

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

**Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos,
utilizando o estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para
comparar os impactos de duas estratégias de gestão de fim
de vida**

Rosana Teixeira Miranda

Itajubá, Setembro de 2019

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

Rosana Teixeira Miranda

**Análise da gestão de fim de vida de módulos fotovoltaicos,
utilizando o estudo de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para
comparar os impactos de duas estratégias de gestão de fim
de vida**

**Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Energia como parte
dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências da
Engenharia de Energia**

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

**Orientador: Prof. Dr. Regina
Mambeli Barros**

**Co-Orientador: Prof. Dr.
Maria Luiza Grillo Renó**

Itajubá, Setembro de 2019

Agradecimento

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O uso de sistemas fotovoltaicos (FV) na geração de energia vem crescendo mundialmente. No Brasil esse crescimento contínuo é percebido no aumento do número de unidades consumidoras. A expectativa de vida útil dos módulos FV é estimada entre 25 a 30 anos. Desta forma, grande parte dessas unidades serão desinstaladas em um futuro próximo. Torna-se importante avaliar os impactos ambientais da tecnologia de forma a adotar com segurança o uso da energia FV. O impacto ambiental dos módulos FV, aplicando a análise do ciclo de vida (ACV), é um tópico amplamente estudado. No entanto, as análises enfatizam a fase de produção e excluem ou deixam de analisar em detalhes a fase de desinstalação e descarte dos módulos. O uso de metais preciosos e de componentes que contém materiais classificados como resíduos perigosos despertou o recente interesse em evidenciar os impactos e de prováveis benefícios ambientais relacionados à gestão de fim de vida dos módulos FV. O trabalho proposto tem como objetivo analisar o aspecto ambiental desta etapa do ciclo de vida para os módulos FV de silício cristalino (c-Si). A metodologia da ACV foi desenvolvida a partir de três cenários de gestão de fim de vida, utilizando como referência dados de literatura e adaptados para simular uma possível usina de tratamento de resíduos FV no Brasil. Primeiramente o cenário 1 considerou a reciclagem dos resíduos dos módulos FV. No cenário 2 há recuperação de parte dos componentes e o restante dos resíduos de módulos FV passa por um processo preliminar de incineração com descarte final em aterros. No cenário 3 a parte não recuperada é descartada em aterros sem nenhum tratamento. Os dados foram modelados para o estudo de ACV através do método ReCiPe e com o uso do software SimaPRO. A partir de indicadores de desempenho ambiental foi possível avaliar cada cenário e ao final comparar e analisar o de menor impacto ambiental. Os resultados obtidos demonstraram que, para as categorias de impacto analisadas, o cenário 1 de reciclagem obteve um desempenho ambiental inferior comparado aos cenários 2 e 3. O indicador na categoria de mudanças climáticas, por exemplo, para o cenário de reciclagem foi de $3,31E+05$ kg CO₂ eq, enquanto que para o cenário de incineração foi de $2,35E+03$ kg CO₂ eq e de $-3,21E+01$ kg CO₂ eq para o cenário de disposição em aterro. O cenário 1 contudo produziu benefício ambiental relevante em termos de aproveitamento de materiais que podem ser usados como matéria prima. Adicionalmente e de forma simplificada, foi analisado o aspecto financeiro da aplicação da reciclagem dos módulos FV. Para a tecnológica considerada nesse estudo, a análise indicou que a reciclagem é ainda uma estratégia inviável de ser implantada como gestão de fim de vida dos resíduos FV, mesmo se considerado o processo em escala industrial. Os custos de reciclagem superaram em quase 3 vezes as receitas com a provável comercialização dos materiais recuperados no processo.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, Reciclagem, Análise do Ciclo de Vida, Resíduo eletroeletrônico, Impacto ambiental.

ABSTRACT

The use of photovoltaic (PV) systems in the energy generation has been growing worldwide. In Brazil the continuous growth is perceived in the increase of the numbers of consuming units. The useful life of PV modules is estimated between 25 and 30 years. Thus, most of these units will be decommissioned in the near future. Hence, it is important to evaluate the environmental impacts of the PV technologies in order to safely adopt the use of PV energy. The environmental impact of PV modules is an extensively studied topic, generally using the life-cycle analysis (LCA). However, these studies emphasize the production phase and exclude or fail to analyze in detail the phase of decommissioning and disposal of the modules. The use of precious metals and materials classified as hazardous has raised recent interest in highlighting the impacts and the probable environmental benefits related to end-of-life management of the PV modules. This proposed study aims to analyze the environmental performance for crystalline silicon (c-Si) PV modules. The LCA methodology will be applied from three end-of-life management scenarios, using literature data that was adapted to simulate a possible PV waste treatment plant in Brazil. Firstly, scenario 1 considered the recycling of PV module waste. In scenario 2, part of the components is recovered and the remained PV waste goes through a preliminary incineration process before being disposal in landfills. In scenario 3 the unrecovered part is discarded in landfills without any treatment. The life cycle inventories were modeled for the LCA study with the ReCiPe method and the use of SimaPRO software. From environmental performance indicators it was possible to evaluate each scenario and at the end to compare and analyzing the one with the lowest environmental impact. For the impact categories analyzed, the results obtained showed that the scenario 1 achieved lower environmental performance compared to scenarios 2 and 3. The climate changes category, for example, in the recycling scenario was $3.309E+05$ kg CO₂ eq, while in the incineration scenario was $2.3441E+03$ kg CO₂ eq and $-3.214E+01$ kg CO₂ eq in the landfill scenario. However, the scenario 1 produced significant environmental benefit in terms of the use of materials that can be used as raw material. Additionally, in a simplified way, the financial aspect of the application of the recycling process was analyzed. For the technology considered in this study, the analysis indicated that recycling is still an unfeasible strategy to be implemented for PV waste end-of-life management, even if considering on an industrial scale process. The costs of the recycling process were almost 3 times higher than the revenues from the probable commercialization of the recovered materials in the process.

Keywords: Photovoltaic module, Recycling, Life Cycle Analysis, Electro-electronic waste, Environmental impact.

Listas de Figuras

Figura 1 - Efeito Fotovoltaico	8
Figura 2 - Célula FV de silício m-Si	10
Figura 3- Célula FV de p-Si	11
Figura 4- <i>Market share</i> global das tecnologias dos módulos FV no período de 2014 a 2030 .	12
Figura 5 - Principais componentes do módulo FV	13
Figura 6 – Potência acumulada em GW no Brasil – período 2012 a 2018 e projeções até 2050	15
Figura 7 – Potência instalada acumulada global em GW – período 2012 a 2018.....	16
Figura 8 – Potencial anual médio de energia solar em cada região do Brasil	16
Figura 9 – Fluxo gestão de fim de vida	19
Figura 10 - Esquema típico dos tipos de materiais usados na produção de células FV	26
Figura 11 - Representação das etapas consideradas em um estudo de ACV.	30
Figura 12 - Fases da ACV	32
Figura 13 – Exemplo estrutura geral de um método de AICV.....	37
Figura 14 – Limite da ACV cenário 1 – reciclagem componentes dos módulos FV	49
Figura 15 - Limite da ACV cenário 2 – incineração	49
Figura 16 - Limite da ACV cenário 3 – descarte em aterro	50
Figura 17 – Esquema para a logística de coleta, transporte e descarregamento dos resíduos FV	54
Figura 18 – Resultados AICV caracterização Midpoint para o cenário de reciclagem ..	80
Figura 19 – Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento químico no cenário de reciclagem	81
Figura 20 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de desmontagem no cenário de reciclagem.....	82
Figura 21 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento e recuperação do vidro no cenário de reciclagem	83
Figura 22 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento térmico do EVA e PVF no cenário de reciclagem	84
Figura 23 - Resultados AICV caracterização Midpoint para cenário de incineração	85
Figura 24 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa separação do vidro no cenário de incineração	86
Figura 25 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de corte e incineração do sanduiche no cenário de incineração	87
Figura 26 - Resultados AICV caracterização Midpoint para o cenário de disposição em aterro	89
Figura 27 - Resultados da AICV caracterização Midpoint na comparação dos cenários	90
Figura 28 - Potência acumulada instalada no período de 2012 a 2050.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Evolução tecnologia FV	6
Tabela 2 – Composição dos materiais de um típico módulo FV de c-Si.....	14
Tabela 3 – Número de sistemas e potência instalada acumulada dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul	17
Tabela 4 – Perspectiva de redução de custos dos sistemas FV (kit FV e integração) em R\$/Wp	17
Tabela 5 – Valores dos principais materiais (euro/kg) presentes em módulos FV	20
Tabela 6 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura	23
Tabela 7 – Categorias de impacto e fatores de caracterização Midpoint	38
Tabela 8 - Categorias de impacto e indicadores Endpoint	39
Tabela 9 – Método ReCiPe.....	40
Tabela 10 - Considerações das versões disponíveis no método ReCiPe.....	40
Tabela 11 – Entrada do processo de reciclagem - composição de 1000 kg de resíduo de módulo FV.....	50
Tabela 12 – Energia recuperada com o tratamento térmico por kg de resíduo	51
Tabela 13 – Dados de unidades FV, fornecedores e empresas recicladoras nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul	52
Tabela 14 – Lista de dados utilizada do Ecoinvent e ELCD.....	55
Tabela 15 - Dados para inventário para 1 kg de óxido de cálcio no Brasil.....	56
Tabela 16 - Dados para processo para produção de 1 kWh de energia elétrica no Brasil.....	57
Tabela 17 - Dados de inventário para a produção de 1 kg de óleo diesel no Brasil.....	59
Tabela 18 - Dados para o inventário de 1 kg de ácido nítrico produzido no Brasil	61
Tabela 19 - Dados de inventário para a produção de 1 kg de gás natural no Brasil.....	61
Tabela 20 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 3.264 t.km	63
Tabela 21 – Fatores de emissão motores diesel.....	64
Tabela 22 – ICV para o processo descarregamento de 1.000 kg h de resíduos de módulos FV	64
Tabela 23 – ICV para o processo desmontagem de 1.000 kg de resíduos de módulos FV.....	65
Tabela 24 - ICV para o processo separação do vidro em 872,43 kg de resíduos de módulos FV	65
Tabela 25 - ICV para o processo do tratamento de 723,00 kg de vidro	66
Tabela 26 – ICV processo corte e tratamento térmico em 149,43 kg de resíduos de módulos FV	67
Tabela 27 – ICV processo tratamento químico em 59,77 kg de resíduos de módulos FV.....	68
Tabela 28 – ICV do cenário 1 - reciclagem dos resíduos FV	69
Tabela 29 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 2.352 t.km	71
Tabela 30 – ICV para o processo desmontagem de 1.000 kg de resíduos de módulos FV.....	72
Tabela 31 - ICV para separação de 872,43 kg de resíduos de módulo FV	72
Tabela 32 – ICV para incineração de 149,43 kg de resíduos	73

Tabela 33 – I CV do cenário 2 - incineração dos resíduos FV	74
Tabela 34 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 1.440 t.km	75
Tabela 35 – ICV para a trituração de 877,83 kg de resíduos de módulos FV	75
Tabela 36 – I CV do cenário 2 – descarte em aterro dos resíduos FV	76
Tabela 37 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV no cenário de reciclagem.....	79
Tabela 38 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV na estratégia de incineração	84
Tabela 39 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV no cenário de aterro.....	88
Tabela 40 – Comparação dos resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg nas estratégias de reciclagem e de incineração	89
Tabela 41 – Comparação dos resultados AICV categoria Endpoint (avaliação de danos) usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg para os cenários propostos.....	91
Tabela 42 – Potência acumulada instalada – realizado até 2018 e projeção até 2050	93
Tabela 43 – Estimativa da potência total instalada acumulada para a tecnologia c-Si em GW de 2012 a 2050.....	93
Tabela 44 – Estimativa do total instalado acumulado de módulo FV da tecnologia c-Si em toneladas no período de 2012 a 2050	94
Tabela 45 – Coeficientes de perdas durante o ciclo de vida dos módulos FV	94
Tabela 46 – Estimativa do total de resíduo de módulo FV da tecnologia c-Si em toneladas no período de 2012 a 2050	95
Tabela 47 – Estimativa do total de componentes recuperados para o ano de 2033	96
Tabela 48 – Valores de mercado de materiais e tratamento de resíduos.....	97
Tabela 49 – Receitas e custos para a reciclagem dos módulos FV	97

Lista de abreviaturas e siglas

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
Abinee	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
a-Si	Silício amorfo (Amorphous Silicon)
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Análise Impacto Ciclo de Vida
ARC	Camada anti reflexiva (anti reflective coating)
CdTe	Telureto de Cádmiio
CFC	Clorofluorcarboneto (chlorofluorocarbon)
CPV	Concentradores Fotovoltaicos
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
CO _{2eq}	Dióxido de carbono (CO ₂) equivalente
CONAMA	Conselho nacional de meio ambiente
c-Si	Silício cristalino (Crystalline silicon)
DALY	Disability Adjusted Life Year

DB _{eq}	Diclorobenzeno equivalente
EC	Comissão Europeia (European Commission)
EPBT	Energy Payback Time
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
EU	União Europeia (European Union)
EVA	Etileno-vinil-acetato
Fe _{eq}	Ferro (Fe) equivalente
F.E.R.G.E.	Devices, Techniques and Enabling Technologies for Renewable Energy Sources toward Green Economy
FRELP	Full Recovery End of Life Photovoltaics
FV	Fotovoltaico
GD	Geração distribuída
GEE	Gás de Efeito Estufa
GWP	Potencial de aquecimento global (Global Warming Potential)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
ILCD	The International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISO	Internacional Organization for Standardization
ITRPV	Internacional Technology Roadmap for Photovoltaic

LCA	Life Cycle Assessment analysis
MG	Grau Metalúrgico (silicon metallurgical grade)
MME	Ministério de Minas e Energia
m-Si	Silício monocristalino
N _{eq}	Nitrogênio equivalente
NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não metânicos (Non-methane volatile organic compound)
Oil _{eq}	Oil (petróleo) equivalente
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPV	Células fotovoltaicas orgânicas
P _{eq}	Fósforo equivalente
PM10 _{eq}	Material particulado (menores ou iguais a 10 micrômetros) equivalente
p-Si	Silício policristalino
PVF	Polivinil-fluoreto
PVPS	Photovoltaic Power Systems Program (da IEA)
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
ROM	Run of Mine
SERI	Solar Energy Research Institute
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SFOE	Swiss Federal Office of Energy
SO _{2eq}	Dióxido de enxofre (SO ₂) equivalente
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UF Unidade Funcional

U235_{eq} Urânio-235 equivalente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1. Objetivo geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. JUSTIFICATIVA	3
1.3. DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR	6
2.2. TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FV	8
2.2.1. Silício cristalino (c-Si)	9
2.2.2. Silício monocristalino (m-Si).....	10
2.2.3. Silício multi ou policristalino (p-Si)	10
2.2.4. Células filmes finos	11
2.2.5. Tecnologia ribbon	11
2.3. <i>MARKET SHARE</i> ATUAL E PERSPECTIVA PARA AS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FV	12
2.4. COMPONENTES DE UM MÓDULO FV DE C-SI	13
2.5. USO DA ENERGIA FV NO BRASIL.....	14
2.6. GESTÃO DO FIM DE VIDA DOS MÓDULOS FV	17
2.7. ESTADO DA ARTE DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FV C-SI.....	22
2.7.1. Desmontagem e separação do sanduíche para remoção da célula FV	24
2.7.2. Separação e recuperação do silício e metais da célula FV.....	26
2.8. OUTROS PROCESSOS (INCINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO EM ATERRO)	27
2.9. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	29
2.9.1. Padrões para a ACV	30
2.9.2. Vantagens e Desvantagens.....	31
2.9.3. Etapas da ACV.....	31
2.9.4. Definição do escopo e objetivo.....	32
2.9.5. Unidade funcional.....	33
2.9.6. Fronteira.....	33

2.9.7.	Alocação	33
2.9.8.	Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	34
2.9.9.	Avaliação dos impactos de Ciclo de Vida	35
2.9.10.	Interpretação	37
2.9.11.	Métodos de Análise de Impacto na ACV	38
2.9.12.	Método ReCiPe	38
2.9.13.	Ferramentas para elaboração da ACV	41
2.9.14.	Software SimaPro	41
2.10.	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO PROCESSO DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FV EM C-SI.....	42
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1.	ETAPA DE DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA ACV	47
3.2.	UNIDADE FUNCIONAL.....	48
3.3.	LIMITE DO SISTEMA.....	48
3.4.	PREMISSAS CONSIDERANTES DURANTE A ACV	50
3.4.1.	Caracterização do módulo FV c-Si.....	50
3.4.2.	Recuperação de materiais e energia.....	51
3.4.3.	Transporte	52
3.5.	ETAPA DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV).....	54
3.5.1.	Base de dados utilizadas do Ecoinvent e ELCD.....	54
3.5.2.	Inventários obtidos da literatura	56
3.6.	INVENTÁRIO CICLO DE VIDA PARA O CENÁRIO 1	62
3.6.1.	Transporte	62
3.6.2.	Descarregamento	63
3.6.3.	Processo de desmontagem	64
3.6.4.	Separação do vidro e do sanduiche (célula FV e camadas de EVA e PVF).....	65
3.6.5.	Tratamento do vidro para reutilização	65
3.6.6.	Processo de corte e tratamento térmico do sanduiche para decomposição do EVA e PVF	66
3.6.7.	Processo tratamento químico para a recuperação metais.....	67
3.6.8.	Compilação dos dados de ICV para o cenário 1	69
3.7.	INVENTÁRIO PARA O CENÁRIO 2	70
3.7.1.	Transporte	70

3.7.2.	Descarregamento	71
3.7.3.	Desmontagem do módulo	72
3.7.4.	Separação do vidro e do sanduiche	72
3.7.5.	Incineração dos resíduos (plástico e sanduiche FV)	73
3.7.6.	Compilação dos dados de ICV para o cenário 2	74
3.8.	INVENTÁRIO PARA O CENÁRIO 3	74
3.8.1.	Transporte	74
3.8.2.	Descarregamento e desmontagem.....	75
3.8.3.	Trituração dos resíduos	75
3.8.4.	Compilação dos dados de ICV para o cenário 3	76
3.9.	METODOLOGIA PARA ANÁLISE ECONÔMICA DA GESTÃO DE FIM DE VIDA	76
4.	RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV	78
4.1.	CENÁRIO 1 - RECICLAGEM	78
4.2.	CENÁRIO 2 - INCINERAÇÃO.....	84
4.3.	CENÁRIO 3 - DISPOSIÇÃO EM ATERRO	87
4.4.	COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS EM NÍVEL MIDPOINT	89
4.5.	COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS EM NÍVEL ENDPOINT	91
5.	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DA GESTÃO DE FIM DE VIDA	92
5.1.	EXPECTATIVA DA POTÊNCIA INSTALADA DA TECNOLOGIA C-SI.....	92
5.2.	EXPECTATIVA DO TOTAL DE RESÍDUOS GERADOS.....	94
5.3.	CÁLCULO DOS CUSTOS DE RECICLAGEM E DAS RECEITAS ESPERADAS COM A RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS.....	95
6.	CONCLUSÕES.....	99

1. INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica vem se consolidando com uma promissora alternativa tecnológica na busca por meios de geração de energia com baixos impactos ambientais. Ainda assim, não se pode desconsiderar o fato que durante o seu ciclo de vida, o módulo FV não é completamente livre de impacto ambiental, principalmente no fim da vida útil. O desenvolvimento rápido do mercado de energia fotovoltaica nos últimos anos reforça a necessidade de pensar na gestão e em alternativas mais sustentáveis para tratar os resíduos gerados quando esses sistemas forem desinstalados.

No Brasil a evolução do número de instalações ocorreu sobretudo a partir de 2012, quando a potência instalada acumulada era de 0,4 MW, chegando em 2019 com uma potência instalada acumulada prevista de 870¹ MW (ANEEL, 2019). A previsão para 2050 é que a potência instalada acumulada seja de 118 GW (MME/EPE, 2016). Desta forma é esperado que o número de módulos FV, que alcançarão o término de vida, crescerá rapidamente com o acúmulo de resíduos aumentando proporcionalmente.

A relevância do tema energia FV tem produzido discussão na comunidade científica e esforços para se obter novos e melhores métodos de destinação dos resíduos dos módulos. Contudo, até o momento poucos estudos incluem de forma detalhada os impactos ambientais ocasionados na etapa do ciclo de vida de desmontagem e descarte. Torna-se assim importante efetuar a análise de ciclo de vida (ACV) das possíveis estratégias para o fim de vida dos módulos FV, de maneira a ser possível contabilizar os impactos ambientais gerados e comparar com outras possíveis alternativas de gestão para os resíduos gerados.

Nesse trabalho, o escopo da aplicação da ACV é o tratamento dos resíduos dos módulos FV da tecnologia de silício cristalino (c-Si), a partir de três cenários assumidos: a reciclagem e recuperação de materiais; o tratamento dos resíduos como em uma planta de REEE, com separação de parte dos componentes e o restante do resíduo não recuperado direcionado para incineração e a disposição dos resíduos em aterros.

O processo de reciclagem é sugerido em diversos estudos pesquisados na literatura como um método eficiente para tratamento dos resíduos FV, com benefícios ao ambiente e

¹ Fonte: Aneel, 2019 - Dados de Junho de 2019

como forma de poupar energia e recursos naturais (FRISSON et al., 2000; ZHONG, 2011; PARK; PARK, 2014).

A reciclagem envolve múltiplas etapas visando maximizar a recuperação de vários materiais contidos nos módulos FV. Materiais tóxicos e valiosos como silício (Si), prata (Ag) e cobre (Cu) conseguem ser recuperados, minimizando a quantidade de resíduos destinados à aterros. Os elementos químicos usados nas soluções do processo para recuperação dos metais são cuidadosamente escolhidos, de modo que se neutralizam. Desta forma os resíduos gerados ao final do processo produz mínimo impacto ambiental. O material recuperado pode ser devidamente reinserido no processo produtivo, reduzindo a demanda por extração de matéria-prima.

Outras alternativas identificadas na literatura como as atuais práticas de tratamento dos resíduos dos módulos FV seriam o tratamento dos resíduos pela incineração antes do envio à aterro, conforme citado por Jungbluth (2004) e Müller et al. (2006) e o descarte em aterro sem tratamento prévio, conforme Latunussa et al. (2016). Nessas alternativas somente parte dos componentes, geralmente as partes de fácil e rápida separação (moldura e cabos) conseguem ser recuperadas. Apesar da incineração não ser comumente utilizada no Brasil como opção de tratamento de resíduos, na EU é a forma de tratamento mais empregada para resíduos perigosos (IPCC, 2001) e por essa razão foi incluída na presente ACV como uma opção para gestão do fim de vida dos módulos FV.

Pesquisa adicional foi realizada sobre as legislações em países, onde o uso de sistemas FV se encontra em estágio mais avançado que o Brasil. A Diretiva 2012/19/UE (EC, 2012) confere aos módulos FV o mesmo tratamento dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), impondo a responsabilidade estendida aos fabricantes após a desinstalação dos sistemas. Levando em consideração que os REEE possuem, da mesma forma que os resíduos de módulos FV, materiais que causam danos ao meio ambiente e à saúde humana, essa diretiva impõe a obrigatoriedade de destinação correta dos módulos FV no fim de vida. Em consulta à Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) pôde-se concluir a mesma tendência de enquadramento do resíduo de módulos FV como REEE na legislação brasileira.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Realizar o estudo de análise ambiental para comparar alternativas de gestão de fim de vida de módulos FV da tecnologia c-Si.

1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar os impactos ou benefícios ambientais da gestão de fim de vida dos módulos FV da tecnologia c-Si, utilizando a metodologia da ACV, estudando três alternativas de tratamento dos resíduos gerados na desinstalação desses sistemas;
- Comparar através de indicadores de impacto ambiental os cenários e identificar em cada um deles os processos com impactos relevantes e que necessitam de melhorias, de forma que os impactos ambientais no fim de vida dos módulos FV sejam minimizados;
- Realizar o estudo econômico do cenário de reciclagem para tratamento dos resíduos de módulos FV, a fim de identificar a possível viabilidade econômica da implantação desse cenário de fim de vida.

1.2. JUSTIFICATIVA

Apesar do crescimento na produção e instalação dos sistemas FV terem acontecido rapidamente, na literatura presente, os estudos de ACV sobre as tecnologias fotovoltaicas enfatizam, em sua maioria, os impactos ambientais na fase de produção, deixando de evidenciar os impactos e os benefícios relacionados com a gestão de fim de vida dos módulos FV. A falta de dados e informações de inventários da fase de fim de vida, conforme declarado por alguns autores, como por exemplo Alsema et al. (2006) e Fthenakis et al. (2012), deve-se ao fato que as instalações são relativamente recentes.

Para tornar consolidado o uso da tecnologia solar como uma fonte notável de energia, as barreiras atuais de uso de recursos limitados, do consumo elevado de energia e dos custos de produção envolvidos, assim como o aumento de eficiência dos sistemas, precisam ser cada vez

mais objeto de discussão e estudos científicos. Até o momento, ainda que com pouco detalhamento das informações, os resultados de análise de impacto ambiental sugerem que a reciclagem e reaproveitamento de matéria prima como estratégia de fim de vida têm aspectos positivos na redução de emissões e do impacto ambiental e na redução dos custos dos módulos, indicando uma necessidade de explorar melhor o tema.

A escolha da tecnologia c-Si se deve ao fato que os módulos desse tipo foram os primeiros a serem instalados. Tradicionalmente a tecnologia c-Si vem dominando o *market share* ao longo dos anos, conseqüentemente serão as primeiras a serem desinstaladas e terão os maiores volumes de resíduos esperados.

Esta pesquisa foi valiosa para entender as formas de tratamento dos resíduos FV e complementar os estudos já realizados, com dados de inventários do ciclo de vida para potencial uso em futuros estudos de ACV. Desta forma, pretende despertar o interesse da comunidade científica, que poderá ampliar a investigação e melhorar a qualidade da modelagem das ACV que incluam o fim de vida dos módulos FV.

Ao efetuar o exercício de projeções e desenhar cenários para o futuro, o presente estudo poderá ainda auxiliar políticas e tomada de decisões estratégicas sobre a gestão dos resíduos dos módulos FV, sobretudo considerando que estas precisam ser planejadas de forma antecipada, o que será absolutamente necessário no momento em que o mercado brasileiro de energia fotovoltaica esteja consolidado.

1.3. DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para a execução dos objetivos dessa dissertação, além da seção 1 apresentada foram desenvolvidos alguns passos:

Primariamente, foi efetuada uma revisão bibliográfica com o objetivo de aprofundar os conhecimentos e obter o suporte científico necessário sobre a energia fotovoltaica, o seu ciclo de vida, sobre a metodologia de ACV e as ferramentas disponíveis. Foram analisados diversos documentos científicos, os mais atuais possíveis, e realizado contato com autores para

esclarecimentos. Foram efetuados contatos com empresas fabricantes e representantes do mercado FV brasileiro a fim de conhecer mais sobre as tecnologias fotovoltaicas aplicadas no país. Especificamente para o tema de regulamentação e políticas de gestão de fim de vida foram contatadas instituições e organismos a fim de identificar o enquadramento do resíduo FV. Numa outra etapa, foi realizada pesquisa sobre o estado da arte dos processos já fundamentados de reciclagem de módulos FV da tecnologia c-Si. Também foi realizada a revisão bibliográfica sobre a ferramenta de ACV para a análise e determinação do impacto ambiental, métodos e softwares. O resultado dessa fase está abordado na seção 2.

