include coating and the material being rolled	Ácido sulfúrico, aço, vapor gerado por gás natural, eletricidade

Fonte: SIMAPRO