Na sequência, a seção 3 aborda a metodologia utilizada para a realização da pesquisa para a elaboração dos inventários e para a realização da ACV. Neste ponto foi relevante a contribuição dos trabalhos identificados na literatura cujos processos, desenvolvidos para tratamento de resíduos de módulos c-Si, foram referências para construção dos inventários para análise de ciclo de vida. A seção 3 aborda também a metodologia para análise econômica da gestão de fim de vida considerando a reciclagem dos módulos.

Na etapa seguinte, a seção 4 apresenta os resultados e a interpretação da análise do ciclo de vida, aplicando o método ReCiPe com auxílio do software SimaPRO.

Na seção 5 é discutido o resultado da investigação da viabilidade financeira do processo de reciclagem de módulos PV de silício cristalino (Si).

Finalmente na seção 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e algumas recomendações e sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BREVE HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR

No início dos anos 70, a crise mundial do petróleo fez com que a indústria fotovoltaica (FV), até então limitada a aplicações aeroespaciais, começasse a investigar sua aplicação também em fins terrestres. A tabela 1 apresenta, em sequência cronológica, um breve resumo da evolução da energia solar fotovoltaica baseada em referências de González et al. (2009), Pinho e Galdino (2014), IEA-PVPS (2018a) e Tolmasquim (2016).

Tabela 1 – Evolução tecnologia FV

Ano	Evento
1839	Descoberta do efeito fotovoltaico pelo físico francês Alexandre Becquerel ao verificar que certos materiais podiam gerar pequenas correntes elétricas quando expostos ao sol.
1876 / 77	Adams e Day observaram o efeito FV no material sólido, selênio, que produzia eletricidade quando exposto à luz. Nos dias atuais, a eletricidade produzida diretamente da luz é referida como efeito fotovoltaico. Fritts em 1877 desenvolveu a célula FV em selênio.
1953	Pearson, Chapin e Fuller desenvolveram o princípio da célula solar em silício para a conversão diretamente da luz solar em eletricidade para geração de energia elétrica.
1956	Durante os primeiros anos depois da descoberta da célula solar de silício para conversão fotovoltaica, os elevados custos impediam o seu uso com fins de geração de eletricidade. Uma célula fotovoltaica custava cerca de 300 dólares por Watt enquanto que uma planta convencional de energia custava 50 centavos de dólar por Watt.
Final anos 50 / Anos 60	Enquanto os esforços para a comercialização de células solares de silício não avançavam, o uso de fotocélulas em aplicações espaciais (satélites) foi amplamente considerado.
Início dos anos 70	O uso para fins espaciais estava consolidado enquanto que para fins terrestres continuava inviabilizado devido ao alto custo. Com a crise mundial de energia nos anos 70, as pesquisas foram intensificadas. Com o financiamento da Exxon Corporation, o Dr. Elliot Berman, projetou uma célula solar de menor custo, utilizando para isso o silício em um grau mais pobre e materiais mais acessíveis, o que reduziu o preço de 100 para 20 dólares o Watt. Desta forma a energia solar passou a ser competitiva em situações onde o acesso à rede existente era distante. Na Austrália surge aplicações para suprimento de energia em estações de telecomunicações.

(continuação)

Ano	Evento
Anos 80	As aplicações em uso residencial, em áreas rurais, tiveram incentivo financeiro do governo para encorajar as instalações do tipo <i>rooftops</i> nesses locais. Novas tecnologias começaram a ser desenvolvidas a partir de estudos em universidades e centros de pesquisas.
Anos 90	O método de produção do silício grau solar mantém os custos de geração solar de energia elétrica superior aos de fontes convencionais de geração. As células da tecnologia m-Si alcançam eficiência de 24,7% em testes. Observa-se também o declínio nos valores das células FV (inferior a U\$10).
Anos 2000	A potência instalada acumulada dobra em relação ao ano de 1999. No final da década, a tecnologia de filmes finos, CdTe, expandiram seu uso, embora as células em c-Si sejam as que dominam o mercado.
Anos 2010- atual	O recorde de eficiência em laboratório é para as tecnologias de terceira geração (ao redor de 40%). Entre as tecnologias em pesquisa e desenvolvimento, as mais promissoras são as células multijunção, as células de materiais semicondutores supereficientes como a perovskita e o arsenieto de gálio e os CPV. A tendência de redução nos preços das células FV é observada a medida que cresce a potência instalada (ao redor de U\$ 0,30).

Atualmente as previsões de consumo de energia global crescem dramaticamente a cada ano. Os preços elevados da energia e as preocupações com o problema do aquecimento global têm aberto o mercado para o uso da energia solar, que possui um vasto campo de aplicações. É comum o uso em sistemas de coletores solares para aquecimento de água e secadores solares utilizados na produção de alimentos. A conversão direta de energia solar em energia elétrica possui base nas células solares. A geração de energia com células solares é considerada uma das tecnologias chave do século. O crescimento se dá principalmente baseado na tecnologia de células produzidas em silício. Entre as inúmeras aplicações da energia solar, especial destaque são para as aplicações que trazem benefício social, como as de fornecimento de energia para comunidades remotas ou rurais.

No momento mundial de aumento populacional e conseqüentemente de demanda de energia, a preocupação com a substituição de fontes fósseis torna-se evidente. Pesquisas para a utilização de tecnologias de fontes de energia mais eficientes e mais limpas tem relevante importância. A energia solar pode ter papel fundamental para garantir o suprimento de energia e o crescimento econômico de maneira sustentável.

2.2. TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FV

O sistema FV ou solar se baseia na utilização de células, fabricadas com materiais semicondutores cristalinos, que convertem a radiação solar incidente sobre esses materiais em eletricidade, através do chamado efeito fotovoltaico. O material mais usado na fabricação de células é o silício (GONZÁLEZ et al., 2009).

Na concepção mais comum dos módulos FV, para melhorar o rendimento das células, procede-se a dopagem com boro para criar uma carga negativa e com fósforo para criar uma carga positiva. A junção semicondutora mais comum é formada por duas camadas: camada tipo-p, onde existe um excesso de carga positiva e camada tipo-n com excesso de carga negativa. Essa junção de duas camadas de silício, forma a célula fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Descrito de forma simples, o efeito fotovoltaico ocorre quando as partículas de luz do sol (fótons) atingem as células fotovoltaicas em uma face, fazendo com que alguns elétrons (partículas atômicas carregadas negativamente) que circundam os átomos se desprendam, querendo migrar para a outra face. Contudo o campo elétrico que se forma na junção p-n, forma uma barreira e não permite essa migração, produzindo uma tensão. Se fecharmos um circuito externo à célula, o qual conecte a camada n à camada p, esses elétrons livres migrarão, produzindo corrente elétrica para a parte da célula de silício que está com ausência de elétrons. O espaço vazio é preenchido por um novo elétron, continuando o processo (SERI, 1982; GONZÁLEZ et al., 2009). A figura 1 representa o efeito fotovoltaico.

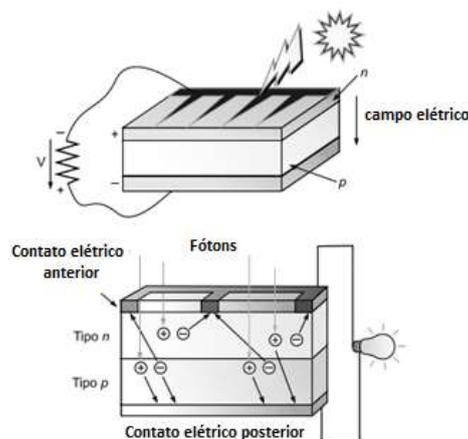


Figura 1 - Efeito Fotovoltaico

Fonte: Adaptado de GONZÁLEZ et al. (2009)

A célula fotovoltaica é a menor unidade de um gerador FV e são ligadas entre si em série e ou paralelo, formando assim um módulo FV. Um conjunto de células fotovoltaicas forma então um módulo FV (PINHO; GALDINO, 2014). Os termos módulos FV, painel FV, painel solar e módulo solar se referem à mesma unidade, no presente trabalho foi adotado o termo módulo FV.

O uso de células fotovoltaicas está crescendo rapidamente e novas tecnologias no mercado vêm acompanhando esse crescimento. Células fotovoltaicas de variados tipos de estruturas, materiais e eficiência estão disponíveis. Há células solares em pesquisa e desenvolvimento que alcançam 40% de eficiência em laboratório, como o caso das células multijunção e CPV (TOLMASQUIM, 2016). Comercialmente as eficiências estão em torno de 16 a 20% (BÜHLER et al., 2018).

Basicamente as tecnologias de semicondutores utilizados em células fotovoltaicas são em silício, chamada de primeira geração, e as de filmes finos, chamadas de segunda geração, compostos por semicondutores como silício amorfo (a-Si), arsenieto de gálio (GaAs), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Uma terceira geração são as tecnologias de concentradores solares (CPV) e células solares orgânicas, como pequenas moléculas ou polímeros (OSC) e as células solares sensibilizadas por corante (CSSC), conhecidas também como células de Grätzel. A terceira geração abrange ainda as células híbridas que se obtém unindo o silício com filmes finos (TOLMASQUIM, 2016).

No trabalho proposto foi tratada a gestão de fim de vida para as células FV da tecnologia de c-Si. Na sequência um resumo das principais características das células FV dessa tecnologia.

2.2.1. Silício cristalino (c-Si)

A tecnologia em silício é a mais tradicional e consolidada no mercado e também a mais utilizada no Brasil, chegando a representar 81% do mercado brasileiro (GREENER, 2019). Para que este silício seja utilizado em células solares, outros processos de fabricação são empregados até que a pureza chegue a níveis de 99,9999%. O processo mais utilizado, para se chegar a níveis de pureza tão altos, é o processo Czochralski (PINHO; GALDINO, 2014).

As células de c-Si podem ser categorizadas em silício monocristalino (m-Si), multicristalino ou policristalino (p-Si) e ribbon (*ribbon sheet* c-Si). O que difere entre estes três tipos é a característica do silício, cristalinidade e tamanho do cristal que resulta o lingote no processo de produção das células FV (RÜTHER, 2004).

2.2.2. Silício monocristalino (m-Si)

Estas células obtêm-se a partir de barras cilíndricas de m-Si, produzidas em fornos especiais. As temperaturas envolvidas no processo são da ordem de 1400°C e o consumo de energia é extremamente alto (RÜTHER, 2004). As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4-0,5 mm de espessura). A sua fabricação ocorrem nas seguintes etapas: o silício se purifica, se funde e se cristaliza em lingotes. Os lingotes são cortados em finas bolachas para produzir células individuais (GONZÁLEZ et al., 2009). Todas essas etapas tornam o processo de fabricação das células mais oneroso. A eficiência das células de m-Si para conversão de luz solar em eletricidade é superior à do p-Si (OLIVEIRA, 2008). As células de m-Si são reconhecidas por seu colorido uniforme, geralmente azul ou preto, que indica alto índice de pureza do silício (GONZÁLEZ et al., 2009). Um exemplo de módulo dessa tecnologia é apresentado na figura 2.



Figura 2 - Célula FV de silício m-Si

Fonte: VCsolar (2019)

2.2.3. Silício multi ou policristalino (p-Si)

O processo de preparação das células de p-Si é menos rigoroso e oneroso comparado às células de m-Si, pois essas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão do silício puro em moldes especiais. Nos moldes, o silício arrefece lentamente e

solidifica-se. Nesse processo, os átomos não se organizam num único cristal, o que resulta em uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. No contorno se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente em relação às células m-Si em termos de conversão de luz solar em eletricidade (OLIVEIRA, 2008). Uma boa forma de distinguir as células p-Si das células m-Si é pela sua forma retangular perfeita, sem as bordas rodeadas como ocorre nas células m-Si (figura 3).

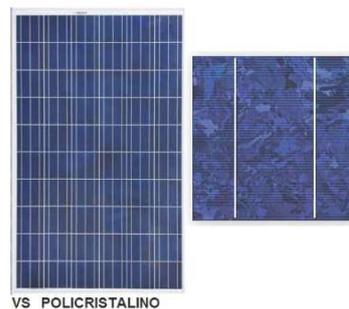


Figura 3- Célula FV de p-Si

Fonte: VCsolar (2019)

2.2.4. Células filmes finos

Essa tecnologia tem como base material tais como silício amorfo (a-Si), seleneto de cobre e índio (CIS) ou o telureto de cádmio (CdTe) que são aplicados em um substrato, geralmente vidro, através de deposição por vaporização catódica ou banho eletrolítico. O processo de fabricação requer temperaturas menores e permite capacidade de produzir com maior automação, o que reduz seu custo. Porém sua eficiência é mais baixa comparada as tecnologias de c-Si (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.5. Tecnologia ribbon

O terceiro grupo de células baseada em silício é da tecnologia ribbon. A vantagem dessa tecnologia é a redução dos custos, eliminando o dispendioso processo de corte, bem como minimizando a quantidade de silício utilizado devido à reduzida espessura da camada (MASOUMIAN, 2014). As células baseadas na tecnologia ribbon são produzidas mediante o estiramento de silício fundido no lugar da utilização de lingotes (GONZÁLEZ et al., 2009). Podem também ser utilizadas pequenas esferas de silício dopadas e dispostas sobre folhas finas

de alumínio (OLIVEIRA, 2008). Estas tecnologias estão em fase de estudos e muitas ainda são apenas realidades em laboratório.

2.3. MARKET SHARE ATUAL E PERSPECTIVA PARA AS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FV

A figura 4 apresenta o gráfico da divisão atual do *market share* das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas e uma previsão dessa divisão para os anos de 2020 e 2030 (IRENA; IEA-PVPS 2016).

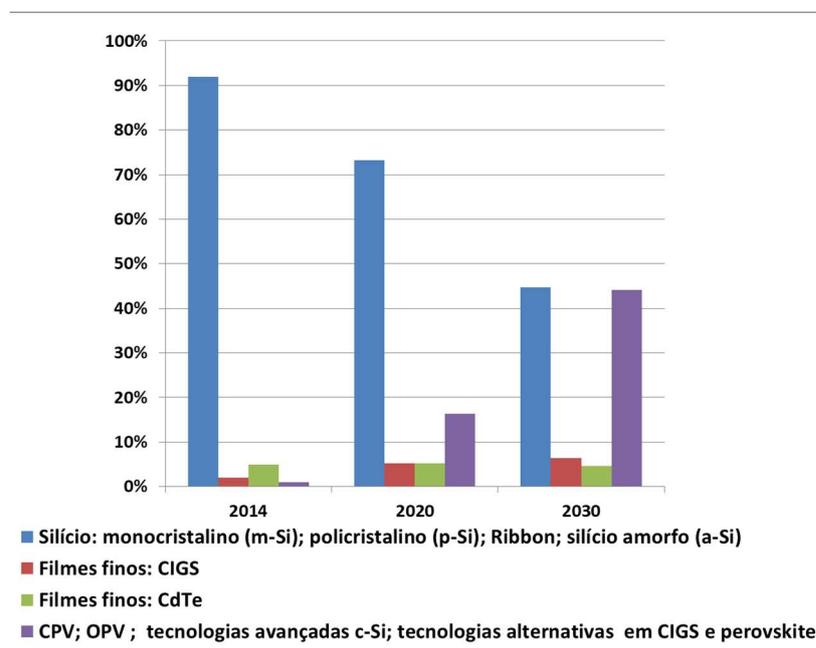


Figura 4- *Market share* global das tecnologias dos módulos FV no período de 2014 a 2030

Fonte: Adaptado de IRENA; IEA-PVPS (2016)

Apesar de certo que novas tecnologias surgirão no mercado, o panorama mundial se encontra no estágio de adoção das tecnologias descritas e não há previsão de quando outras tecnologias passarão a ser técnica e economicamente mais atrativas que as disponíveis atualmente e nem quando serão comercializadas. Sendo assim, é possível perceber que a participação e utilização da tecnologia de c-Si vai diminuindo ao longo dos anos, mas ainda se manterá a frente das demais tecnologias, indicando que os módulos de silício continuarão a ser objeto de estudos e pesquisas.

2.4. COMPONENTES DE UM MÓDULO FV DE C-SI

Um módulo FV segundo Tolmasquim (2016) é feito em camadas, composto de células solares em Si, contatos metálicos entre as células, camada da junção p-n, uma camada (película encapsulante) que envolve as células, geralmente de em EVA, uma placa frontal de vidro especial (temperado) e uma última camada, que é o fundo protetor que oferece isolamento elétrico adicional, em PVF ou vidro. O módulo é emoldurado com alumínio e contém uma caixa de junção. A camada de EVA é usada com um adesivo entre o vidro temperado e a célula FV. A figura 5 ilustra a estrutura típica de um módulo FV c-Si de um dos tipos atualmente comercializado.

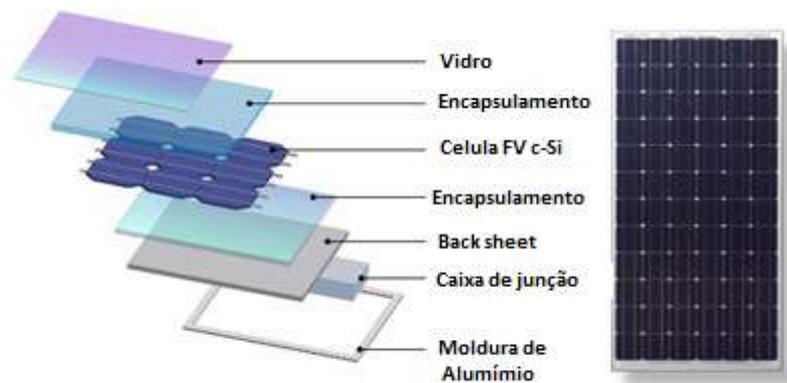


Figura 5 - Principais componentes do módulo FV

Fonte: STR Solar (2018)

Devido ao alto índice de reflexão do silício (de 33% a 54%), há a necessidade que a superfície frontal da célula seja coberta com uma camada anti-reflexiva (ARC- *anti reflective coating*), que diminui este índice de reflexão. É esta cobertura que altera a cor da célula, geralmente para azul. Esta camada ARC utiliza substâncias tais como: SiO (monóxido de silício); SiO₂ (dióxido de silício); Si₃N₄ (nitreto de silício); Al₂O₃ (óxido de alumínio) (RADZIEMSKA; OSTROWSKI, 2010; KANG et al., 2012). A malha de metais condutores sobre a célula FV é usualmente composta de prata (Ag), cobre (Cu) e estanho (Sn) (KANG et al., 2012).

De acordo com relatório do ITRPV-VDMA (2019) a tendência de redução e substituição de alguns tipos de materiais será necessária para garantir a viabilidade do uso, aumento de eficiência, redução dos custos e minimizar os impactos ambientais. A tabela 2

mostra os principais componentes e os percentuais que foram identificados na literatura para os módulos FV da tecnologia c-Si.

Tabela 2 – Composição dos materiais de um típico módulo FV de c-Si

Material	%
Vidro	60,00 a 76,00%
EVA (encapsulamento)	6,00 a 7,00%
PVF (camada protetora)	3,00 a 4,00%
Plástico	0,60%
Cobre	0,27%
Alumínio	10,00 a 14,00%
Silício (Si)	3,00 a 5,00%
Contatos elétricos (Ag, Cu, Al, Sn, Pb)	0,50 a 1,00%
Outros (adesivo, selantes)	1,13%

2.5. USO DA ENERGIA FV NO BRASIL

No Brasil, a maioria dos sistemas FV instalados até 2012 era restrito a sistemas isolados onde se observava aplicações que visavam atender sistemas afastados dos grandes centros urbanos, viabilizados através de programas federais (MME/EPE, 2015). A partir de 2012, a geração distribuída (GD) tornou-se fator importante para a energia solar. A instalação de sistemas FV passou a ser também uma opção para os consumidores que desejam gerar a sua própria energia elétrica, através da instalação e utilização dos sistemas FV conectados à rede, denominados *on-grid*. Atualmente, os sistemas solares FV são instalados em residências, comércios, indústrias e por meio de usinas de energia solar (também chamadas de fazendas solares).

Conforme ANEEL (2019), os sistemas residenciais e comerciais, onde normalmente estão os consumidores que pagam mais caro pela energia elétrica, representam cerca de 78% de todos os sistemas FV instalados no Brasil, sendo que a perspectiva para os próximos anos é que se mantenha essa predominância. Os outros 22% estão representados nos diferentes tipos de aplicação, seja industrial, rural, serviços públicos ou outras muitas, distribuídas em inúmeros segmentos e tipos de consumidores (ANEEL, 2019). Em termos de faixas de potência, observa-

se que os equipamentos de sistemas residências têm potência média de 4 kWp, comerciais têm potência média de 50kWp e industriais a potência média de 1 MWp.

A figura 6 apresenta a evolução da potência instalada acumulada de 2012 a 2018 e a projeção para o período de 2019 a 2050 em GW (MME/EPE, 2016; RÜTHER et al., 2018; ANEEL, 2019). É possível verificar que o Brasil vem apresentando crescimento, evidenciando o relevante crescimento a partir de 2016.

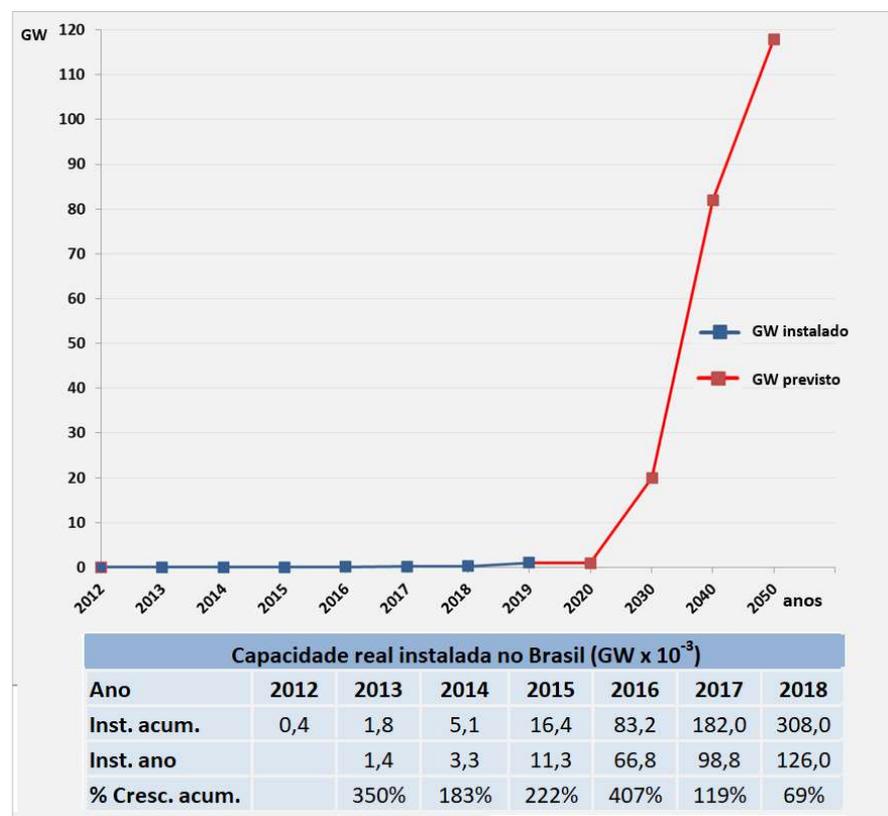


Figura 6 – Potência acumulada em GW no Brasil – período 2012 a 2018 e projeções até 2050

Fonte: MME/EPE (2016); RÜTHER et al. (2018); ANEEL (2019)

Comparando com o crescimento global apresentado na figura 7, as taxas de crescimento brasileiro são superiores às globais.

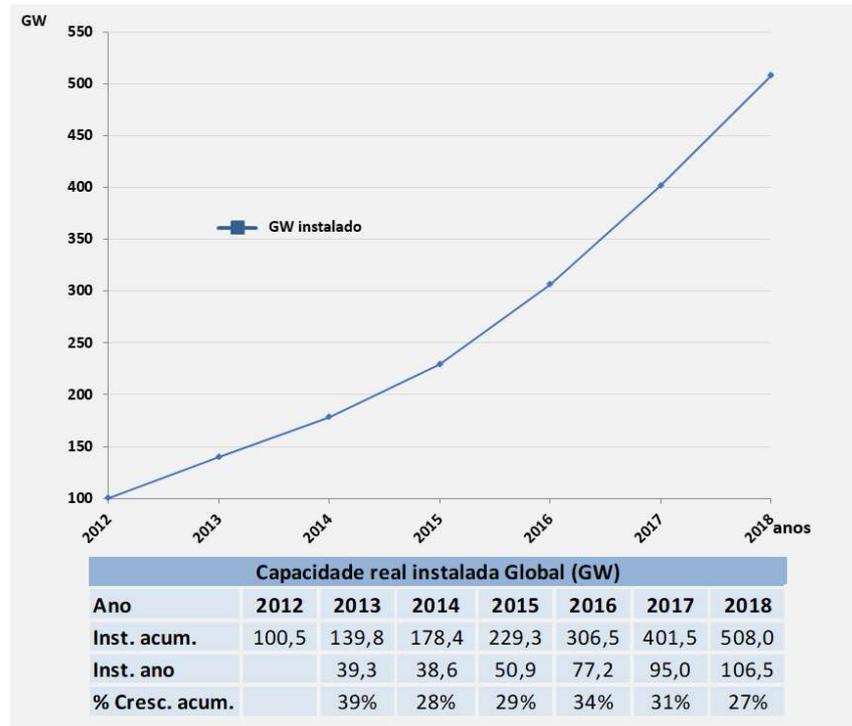


Figura 7 – Potência instalada acumulada global em GW – período 2012 a 2018

Fonte: IEA-PVPS (2018b)

Por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, o Brasil possui grande potencial energético solar para aproveitamento em seu território. No mapeamento realizado pelo Projeto SWERA (PEREIRA et al., 2006), a região Nordeste apresenta a maior disponibilidade energética, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste (figura 8).

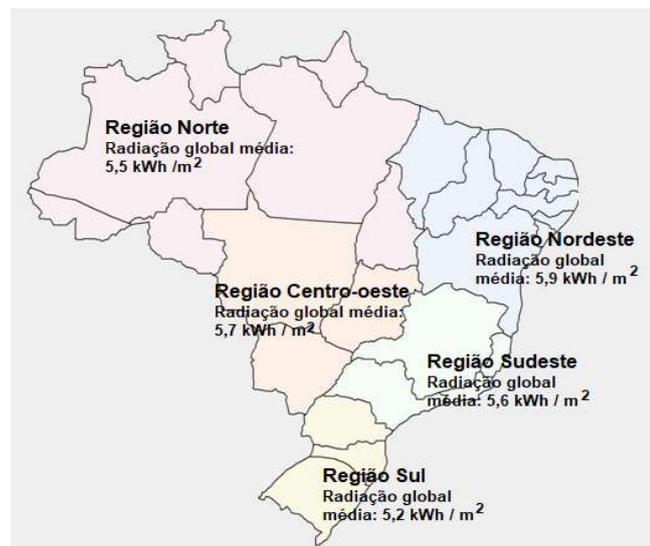


Figura 8 – Potencial anual médio de energia solar em cada região do Brasil

Fonte: PEREIRA et al. (2006)

Porém as regiões que mais adotaram a energia fotovoltaica para geração de energia elétrica são as regiões sudeste e sul. Os Estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul são os que possuem mais sistemas instalados (RUTHER et al., 2018). Tomando como base os números de unidades e das respectivas potências instaladas nesses Estados (tabela 3), pode-se considerar que há um potencial de crescimento ainda muito grande do uso da energia fotovoltaica no país.

Tabela 3 – Número de sistemas e potência instalada acumulada dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul

Estado	Total de sistemas	% do total nacional	Potência (MW)	% do total nacional
Minas	14.743	21,00%	147,47	20,40%
São Paulo	12.035	17,10%	87,84	12,20%
Rio Grande do Sul	10.110	14,40%	117,16	16,20%

Fonte: ANEEL (2019)

A modularidade da tecnologia fotovoltaica confere grande possibilidade de aplicação em GD, principalmente na escala de micro geração para atendimento domiciliar e comercial. Além disso, o MME/EPE (2016) aponta também perspectivas de redução dos custos dos sistemas FV ao longo das décadas (tabela 4). Essa redução nos custos tornaria os sistemas FV mais acessíveis, estimulando a adesão da tecnologia em camadas da população com menor poder aquisitivo.

Tabela 4 – Perspectiva de redução de custos dos sistemas FV (kit FV e integração) em R\$/Wp

	2018	2020	2030	2040	2050
Residencial	5,76	4,40	3,20	2,70	2,30
Comercial	4,41	4,20	3,00	2,50	2,10
Industrial	3,78	3,40	2,70	2,30	2,00

Fonte: MME/EPE,2016

2.6. GESTÃO DO FIM DE VIDA DOS MÓDULOS FV

A tecnologia FV é considerada uma alternativa promissora para a geração de energia e garantia da segurança energética e mitigação dos efeitos climáticos. Com a expansão do mercado FV e a produção de módulos em larga escala é importante considerar a gestão

apropriada dos resíduos dos módulos FV. Essa medida evitará impactos ambientais ao nível da disponibilidade da matéria prima e eliminação dos resíduos.

Diferentemente dos processos naturais, em processos industriais, os resíduos se acumulam, uma vez que não há a decomposição de resíduos. O tratamento dos resíduos no final da vida útil, com a reciclagem ou o descarte adequado, torna-se procedimento muito necessário. Sem o tratamento e gestão, o aumento de materiais residuais aumenta a pressão sobre o meio ambiente em termos de poluição, bem como pelo crescente esgotamento dos recursos naturais (CORCELLI et al., 2017).

Os módulos FV tipicamente possuem uma vida útil de 25 a 30 anos. Os principais fatores que determinam a vida útil dos módulos são a decomposição do encapsulamento em EVA pelo efeito do sol, destruição dos materiais internos por efeitos externos como na camada de vidro temperado e defeitos na célula FV (KANG et al., 2012). Outros fatores observados de falhas acontecem antes que os módulos FV alcancem seu fim de vida. Em alguns casos, os danos ocorrem durante o transporte e a instalação. Há falhas iniciais após o *start-up* da operação e falhas que ocorrem durante a operação do sistema, causadas sobretudo por condições ambientais severas e ainda por fatores inesperados que podem incluir até mesmo naturais (IEA–PVPS, 2018b).

A análise do ciclo de vida dos módulos FV demonstra que o ciclo de vida desses sistemas não é perfeito. Resíduos são gerados em várias etapas ao longo do ciclo de vida. Em um fluxo de ciclo de vida ideal, o aproveitamento de matéria prima é maximizado e o uso de matéria prima e o volume de resíduo descartado são minimizados. Conforme figura 9, possíveis fluxos (linhas pontilhadas) poderiam ser alcançados com a gestão de fim de vida para reduzir os impactos ambientais (TAO; YU, 2015).

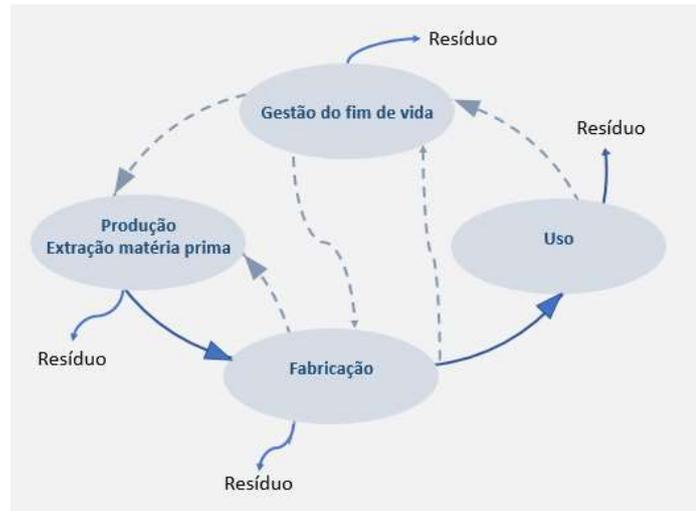


Figura 9 – Fluxo gestão de fim de vida

Fonte: Adaptado de TAO e YU (2015)

Há uma preocupação sobre a disposição dos módulos FV em aterros porque eles possuem metais em sua composição que contém substâncias perigosas tais como cádmio, chumbo e selênio, por exemplo (FTHENAKIS, 2000). A disposição inadequada dos resíduos FV pode causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana: lixiviação do cádmio e chumbo, perdas de recursos já processados como vidro e alumínio e a escassez de recursos raros como a prata, estanho entre outros (DIAS, 2015).

Um módulo típico da tecnologia de c-Si, com peso de cerca de 22 kg, contém em média 12,67 g de chumbo. Ainda que em pequenas quantidades na composição dos módulos, a quantidade desse metal excede o limite dos níveis para disposição em aterros comuns (DIAS, 2015). O chumbo é um metal pesado com um alto potencial de acumulação no sistema humano e no meio ambiente. Dependendo do nível de exposição, o chumbo é relacionado com doenças no sistema nervoso, cardiovascular e a osteoporose, entre outras doenças. No ecossistema, o acúmulo de chumbo tem demonstrado um range de efeitos negativos, podendo citar o impacto na biodiversidade, afetando o crescimento e reprodução de plantas e animais e os efeitos neurológicos em vertebrados. A disposição em aterros desse tipo de resíduo requer medidas de acondicionamento o que torna os custos dessa opção de gestão de resíduo mais elevada.

Os módulos FV são compostos em sua maioria por vidro e alumínio que representam cerca de 74% e 10% respectivamente. Em termos de peso, isso significa cerca de 16,6 kg e 2,2 kg (módulo com 22 kg) que potencialmente podem ser recuperados. Não recuperar esses

materiais tem um grande impacto no meio ambiente devido a sua disposição final em aterros e de energia.

O uso de metais raros, como a prata, embora representem menos de 1% da massa total do módulo, pode contribuir para a escassez do recurso. Embora a tendência seja a redução da quantidade de prata por módulo FV, esse metal é de elevado valor no mercado. Segundo relatório da EC (2011), é provável que o valor de mercado para a prata aumente em 20% de seu valor a cada dez anos, sendo seu preço estimado para 2050 de 1.348 euros/kg. A tabela 5 mostra o preço atual e uma expectativa de preço futuro de mercado dos principais componentes de módulos FV de c-Si. De acordo ainda com a EC (2011), a recuperação de todos esses materiais, com a reinserção na cadeia produtiva dos módulos FV, além de prevenir impactos ao meio ambiente, seria uma forma de reduzir o preço médio dos módulos FV.

Tabela 5 – Valores dos principais materiais (euro/kg) presentes em módulos FV

Recurso	2020	2030	2040	2050
Prata	780,00	936,00	1.123,00	1.348,00
Silício	12,85	15,42	18,51	22,21
Alumínio	1,38	1,59	1,83	2,10
Vidro	0,55	0,61	0,67	0,73

Fonte: EC (2011)

A recuperação do silício, contribui para a redução do payback energético (EPBT - *energy payback time*) dos módulos FV. A energia consumida no processo de purificação do silício é um dos processos que mais consomem energia. Um *survey* baseado em revisão na literatura realizado no estudo de Tiago et al. (2015) demonstra que na produção do módulo FV, o consumo maior de energia está relacionado com a produção do silício para ser usado nos módulos. Se a energia desse processo é reduzida, consequentemente o EPBT pode ser reduzido de maneira significativa.

O estudo de Müller et al. (2006) sugere que a energia economizada na fabricação de módulos novos a partir do silício reciclado seria de 55%. Nesse estudo, a energia consumida para produzir a lâmina de silício para um módulo FV é de 400 kWh a partir de matéria prima extraída e de 186 kWh a partir do silício reciclado. O estudo de Goe e Gaustad (2014) sugere que o EPBT decresce enquanto a taxa de reciclagem cresce para uma dada eficiência de

módulos c-Si. Em geral, de 3 a 5% na taxa de reciclagem, produz uma redução equivalente a 1% no EPBT (GOE; GAUSTAD, 2014). Portanto a recuperação de materiais e de energia é um incentivo para a reciclagem.

Outro aspecto é em relação à eficiência dos módulos FV fabricados a partir de células recuperadas. Os resultados também têm sido positivos. De acordo com Frisson et al. (2000), uma célula solar de c-Si, a partir de silício reciclado, obteve a mesma eficiência quando comparada à célula fabricada com matéria prima nova (ao redor de 16%).

Além das questões ambientais, da limitação de recursos disponíveis e do descarte de recursos valiosos, a gestão do fim de vida dos sistemas FV está se tornando assunto urgente quando se trata de regulamentações e diretivas. A União Europeia (EU), por exemplo, incluiu os módulos FV na Diretiva 2012/19/EU (EU, 2012) que trata dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, impondo implicitamente a responsabilidade estendida aos fabricantes. Desta forma, os fabricantes devem garantir a correta gestão de fim de vida dos módulos FV. Foram estabelecidas metas de recuperação e reciclagem dos módulos FV: de 13 de agosto de 2012 a 14 de agosto de 2015, foram fixadas em 75% e 65%, respectivamente; de 15 de agosto de 2015 a 14 de agosto de 2018, as metas se passaram para 80% e 70%, respectivamente; a partir de 15 de agosto de 2018, essas porcentagens aumentaram para 85% e 75% (EU, 2012).

A fim de alcançar a apropriada gestão de fim de vida dos módulos FV, a *PV Cycle* uma associação sem fins lucrativos e estabelecida por indústrias Europeias de FV em 2007, promove o comprometimento e responsabilidade por todo o ciclo de vida e a coleta voluntária para a reciclagem dos módulos FV. De acordo com o relatório anual da *PV Cycle* (2017), já haviam sido processadas 19.195 toneladas desde o começo das operações em 2010.

No Brasil, em consulta realizada à ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), os módulos FV deverão ser enquadrados como produtos eletroeletrônicos e sujeitos a ter um sistema de logística reversa conforme Lei 12.305/2010 que instituiu a PNRS (Política Nacional de Resíduos sólidos). O Decreto nº 7.404/2010, que regulamentou a lei, criou também o Comitê Orientador para a Implementação de Sistemas de Logística Reversa, que tem como base de suas atribuições estabelecer a orientação estratégica na implantação dos sistemas de logística reversa. A legislação obriga que todas as partes relacionadas ao processo (fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes) deverão contribuir para o

encaminhamento dos equipamentos eletroeletrônicos no fim de vida para a reciclagem ou destinação final ambientalmente adequada (ABDI, 2013).

2.7. ESTADO DA ARTE DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FV C-SI

A reciclagem de módulos FV para ser implementada de forma industrial ainda possui algumas barreiras. Um dos aspectos refere-se à viabilidade econômica diante principalmente dos baixos volumes de resíduos ainda produzidos e os custos elevados de muitos processos testados de reciclagem. Em alguns casos, esses processos tornam-se mais onerosos que a alternativa de envio dos resíduos para aterro. Outro obstáculo, apontado por Corcelli et al. (2016), é que as tecnologias desenvolvidas para reciclagem até o momento não conseguem tratar diferentes tecnologias de células FV e poucas estão completamente automatizadas para escala industrial. Existem dois processos de tratamento e reciclagem desenvolvidos e colocados em operação: Deutsche Solar desenvolvido para módulos de c-Si e Fisrt Solar desenvolvido para módulos de CdTe (EC, 2011). Atualmente, a PV Cycle, colocou em prática a logística reversa e um programa de reciclagem em escala industrial de módulos de c-Si.

Diante dessas dificuldades, interesse pelo assunto tem feito fabricantes e pesquisadores voltarem a atenção à prática de reciclagem de módulos FV e esforços vem sendo realizados para desenvolver tecnologias de reciclagem capaz de recuperar os materiais raros e caros contidos nos módulos, o que tornaria mais viável a reciclagem.

Na literatura são identificados diversos métodos de tratamento e reciclagem de módulos FV da tecnologia de c-Si. Muitos estão sendo propostos e testados para maximizar a quantidade de silício grau solar e outros metais valiosos, além da prata (HUANG et al., 2016; 2017). A reciclagem dos resíduos de módulos FV geralmente é baseada em tratamentos físicos, térmicos, químicos ou ambos. A tabela 6 contém um resumo dos métodos encontrados na literatura.

Tabela 6 – Métodos de reciclagem de módulos FV em c-Si identificados na literatura

Tecnologia / Processo	Vantagens	Desvantagens
Dissolução em solvente orgânico	Fácil remoção do EVA Menor dano as células FV Recuperação do vidro	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio
Solvente orgânico e irradiação ultrassônica	Fácil remoção do EVA Mais eficiente que a dissolução	Impacto devido às emissões e resíduos ao meio Custos equipamentos
Calor /Eletrotérmico	Fácil remoção do vidro	Processo lento
Separação mecânica	Menor dano as células FV Recuperação do vidro	Requer outro processo para completa remoção do EVA Danos às células FV
Pirolise	Recuperação de materiais - 80% do sanduiche e de 100% do vidro Eficiência e custo para escala em processo industrial	Danos às células FV
Dissolução em solvente (ácido nítrico)	Remoção completa do EVA e de metais dos contatos elétricos do sanduiche Possibilidade de recuperação da célula FV intacta	Causa danos às células FV Geração de emissões e resíduos prejudiciais ao meio.
Desintegração física	Capacidade de tratar os resíduos	Requer outro processo para completa remoção do EVA Geração de resíduos com metais pesados Danos às células FV
Mecânico (seco e úmido)	Mínimiza os impactos causados nos processos químicos Viabilidade dos equipamentos Baixo consumo de energia	Baixa recuperação de materiais raros
Tratamento térmico (calor em duas etapas)	Completa remoção do EVA Possível recuperação da célula FV intacta	Geração de emissões prejudiciais ao meio Alto consumo de energia
Solução química	Recuperação de metais com elevado grau de pureza Processo simples e eficiente	Uso de soluções químicas

Atualmente há tecnologias que conseguem reciclar cerca de 90% do módulo FV, em termos de seu peso (IRENA; IEA–PVPS, 2016). O grande desafio do processo da reciclagem é a recuperação da célula para aproveitamento na fabricação de novos módulos. Alguns fabricantes estão tentando garantir um processo de fabricação dos módulos que beneficie a posterior reciclagem, sem, contudo, prejudicar a eficiência das células (AUER, 2015). Em particular a remoção do encapsulamento para a proteção da célula FV, comumente em EVA, é uma das etapas de maior dificuldade para a reciclagem (RADZIEMSKA;

OSTROWSKI, 2010). No processo de reciclagem descrito por Muller et al. (2006), a reciclagem do vidro e metais (cabos e alumínio) ocorre separado.

2.7.1. Desmontagem e separação do sanduíche para remoção da célula FV

Basicamente a recuperação e reciclagem do módulo FV de c-Si requer primeiramente a desmontagem dos principais componentes do mesmo. O processo de produção dos módulos FV envolve laminação única das células (após a formação da camada junção p-n) e a montagem em molduras de alumínio (RADZIEMSKA; OSTROWSKI, 2010). Os módulos são encapsulados com vários materiais para proteger as células e os conectores elétricos das ações do meio em que são instalados. Desta forma, a reciclagem requer a desmontagem dos módulos, com a remoção do encapsulamento formado pelas camadas de EVA, e da camada protetora, geralmente de PVF, de forma que essa célula fique intacta. Em alguns processos mesmo as células FV quebradas são recicladas e reutilizadas como matéria prima para a produção dos lingotes ou outras aplicações (MULLER et al., 2006; PARK et al., 2015).

A desmontagem do módulo mecanicamente é uma forma mais simples e econômica e envolve a separação da moldura em alumínio (Al), da caixa de junção (caixa de conectores) e a parte do vidro. O vidro separado dessa forma precisará passar por tratamento térmico para ser reaproveitado (DIAS, 2015; PARK et al., 2015; HUANG et al., 2017;), pois no processo mecânico não é possível retirar toda a camada de EVA. De forma mecânica já é possível a recuperação do vidro e da moldura em alumínio. Com a separação da caixa de junção pode-se obter reaproveitamento dos cabos em cobre e de parte do material plástico sendo que o restante ou é conduzido para incineração ou para descarte em aterro. Em escala menor a desmontagem mecânica, a recuperação de parte do vidro, da estrutura em alumínio e dos metais perigosos é uma alternativa em um cenário onde possivelmente envolveria o descarte do restante dos materiais em aterro controlado e reduziria os resíduos perigosos (FTHENAKIS, 2000).

Para remoção do EVA, vários métodos são empregados, tais como, dissolução em soluções e tratamento térmico para decomposição do material, sendo o térmico o mais difundido (TAMMARO et al., 2015). O método descrito por Kang et al. (2012) para a separação do vidro temperado é imergindo o módulo FV em solvente orgânico, previamente ao tratamento térmico, para remoção do EVA. Desta forma o método proposto reduziria o volume dos resíduos de

módulos FV e da necessidade de instalação de fornos maiores para tratamento térmico (KANG et al., 2012).

O processo térmico é mais rápido e eficiente para separação da célula FV das camadas de EVA e de PVF (PARK et al., 2015). A estrutura do composto do módulo com o aquecimento é desunida, de modo que o vidro, EVA, PVF, metais, plásticos e a célula FV são separados facilmente (MULLER et al., 2006; RADZIEMSKA; OSTROWSKI, 2010; AUER, 2015; TAO; YU, 2015). Materiais plásticos, EVA e o PVF são queimados e a célula FV é separada (AUER, 2015). O processo térmico é realizado em forno ao redor de 45 minutos em temperaturas controladas entre 350°C a 600 °C graus (TAO; YU, 2015; PARK et al., 2015; TAMMARO, 2015). Wang et al. (2012) utiliza um processo térmico em dois passos para a delaminação térmica para a destruição da camada de EVA. Dias et al. (2016) estudou a destruição do polímero pelo processo de pirólise que poderia ser usado com menor impacto ambientais que o uso de solventes orgânicos.

Para separação do EVA o processo térmico mostrou-se também mais econômico e mais favorável, com altas taxas de recuperação de materiais. Acima de 90% do vidro, 95% dos materiais semicondutores e até 98% da célula solar intacta são recuperados para posterior tratamento e uso (TAO; YU, 2015). Como vantagem nesse processo é a possibilidade de utilizar a reação exotérmica da queima do EVA, como fonte de calor para o aquecimento do forno, reduzindo a energia consumida nessa fase (FRISSON et al., 2000; DIAS et al., 2016). O processo térmico também possui menos impacto do ponto de vista ecológico, quando comparado ao processo químico, pois este último requer o uso de caros e tóxicos reagentes (FRISSON et al., 2000; RADZIEMSKA et al., 2010). As desvantagens no processo térmico seriam a necessidade de fornos com dimensões para recebimento dos módulos e as emissões. A técnica mais promissora é a pirólise, especialmente para a implementação industrial (FRISSON et al., 2000). Após esse tratamento a reciclagem e recuperação de outros materiais são complementadas com outros processos.

A separação da camada de EVA e de PVF através do processo químico envolve soluções em HNO₃ e solventes orgânicos. O processo com solução de HNO₃ é longo, dura cerca de 7 a 14 horas em imersão, e a solução de HNO₃ danifica os componentes da célula FV, incluindo os metais Ag e Al (KANG et al., 2012). Já o processo com solventes orgânicos pode durar semanas. Doi et al. (2001) utilizou tricloroetileno por 10 dias e conseguiu remover a camada de EVA sem causar danos a célula FV. A desvantagem desses processos é a grande

quantidade e o custo elevado de produtos químicos, duração longa dos processos, além da disposição desses produtos após o tratamento (AUER, 2015). Os produtos químicos usados precisam ser tratados química e fisicamente e o lodo resultante e a água contaminada seguem para plantas de tratamento de esgoto. Além disso, alguns processos químicos para separação do EVA resultam em danos a célula e ou não são capazes de remover totalmente o EVA da célula FV (FRISSON et al., 2000). Para acelerar e reduzir o tempo do tratamento podem ser utilizados agitadores ultrassônicos o que demanda custo e alto consumo de energia (HUANG et al., 2017).

2.7.2. Separação e recuperação do silício e metais da célula FV

As células intactas, recuperadas no processo de tratamento para separação do EVA, não requerem o processo de refinamento para alcançar a pureza mínima necessária para que o silício seja utilizado em células solares. No lugar, as células necessitam de tratamento para remoção das impurezas restantes das camadas de EVA, PVF e do material anti reflexo (ARC) (MÜLLER et al., 2006; PARK et al., 2015). Geralmente a remoção dessas impurezas é obtida através do tratamento químico das células FV para recuperação dos metais condutores (geralmente Al e Ag) e da camada de SiNx.

O processo requer uma composição adequada e concentração da solução ácida, bem como a faixa de temperatura para a reação química. A eficiência dos processos para recuperação de silício puro a partir de módulos FV reciclados dependerá do processo de fabricação desses módulos. É importante identificar os materiais utilizados na fabricação da célula FV (figura 10).

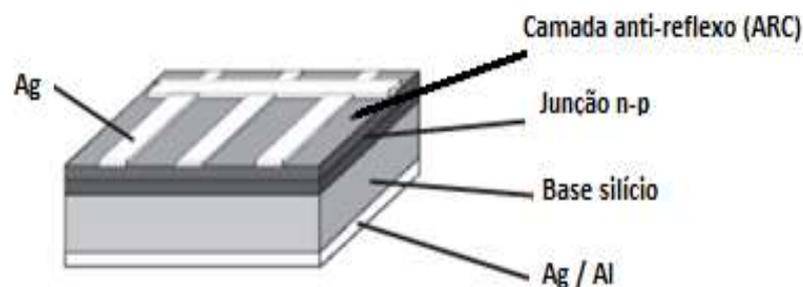


Figura 10 - Esquema típico dos tipos de materiais usados na produção de células FV

Fonte: Adaptado de RADZIEMSKA e OSTROWSKI (2010)

As composições das soluções são ajustadas para os diferentes tipos de células de c-Si. Na literatura é possível verificar vários estudos desenvolvendo métodos e adequação das soluções a fim de recuperar o silício na produção de novas células FV que obtenha propriedades idênticas ou quase idênticas às células produzidas a partir do silício extraído de matéria prima. A maioria dos métodos de tratamento químico para remoção das impurezas envolve solução de HF e HNO₃ (KANG et al., 2012; PARK et al., 2015). O importante nessa etapa é encontrar uma tecnologia adequada para atender células FV de diferentes fabricantes. Otimizar esta parte do processo também pode ser problemático.

No levantamento bibliográfico realizado, pode-se perceber que a maioria dos estudos tem focado na recuperação do SiMG das células FV (MULLER et al., 2006; RADZIEMSKA et al., 2010; HUANG; TAO, 2015; HUANG et al., 2017). O estudo de Radziemska e Ostrowski (2010) menciona a recuperação de Ag por ser um metal valioso. A recuperação de múltiplos metais de módulos FV foi encontrada no estudo de Huang et al. (2016, 2017). O objetivo proposto por Huang et al. (2016, 2017) é desenvolver uma tecnologia que seja técnica e economicamente viável e ambientalmente sustentável, conseguindo recuperar vários metais, incluindo tóxicos e valiosos metais, que compõem o módulo FV (SiMG, Ag, Pb, Cu e Sn). São utilizados elementos de forma que ao final do processo tenha pouco resíduo gerado. Em uma etapa é utilizado HNO₃ e HF e em outra o NaOH, conseguido extrair o Al e o SiMG. As emissões no processo são as da incineração dos polímeros e NOx das soluções. Ao final as soluções geradas são neutralizadas restando pouco resíduo para ser descartado em aterro. A pesquisa de Huang et al. (2016, 2017) sugere capacidade de eliminar um dos maiores obstáculos que impedem a continuidade de diversos outros estudos que é a inviabilidade econômica. De acordo com esses autores, os retornos obtidos com a recuperação dos metais e os custos evitados com aterro compensariam os custos com a reciclagem.

2.8. OUTROS PROCESSOS (INCINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO EM ATERRO)

De acordo com as recomendações e diretrizes mundiais, tais como a recente Diretiva 2012/19/EU, a reciclagem e recuperação de parte dos componentes dos REEE e destinação adequada do material não recuperado é obrigatória. Essa diretiva também classifica os resíduos

de módulos FV como REEE e portanto claramente como nocivos à saúde humana e ao ambiente para serem descartados diretamente em aterros comuns.

No Brasil a classificação e a gestão dos resíduos dos módulos FV não foi amplamente discutida. Uma proposta do MMA/CONAMA (2010) para REEE ainda não incluía os resíduos dos módulos FV. No trabalho de Dias (2015) os materiais presentes nos componentes dos módulos FV de c-Si foram caracterizados, indicando que de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) são classificados como classe I (resíduo perigoso), uma vez que possuem uma quantidade de chumbo acima do limite estabelecido pela norma.

Considerando a classificação de resíduo perigoso, a outra possibilidade de tratamento dos resíduos dos módulos FV é a incineração em plantas de tratamento de REEE e descarte de materiais em aterros para materiais inertes. Jungbluth (2004) e Müller (2006) citam a adoção dessa prática onde as partes maiores dos componentes, como a moldura em alumínio, são separadas e recuperadas e o restante é incinerado antes da disposição em aterros. A desvantagem dessa solução é a perda de matéria prima como o silício e o vidro.

A incineração para tratamento de resíduos sólidos é uma tecnologia por meio da combustão dos resíduos, na presença de ar de combustão (oxigênio – O₂) e com combustível auxiliar, em um sistema fechado, resultando ao final do processo sólidos, cinzas, gases e líquidos (BARROS, 2013). É necessário equipamentos de controle de poluição gasosa e particulada e a disposição em aterros dos sólidos e cinzas resultantes do processo de incineração (BARROS, 2013).

A incineração de resíduos perigosos é similar à de resíduos de coleta municipal. O processo difere na quantidade de combustível auxiliar que é necessário para manter a alta temperatura de combustão, sendo que a temperatura de combustão alcança de 800 a 1600° C (DOKA, 2003).

Após a incineração ocorre o processo de precipitação eletrostática para remoção de partículas e de cinzas no ar, e as etapas de tratamento e purificação dos gases de combustão e tratamento de águas residuais. Diferentes técnicas e materiais auxiliares são utilizados nessas etapas para garantir a limpeza dos poluentes (gases ácidos, compostos orgânicos ou NO_x) antes de suas emissões para o ar. Gases ácidos são limpos utilizando agentes alcalinos (CaO ou Ca(OH)₂). NO_x são reduzidos para N₂ e vapor de água utilizando agentes redutores aplicando processos específico onde o gás de combustão passa sobre um catalisador. O tratamento de

dioxinas e furanos mais usual é o de adsorção em carvão ativado (MARGALLO et al., 2012). Após a precipitação eletrostática ocorre um spray de água para remoção de componentes prejudiciais ao meio ambiente tais como HF, HCl, alguns particulados e alguns metais pesados. Em um segundo estágio hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) ou outro componente é utilizado para remover SOx e algum HCl que tenha permanecido. Outros metais pesados como cloretos e hidróxidos são removidos sem precisarem de agentes especiais para serem precipitados. Os principais tipos de resíduos resultantes da fase de combustão são as cinzas de fundo e as cinzas de caldeira, escória e lodo do purificador. Estes resíduos geralmente são descartados em aterros após um processo de solidificação com água e cimento (DOKA, 2003; MARGALLO et al., 2012; BARROS, 2013).

Entre os impactos da incineração estão os resíduos gerados e a emissão de gases de combustão que se formam como as dioxinas e furanos, compostos reconhecidamente tóxicos (DOKA, 2003; BARROS, 2013; ABELIOTIS, 2014; MARGALLO et al., 2014). Embora as emissões dependam da composição do resíduo específico, na literatura são encontrados dados das emissões associadas ao processo e dos poluentes mais significantes. As emissões de CO, dioxinas e furanos e NOx são mais dependentes das condições operacionais do processo de incineração (temperatura, velocidade e concentração de oxigênio). As emissões para a água nos processos de incineração de resíduos estão relacionadas apenas às plantas com um sistema de limpeza de gases de exaustão (MARGALLO et al., 2014). A maioria da energia produzida na combustão é transferida para os gases de combustão. O resfriamento desses gases permite a recuperação de energia, que pode ser usada na produção de calor para o próprio processo (MARGALLO et al., 2014). De acordo com Rosa et al. (2003) a incineração do plástico, por exemplo, resulta em cerca de 3,3 MWh/t de eletricidade.

Outra forma de gestão dos resíduos seria o tratamento em plantas equipadas para tratar REEE, porém sem tecnologia específica para tratar os resíduos dos módulos FV (Latunussa et al, 2016). Assim, somente parte dos componentes é recuperada (alumínio e cabos), sendo a maior parte enviada a aterro especial.

2.9. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma das ferramentas mais integradas e completas para a análise e determinação do impacto ambiental global ao longo do processo produtivo. As

normas ISO 14040 e 14044 (ISO, 2009), formalmente definem a ACV como uma técnica para avaliação dos impactos ambientais associados ao produto que consiste no levantamento do inventário do fluxo de entradas e saídas do produto, na avaliação dos potenciais impactos associados a esses fluxos e na interpretação dos resultados da análise do inventário e da avaliação dos impactos em relação aos objetivos do estudo.

Uma definição similar foi adotada em 1993 pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), que foi a pioneira em publicar um guia para a prática da ACV. De acordo com SETAC (1993), a ACV permite avaliar as emissões e os impactos ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, processo ou atividades e identificar e quantificar as necessidades de energia e os resíduos liberados ao ambiente. Seus resultados servem para identificar oportunidades de melhorias e podem ser usados por exemplo para comparar a avaliação ambiental de diferentes fontes de energia, como fotovoltaica, eólica, nuclear, entre outras. Por ciclo de vida entende-se um conjunto de etapas necessárias para que um produto desempenhe a sua função, incluindo desde a extração dos recursos naturais usados, a fabricação, transporte, uso, descarte até a disposição final, como representado na figura 11.



Figura 11 - Representação das etapas consideradas em um estudo de ACV.

2.9.1. Padrões para a ACV

Com o intuito de padronizar os trabalhos relacionados à ACV, existem algumas normas reguladoras. Os principais padrões para ACV são a série ISO 14000. A ISO 14040

(ISO, 2009), por exemplo, considera os princípios e a estrutura para uma ACV, enquanto a ISO 14044 (ISO, 2009), especifica os requisitos e diretrizes para a realização de um estudo de ACV. As normas ISO não são muito detalhadas. Consequentemente, ao aderir a um padrão ISO, é necessário documentar cuidadosamente o objetivo e as questões de escopo e interpretação.

2.9.2. Vantagens e Desvantagens

De acordo com SETAC (1993), um dos principais objetivos de uma ACV é retratar as interações entre o processo considerado e o ambiente, da forma mais completa possível, contribuindo para o entendimento da natureza global e das consequências das atividades humanas sobre o ambiente. A ACV produz informações objetivas que permitem identificar oportunidades para melhorias ambientais (SETAC, 1993). A técnica serve como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões. A partir da avaliação dos impactos relacionados à função do produto ou processo, a ACV pode ser aplicada de duas maneiras: como um meio de identificar melhorias para seu desempenho ambiental ou como uma forma de comparação entre dois sistemas. A ACV pode ainda ser utilizada como meio de suporte para o desenvolvimento do planejamento estratégico e para a otimização de projetos, produtos e processos, no suporte para cumprimento às normas ambientais e como forma de marketing ambiental.

A ACV, contudo, apresenta desvantagens devido ao fato de não haver uma metodologia consolidada para a análise. Pode-se citar também a falta de modelos e de banco de dados para a avaliação de impactos, a subjetividade dos critérios para a tomada de decisão e o grande número de dados necessários para o estudo.

A ACV vem sendo empregada sob diferentes filosofias, o que tem levado a bastante polêmica, especialmente quanto à caracterização e mensuração dos impactos ambientais.

2.9.3. Etapas da ACV

A norma ISO 14040 (ISO, 2009) define os princípios, estrutura e os requisitos e orientação para os trabalhos de ACV. De acordo com essa norma, a realização da ACV deve ser realizada seguindo as etapas (figura 12):

- Definição do objetivo e o escopo do estudo;
- Análise do inventário de Ciclo de Vida (ICV), elaborando um modelo do ciclo de vida do produto com todas as entradas e saídas ambientais;

- Avaliação do impacto de Ciclo de Vida (AICV), compreendendo a relevância ambiental de todas as entradas e saídas;
- Interpretação do estudo.

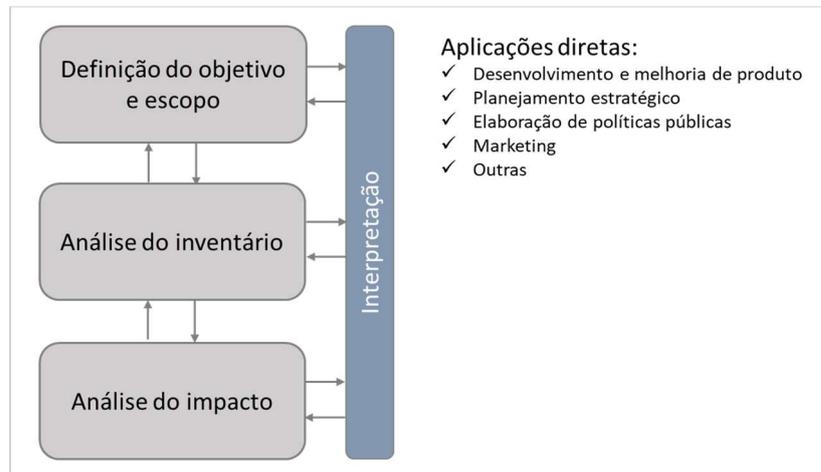


Figura 12 - Fases da ACV

Fonte: Adaptado de ISO 14040 (2009)

Todas essas etapas se relacionam entre si. O objetivo e escopo, previamente estabelecidos, podem ao longo do estudo ser alterados de acordo com as necessidades e dificuldades surgidas ao longo do processo de coleta de dados e avaliação de impactos. Qualquer ajuste no objetivo ou no escopo deve ser documentado.

De uma forma simplificada, a ACV pode ser considerada com o retrato das entradas e saídas de um dado sistema e muitos autores utilizam o conceito de *Input e Output Analysis*. Através da ACV dados ambientais quantificáveis podem ser obtidos, tais como: entradas (matérias primas e energia) e as saídas (emissões totais, consumo de energia, geração de resíduos, entre outros).

2.9.4. Definição do escopo e objetivo

A ACV está relacionada a uma ampla gama de variáveis, sendo muitas vezes complicado compreender o significado exato dos resultados. Desta forma é uma etapa muito importante a definição do objetivo, ou seja, definir as razões para a realização do estudo para posterior avaliação e interpretação adequada dos resultados.

Nessa etapa é determinada também a fronteira do sistema, onde iniciar e concluir o estudo do ciclo de vida. Diferentes limites obviamente criarão resultados diferentes daí a

importância da delimitação da abrangência. As categorias de impactos se referem aos impactos que podem ser causados ao meio ambiente.

No escopo são estudados o público alvo sendo que, dependendo do grupo que será destinado o estudo, o nível de profundidade necessária será diferente. Também são definidas a unidade funcional e a função do produto ou processo, além de apresentar os critérios e hipóteses que serão adotados e as categorias de impacto que serão consideradas para a análise do desempenho ambiental. Para o bom andamento do estudo, é importante que os termos e os conceitos utilizados nesta etapa estejam bem definidos.

2.9.5. Unidade funcional

Unidade funcional (UF) é a quantidade do produto que será considerada no estudo e tem como objetivo quantificar o uso final do produto ou processo, constituindo uma referência em relação ao inventário. A UF fornece uma base ou referência quantitativa das entradas e saídas do sistema, permitindo que todos os processos, atividades ou serviços sejam analisados e comparados para uma mesma unidade (COLTRO, 2007).

Definir a UF pode ser um passo difícil, pois nem sempre está claro qual função o produto ou processo preenche, não tratando simplesmente de comparar os produtos que podem ter características diferentes (GOEDKOOOP et al., 2016). Assim, a definição de uma unidade torna processos de comparação e análise de sistemas mais simplificada, devendo portanto ser claramente definida e mensurável.

2.9.6. Fronteira

A fronteira do sistema estabelece limites para o estudo de ACV. Excluindo certas partes do processo, que significará deixá-los fora da fronteira, afetar os resultados da ACV. Desta forma, o relatório deve deixar bem claro caso alguma parte do ciclo de vida do produto não foi estudada. Torna-se útil nessa etapa, desenhar o diagrama do sistema e identificar a fronteira no diagrama. (COLTRO, 2007; GOEDKOOOP et al., 2016).

2.9.7. Alocação

O estudo de ACV requerer critérios de alocação quando o ciclo de vida de produtos diferentes é interligado. De acordo com a norma ISO 14040 (ISO, 2009) a fronteira do sistema

deve ser definida de modo que os co-produtos sejam incluídos na ACV, o que auxiliará na identificação dos dados relevantes que são particulares do produto.

2.9.8. Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A análise do inventário é a base para uma ACV. Nesta etapa é realizada a identificação e quantificação de todos os materiais consumidos e produzidos ao longo do ciclo de vida (matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, etc) que influenciam o meio ambiente (ZBICINSKI et al., 2006). É uma etapa bem técnica, onde são realizadas a coleta e a quantificação das entradas e saídas do processo em estudo, a partir de dados primários, coletados direto de fonte, e secundários, coletados da literatura (ITO, 2011). Por envolver dificuldades para a obtenção dos dados necessários, é a etapa que mais demanda tempo. É importante entender os limites aplicáveis, a qualidade dos dados e as suposições envolvidas no cálculo ao realizar o estudo da ACV.

De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2009), algumas atividades devem ser realizadas nesta etapa com o propósito de organizar a coleta de dados, tais como a elaboração de diagrama de fluxo com todas as etapas do ciclo de vida, a definição e refinamento dos limites do sistema, dos procedimentos de cálculo e dos procedimentos de alocação.

O ICV é a totalização das entradas e saídas de um sistema para cada fase de um produto. O consumo de recurso é especialmente investigado pela necessidade global de redução de aquisição de material, pelo consumo de material e energia envolvidos, bem como a emissão de resíduos gerados para a produção dos produtos. As principais funções de uma análise de ICV de materiais incluem os seguintes propósitos de acordo com a ISO 14040 (ISO, 2009):

- Desenvolver uma base de informação sobre o uso de um recurso do sistema;
- Comparar as entradas e saídas do sistema com materiais ou produtos alternativos;
- Identificar os estágios de ciclo de vida de um produto ou material, no qual possa ocorrer uma redução da perda de material;
- Auxiliar o desenvolvimento de novos processos, produtos e materiais visando à redução líquida dos recursos e resíduos;
- Identificar áreas a serem tratadas em uma ACV posterior;
- Identificar o estágio dentro do ciclo de vida de um produto no qual possa ser alcançada uma redução no uso do recurso;

- Conduzir o desenvolvimento da reciclagem (reuso, remanufatura e reprocessamento);
- Auxiliar o desenvolvimento de regulamentações ambientais mais efetivas.

2.9.9. Avaliação dos impactos de Ciclo de Vida

A etapa de avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV onde é realizada a identificação, caracterização e avaliação dos potenciais impactos ambientais associados aos aspectos ambientais que foram levantados na etapa de análise de inventário. Nesta etapa devem ser determinadas as categorias de impactos a serem avaliadas no estudo.

Avaliações mais simples podem ser realizadas apenas com os dados obtidos na fase do inventário. Quando são detectadas grandes diferenças nos parâmetros de impacto ou quando houver necessidade de se relacionar os dados do inventário aos problemas ambientais, o uso de uma metodologia específica, como a estabelecida na padronização ISO 14000 (ISO, 2009) é de grande utilidade.

As diferentes formas existentes para avaliação do impacto ambiental é motivo de grandes debates científicos. Algumas limitações no estabelecimento dos impactos potenciais e de aspectos como subjetividade nas análises ou diferenças entre indicadores e impactos devem ser consideradas nas ACVs.

A padronização ISO recomenda uma estrutura para o processo de avaliação que inclui basicamente três passos obrigatórios, de acordo com Zbicinski et al. (2006):

- Seleção e definição das categorias ambientais, indicadores de categorias e de modelos de caracterização. São exemplos de categoria: material particulado (abaixo MP10), ruído, recursos abióticos, recursos bióticos, uso do solo, aquecimento global, destruição da camada de ozônio, impactos eco toxicológicos, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação, eutrofização e ambiente de trabalho.
- Classificação: correlação dos dados que são classificados e apurados nas diversas categorias selecionadas. Os fluxos elementares do inventário são atribuídos às categorias de impacto de acordo com a capacidade das substâncias de contribuir para diferentes impactos ambientais. Por exemplo, o dióxido de carbono (CO₂) será

classificado como contribuindo para o aquecimento global, o dióxido de enxofre (SO₂) será classificado como produzindo acidificação. O potencial de impacto é calculado com base na análise de inventário.

- **Caracterização:** os dados de quantidades de materiais de saída são calculados com fatores de caracterização para produzir indicador numérico de categoria de impacto. Diferentes substâncias entre um grupo contribuem diferentemente para a categoria de impacto. Durante a caracterização a relativa força das emissões não desejadas são avaliadas e as contribuições para cada problema ambiental é quantificada. Um fator de equivalência indica quantas vezes mais um dado componente contribui para o problema ambiental em comparação à substância de referência. No caso de emissões de aquecimento global (GWP), CO₂ é escolhido para referência. Para todas as outras substâncias que causam emissão de gás de efeito estufa (GEE), são dadas um coeficiente indicando quantas vezes mais ou menos essa substância contribui para o efeito. Por exemplo, o metano tem um fator de equivalência de 11, o que significa que 1 kg de metano causa o mesmo efeito de GEE que 11 kg de dióxido de carbono (CO₂), ou seja o GEE é calculado em termos de CO₂ equivalente (CO_{2-eq}), usando potencial de aquecimento global (GWP). Há outros fatores estabelecidos de caracterização para outros impactos ambientais como potencial de Acidificação, potencial de redução da camada de ozônio, potencial de eutrofização, entre outras.

Há ainda os elementos opcionais que são usados para simplificar a interpretação dos resultados. Esses passos são considerados como opcionais pela padronização ISO (ZBICINSKI et al., 2006):

- **Normalização:** os resultados do passo da caracterização não podem ser comparados desde que estes estão usualmente apresentados em unidades diferentes como por exemplo, em CO_{2-eq}. A normalização é um procedimento que permite comparar as categorias de impacto entre elas.
- **Ponderação:** Em alguns casos que apresentam uma grande quantidade de dados envolvida e existe complexidade para relacioná-los, pode-se gerar um único indicador ambiental. Ponderação é a conversão dos resultados dos indicadores das diferentes categorias de impacto a uma escala comum, baseada em escolha de valores. Para realizar a ponderação, a hierarquia das categorias de impacto deve ser estabelecida, atribuindo-se pesos a elas em termos de sua importância, somando-se, após isso, os

resultados ponderados. A ponderação não é estipulada na padronização internacional porque é considerada subjetiva (ITO, 2011). É um dos passos mais controverso e difícil na ACV. De acordo com a série ISO 14000 (ISO, 2009) se a pretensão da ACV é comparar os resultados de produtos ou serviços para serem apresentados ao público externo, a ponderação não é permitida (GOEDKOOOP et al., 2016).

A utilização de métodos de AICV contém informações ambientais acerca de inúmeras substâncias e recursos e realizam as etapas da avaliação de impactos utilizando fatores previamente definidos. Cada método possui seus princípios de medições e fatores de caracterização, normalização e ponderação particulares para traduzir os dados numéricos do inventário em resultados ambientalmente relevantes. A figura 13 contém a estrutura típica dos métodos de avaliação de impactos adotadas pela grande maioria dos métodos.

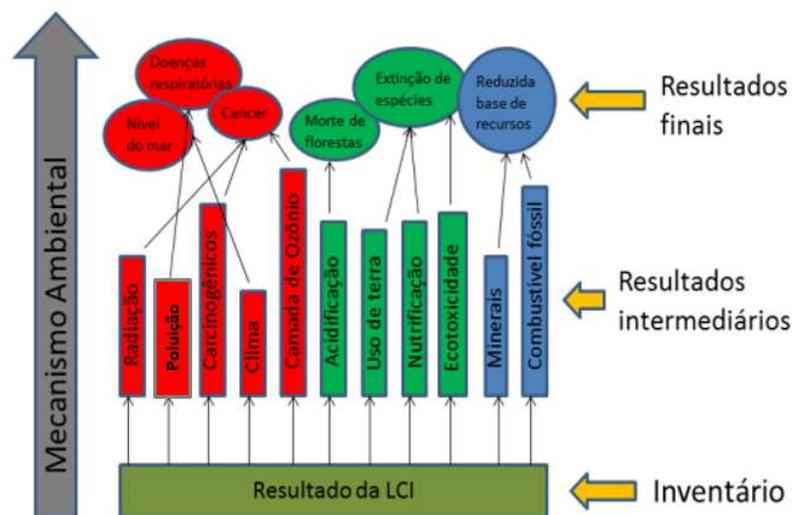


Figura 13 – Exemplo estrutura geral de um método de AICV

Fonte: Adaptado de GOEDKOOOP et al. (2013)

Considerando essa estrutura, os métodos de avaliação de impactos, agrupam os resultados de inventário nas chamadas “categorias *Midpoints*”, que seriam os resultados intermediários e “categorias *Endpoint*”, ou dano propriamente dito, que seria o resultado final.

2.9.10. Interpretação

A interpretação é uma forma de tornar os resultados obtidos mais simples de serem compreendidos. É importante ressaltar que essa etapa depende dos limites de pesquisa e

abordagens para análise do inventário, devem ser levadas em consideração as hipóteses estabelecidas anteriormente, assim como as adaptações realizadas durante o estudo. Geralmente, os dados usados na ACV incluem estimativas e informações encaminhadas. Por esse motivo, se os dados afetarem os resultados de maneira significativa, a análise de sensibilidade deve ser incluída (ITO, 2011).

2.9.11. Métodos de Análise de Impacto na ACV

A AICV pode ser realizada por vários métodos, com diferentes indicadores, categorias de impacto e formas de cálculo. Os principais métodos de AICV e os mais citados na literatura, foram desenvolvidos em sua maioria para países da Europa pelo fato de que as pesquisas relacionadas à ACV foram iniciadas na Europa, destacando-se perante a comunidade científica mundial. É o caso do CML 2002, Eco-indicator 99, EPS 2000, Impact 2002+, e ReCiPe. Há ainda outros métodos como LUCAS (Canadá), TRACI (Estados Unidos), LIME (Japão) e os métodos desenvolvidos por grupos de pesquisas, envolvendo colaboradores ao redor do mundo, como os métodos USEtox e IMPACT World+. No Brasil ou em outros países da América do sul ainda é ausente de métodos que possam retratar o contexto desses países.

2.9.12. Método ReCiPe

Um dos métodos para realização da AICV é o ReCiPe (GOEDKOOOP et al., 2013; HUIJBREGTS et al., 2016). O método é da PRé (Product Ecology Consultants) de origem Holandesa e é considerado uma atualização dos métodos Eco-Indicator 99 e do CML. O método ReCiPe converte as emissões de substâncias perigosas e a extração de recursos naturais em indicadores de categoria de impacto Midpoint e Endpoint.

Na categoria Midpoint o processo é avaliado em relação a 18 categorias de impactos (tabela 7). Para cada categoria, um indicador específico (por exemplo, kg CO₂ eq para mudanças climáticas) é calculado como a soma ponderada das emissões individuais.

Tabela 7 – Categorias de impacto e fatores de caracterização Midpoint

Danos à saúde humana	Unidade
Formação de material particulado	kg PM10 eq
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC
Radiação ionizante	kg U235 eq

(continuação)

Danos à saúde humana	Unidade
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq
Danos à diversidade do ecossistema	Unidade
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq
Eutrofização de água doce	kg P eq
Eutrofização marinha	kg N eq
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq
Ocupação do solo	m ²
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq
Danos à diversidade do ecossistema	Unidade
Transformação solo	m ²
Danos à disponibilidade de recurso	Unidade
Depleção de recursos minerais	kg Fe eq
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq
Depleção água	m ³

Fonte: GOEDKOOOP et al. (2013)

Na categoria Endpoint, as pontuações expressam a gravidade relativa ao impacto ambiental e são apresentadas em três categorias (tabela 8), ou seja, danos à saúde humana expressa em DALY (ano de vida ajustado por incapacidade), danos ao ecossistemas, expressa em espécie-ano e danos aos recursos, expressa em dólar (US\$).

Tabela 8 - Categorias de impacto e indicadores Endpoint

Categoria de Impacto	Unid.	Indicador
Danos à saúde humana	Yr	Incapacidade - anos de perda de vida
Danos a diversidade ecossistema	Yr	Perda de espécies durante o ano
Danos aos recursos	\$	Aumento de custo

Fonte: GOEDKOOOP et al. (2013)

Os dois métodos mencionados possuem suas vantagens e desvantagens. A análise Midpoint possui um grau menor de incerteza e fornece uma análise mais abrangente e detalhada dos impactos causados por um determinado sistema. Em função dessas características é o método mais aceito e usado em pesquisas.

Já o método de Endpoint possui um grau maior de incerteza, pois é baseado em modelos próprios dos desenvolvedores do ReCiPe. A vantagem de seu uso é a normalização em pontos, que permite que cada sistema avaliado tenha um total de pontos, permitindo a comparação de sistemas em suas totalidades, e não apenas a comparação por categorias. O escopo de aplicação das categorias possui abrangência na Europa. Porém, como outras metodologias, alguns impactos são de abrangência global como aquecimento global e destruição da camada de ozônio e recursos. A tabela 9 apresenta as particularidades do método ReCiPe adotado no estudo.

Tabela 9 – Método ReCiPe

	Etapas consideradas	Particularidades
Endpoint	Caracterização, Avaliação de danos, Normalização, Ponderação e Agrupamento	Há 3 versões: hierárquica, Igualitária e Individualista. Método orientado a danos
Midpoint	Caracterização e Normalização	Há 3 versões: hierárquica, Igualitária e Individualista. Há dois tipos de conjunto de ponderação para a Europa e para o mundo. Método clássico.

Fonte: GOEDKOOOP et al. (2013)

A fim de lidar com as incertezas e com a perspectiva de tempo e incertezas metodológicas do modelo, o método ReCiPe, assim como outros métodos, agrupa diferentes fontes de incerteza e diferentes opções em um número limitado de perspectivas ou cenários: Individualista (I); Hierarquista (H) e Igualitário (E). Essas perspectivas são usadas para agrupar tipos similares de suposições e escolhas. A tabela 10 resume as características e considerações de cada versão.

Tabela 10 - Considerações das versões disponíveis no método ReCiPe

	Perspectiva de tempo	Gerenciamento do problema ambiental	Nível de evidência requerido
Igualitária (E)	Longo prazo - horizonte de 500 anos	A perspectiva igualitária é mais cautelosa, levando em conta o período de tempo mais longo, os tipos de impacto que ainda não estão totalmente estabelecidos, mas para os quais algumas indicações estão disponíveis.	Todos os possíveis efeitos são considerados.
Hierárquica (H)	Entre curto e longo prazo - horizonte de 100 anos	A Perspectiva hierárquica baseia-se nos princípios de política mais adequadas em relação a prazos e outras questões.	Efeitos incluídos na avaliação com base em consenso.

(continuação)

	Perspectiva de tempo	Gerenciamento do problema ambiental	Nível de evidência requerido
Individualista (I)	Curto prazo - horizonte de 20 anos	A perspectiva individualista baseia-se no interesse de curto prazo, tipos de impacto que são indiscutíveis e otimismo tecnológico em relação à adaptação humana.	Efeitos comprovados são incluídos.

Fonte: Adaptado de GOEDKOOOP et al. (2013)

2.9.13. Ferramentas para elaboração da ACV

Dependendo do escopo definido, a ACV demandará grandes volumes de informações e de cálculo. Como ferramenta computacional de apoio são utilizados alguns softwares que são, em linhas gerais, um grande banco de dados contendo elementos comuns ao ciclo de vida de diversos processos produtivos (matérias primas, energia, transporte, resíduos, entre outros) e relacionam esses processos às respectivas categorias de impacto ambiental. Como exemplo de software pode-se citar o OpenLCA, software gratuito de origem alemã, o SimaPRO, desenvolvido por empresa holandesa e o Gabi 6, de origem alemã. Na sequência será abordado o software SimaPRO que foi a ferramenta computacional utilizada nesse trabalho.

2.9.14. Software SimaPro

O software SimaPro foi desenvolvido pela empresa PRé Consultants. Possui usuários em mais de 80 países e é um dos softwares mais utilizado no mundo para estudos de ACV. O software é uma ferramenta para armazenar os dados coletados e analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços, seguindo os padrões ISO 14040 (ISO, 2009). A primeira versão do SimaPro foi desenvolvida há 25 anos e atualmente está na versão 8 (SimaPro, 2018).

O SimaPro reúne os principais banco de dados de inventários, incluindo o Ecoinvent v3, a nova base de dados de indústria específica Agri-footprint e a base de dados ELCD.

Nos últimos anos o mercado de FV tem desenvolvido rapidamente. O banco de dados do Ecoinvent para energia FV tem sido atualizada pela EPIA (*European Photovoltaics Industry Association*) juntamente com a SFOE (*Swiss Federal Office of Energy*). A base de dados na v.02 contém mais de 4.000 dados de materiais e serviços para energia, transporte, construção, eletrônicos, químico, tratamento de resíduo e setor de agricultura entre outros (JUNGBLUTH et al., 2004).

2.10. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO PROCESSO DE RECICLAGEM DE MÓDULOS FV EM C-SI

Para avaliar os efeitos ambientais da reciclagem é necessária uma investigação aprofundada dos impactos devidos ao uso de materiais e energia, assim como dos impactos evitados quando retornando os materiais a cadeia de valor da produção de módulos FV. A técnica de ACV é considerada uma ferramenta satisfatória para quantificar a performance ambiental e tem sido objeto de discussões na comunidade científica. A ACV está presente em um amplo número de estudos de impacto ambiental aplicados para módulos FV, publicados por experientes autores dos EUA, Europa e Ásia. Entretanto a maioria desses os estudos são apresentados avaliando a fase de produção dos módulos. Embora os estágios de desinstalação e fim de vida façam parte do ciclo de vida dos módulos FV, pouca base de dados de ACV incluem no limite do sistema os impactos ambientais dessas fases, sobretudo da tecnologia c-Si. Os diferentes estudos sobre tratamento para a reciclagem de módulos FV em c-Si, apresentados na seção 2.7, não contemplaram a avaliação do impacto ambiental do processo de reciclagem descrito. Já aqueles que abordaram o estudo de ACV contém poucas informações disponíveis sobre o inventário do ciclo de vida (ICV).

O trabalho de Fthenakis (2000) investiga alguns métodos de reciclagem de módulos FV, concluindo em seu estudo, sem a aplicação da ACV, que o processo pode ser tecnologicamente e economicamente viável, sendo uma alternativa para reduzir os volumes de resíduos perigosos para disposição em aterros.

Frisson et al. (2000) apresenta a ACV baseada em um módulo de 125 x 125 mm (multi-Si) e estimou que um módulo usando células FV recicladas obteve um consumo de energia 40% menor que um módulo padrão. No entanto, o estudo não forneceu informações sobre o processo de reciclagem considerado.

O trabalho de Müller et al. (2006) avaliou os impactos ambientais do processo de reciclagem, desenvolvido pela Deutsche Solar, para um módulo FV de 12,5 x 12,5 cm, 72 células, camada protetora em PVF e 160 Wp. O trabalho desses autores tem conclusões positivas, embora não apresente detalhadamente o ICV, com as entradas e saídas que ocorrem em cada estágio do processo. Sob o aspecto da demanda de energia consumida no processo, Müller et al. (2006) concluiu como resultado da reciclagem que 2/3 da energia consumida na produção de módulos FV poderiam ser economizados. O estudo avaliou sete categorias de

impacto (esgotamento abiótico, aquecimento global, esgotamento camada ozônio, toxicidade humana, oxidação humana, acidificação e eutrofização). Devido à reciclagem de vidro e metais, para a fabricação de novos módulos FV, os valores de impacto absoluto para cada categoria foram negativos. Os resultados também mostraram que os impactos ao meio ambiente na reciclagem estão relacionados principalmente ao consumo de energia durante o tratamento térmico e ao uso de produtos químicos para recuperação de materiais das células FV, indicando a necessidade de pesquisas para melhorias no processo de reciclagem nesses dois aspectos.

Müller et al. (2006) ainda compara o impacto da reciclagem com outros dois cenários de gestão de fim de vida. O primeiro pelo tratamento pela incineração e posterior disposição em aterro sanitário. O outro cenário seria um processo de trituração com triagem e subsequente tratamento térmico de uma fração que é depositada em aterro sanitário. Essas duas opções apresentaram impactos menores aos do processo de reciclagem.

Radziemska e Ostrowski (2010) citam que as soluções químicas utilizadas para o processo de recuperação do silício em módulos FV contêm alta quantidade de substâncias tóxicas, tais como óxido de nitrogênio e fluoretos que requerem dispendiosas medidas de disposição de resíduos. Entretanto nenhuma comparação ou avaliação para determinar os impactos é fornecida.

Peng et al. (2013) faz uma revisão literária de estudos de ACV da produção de módulos FV e examina a performance ambiental desses sistemas, demonstrando os resultados em termos de *payback* energético (EPBT- *energy payback time*) e emissões de GEE. Na revisão literária que faz, Peng et al. (2013) reporta os valores totais de energia requerida para a produção de módulos FV mono-Si (dimensão de 156x156 mm²) estimada em um range de 2860 a 5253 de MJ/m² e de emissões em um range de 45 a 29 g CO₂-eq por kWh. Para módulos de multi-Si o range é de 5150 a 2699 MJ/m² e emissões em um range de 44 a 23 g CO₂-eq por kWh. De acordo com Peng et al. (2013), a energia requerida na produção desses módulos por unidade de área vem gradualmente decrescendo ao longo dos anos, sendo que um dos fatores que contribuiu para essa redução é a reciclagem e o reuso de materiais como o silício. O trabalho de Peng et al. (2013) também não contém dados de ICV detalhado e não menciona a UF considerada para os resultados.

Wild-Scholten (2009) reporta o consumo estimado de 250 MJ e 240 MJ usados para a coleta e reciclagem de módulos de mono-Si e multi-Si respectivamente. Entretanto, em sua análise não está clara qual a UF.

Held (2009; 2013) realizou a ACV para a reciclagem de módulos FV (c-Si) do processo aplicado pela PV Cycle em cooperação com Maltha Recycling. A unidade funcional foi 1 tonelada de resíduo de módulo FV de c-Si. O método de reciclagem estudado por Held (2013) não permite recuperar materiais mais valiosos como a prata e o silício. Assim, o estudo foca nos créditos dados pela reciclagem do vidro, alumínio e cobre, evitando as emissões de CO₂ que teriam se utilizados esses materiais através rota primária para a fabricação dos módulos. Os resultados mostram que a reciclagem de 1 tonelada de resíduo evitou de 800 kg de CO₂-eq a 1000 kg de CO₂-eq quando comparado com emissões de módulos fabricados com 100% de matéria prima nova.

O estudo de Held (2009; 2013) demonstrou ainda que houve benefício ambiental pela recuperação de energia com a incineração dos plásticos, estimando redução no impacto do processo de reciclagem devido aos créditos desse benefício. No estudo é possível verificar a contribuição da reciclagem do módulo FV na redução dos impactos durante todo o ciclo de vida do módulo FV, analisado em 5 categorias (potencial de acidificação e eutrofização, aquecimento global, formação de foto-oxidantes e energia primária dos recursos). Os resultados foram apresentados somente em forma agregada.

Corcelli et al. (2016) apresenta em seu trabalho os resultados da ACV de um processo térmico para tratamento e recuperação de componentes de módulos FV (c-Si) intitulado como F.E.R.G.E. (*Devices, Techniques and Enabling Technologies for Renewable Energy Sources toward Green Economy*). O processo não recupera metais valiosos como a prata. A UF definida foi 1 m² de resíduo de módulo FV (c-Si). Esses autores introduziram dois diferentes cenários de reciclagem que definiram como alta taxa e baixa taxa de recuperação de materiais obtidos com a reciclagem. É apresentado o ICV dos principais fluxos de entrada e saída do tratamento térmico referente à UF. Foram considerados os seguintes indicadores: Potencial de Aquecimento Global; Potencial de Formação de Oxigênio Fotoquímico; Potencial de Acidificação Terrestre; Potencial de Eutrofização em Água Doce; Potencial de Ecotoxicidade Terrestre; Potencial de Toxicidade; Potencial de Esgotamento de Água; Potencial de Esgotamento de Metais e Potencial de Esgotamento Fóssil.

Os resultados de Corcelli et al. (2016) demonstram que o processo de recuperação tem efeito positivo nas categorias de impacto analisadas, em particular nos indicadores de eutrofização de água doce, toxicidade humana, acidificação terrestre e esgotamento de fósseis e foram apresentados como impactos agregados e normalizados, sem o detalhe de cada etapa do tratamento. Além disso, os impactos negativos foram estimados para todas as categorias de impactos considerados devido à contabilização dos créditos potenciais para a produção de materiais secundários.

Latunussa et al. (2016) aplicou a metodologia da ACV para o tratamento de resíduos de módulos FV (c-Si) para um processo piloto desenhado para escala industrial com capacidade de processar de 1 tonelada por hora a 8.000 toneladas por ano. O processo foi desenvolvido pela companhia italiana SASIL S.r.l. dentro do projeto denominado FRELP (Full Recovery End of Life Photovoltaics). A UF definida foi 1 tonelada de resíduo de módulo FV (c-Si). O processo descrito por Latunussa et al. (2016) inclui o tratamento químico para recuperação do SiMG e de metais como a prata e o cobre.

O trabalho de Latunussa et al. (2016) é um dos mais detalhados. É apresentado o ICV dos principais fluxos de entrada e saída do tratamento térmico referente a UF. Foram considerados os seguintes indicadores: Esgotamento Abiótico de Recursos (Mineral); Demanda de Energia Cumulativa; Ecotoxicidade de água doce; Eutrofização marinha, de água doce e terrestre; Acidificação, Formação de ozônio fotoquímico; Ecossistemas de radiação ionizante; Radiação ionizante Saúde Humana; particulados; Toxicidade humana, efeitos não cancerígenos; Toxicidade humana, efeitos cancerígenos; Esgotamento de ozônio; Mudanças Climáticas. O estudo também apresenta a contribuição de cada fase para os impactos ambientais globais da reciclagem. Os resultados apresentados destacaram que a maioria dos impactos para o processo de reciclagem está relacionada ao transporte de resíduos FV para o local, ao processo de incineração dos polímeros e aos tratamentos adicionais (incluindo peneiramento, lixiviação ácida, eletrólise e neutralização) para a recuperação de metais (incluindo prata) das cinzas extraídas na incineração.

A revisão na literatura realizada nessa seção permitiu identificar que o estágio de fim de vida geralmente é excluído da fronteira das análises de ACV e que poucos trabalhos focam especificamente nessa etapa. Desta forma, há falta de dados de ICV detalhado que permita a avaliação do impacto da reciclagem no ciclo de vida de sistemas FV. Faltam também detalhes da UF utilizada de forma que possa permitir posteriores comparações. É

observada também uma falta de orientação sobre como modelar a fase de fim de vida dos módulos FV nos estudos (LATUNUSSA et al., 2016).

A Agência Internacional de Energia (IEA-PVPS, 2016) desenvolveu um guia para desenvolvimento da ACV de sistema FV, com o objetivo de orientar o desenvolvimento desses estudos. Porém o guia da IEA não fornece detalhes de como etapa de fim de vida dos módulos deve ser modelada e somente destaca que na definição do limite da ACV, deve-se declarar claramente, identificando se o descarte e disposição, transporte e reciclagem fará ou não parte da análise.

Os bancos de dados para ACV também possuem poucas informações detalhadas. O Ecoinvent, por exemplo, assume que as partes metálicas maiores do sistema e o silício são reciclados, sem considerar quaisquer impactos ou benefícios ambientais devido a essa reciclagem (LATUNUSSA et al., 2016). Analogamente, o banco de dados profissional GaBi não inclui os impactos do fim de vida dos módulos FV, pois segundo os autores, até o momento não existem tecnologias que permita o reuso e reciclagem dos módulos (LATUNUSSA et al., 2016). Entretanto é reconhecida a importância da inclusão da gestão do fim de vida nas análises e da necessidade em se obter mais informações sobre a eficiência da reciclagem.

Com o levantamento foi possível também conhecer os processos de reciclagem já desenvolvidos para os módulos FV de c-Si, embora a maioria esteja no estágio piloto. Observou-se que o foco dos processos de reciclagem, que antes era principalmente recuperar vidro, alumínio, cobre e silício, tem sido alterado. Laboratórios e indústrias tem voltado a atenção em tecnologias que permitam recuperar maior taxa de silício em grau solar e de metais valiosos contidos nos módulos FV. No entanto, os estudos que descrevem tais processos não investigaram os potenciais impactos do ciclo de vida relacionados aos tratamentos e reciclagem, ou não apresentaram detalhadamente o ICV.

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento detalhado do inventário do ciclo de vida, com dados dos fluxos de entradas e saídas que permitam informações para o estudo de ACV de um processo de reciclagem proposto que além da recuperação do vidro, alumínio, polímeros (como fonte de calor), consegue alta taxa de recuperação de metais, deixando quase nenhum resíduo para ser descartado em aterros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi baseado em dados da literatura acadêmica e em relatórios técnicos de pesquisa de reciclagem de módulo FV em todo o mundo, principalmente de contribuições da Europa e China. Foi realizada uma pesquisa cuidadosa buscando pelas palavras chaves como *life cycle assessment analysis*”, “LCA”, “*photovoltaic module recycling*”, “*end-of-life photovoltaic panels waste*” entre outras. Considerando o objetivo de avaliar os impactos relacionados ao fim de vida dos módulos, a busca considerou dados de estudos que abordassem esse estágio no escopo da avaliação.

A ACV foi aplicada seguindo a metodologia e conceitos desenvolvidos de ACV conforme definidos pela ISO 14040 (ISO, 2009) e recomendações do *ILCD Handbook* (European Commission; Joint Research Centre, 2010), para o tratamento de resíduo de módulos FV da tecnologia silício cristalino (c-Si) que são gerados no fim de vida.

Os inventários de entradas e saídas de materiais e energia, base para o estudo de ACV, foram adaptados utilizando como referência o trabalho de Latunussa et al. (2016) e de Oliveira (2017).

A AICV foi modelada com o auxílio do software SimaPro versão 8.0. O método ReCiPe versão 1.10 foi selecionado para modelar o potencial impacto ambiental. A versão hierárquica disponível no método ReCiPe Midpoint e ReCiPe Endpoint foi utilizada a fim de lidar com a perspectiva de tempo e incertezas metodológicas do modelo.

3.1. ETAPA DE DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA ACV

Seguindo a ISO 14040 (ISO, 2009), na primeira etapa da metodologia da ACV busca-se deixar claro o escopo do estudo. A ACV foi aplicada considerando a simulação de três cenários para tratamento dos resíduos FV no Brasil.

O escopo do cenário 1 considera o método de tratamento de resíduos FV através do processo de reciclagem. Nessa estratégia os materiais que compõem o módulo FV são recuperados numa sequência de processos mecânicos e térmicos aplicando tecnologia já experimentada. O processo de reciclagem tem o objetivo de maximizar a recuperação de materiais dos módulos FV e minimizar os resíduos para disposição em aterros.

A fim de obter comparações no estudo de ACV, dos impactos e ou benefícios conseguidos com a reciclagem e recuperação de componentes dos módulos FV, foram criados dois outros cenários para o tratamento do fim de vida dos módulos FV. Esses cenários consideram o tratamento similar ao tratamento requerido ao REEE, onde parte dos componentes são recuperados. Nesse caso somente o alumínio da moldura do módulo e o cobre dos cabos são recuperados. No cenário 2, após a separação da moldura, parte do resíduo é separado e parte passa por um processo de controle e de incineração, reduzindo o volume a ser descartado em aterro. O cenário 3 difere do cenário 2 com relação ao descarte dos resíduos não recuperados. Nesse cenário não há nenhum tipo de separação e tratamento antes de envio do resíduo para descarte em aterro.

3.2. UNIDADE FUNCIONAL

A unidade funcional (UF) da ACV é o tratamento de 1000 kg de resíduo de módulo FV da tecnologia c-Si. Essa unidade está consistente pois, na maioria dos processos industriais existentes, os resíduos são tratados em batelada, sendo necessário acumular um certo volume para viabilizar o processo. Os outros consumos de materiais tais como combustíveis, água, eletricidade são proporcionalmente calculados pelo peso total processado.

3.3. LIMITE DO SISTEMA

Na ACV para gestão de resíduos, em vez da abordagem tradicional "do berço ao túmulo", o ponto de partida da análise é o ponto em que os resíduos são gerados. Assim em todos os cenários definidos para a ACV, o processo inicial é a coleta dos resíduos FV na planta de geração. Serão contabilizados os impactos que ocorrem da coleta ao processamento dos resíduos FV e o descarte dos resíduos finais, conforme cenário de gestão de fim de vida. Um esquema do fluxo do processo dos cenários propostos para o estudo de ACV estão abordados nas figuras 14,15 e 16. Em ambas estratégias a extensão do limite do sistema da ACV não, inclui a avaliação ambiental da reutilização dos materiais recuperados.

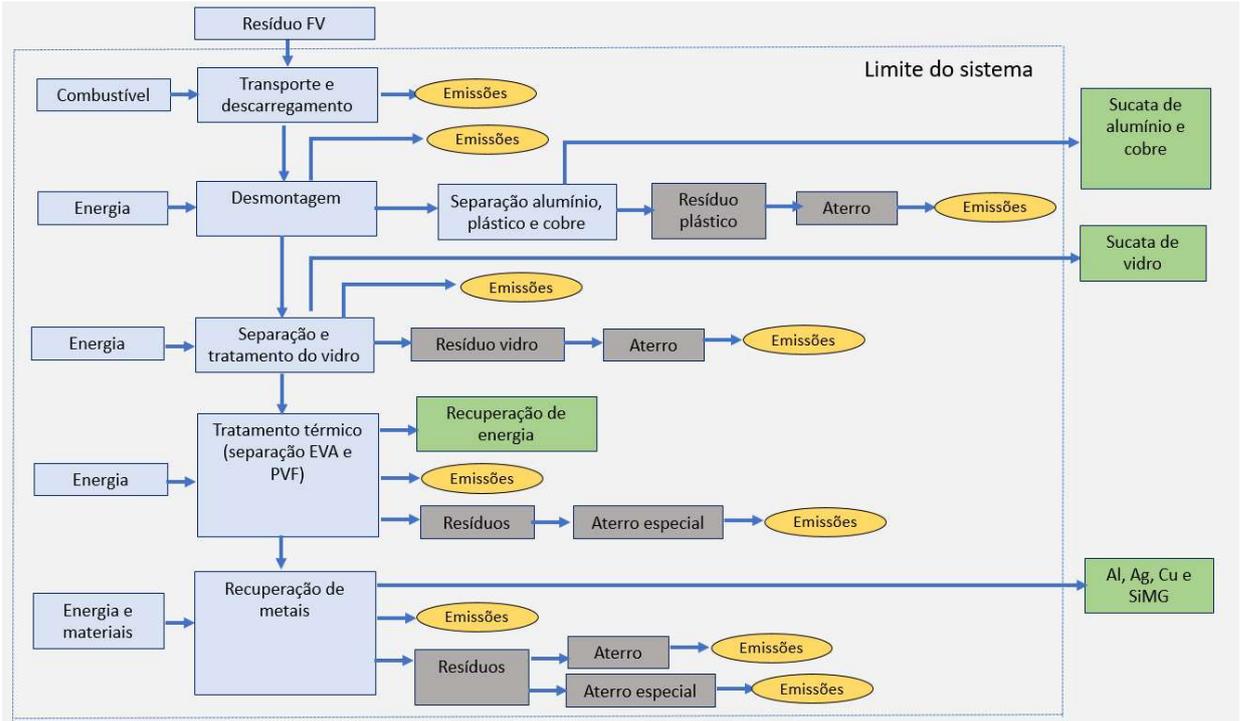


Figura 14 – Limite da ACV cenário 1 – reciclagem componentes dos módulos FV

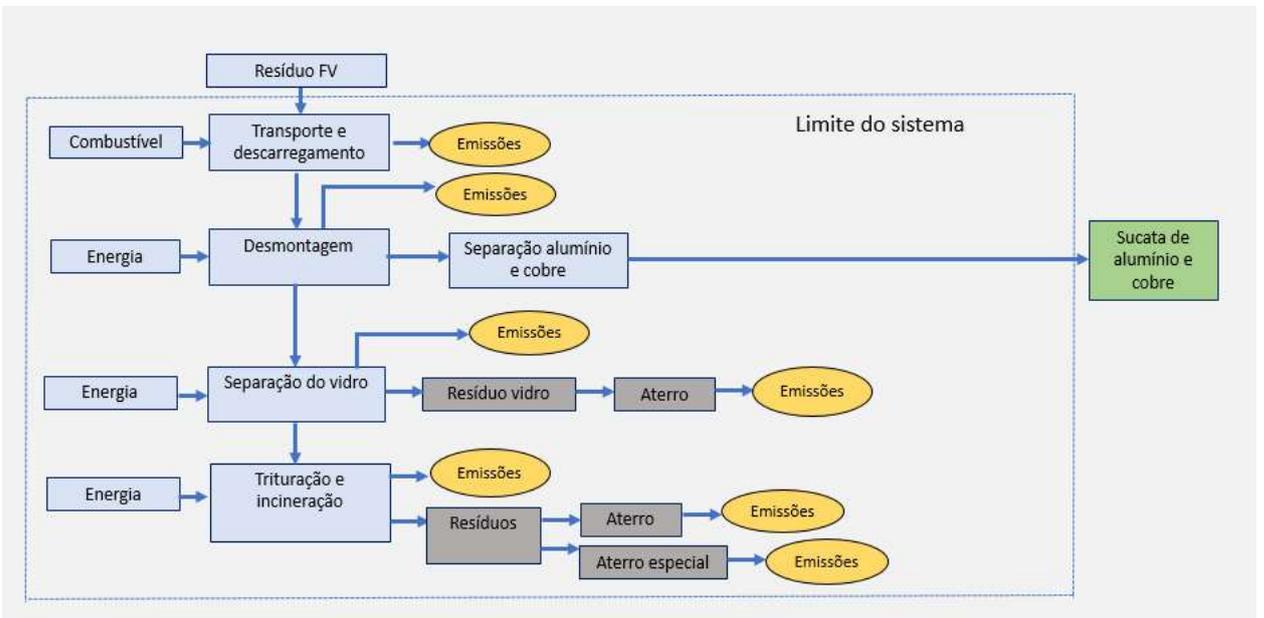


Figura 15 - Limite da ACV cenário 2 – incineração

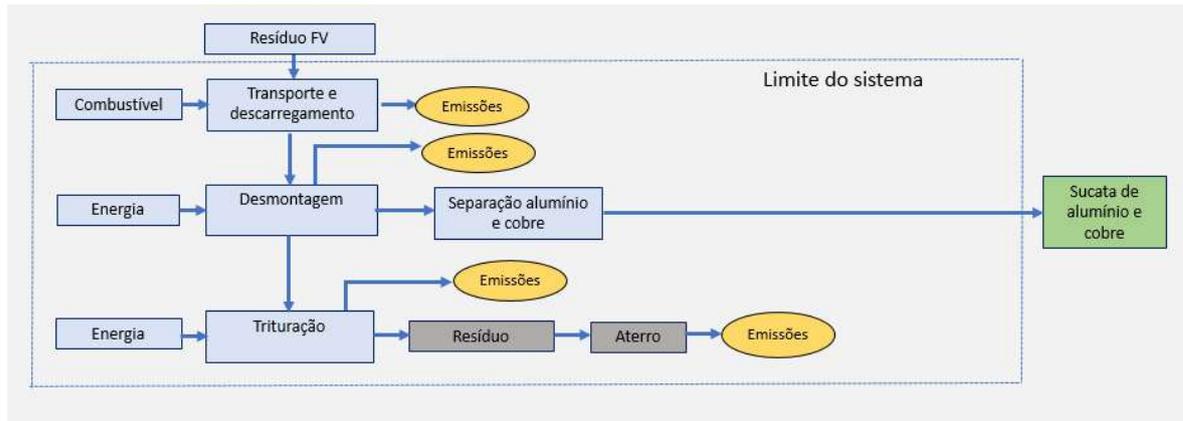


Figura 16 - Limite da ACV cenário 3 – descarte em aterro

3.4. PREMISSAS CONSIDERANTES DURANTE A ACV

Um número de suposições e simplificações foram consideradas na condução do estudo. Essas suposições podem influenciar nos resultados da análise e serão detalhadas ao longo dessa seção.

3.4.1. Caracterização do módulo FV c-Si

A composição dos resíduos para a entrada do processo de reciclagem (1000 Kg) pode variar de acordo com as características do módulo (tamanho, tecnologia, potência, materiais utilizados, etc). Na prática instalações de reciclagem recebem diferentes tipos de módulos. Para esse estudo de ACV foi realizada verificada dados da pesquisa Greener (2019) a respeito das características e dos modelos mais comercializados no mercado brasileiro e foi assumido um típico padrão. Os módulos FV atuais são montados predominantemente com 60 células, camada protetora em PVF, eficiência de cerca 15,8%, dimensão média de 1640 x 990 e peso médio de 20 kg. A tabela 11 mostra a composição de 1000 kg que é a entrada para os processos. As informações para composição do resíduo foram baseadas em informações pesquisadas na literatura para o percentual de materiais que compõem um módulo FV visto na seção 2.4.

Tabela 11 – Entrada do processo de reciclagem - composição de 1000 kg de resíduo de módulo FV

Material		%	kg
Vidro	Vidro	72,30%	723,00
Encapsulamento	EVA	6,17%	61,70
Proteção	PVF	3,23%	32,30

(continuação)			
Material		%	kg
Caixa de junção e cabos	Plástico	0,54%	5,40
Cabos	Cobre (Cu)	0,27%	2,70
Quadro	Alumínio (Al)	11,95%	119,50
Célula	Silício (Si)	3,65%	36,50
Contatos elétricos	Prata (Ag)	0,05%	0,50
	Cobre (Cu)	0,20%	2,00
	Alumínio (Al)	0,32%	3,20
	Estanho (Sn)	0,13%	1,30
	Chumbo (Pb)	0,06%	0,60
Outros	Selante, adesivo, etc	1,13%	11,30
Total		1,00	1.000,00

3.4.2. Recuperação de materiais e energia

Durante algumas etapas nos cenários adotados é possível recuperar materiais e energia nas saídas dos processos. Esses materiais recuperados nas saídas serão assumidos como materiais reciclados para serem reaproveitados como matéria prima. O silício usado no módulo FV é assumido ser recuperado como SiMG devido à baixa pureza.

Durante o processo térmico para decomposição do EVA, PVF, no cenário de reciclagem, é esperada a produção de energia. Embora o aproveitamento energético de resíduos seja um método pouco explorado no Brasil, no cenário de reciclagem, por se tratar de um cenário inovador, a possibilidade de conciliar a cogeração de energia foi assumida como forma de reduzir os impactos ambientais. Nesse trabalho foi considerada a premissa de Latunussa et al. (2016) que utilizou os dados médios de um *mix* de plástico do banco de dados Ecoinvent (PRé Consultants, 2013) para estimar o valor calórico do EVA e PVF. As quantidades de energia recuperadas nesse processo, por kg de material, estão na tabela 12.

Tabela 12 – Energia recuperada com o tratamento térmico por kg de resíduo

Material		Quant.	Unid.
EVA e PVF	Eletricidade	3,48	MJ
	Calor	7,03	MJ

Fonte: Latunussa et al. (2016)

3.4.3. Transporte

A primeira etapa do processo nas duas estratégias consiste na coleta do material desinstalado na planta de geração FV e a transferência desse material até os pontos de coleta e que posteriormente segue até as instalações de tratamento para o descarregamento do resíduo. Devido ao fato dos módulos estarem instalados em diversas localidades e em muitos casos em instalações distantes dos grandes centros, a logística deve ser pensada de maneira a ter a menor contribuição e impacto ambiental nos processos de tratamento do resíduo FV.

Nesse trabalho foi proposto a utilização da rede de fornecedores e distribuidores dos módulos FV, de forma de logística reversa para coletar os módulos no fim de vida de forma a reduzir o impacto do transporte. A partir desse ponto, os resíduos são levados a planta de tratamento dos módulos FV. Para dimensionar a rede de coleta e transporte para a análise do impacto ambiental desses processos, foi considerado o tratamento do descarte dos módulos FV nos locais onde atualmente possuem mais sistemas FV instalados: Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul (ANEEL, 2019). Essa opção leva em consideração ainda outros dois dados de concentração nesses mesmos estados: número de fornecedores e distribuidores e número de recicladoras de REEE.

De acordo com relatório da Greener (2019), das 8.011 empresas (fornecedores e distribuidores) que comercializam sistemas FV, a maior parte encontra-se nos estados do sul e sudeste. Já em relação às recicladoras de eletroeletrônicos, que poderiam absorver este material para tratamento e destinação, o mapa elaborado pela ABDI (2013) mostra que das cerca de 93 empresas existentes no país, o número maior também está concentrado no sul e sudeste. A tabela 13 apresenta os dados consolidados. Desta forma seria possível ter essas empresas de reciclagem de REEE transformadas em pontos de plantas de tratamento (reciclagem ou incineração) dos resíduos de módulos FV.

Tabela 13 – Dados de unidades FV, fornecedores e empresas recicladoras nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul

Estado	Total de unidades FV	Total de empresas no mercado FV	Total de recicladoras REEE
Minas	6.519	1.110	9
São Paulo	6.245	1.147	36
Rio Grande do Sul	3.998	597	11

Fonte: GREENER (2019); ABDI (2013)

Nos cenários propostos, após a desinstalação dos sistemas, os módulos desmontados retornarão aos fornecedores que assumirão o papel de um ponto de coleta. Estimou-se para isso uma distância média de 100 km entre as instalações das usinas FV e o ponto de coleta mais próximo.

Posteriormente os materiais são coletados e transferidos para a instalação de tratamento do resíduo. No cenário 1, por se tratar de um processo específico de reciclagem de módulos FV, foi considerado que as plantas de REEE, com capacidade de tratar esse tipo de resíduo estariam localizadas mais próximas às capitais. Através de consulta ao mapa de distâncias entre cidades, consultadas no site *www.cidademapa.com.br*, é possível identificar que a distância média entre a região metropolitana dos três estados escolhidos aos principais municípios desses estados é de cerca de 500 km. Assim, essa distância de 500 km foi assumida para o cenário 1 como a distância entre o ponto de coleta até a planta de reciclagem de FV mais próxima.

Para os cenários 2 e 3, considerou-se que após a coleta os resíduos serão encaminhados para tratamento em unidades recicladoras de REEE genérica, sendo esses locais mais próximos, a uma distância de 300 km do ponto de coleta.

Já na instalação de tratamento, com o auxílio de empilhadeira, sucessivamente os materiais são descarregados. Estima-se que 1.000 kg de resíduo seja descarregado em 1 hora.

Nesse estudo é assumida a premissa do estudo de referência em que o tratamento térmico é realizado em uma planta específica, externa à planta de tratamento de REEE e localizada à distância de 200 km. Realizado esse tratamento térmico, o material é retornado à planta para recuperação (cenário1) ou levado para descarte em aterro (cenário2).

Os resíduos gerados ao final dos processos serão destinados para aterro ou aterro especial. A distância adotada entre as plantas de tratamento de REEE e os aterros foi de 100 km. A figura 17 esquematiza o sistema de logística de coleta e transporte proposto para os dois cenários.

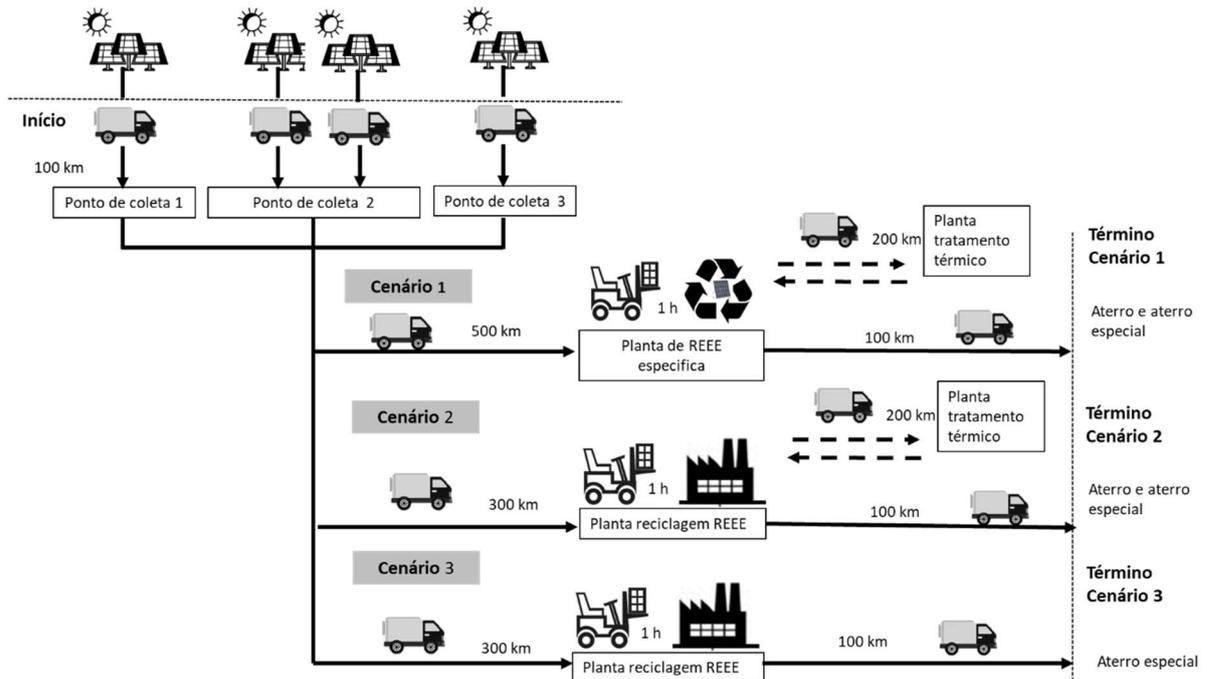


Figura 17 – Esquema para a logística de coleta, transporte e descarregamento dos resíduos FV

3.5. ETAPA DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Antes da análise da avaliação do ciclo de vida é importante construir o inventário do ciclo de vida (ICV) dos processos. A fase do ICV tem por objetivo identificar e quantificar, dentro do limite do sistema, as entradas e saídas de materiais e energia requerida em cada processo, assim como as emissões (água e ar) e resíduos gerados e os materiais e energia recuperados. Nesse estudo, os dados e quantidades de entrada e saída necessários para a modelagem do ICV do primeiro cenário de tratamento do resíduo FV foram extraídos e adaptados do estudo de Latunussa et al. (2016). Nos cenários 2 e 3, para as etapas de desmontagem, separação do vidro, corte e trituração do resíduo as quantidades de entrada de energia foram também adaptados de Latunussa et al. (2016) assumindo algumas premissas. No cenário 2, as quantidades de entradas e saídas para a etapa de incineração do plástico foram obtidas e adaptadas da literatura (OLIVEIRA, 2017).

3.5.1. Base de dados utilizadas do Ecoinvent e ELCD

Devido à falta de um banco de dados brasileiro, na modelagem do ICV no SimaPro, a maioria dos dados usados foi a existente do banco de dados Ecoinvent (PRé Consultants, 2013 e 2014) e da ELCD (2006). Na tabela 14 está a lista de dados selecionadas no SimaPro.

Tabela 14 – Lista de dados utilizada do Ecoinvent e ELCD

Fase do processo	Item	Dado utilizado	
Desmontagem dos módulos	Alumínio	Aluminum (waste treatment) {GLO} recycling of aluminum Alloc Def, S	
	Cabos de cobre	Scrap copper {GLO} market for Alloc Def, S	
	Resíduo de plástico em aterro	Landfill of plastic waste EU-27	
Tratamento do vidro	Vidro	Glass cullet, sorted {RER} treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting Alloc Def, S	
Separação do vidro e tratamento do vidro	Resíduo de vidro em aterro	Waste glass (waste treatment) {CH} treatment of waste glass, inert material landfill Conseq, S	
Tratamento químico, filtração, eletrólise e neutralização	Água	Water, unspecified natural origin, BR	
	Alumínio	Aluminum, cast alloy {GLO} market for Alloc Def, S	
	Cobre	Copper {GLO} market for Alloc Def, S	
	Prata	Silver {GLO} market for Alloc Def, S	
	Chumbo	Lead {GLO} market for Alloc Def, S	
	Silício	Silicon, metallurgical grade {GLO} market for Alloc Def, S	
	Estanho	Tin {GLO} market for Alloc Def, S	
	Resíduo do processo (resíduo líquido)	Limestone residue (waste treatment) {CH} treatment of, inert material landfill Conseq, S	
	Lodo contendo metais	Sludge, pig iron production (waste treatment) {CH} treatment of, residual material landfill Conseq, S	
	Tratamento térmico	Cinzas	Average incineration residue (waste treatment) {CH} treatment of, residual material landfill Conseq, S
		Incineração PVF	Waste polyvinyl fluoride (waste treatment) {CH} treatment of waste polyvinyl fluoride, municipal incineration Conseq, S
Incineração EVA		Waste plastic, mixture (waste treatment) {CH} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Conseq, S	
Produção de eletricidade		Electricity, medium voltage {BR} market for Conseq, S	
Produção de calor		Energy saving {GLO} market for Alloc Def, S	

3.5.2. Inventários obtidos da literatura

A base de dados do SimaPro em alguns casos não retrata totalmente o contexto brasileiro. Para reduzir os efeitos regionais, foram pesquisados na literatura dados de inventários de material e energia produzidos no Brasil. Na sequência serão detalhados os dados dos principais materiais e energia utilizados nos processos dos dois cenários.

a) Óxido de cálcio – CaO

Na composição extraída do estudo de Viana (2008), para 1 kg de CaO são consideradas as cargas ambientais referentes à produção do calcário, do processo de calcinação e da produção e uso de óleo combustível como energia (tabela 15).

Tabela 15 - Dados para inventário para 1 kg de óxido de cálcio no Brasil

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Calcário Brasil	kg	1,79E+00
Óleo combustível	kg	1,05E-01
Saída - Emissões ar		
CO ₂	kg	1,15E-03

O óxido de cálcio é utilizado no processo de tratamento químico para neutralização da solução ácida. O óxido de cálcio é produzido a partir da calcinação do calcário. O calcário é enviado a um forno onde é submetido a uma temperatura na faixa de 900 a 1000 °C, o que provoca a sua decomposição em óxido de cálcio, também conhecido como cal virgem, e CO₂. Além das emissões de CO₂, também são emitidos gases devido ao uso de combustíveis fósseis no forno, geralmente óleo diesel (MME, 2018b).

b) Energia elétrica

A energia elétrica é utilizada em diversos processos no cenário de reciclagem e no cenário de incineração dos módulos FV. A matriz elétrica brasileira é em sua maioria de fontes renováveis, sendo grande parte da energia elétrica gerada no Brasil de usinas hidrelétricas. O Brasil dispõe ainda de um conjunto de interligações de seu sistema elétrico com os sistemas elétricos da Argentina, do Uruguai e do Paraguai, segundo informações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018). Como geralmente não há disponibilidade

de dados de eletricidade da Argentina, do Uruguai e do Paraguai, o compartilhamento de energia desses países são considerados diretamente no mix de energia elétrica brasileira.

Através dos dados do MME/EPE (2018), temos que a matriz elétrica brasileira é composta em maior parte, por energia proveniente de fontes de origem renovável, predominantemente pela hidroeletricidade com 65,2%, seguindo pelas termelétricas de gás natural com 10,5%, as plantas de cogeração a biomassa com 8,2%, geração eólica com 6,8%, as termelétricas que usam carvão e seus derivados representam 4,1%, as termelétricas que usam derivados de petróleo 2,5%, usinas nucleares com 2,6%. A geração solar está em um processo de desenvolvimentos e representa apenas 0,1% da matriz elétrica brasileira. A composição do inventário para o processo da produção de 1 kWh de energia elétrica foi adaptada de Coltro; Garcia; Queiroz *apud* Viana, 2008 e considera as fontes de abastecimento que compõem a matriz elétrica brasileira conforme MME/EPE (2018) (tabela 16).

Tabela 16 - Dados para processo para produção de 1 kWh de energia elétrica no Brasil.

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Eletricidade proveniente de hidroelétrica	kWh	6,52E-01
Eletricidade proveniente de usina nuclear	kWh	2,60E-02
Eletricidade proveniente de usina eólica	kWh	6,80E-02
Eletricidade proveniente de gás natural	kWh	1,05E-01
Eletricidade proveniente de carvão	kWh	4,10E-02
Eletricidade proveniente de usina solar	kWh	1,00E-03
Eletricidade proveniente de biomassa	kWh	8,20E-02
Eletricidade proveniente de petróleo	kWh	2,50E-02
Saída - Emissões ar		
Cloreto de hidrogênio	g	3,00E-05
Metano	g	5,48E+01
Metano, biogênico	g	4,85E+02
Monóxido de Carbono	g	1,49E+02
Dióxido Carbono	g	1,78E+04
Dióxido Carbono, biogênico	g	1,65E+04
Água	kg	2,30E+02
Hidrocarbonetos, não especificado	g	7,50E-01
Metais, não especificado	g	1,00E-05
Amônia	g	6,00E-06

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Saída - Emissões ar		
COV, composto orgânico voláteis	g	7,28E+00
Óxidos de nitrogênio	g	5,75E+02
Monóxido de nitrogênio	g	1,10E+01
Particulados	g	6,72E+01
Dióxido de enxofre	g	1,16E+02
Espécies radioativas, não especificado	kBq	9,77E+00
Saída - Emissões água		
Ácidos, não especificados	g	1,70E-04
DBO, Demanda biológica oxigênio	g	7,00E-02
DQO, Demanda química oxigênio	g	1,30E-01
Cloretos	mg	2,95E+00
COD, Carbono orgânico dissolvido	g	5,00E-02
Metais pesados, não especificado	g	1,80E-04
Hidrocarbonetos, não especificado	g	3,00E-02
Metais, não especificado	g	1,00E-02
Nitrogênio	g	4,50E-03
Óleos, não especificado	g	1,40E-01
Enxofre	g	4,50E-04
Compostos orgânicos (dissolvidos)	g	5,00E-02
Sólidos suspensos, não especificado	g	1,00E-01
Espécies radioativas, não especificado	kBq	1,51E+01
Saída - Fluxo final de resíduo		
Resíduo processo	kg	1,07E+01
Resíduos, não especificado	kg	1,34E+01

a) Emissões do uso da energia elétrica

Para as emissões referentes ao uso de energia elétrica foi considerado o fator de emissão de 0,090 kg/kWh de CO₂ para geração elétrica pelo sistema interligado nacional (SIN) no Brasil, conforme CB3E; UFSC (2017).

b) Óleo diesel

O óleo diesel é utilizado como combustível em atividades de transporte. A produção do óleo diesel é baseada na atividade de extração e refino do petróleo. Segundo o Anuário Estatístico

2017 da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2017), o petróleo no Brasil é em quase sua totalidade (95%) extraído em mar, sendo também que a maior parte (83,1%) do petróleo refinado é nacional. No processo de refino ocorre o consumo de energia elétrica e a produção de vários derivados, que inclui entre eles o óleo diesel.

A composição do inventário foi extraída do estudo de Viana (2008), onde são consideradas as cargas ambientais referentes às atividades de extração do petróleo nacional e importado, do transporte marítimo referente ao petróleo importado, do refino do petróleo e da produção de energia elétrica necessária para o refino. O autor utilizou dados de refino de petróleo e produção de derivados da ANP e de literatura para compor o inventário de 1000 kg de óleo diesel. Os valores foram trabalhados para a produção de 1kg de óleo diesel (tabela 17).

Tabela 17 - Dados de inventário para a produção de 1 kg de óleo diesel no Brasil

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia, não especificada	MJ	1,95E-01
Carvão	kg	1,57E-03
Gás natural	kg	4,46E-02
Petróleo	kg	1,17E+00
Água	m ³	1,40E+01
Materiais auxiliares	kg	1,06E-04
Urânio	kg	3,31E-08
Combustíveis renováveis	kg	3,39E-04
Saída - Emissões ar		
Metano	kg	2,75E-03
CO	kg	5,91E-04
CO ₂	kg	2,51E-01
Água	m ³	2,67E-04
Hidrocarbonetos	kg	1,25E-04
Metais, não especificado	kg	1,88E-09
Amônia	kg	7,07E-13
COVNM	kg	1,00E-03
NO _x	kg	1,39E-03
N ₂ O	kg	1,30E-06
Particulados	kg	1,46E-04
SO _x	kg	1,12E-03
Metil carptano	kg	1,05E-08

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Saída - Emissões ar		
H ₂ S	kg	2,19E-07
Radioatividade para o ar	kBq	1,15E-03
Saída - Emissões água		
Ácidas	kg	2,00E-11
DBO	kg	3,50E-05
DBQ	kg	2,16E-04
Cloretos	kg	2,55E-05
Metais pesados, não especificados	kg	4,86E-09
Hidrocarbonetos	kg	2,07E-06
Metais, não especificado	kg	1,18E-09
Compostos de nitrogênio	kg	2,41E-09
Óleos, não especificado	kg	1,65E-08
Compostos de enxofre	kg	5,30E-11
Compostos orgânicos (dissolvidos)	kg	5,89E-09
Sólidos suspensos totais	kg	1,11E-04
Efluentes líquidos, não especificados	kg	3,38E-08
Água residual	kg	3,27E-06
Óleos, não especificado	kg	1,62E-05
Íons metálicos	kg	9,39E-09
Na	kg	1,71E-05
Radioatividade para a água	kBq	1,78E-03
Saída - Fluxo final de resíduo		
Resíduos oleosos	kg	3,07E-04
Resíduos não inertes	kg	4,13E-06
Resíduos solo	kg	1,58E-03
Resíduo processo	kg	1,26E-03
Resíduos, não especificado	kg	3,64E-10
Saída - Emissões não materiais		
Energia	MJ	9,72E-04

a) **Ácido nítrico – HNO₃**

O ácido nítrico é utilizado em solução no processo químico para recuperação de metais. Os dados que compõem o inventário foram obtidos do estudo de Ribeiro (2009). O mencionado estudo consultou dados de fabricante brasileiro para os consumos de materiais e energia e para as emissões energéticas. Para as emissões, efluentes e resíduos, o estudo de

Ribeiro (2009) utilizou as informações da base de dados Ecoinvent para o inventário do *Nitric acid*. Na tabela 18 encontram-se os dados para o inventário de 1 kg de ácido nítrico.

Tabela 18 - Dados para o inventário de 1 kg de ácido nítrico produzido no Brasil

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Ar	kg	1,50E+00
Água	m ³	6,23E-05
Amônia	kg	2,70E-01
Energia elétrica Brasil	MJ	1,78E+00
Saída - Emissões ar		
Amônia	kg	2,50E-03
NOx	kg	4,71E-03
N ₂ O	kg	8,39E-03
Particulados, não especificado	kg	2,00E-04
Saída - Emissões água		
DBO	kg	1,40E-03
Compostos de nitrogênio	kg	1,30E-04
Saída - Fluxo final de resíduo		
Resíduo sólido	kg	3,60E-08
Vapor	MJ	2,25E-06

c) Gás natural

A composição para o inventário de 1 kg de gás natural beneficiado obtida do estudo de Silva et al., 2006 apud Ribeiro, 2009 e considerada a composição média do gás natural e a entrada de 1,03 kg de gás natural bruto (tabela 19).

Tabela 19 - Dados de inventário para a produção de 1 kg de gás natural no Brasil

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Gás natural	kg	1,03E+00
Água	m ³	1,97E-05
Gás natural (energia)	MJ	4,34E-03
Saída - Emissões ar		
CO ₂	kg	8,36E-02
CO	kg	2,82E-07
Hidrocarbonetos	kg	1,83E-07
Metano	kg	1,50E-03
NOx	kg	2,67E-04

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Saída - Emissões ar		
SOx	kg	9,65E-04
H ₂ S	kg	3,15E-10
Particulados	kg	1,63E-05
Saída - Emissões água		
Compostos de enxofre	kg	1,63E-07
Compostos de nitrogênio	kg	1,17E-09
Saída – Emissões solo		
Enxofre	kg	2,02E-08
Saída – Emissões não materiais		
Vapor	MJ	1,08E-03

3.6. INVENTÁRIO CICLO DE VIDA PARA O CENÁRIO 1

O processo de reciclagem do módulo é dividido em etapas em uma sequência de desmontagem mecânica, separação do vidro tratamento térmico, reciclagem da célula FV através de tratamento químico e descarte dos resíduos.

Nesse cenário de gestão de fim de vida o foco é a recuperação de maior quantidade de metais e do SiMG com qualidade para ser usado como matéria prima na indústria, o que resultaria em grande economia de energia e de emissões de CO₂ evitadas. A quantidade de material para ser descartada em aterro também é reduzida. Para as etapas descritas nos itens 3.6.3, 3.6.4, 3.6.5 e 3.6.6 os inventários foram adaptados a partir do inventário de referência da literatura (LATUNUSSA et al., 2016).

3.6.1. Transporte

Nessa etapa inclui os materiais e emissões calculados a partir da soma das distâncias percorridas nas etapas que envolvem transporte. A primeira etapa de transporte é a retirada de 1.000 kg de resíduo onde estão instalados os sistemas FV até o ponto de coleta e deste até a planta de reciclagem. Essa distância foi estimada em 100 km até o ponto de coleta, somados a uma distância de 500 km até a planta de reciclagem.

O processo de tratamento térmico para decomposição do EVA e do PVF da camada protetora é realizada em planta específica. Os fragmentos do sanduiche da célula FV (149,43 kg de resíduo) serão encaminhados para tratamento térmico, retornando 59,77 kg de cinzas. A distância entre a planta de reciclagem e a planta de pré-processamento é de 200 km. A última etapa é descarte dos resíduos gerados. No cenário de reciclagem são gerados os seguintes resíduos: plástico das caixas e cabos (5,40 kg), vidro (14,46 kg), cinzas do processo de tratamento térmico (2,16 kg), lodo do processo químico (68,25 kg) e efluentes líquido (415,78 kg). As cinzas do tratamento térmico, assim como o lodo do processo químico são consideradas resíduos perigosos e devem seguir para aterro especial. Os demais resíduos seguem para aterro. A distância entre a planta de reciclagem e os destinos finais de descarte é de 100 km.

O processo de reciclagem tem ainda produtos evitados (872,61 kg de alumínio, vidro e metais recuperados) que permanecem na recicladora não sendo necessário transporte. O ICV do transporte rodoviário foi obtido do estudo de Viana (2008) e é dado em t.km. Contabilizados os totais, no processo de reciclagem teremos em tonelada 2,72 t sendo transportados numa distância total de 1.200 km O inventário para 3.264 t.km para o processo de reciclagem é dado na tabela 20.

Tabela 20 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 3.264 t.km

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Óleo diesel Brasil	kg	6,63E+01
Saídas – Emissões		
SO ₂	kg	4,05E-02
NO ₂	kg	1,38E+00
CO ₂	kg	1,31E+02
CO	kg	7,72E-01
N ₂ O	kg	2,25E-01
NM VOC	kg	2,99E-02
Aspecto ambiental		
Metano	kg	1,24E-01
Particulados, < 10	kg	6,27E-02

3.6.2. Descarregamento

Para o inventário do descarregamento dos resíduos na planta de tratamento foi considerado os materiais e emissões de uma empilhadeira modelo com capacidade de 1,5 -1,75

t, potência de 36 kW. De acordo com fabricante (TOYOTA, 2017), o consumo para esse tipo de equipamento é de 2,60 l_{diesel}/ h ou 2,22 kg_{diesel} /h (densidade do diesel igual a 0,852 kg/l) e possui capacidade para descarregar 1 tonelada de resíduo no período de uma hora. No inventário serão consideradas as cargas ambientais das emissões do uso do diesel do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011) da tabela 21.

Tabela 21 – Fatores de emissão motores diesel

Kg poluentes/kg Diesel				
CO	NO _x	NMHC	MP	CO ₂
0,00395	0,00857	0,00076	0,000086	3,13498

O inventário para descarregamento de 1000 kg de resíduo é o mostrado na tabela 22.

Tabela 22 – ICV para o processo descarregamento de 1.000 kg h de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Óleo diesel Brasil	kg	2,22E+00
Saídas - Emissões		
CO	kg	8,75E-03
NO _x	kg	1,90E-02
NMHC	kg	1,68E-03
MP	kg	1,91E-04
CO ₂	kg	6,94E+00

3.6.3. Processo de desmontagem

Após a coleta e descarregamento do resíduo no local de reciclagem é realizada a desmontagem dos módulos. Através de processo mecânico e manual, com auxílio de ferramentas como chave de fenda, alicate e pequena serra elétrica, ocorre a desmontagem dos módulos para separação da moldura de alumínio, cabos e caixa de junção do restante dos módulos. O alumínio da moldura (119,50 kg) é reaproveitado 100% (IRENA e IEA-PVS, 2016) e o cobre (2,67 kg) cerca de 99% (MUCHOVA et al., 2011). Esses materiais saem como resíduos reciclados que podem ser vendidos para reuso como matéria prima. O plástico (5,40 kg) sai como resíduo para descarte em aterro. Nesse processo é consumido 5,33 kWh de energia elétrica. O inventário para a desmontagem de 1.000 kg de módulo FV está na tabela 23.

Tabela 23 – ICV para o processo desmontagem de 1.000 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	5,33E+00
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	4,80E-01
Saídas – Resíduos e emissões para tratamento		
Alumínio (reciclagem)	kg	1,20E+02
Cabos de cobre (reciclagem)	kg	2,67E+00
Resíduo plástico para aterro	kg	5,40E+00

3.6.4. Separação do vidro e do sanduiche (célula FV e camadas de EVA e PVF)

Após a separação do alumínio e da caixa de junção, do total de 1.000 kg de resíduo, sobram 872,43 kg de resíduo. Nessa etapa ocorre a separação da camada de vidro do sanduiche. A separação ocorre através de processo mecânico e térmico. De acordo com o processo de referência o vidro é colocado em forno infravermelho, em um sistema misto de ondas médias e curtas, consumindo 52 kWh de energia elétrica. Ao final dessa etapa sobram 723,00 kg de vidro e 149,40 kg do sanduiche (formado por camadas de polímeros e células FV) que segue para a próxima etapa de tratamento térmico. O inventário para a separação do vidro está na tabela 24.

Tabela 24 - ICV para o processo separação do vidro em 872,43 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	5,17E+01
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	4,65E+00

3.6.5. Tratamento do vidro para reutilização

Quando a camada de vidro é removida, o material adesivo fica colado ao semicondutor, sendo necessário que o vidro passe por um processo de aquecimento controlado para que se solte as camadas de polímeros. Para o tratamento de 723,00 kg de vidro é consumido 3 kWh de energia elétrica. Após a separação grande parte do vidro consegue ser recuperado sem comprometer suas propriedades. Foi considerada a eficiência do processo de referência de

98% de aproveitamento do vidro, sendo o restante descartado para aterro sanitário. Na ACV, a sucata de vidro que sai desse processo vidro é assumido como resíduo reciclado (708,54 kg de caco de vidro) para ser utilizado como vidro secundário no mercado. Somente 2% do total do vidro (14,46 kg) mantém impurezas, saindo nesse processo como resíduo para tratamento em aterro situado a 100 km da planta de reciclagem. O processo consome 3,31 kWh de energia elétrica. O inventário para esse etapa está na tabela 25.

Tabela 25 - ICV para o processo do tratamento de 723,00 kg de vidro

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	3,31E+00
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	2,97E-01
Saída – Produtos evitados		
Sucata de vidro	kg	7,09E+02
Saída – Resíduos e emissões para tratamento		
Vidro para aterro	kg	1,45E+01

3.6.6. Processo de corte e tratamento térmico do sanduiche para decomposição do EVA e PVF

O sanduíche formado por camadas de polímeros (EVA e PVF), adesivo e células FV é direcionado para incineração (149,43 kg). No processo descrito no trabalho de referência, esse sanduíche é cortado em peças menores para facilitar o tratamento térmico. No processo de corte do sanduíche é consumido 0,33 kWh de energia elétrica. É assumido para a ACV que o tratamento térmico para a decomposição dos polímeros e adesivos é realizada em uma planta especializada localizada a 200 km de distância. Para esse processo foi adotada a mesma premissa do estudo de referência, considerado o inventário médio de materiais, energia e emissões do banco de dados do Ecoinvent para a incineração do plástico e PVF.

A reação exotérmica da queima do material incinerado serve como fonte de calor (FRISSON et al., 2000; WANG et al., 2012; Farrell et al., 2019), reduzindo a quantidade de energia de entrada. Assim nessa etapa foi assumida a cogeração de energia a partir do aproveitamento energético do resíduo (EVA e PVF). Foram adotadas as quantidades de energia recuperadas do estudo de referência, que é de 3,48 MJ de eletricidade e 7,03 MJ de energia térmica por kg de

plástico e PVF incinerado. Dessa forma esses valores foram multiplicados pela quantidade de EVA (61,70 kg) e de PVF (32,30 kg), chegando a produção de eletricidade (média voltagem) de 327,12 MJ e de calor de 660,82 MJ que sairão como produtos evitados.

Durante o processo de incineração, embora a célula FV possa sofrer algum dano, a reciclagem não é inviabilizada (HUANG et al., 2017). A saída desse processo é composta de 59,77 kg de cinzas residual (cerca de 40% do total de resíduo que entra), que retornarão a planta de reciclagem para a etapa seguinte de tratamento química, onde são extraídos resíduos de células FV e de metais condutores. A incineração também produz cinzas, cerca de 0,2% do peso do módulo (2,16 kg) e que deverão ser descartadas em aterro para materiais perigosos situado a 100 km da planta de reciclagem. O inventário detalhado dessa etapa foi adaptado para a quantidade de 149,43 kg de resíduo (tabela 26).

Tabela 26 – ICV processo corte e tratamento térmico em 149,43 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kg	0,33E+00
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	2,97E-02
Saída – Resíduos e emissões para tratamento		
Cinzas incineração para aterro	kg	2,16E+00
Incineração plástico	kg	6,17E+01
Incineração PVF	kg	3,23E+01
Saída – Produtos evitados		
Eletricidade – média voltagem	MJ	3,27E+02
Energia térmica	MJ	6,61E+02

3.6.7. Processo tratamento químico para a recuperação metais

Os resíduos (59,77 kg de cinzas) do processo anterior de tratamento térmico, seguem para o tratamento químico. Essa etapa é realizada para separar a célula FV dos demais metais dos eletrodos contidos nas cinzas e da camada de SiNx, (FRISSON et al., 2000). O processo envolve múltiplas etapas, sendo capaz de recuperar não somente o SiMG, mas a prata (Ag), alumínio (Al) e cobre (Cu).

O aumento nos índices de recuperação dos materiais e o mínimo impacto ambiental são fatores positivo desse processo. As cinzas geradas na etapa anterior são primeiramente peneiradas para separar os metais. O que sobra é imerso em uma solução aquosa de ácido nítrico (HNO_3) a qual, em um processo sequencial de filtração, eletrólise e neutralização, separa os metais (Ag, Al e Cu) que compõem a malha do circuito printado sobre a célula e produz vários óxidos metálicos, deixando o resíduo de Si. A solução é aquecida, porém a energia consumida nesse processo não foi estimada no trabalho de referência. Os metais são então recuperados, um por um, através de processo de filtração e eletrólise.

O processo é monitorado para maximizar a quantidade de metais recuperados, sendo possível recuperar cerca de 95% do SiMG, Ag, Cu e Al. A prata pertence ao grupo dos metais preciosos e, ainda que presente em pequena quantidade, tem relevância na composição dos custos nos módulos FV. A pureza dos metais recuperados é de cerca de 90%, podendo ser utilizados na indústria em substituição de matérias primas, evitando os impactos da produção. No inventário 34,68 kg de SiMG, 0,48 kg de Ag, 3,04 kg de Al e 1,90 kg de Cu saem como produtos evitados. Estima-se no processo de eletrolise a emissão de 2kg de NO_x . Os resíduos gerados nessas etapas são ao final neutralizados, adicionando CaO . Ao final do processo de neutralização sobram um lodo contendo uma solução de nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), resíduos de CaO e metais não recuperados.

O consumo de energia em todas as etapas desse processo é estimado em 1,29 kWh/kg de cinzas que entram no processo (totalizando 77,11 kWh). A última etapa é a filtragem do resíduo da neutralização para separação do líquido residual (contendo 415,78 Kg de água e nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) do lodo (contendo 68,25 kg de metais não recuperados com alguns resíduos de hidróxido de cálcio). O líquido residual segue para aterro comum e o lodo, classificado como perigoso, segue para aterro especial, localizados a 100 km da planta de reciclagem. O inventário para essa etapa está na tabela 27.

Tabela 27 – ICV processo tratamento químico em 59,77 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Água	m^3	4,20E-01
HNO_3 – Brasil	Kg	9,62E+00
CaO - Brasil	Kg	4,96E+01

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	7,71E+01
Saídas – Emissões		
NOx	Kg	2,72E+00
Saídas - Produtos evitados		
Silício (Si)	Kg	3,47E+01
Prata (Ag)	Kg	4,75E-01
Alumínio (Al)	kg	3,04E+00
Cobre (Cu)	kg	1,90E+00
Saída – Resíduos e emissões para tratamento		
Resíduo do processo (resíduo líquido)	kg	4,16E+02
Lodo (resíduo perigoso)	kg	6,82E+01

3.6.8. Compilação dos dados de ICV para o cenário 1

A quantificação das entradas e saídas para o estudo de ACV do processo do cenário 1 está apresentada na tabela 28.

Tabela 28 – ICV do cenário 1 - reciclagem dos resíduos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Resíduo módulo FV	kg	1.000,00
Eletricidade	kW	137,79
Diesel	kg	42,00
Água	kg	420,64
CaO - óxido de cálcio	kg	49,58
HNO ₃ -ácido nítrico	kg	9,62
Saída, recuperação de materiais		
Sucata de vidro	kg	708,54
Sucata de alumínio	kg	119,50
Sucata de cobre	kg	2,67
Alumínio	kg	3,04
Cobre	kg	1,90
Prata	kg	0,48
Silício	kg	34,68

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Saída, recuperação de energia		
Produção de eletricidade	MJ	327,12
Produção de calor	MJ	660,82
Saída, aterro sanitário		
Vidro resíduo	kg	14,46
Plástico resíduo	kg	5,40
Cinzas (resíduo perigoso)	kg	2,16
Resíduo do processo (resíduo líquido)	kg	415,85
Lodo (resíduo perigoso)	kg	68,26
Saída, emissões para o ar		
NOx	kg	2,72

3.7. INVENTÁRIO PARA O CENÁRIO 2

Nesse cenário ocorre a reciclagem apenas de parte dos componentes do módulo e tratamento dos demais resíduos dos módulos FV como REEE através de incineração antes da disposição em aterro.

O processo do cenário 2 é dividido em etapas sendo que a sequência de desmontagem mecânica do módulo ocorre de forma similar ao do processo de reciclagem. A etapa de separação do vidro do sanduiche foi adaptada de forma que nessa etapa o vidro ao final não consegue ser aproveitado e é descartado em aterro. O sanduiche segue para etapa final que é o tratamento térmico e descarte dos resíduos gerados em aterros. Para as etapas descritas nos itens 3.7.3 e 3.7.4, os inventários foram adaptados a partir do inventário de referência da literatura (LATUNUSSA et al., 2016). Para a etapa descrita no item 3.7.5 foi adotada a premissa de que o material a ser incinerado é plástico, utilizando como referência o inventário para incineração de plástico da literatura (OLIVEIRA, 2017).

3.7.1. Transporte

Os processos dessa estratégia que envolvem transporte são os para a retirada dos 1.000 kg de resíduos no local da instalação do sistema FV até o ponto de coleta e desse até a planta de reciclagem de REEE. Essa distância foi estimada em 100 km até o ponto de coleta, somados

a uma distância de 300 km até a planta de reciclagem de REEE. O alumínio e cobre separados (122,20 kg) permanecem na recicladora para serem comercializados, não sendo necessário transporte para esses materiais. O tratamento do resíduo (154,80 kg) segue para uma planta de incineração a uma distância estimada de 200 km da recicladora de REEE. A última etapa é a destinação dos resíduos gerados. O vidro (723,00 kg) e as cinzas de fundo (61,92 kg) e cinzas de caldeira (1,55 kg), produzidas na incineração, seguem para aterros comum e especial respectivamente que estão a uma distância estimada de 100 km da recicladora de REEE. O ICV do transporte rodoviário no Brasil foi obtido do estudo de Viana (2008) e é dado em t.km. Contabilizados os totais, no processo de reciclagem teremos em toneladas 2,94 t sendo transportados numa distância total de 800 km. O inventário para 2.352 t.km para o processo de incineração é dado na tabela 29.

Tabela 29 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 2.352 t.km

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Óleo diesel Brasil	kg	4,77E+01
Saídas – Emissões		
SO ₂	kg	3,42E-02
NO ₂	kg	1,17E+00
CO	kg	1,11E+02
CO ₂	kg	6,53E-01
N ₂ O	kg	1,90E-01
NM VOC	kg	2,53E-02
Metano	kg	1,05E-01
Particulados, < 10	kg	5,31E-02

3.7.2. Descarregamento

O descarregamento dos resíduos ocorre em processo igual ao descrito para a reciclagem. Dessa forma o inventário é o mesmo apresentado na tabela 23 da seção 3.6.2.

3.7.3. Desmontagem do módulo

O processo de desmontagem do módulo ocorre de maneira quase semelhante ao descrito na seção 3.6.1. A diferença é somente que o resíduo plástico separado nessa etapa (5,40 kg) segue para incineração. Na desmontagem do módulo FV, 119,50 kg de alumínio e 2,70 kg de cobre que saem do processo permanecem na recicladora para serem comercializados. O inventário está apresentado na tabela 30.

Tabela 30 – ICV para o processo desmontagem de 1.000 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	5,33E+00
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	4,80E-01
Saídas - Resíduos e emissões para tratamento		
Sucata de alumínio (reciclagem)	kg	1,20E+02
Sucata de cobre (reciclagem)	kg	2,67E+00

3.7.4. Separação do vidro e do sanduiche

Após a separação do alumínio e da caixa de junção sobram 872,43 kg de resíduo. De acordo com Latunussa et al. (2016), geralmente as plantas de reciclagem de REEE não são especializadas em tratamento de resíduos FV. Assim, nessa estratégia ocorre baixa recuperação de materiais que podem ser reutilizados como matéria prima. Diferentemente do cenário 1, o vidro que sai nessa etapa não consegue ser reciclado para outras aplicações e 723,00 kg de vidro separado do sanduiche é descartado em aterro. O inventário é similar ao apresentado na tabela 25 da seção 3.6.4 sendo modificada a saída de resíduo que seguirá para aterro. O restante do resíduo que sobra é 149,40 kg do sanduiche que é incinerado. O inventário para essa etapa está apresentado na tabela 31.

Tabela 31 - ICV para separação de 872,43 kg de resíduos de módulo FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	5,17E+01

(continuação)

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	4,65E+00
Saída – Resíduos e emissões para tratamento		
Vidro para descarte em aterro	kg	7,23E+01

3.7.5. Incineração dos resíduos (plástico e sanduiche FV)

A incineração do plástico (5,40 kg) e do sanduiche FV (149,40 kg) ocorre em uma planta externa à planta de reciclagem de REEE. De acordo com a composição dos módulos FV, o sanduiche contém 70% de polímeros e adesivos. Para essa etapa foi considerado o inventário de entradas e saídas da incineração de plástico. Nesse processo ocorre a decomposição dos resíduos, restando 1,55 kg de cinzas e 0,17 m³ de lodo. Não foi considerada a cogeração de energia a partir do calor produzido durante a incineração do plástico. O inventário para essa etapa está apresentado na tabela 32.

Tabela 32 – ICV para incineração de 149,43 kg de resíduos

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kg	7,76E+01
Óleo combustível	kg	1,25E+00
Gás natural	kg	2,71E+00
Água	m ³	5,50E-01
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	9,14E+00
CO	kg	3,00E-03
Particulados	kg	2,82E-04
NOx	kg	5,64E-04
COVNM	kg	1,69E-02
Saída – Resíduos e emissões para tratamento		
Cinzas (material perigoso) para aterro	kg	1,55E+00
Lodo	m ³	1,70E-01

3.7.6. Compilação dos dados de ICV para o cenário 2

A quantificação das entradas e saídas para o estudo de ACV do processo do cenário 2 está apresentada na tabela 33.

Tabela 33 – ICV do cenário 2 - incineração dos resíduos FV

Aspecto Ambiental	Un.	Qtde.
Entrada		
Resíduo módulo FV	kg	1.000,00
Eletricidade	kW	134,79
Diesel	kg	47,75
Óleo combustível	kg	1,25
Gás natural	kg	2,71
Água	m ³	0,55
Saída, resíduos e emissões para tratamento		
Alumínio (reciclagem)	kg	119,50
Cabos de cobre (reciclagem)	kg	2,67
Vidro resíduo (aterro)	kg	723
Cinzas (aterro - resíduo perigoso)	kg	1,55
Lodo (aterro- resíduo perigoso)	m ³	0,17

3.8. INVENTÁRIO PARA O CENÁRIO 3

Esse cenário difere do cenário 2 na etapa de tratamento térmico do resíduo para envio ao aterro. Após a separação do alumínio e dos cabos em cobre, o restante do resíduo é triturado e enviado para aterro.

3.8.1. Transporte

As distâncias que envolvem a coleta e envio até a planta de reciclagem de REEE foram assumidas as mesmas do cenário 2. A última etapa é a destinação do resíduos gerado (877,83 kg) que segue para aterro considerada a distância de 100 km da recicladora de REEE. O ICV do transporte rodoviário no Brasil foi obtido do estudo de Viana (2008) e é dado em t.km. Contabilizados os totais, temos 2,88 toneladas transportados em uma distância total de 500 km. O inventário para 1.440 t.km para o processo é dado na tabela 34.

Tabela 34 – ICV para o processo de transporte rodoviário de 1.440 t.km

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Óleo diesel Brasil	kg	2,92E+01
Saídas – Emissões		
SO ₂	kg	2,82E-02
NO ₂	kg	9,65E-01
CO	kg	9,14E+01
CO ₂	kg	5,39E-01
N ₂ O	kg	1,57E-01
NM VOC	kg	2,09E-02
Metano	kg	8,65E-02
Particulados, < 10	kg	4,38E-02

3.8.2. Descarregamento e desmontagem

As etapas de descarregamento e desmontagem ocorrem de formas iguais ao descrito para o cenário 2 e vistos nas seções 3.7.2 e 3.7.3.

3.8.3. Trituração dos resíduos

Nessa etapa 877,83 kg de resíduo é triturado em processo mecânico. O processo consome 52,03 kWh de energia elétrica. O inventário para a desmontagem de 1.000 kg de módulo FV está na tabela 35.

Tabela 35 – ICV para a trituração de 877,83 kg de resíduos de módulos FV

Aspecto ambiental	Unid.	Qtde.
Entrada		
Energia elétrica Brasil	kWh	5,20E+01
Saídas – Emissões		
CO ₂	kg	4,68E001
Saídas - Resíduos e emissões para tratamento		
Resíduo (aterro)	kg	8,77E+02

3.8.4. Compilação dos dados de ICV para o cenário 3

A quantificação das entradas e saídas para o estudo de ACV do processo do cenário 3 está apresentada na tabela 36.

Tabela 36 – ICV do cenário 2 – descarte em aterro dos resíduos FV

Aspecto ambiental	Un.	Qtde.
Entrada		
Resíduo módulo FV	kg	1.000,00
Eletricidade	kW	57,36
Saída, resíduos e emissões para tratamento		
Alumínio (reciclagem)	kg	119,50
Cabos de cobre (reciclagem)	kg	2,67
Resíduo (aterro)	kg	877,83

3.9. METODOLOGIA PARA ANÁLISE ECONÔMICA DA GESTÃO DE FIM DE VIDA

A questão da viabilidade tecnológica e ambiental da reciclagem de módulos FV é extremamente destacada na literatura conforme exposto nesse trabalho. Contudo, na literatura é possível verificar que diversos autores tentam estimar a rentabilidade de processos de reciclagem de módulos FV (CHOI; FTHENAKIS (2014); CUCCHIELLA et al., 2015; D'ADAMO et al., 2017), mas as vantagens econômicas não estão bem definidas. O objetivo dessa seção é investigar, sob o ponto de vista econômico, a implantação da reciclagem dos módulos FV, de forma a orientar futuras pesquisas para essa estratégia de gestão de fim de vida.

Uma revisão na literatura sobre a reciclagem de módulos FV indica que sua viabilidade econômica ainda é desfavorável. Embora os módulos FV da tecnologia c-Si em sua composição possuam materiais valiosos, a reciclagem tem sido uma opção economicamente inviável quando comparada a outras formas de condução para o descarte final dos resíduos, como a opção de aterro por exemplo.

A análise econômica adotada nesse estudo foi realizada de forma simplificada seguindo as seguintes etapas:

- Cálculo das projeções de capacidade instalada acumulada, em GW, ao longo dos anos de 2012 a 2050, utilizando a tendência linear a partir os dados oficiais da evolução da potência instalada no Brasil;
- Estimativa da potência total instalada acumulada para a tecnologia c-Si, em GW, ao longo de 2012 a 2050, baseado no *market share* atual da tecnologia;
- Estimativa do total instalado acumulado de módulo FV da tecnologia c-Si, em toneladas, no período de 2012 a 2050;
- Cálculo das projeções, em toneladas, de resíduos de módulos FV da tecnologia c-Si gerados, aplicando coeficientes de perdas estimados;
- Cálculo das quantidades, em toneladas, de componentes que podem ser recuperados a partir do total de resíduos gerados e dos coeficientes de aproveitamento do processo de reciclagem utilizado como referência;
- Estimativa, a partir dos valores médios de mercado, das receitas possíveis obtidas com a comercialização dos materiais recuperados, dos custos evitados da disposição desses materiais em aterros e aterros especiais e dos custos do processo de reciclagem;
- Análise do provável benefício financeiro conseguido pela receita com reciclagem dos materiais, confrontando com os custos envolvidos do processo de reciclagem.

4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA - AICV

O objetivo dessa seção é a avaliação e interpretação dos resultados dos impactos decorrentes das cargas ambientais calculadas para o inventário de 1000 kg de resíduo de módulo FV.

Primeiramente, para cada cenário simulado, é apresentado o resultado da AICV para as contribuições relativas das múltiplas entradas e saídas dos inventários de ciclo de vida, convertidas em indicadores numéricos específicos, representando as contribuições nas 18 categorias de impacto ambiental Midpoint (por exemplo, kg de CO₂ eq para a categoria “mudanças climáticas”). Na avaliação, os impactos ambientais (indicadores positivos) opõem-se aos benefícios ambientais (indicadores negativos).

Na representação gráfica, a soma da contribuição negativa e positiva é dimensionado para 100%, porque cada categoria é avaliada por um indicador diferente com sua própria unidade.

Adicionalmente são apresentados os resultados da avaliação de impacto na categoria de danos Endpoint comparando os três cenários.

A discussão dos resultados dessa seção permitiu definir os processos de maior impacto ou benefício ambiental em cada estratégia. Na comparação entre os cenários foi possível identificar o de menor impacto ambiental.

4.1. CENÁRIO 1 - RECICLAGEM

A tabela 37 mostra os resultados da avaliação de impacto para a UF de 1.000 kg de tratamento de resíduo de módulo FV no cenário de reciclagem de acordo com o processo descrito na seção 3.6. São relacionados os impactos (indicadores positivos) e os benefícios (indicadores negativos) de cada categoria Midpoint/caracterização.

Tabela 37 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV no cenário de reciclagem

Categoria de impacto	Unidade	Total
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	3,3092E+05
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	-6,3864E-05
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	7,5512E+03
Eutrofização de água doce	kg P eq	-1,6974E+00
Eutrofização marinha	kg N eq	3,8672E+02
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	-2,1226E+03
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1,0211E+04
Formação de material particulado	kg PM ₁₀ eq	2,5785E+03
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,5878E-01
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	-3,6089E+01
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	-3,7144E+01
Radiação ionizante	kBq U235 eq	-1,6130E+02
Ocupação do solo agrícola	m ² ano	-5,7750E+01
Ocupação do solo urbano	m ² ano	-2,2300E+01
Transformação solo	m ²	-2,9034E-01
Depleção água	m ³	1,9836E+06
Depleção de recursos minerais	kg Fe eq	1,0768E+02
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	1,1069E+05

De forma gráfica a figura 18 mostra a contribuição de cada fase do processo no cenário de reciclagem. Baseado nos resultados, é possível verificar que a etapa de tratamento químico é a de maior contribuição que o processo de reciclagem produz, variando de 40% a 100% nas 9 categorias de impacto ambiental (mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização marinha, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, depleção água, de recursos minerais e fósseis). A etapa de separação do vidro do sanduiche e a etapa de tratamento para recuperação do vidro também contribuiriam na produção de impacto de forma menos relevante.

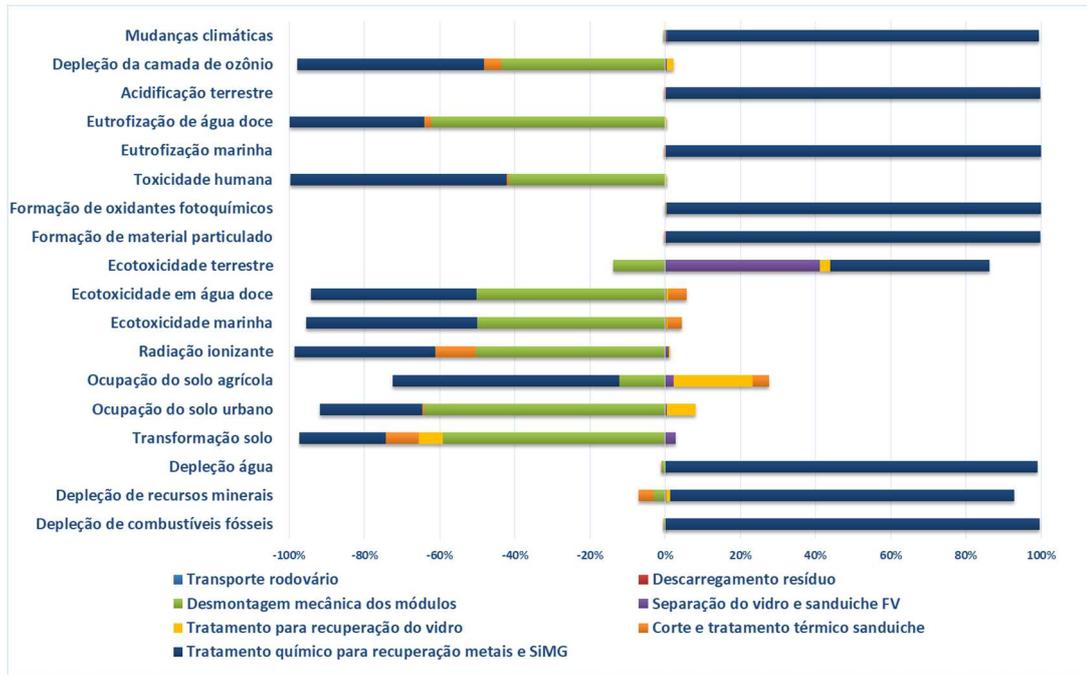


Figura 18 – Resultados AICV caracterização Midpoint para o cenário de reciclagem

Analisando a etapa de tratamento químico (figura 19), os resultados mostram que o impacto produzido diretamente em 8 categorias (mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização marinha, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, depleção água, de recursos minerais e fósseis) são devidos principalmente à contribuição pelo uso de HNO_3 , que variou de 60% a 80%. O uso de substâncias químicas nessa etapa do processo de reciclagem produziu emissões de CO_2 , principal poluente que contribuiu para as mudanças climáticas e de NO_x .

A contribuição da energia elétrica produziu impacto relevante (cerca de 80%) na categoria ecotoxicidade terrestre.

A geração de resíduos ao final da etapa de tratamento químico contribuiu para o impacto na categoria ocupação do solo ao redor de 20%.

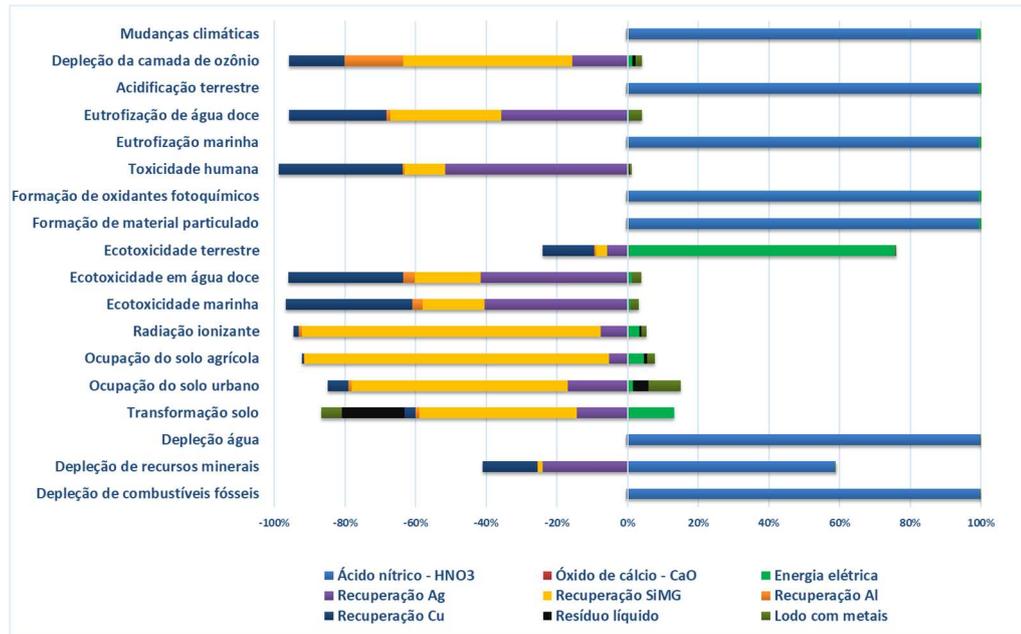


Figura 19 – Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento químico no cenário de reciclagem

Como resultado, vemos espaços de melhorias nesses dois aspectos: consumo de produtos químicos das soluções utilizadas no tratamento químico para separação dos metais e redução do consumo de energia elétrica. A necessidade de testar soluções químicas utilizadas na recuperação dos metais deve ser feita de forma a utilizar elementos que neutralizam os resíduos gerados ao final dos processos, objetivando minimizar o impacto ambiental conforme proposto por Huang et al. (2016, 2017). Outro ponto é conseguir que na saída do processo de reciclagem consiga a recuperação do silício em grau solar de forma a ser reaproveitado no ciclo produtivo dos módulos FV.

A redução de energia poderia ocorrer com a eliminação de algumas etapas, como por exemplo, a etapa de corte para o tratamento térmico do sanduiche. Conforme citado por Huang et al. (2017), em escala industrial, é possível a utilização de fornos com capacidade de comportar as peças inteiras, dispensando a necessidade da etapa de corte.

O processo de reciclagem, como observados na AICV da figura 18 dessa seção, produziu benefício ambiental em 9 categorias de impacto (depleção da camada de ozônio, eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade água doce e marinha, radiação ionizante, ocupação do solo agrícola e urbano e transformação solo), devido principalmente às etapas de tratamento químico e desmontagem mecânica dos módulos.

A etapa de tratamento químico, onde é esperada a recuperação de metais preciosos como o silício e de metais raros como a prata, produziu benefício ambiental nas categorias de depleção da camada de ozônio, toxicidade humana e ocupação do solo agrícola, variando de 20% a 60% nessas categorias. Na AICV dessa etapa (figura 19), temos que todo o benefício ambiental conseguido dessa etapa está relacionado à recuperação dos metais. Supõe-se que o silício recuperado do tratamento substitui o SiMG, evitando assim os impactos ambientais relacionados à sua produção. Segundo Müller et al. (2006), a energia evitada na produção de módulos FV a partir do silício recuperado reduziria o consumo de energia durante a produção de novos módulos em mais de 50%.

Na etapa de desmontagem dos módulos, analisada em separado na figura 20, o benefício ambiental foi obtido na totalidade pela produção de sucata de alumínio. Comparado ao uso do alumínio a partir da rota primária, o alumínio recuperado e reutilizado na indústria pode reduzir o consumo de energia em 95% (LATUNUSSA et al., 2016).

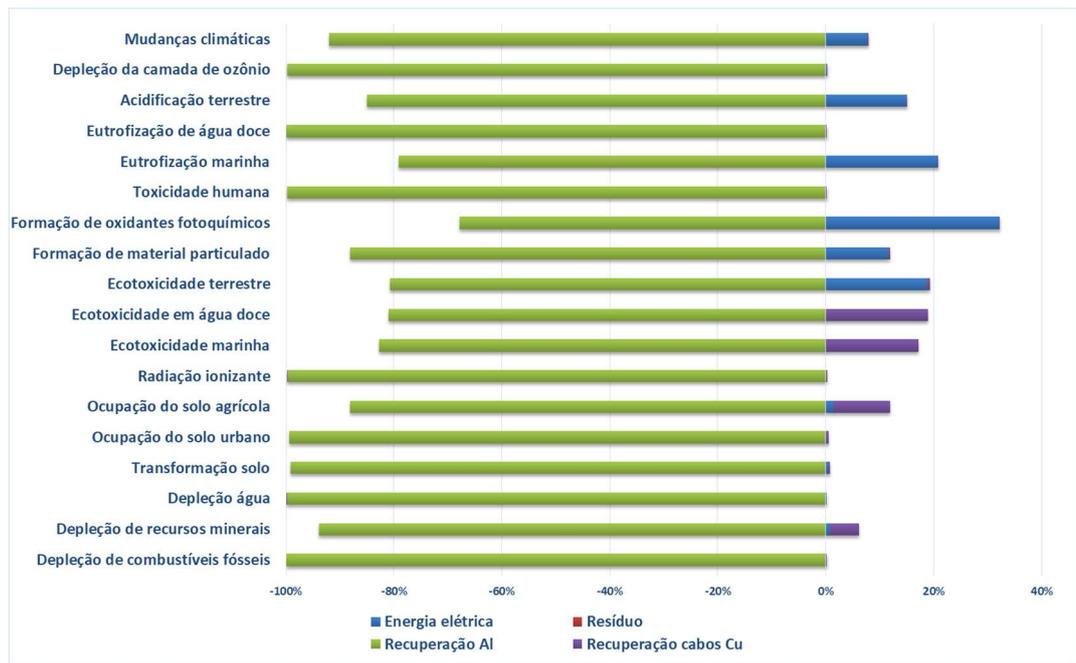


Figura 20 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de desmontagem no cenário de reciclagem

Na etapa de tratamento e recuperação do vidro, analisada separadamente na figura 21, é possível confirmar a contribuição dessa etapa como benefício nas categorias

de transformação do solo e depleção de recursos (água) devido a recuperação do vidro nessa etapa. O vidro recuperado reduziu a quantidade de resíduos para envio a aterro.

A produção a partir do vidro reciclado evita o uso de recursos, reduz a demanda de energia e de emissões de CO₂. O vidro reciclado possui menor ponto de fusão levando a uma menor demanda de energia. Em comparação à produção a partir da matéria da rota primária, a produção a partir do vidro reciclado consome 25% menos energia comparada (HELD, 2009).

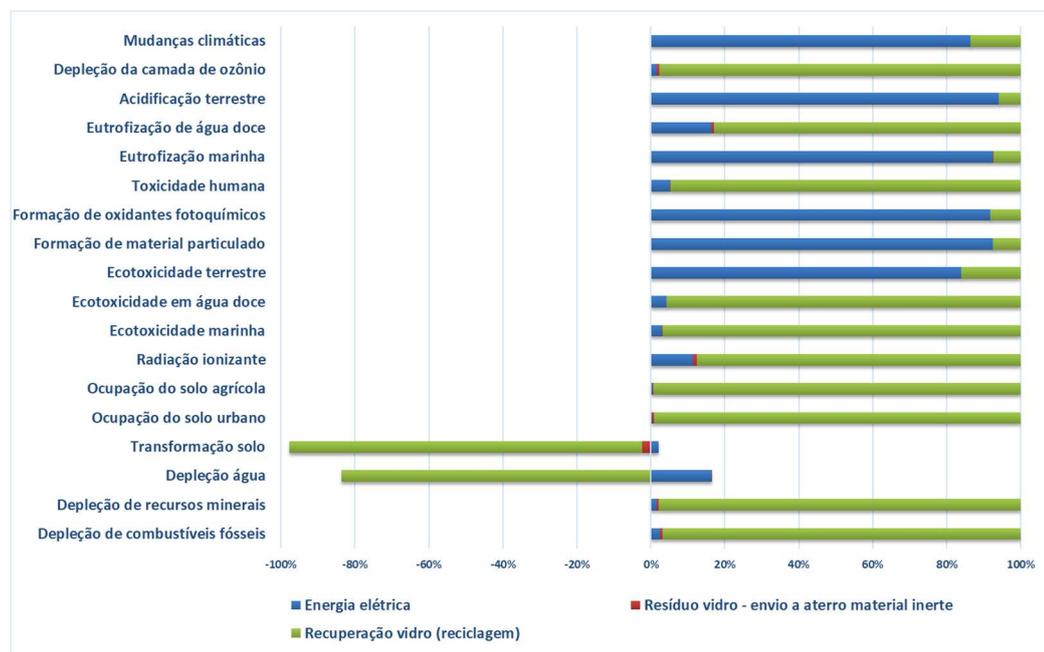


Figura 21 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento e recuperação do vidro no cenário de reciclagem

A etapa de tratamento térmico para decomposição do EVA e PVF produziu, embora de forma modesta, benefício ambiental para o processo de reciclagem. Na AICV do processo de reciclagem mostrado na figura 18, temos o impacto negativo dessa etapa nas categorias de depleção da camada de ozônio, eutrofização de água doce, toxicidade humana, radiação ionizante, ocupação do solo urbano, transformação solo e depleção de recursos minerais. Nessa etapa foi assumido o aproveitamento energético do calor produzido pela queima dos polímeros. Através da cogeração, nessa etapa ocorre a produção de energia elétrica e calor.

Investigando a etapa (figura 22) é possível confirmar os percentuais de contribuições que as produções de calor e energia elétrica, a partir do tratamento térmico dos polímeros usados nos módulos FV de c-Si, geraram como benefício nessa etapa da reciclagem. Essa potencial recuperação de energia é citada na literatura em trabalhos como o de Farrell et al. (2019), sugerindo o uso dessa energia no próprio processo de reciclagem, torna-o assim mais sustentável.

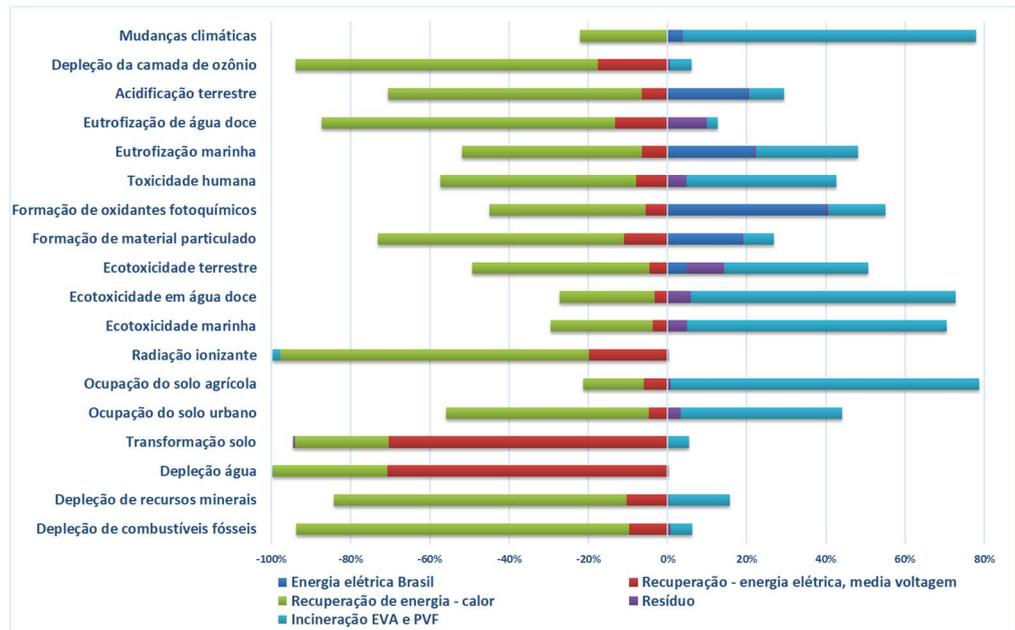


Figura 22 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de tratamento térmico do EVA e PVF no cenário de reciclagem

4.2. CENÁRIO 2 - INCINERAÇÃO

A tabela 38 mostra os resultados da avaliação de impacto para a UF de 1.000 kg de tratamento de resíduo de módulo FV para a estratégia de incineração de acordo com o processo descrito na seção 3.7. São relacionados os impactos (indicadores positivos) e os benefícios (indicadores negativos) de cada categoria Midpoint/caracterização.

Tabela 38 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV na estratégia de incineração

Categoria de impacto	Unid.	Total
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	2,3541E+03
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	-2,7809E-05
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	4,6724E+01

(continuação)

Categoria de impacto	Unid.	Total
Eutrofização de água doce	kg P eq	-1,0518E+00
Eutrofização marinha	kg N eq	2,6419E+00
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	-8,7859E+02
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	7,5251E+01
Formação de material particulado	kg PM ₁₀ eq	1,4536E+01
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,9700E-01
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	-1,9954E+01
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	-2,0053E+01
Radiação ionizante	kBq U235 eq	-7,9208E+01
Ocupação do solo agrícola	m ² ano	-7,1790E+00
Ocupação do solo urbano	m ² ano	-1,5974E+01
Transformação solo	m ²	-1,8980E-01
Depleção água	m ³	-1,6852E+04
Depleção de recursos minerais	kg Fe eq	-2,5850E+00
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	-3,8218E+02

A figura 23 mostra a contribuição de cada fase do processo no cenário de incineração. Os resultados demonstram que as etapas de incineração e de separação do vidro contribuíram nas 6 categorias de impacto que o cenário produziu (mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização marinha, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado e ecotoxicidade terrestre).

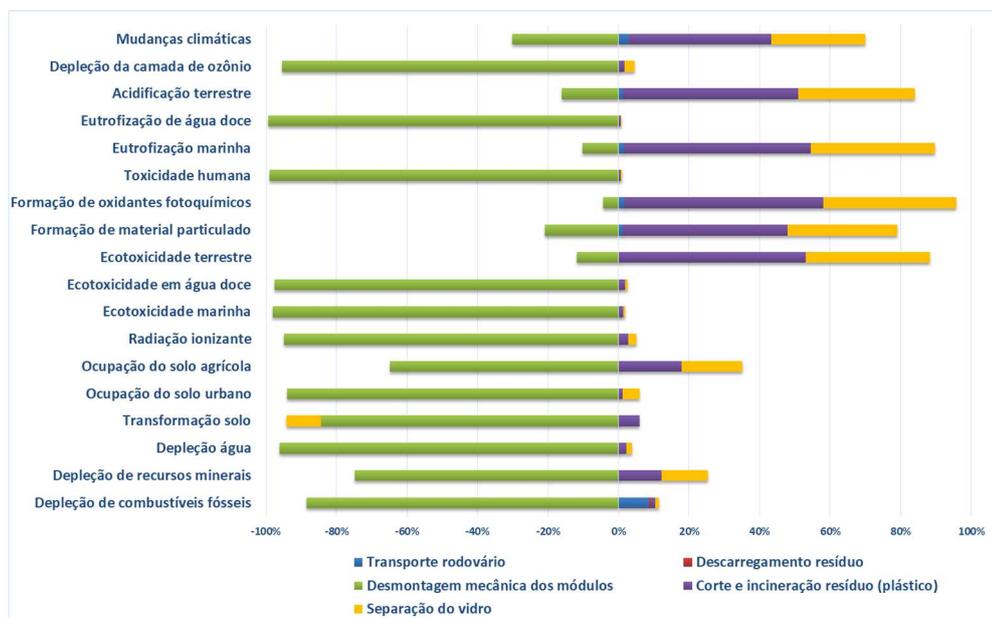


Figura 23 - Resultados AICV caracterização Midpoint para cenário de incineração

Analisando separadamente as etapas de separação do vidro (figura 24) e de corte e incineração do sanduiche (figura 25) é possível verificar que o impacto ambiental está relacionado ao consumo de energia. A contribuição da energia variou de 10% a 100% nas categorias de impacto analisadas do método Midpoint.

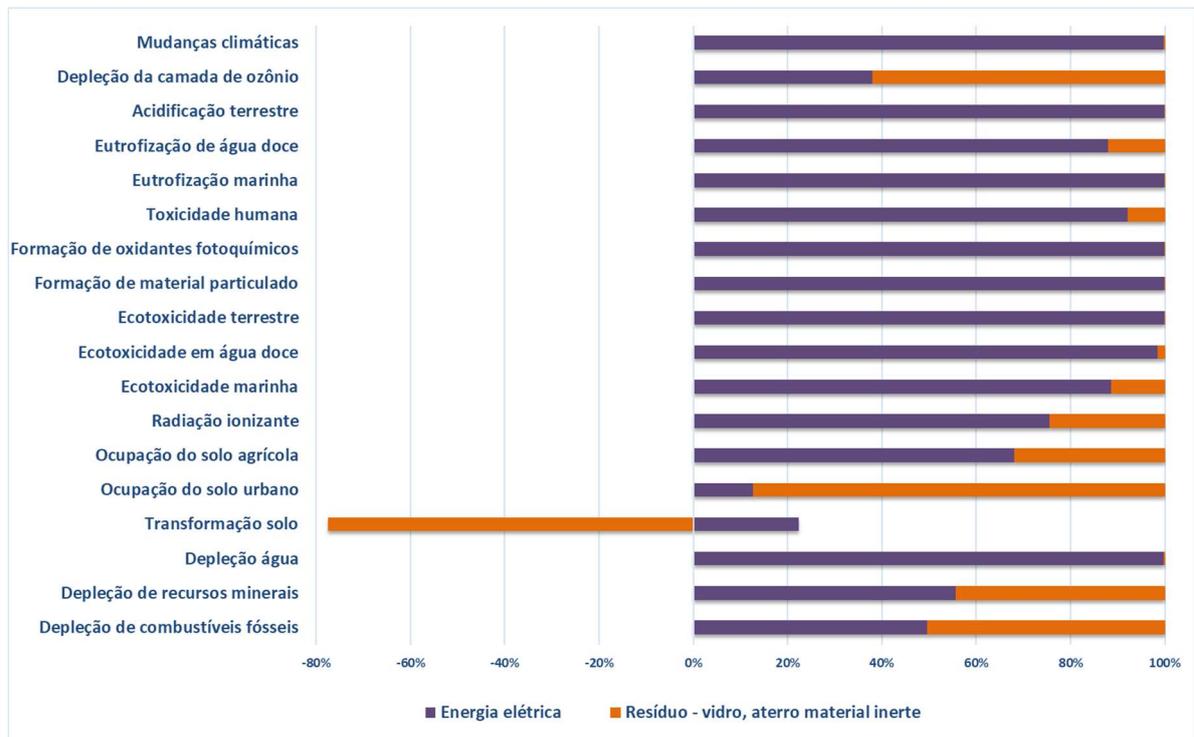


Figura 24 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa separação do vidro no cenário de incineração

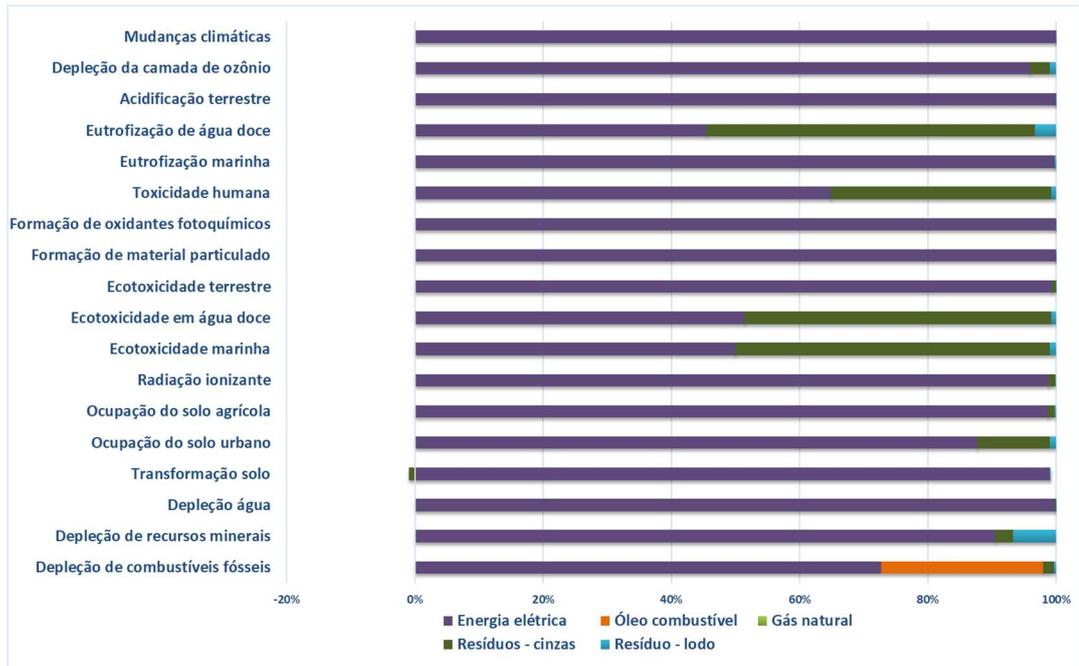


Figura 25 - Resultados AICV caracterização Midpoint para a etapa de corte e incineração do sanduiche no cenário de incineração

Na AICV para a simulação do cenário de incineração temos que a principal desvantagem é a pouca recuperação de materiais, sobretudo do Si. O benefício ambiental está relacionado ao aproveitamento do alumínio, na etapa de desmontagem do módulo, que sai como material reciclado para reuso no mercado em substituição à matéria prima. O descarte de resíduo em aterro, principalmente do vidro produziu impacto negativo na categoria de transformação do solo. Não foi considerada o aproveitamento energético do resíduo e a cogeração de energia, o que poderia significar maior benefício ambiental.

4.3. CENÁRIO 3 - DISPOSIÇÃO EM ATERRO

A tabela 39 mostra os resultados da avaliação de impacto para a UF de 1.000 kg de tratamento de resíduo de módulo FV para a estratégia de disposição em aterro de acordo com o processo descrito na seção 3.8. São relacionados os impactos (indicadores positivos) e os benefícios (indicadores negativos) de cada categoria Midpoint/caracterização.

Tabela 39 – Resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg de resíduo de módulo FV no cenário de aterro

Categoria de impacto	Unid.	Total
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	-3,2147E+01
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	-2,8193E-05
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	1,2523E+01
Eutrofização de água doce	kg P eq	-1,0566E+00
Eutrofização marinha	kg N eq	8,7914E-01
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	-8,8477E+02
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	2,8727E+01
Formação de material particulado	kg PM ₁₀ eq	2,8582E+00
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	6,0754E-02
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	-2,0347E+01
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	-2,0328E+01
Radiação ionizante	kBq U235 eq	-8,1491E+01
Ocupação do solo agrícola	m ² ano	-1,1224E+01
Ocupação do solo urbano	m ² ano	-1,5999E+01
Transformação solo	m ²	-2,0882E-01
Depleção água	m ³	-1,7270E+04
Depleção de recursos minerais	kg Fe eq	-3,1442E+00
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	-3,9469E+02

A figura 26 mostra a contribuição de cada fase do processo considerando o cenário de aterro. Pode-se perceber que esse cenário produziu impacto ambiental em somente 5 categorias (acidificação terrestre, eutrofização marinha, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado e ecotoxicidade terrestre) devido principalmente à contribuição da disposição dos resíduos (considerados inertes) em aterro. O principal benefício obtido nesse cenário é devido à etapa de desmontagem. Da mesma forma, como demonstrado nos cenários anteriores, este benefício está relacionado à recuperação do alumínio.

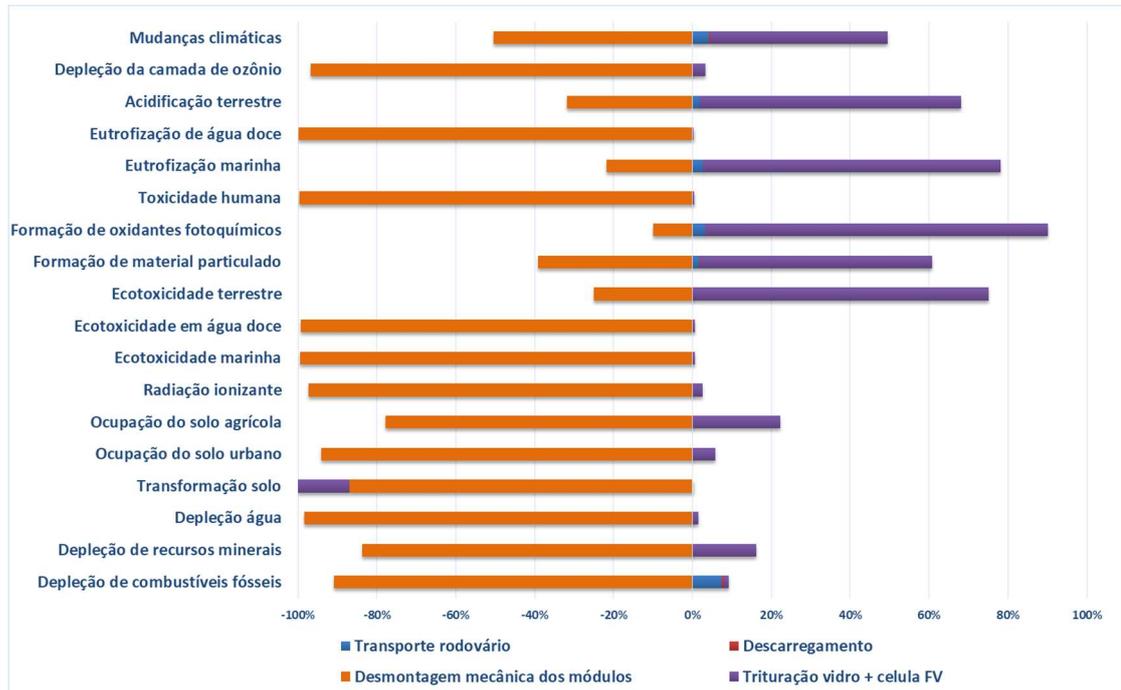


Figura 26 - Resultados AICV caracterização Midpoint para o cenário de disposição em aterro

4.4. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS EM NÍVEL MIDPOINT

A avaliação de impacto na categoria Midpoint da comparação entre os cenários propostos no estudo de ACV está apresentada na tabela 40. A reciclagem produziu indicadores maiores de impacto ambiental em relação aos outros dois cenários estudados.

Tabela 40 – Comparação dos resultados AICV categoria Midpoint usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg nas estratégias de reciclagem e de incineração

Categoria de impacto	Unid.	Reciclagem	Incineração	Aterro
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	3,3092E+05	2,3541E+03	-3,2147E+01
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	-6,3864E-05	-2,7809E-05	-2,8193E-05
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	7,5512E+03	4,6724E+01	1,2523E+01
Eutrofização de água doce	kg P eq	-1,6974E+00	-1,0518E+00	-1,0566E+00
Eutrofização marinha	kg N eq	3,8672E+02	2,6419E+00	8,7914E-01
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	-2,1226E+03	-8,7859E+02	-8,8477E+02
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1,0211E+04	7,5251E+01	2,8727E+01
Formação de material particulado	kg PM ₁₀ eq	2,5785E+03	1,4536E+01	2,8582E+00

(continuação)

Categoria de impacto	Unid.	Reciclagem	Incineração	Aterro
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,5878E-01	1,9700E-01	6,0754E-02
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DB eq	-3,6089E+01	-1,9954E+01	-2,0347E+01
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	-3,7144E+01	-2,0053E+01	-2,0328E+01
Radiação ionizante	kBq U235 eq	-1,6130E+02	-7,9208E+01	-8,1491E+01
Ocupação do solo agrícola	m ² ano	-5,7750E+01	-7,1790E+00	-1,1224E+01
Ocupação do solo urbano	m ² ano	-2,2300E+01	-1,5974E+01	-1,5999E+01
Transformação solo	m ²	-2,9034E-01	-1,8980E-01	-2,0882E-01
Depleção água	m ³	1,9836E+06	-1,6852E+04	-1,7270E+04
Depleção de recursos minerais	kg Fe eq	1,0768E+02	-2,5850E+00	-3,1442E+00
Depleção de combustíveis fósseis	kg oil eq	1,1069E+05	-3,8218E+02	-3,9469E+02

A figura 27 mostra a comparação entre os impactos e benefícios ambientais dos três cenários de tratamento de uma forma mais clara.

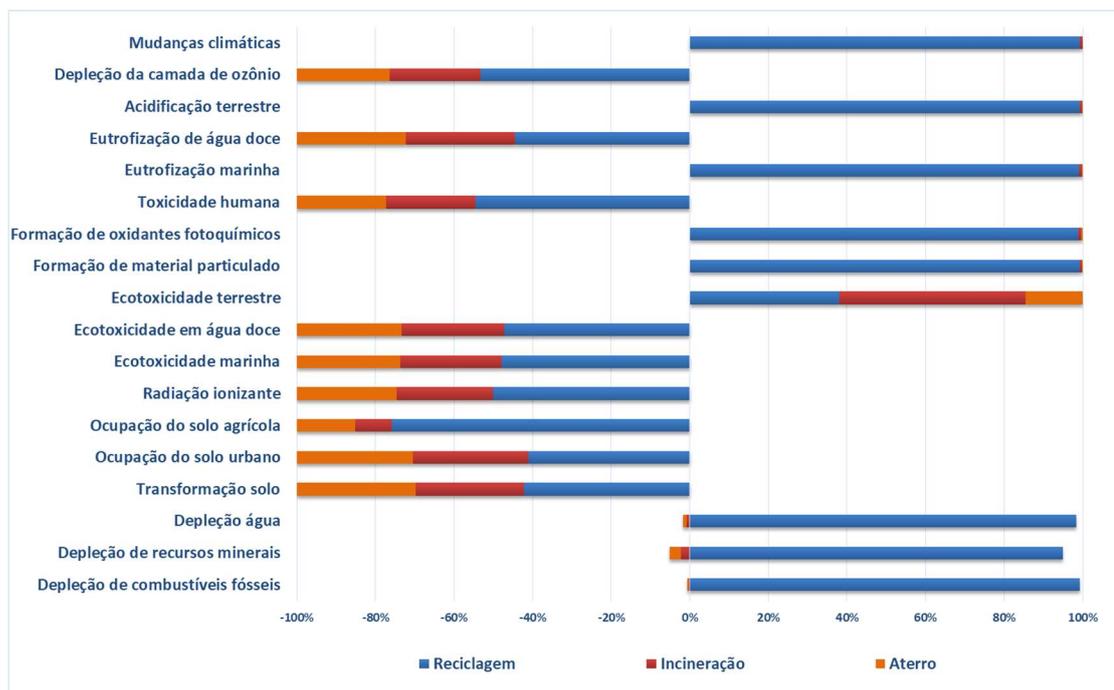


Figura 27 - Resultados da AICV caracterização Midpoint na comparação dos cenários

Os resultados da AICV para os cenários de tratamento dos resíduos de módulos FV demonstram que o cenário da reciclagem produziu percentuais de impactos ambientais consideravelmente maiores nas categorias analisadas, com exceção para a categoria de ecotoxicidade terrestre, onde o cenário de incineração apresentou resultado pior. O cenário de

reciclagem contudo, produziu percentuais maiores de benefícios ambientais. Na categoria de ocupação do solo, por exemplo, a contribuição negativa é produzida sobretudo pelo aproveitamento de materiais que ocorrem no processo.

4.5. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS EM NÍVEL ENDPOINT

A fim de complementar os resultados da AICV em nível Midpoint, realizou-se a avaliação também em nível Endpoint para os três cenários estudados (tabela 41). As pontuações dos indicadores expressam a gravidade relativa ao impacto ambiental e são apresentadas em três categorias, ou seja, o dano à saúde humana, expressa em DALY (ano de vida ajustado por incapacidade), ecossistemas, expressa em espécie-ano e recursos, expressa em dólar (US\$).

Tabela 41 – Comparação dos resultados AICV categoria Endpoint (avaliação de danos) usando o método ReCiPe hierárquico para o do tratamento de 1.000 kg para os cenários propostos

Categoria de danos	Unidade	Reciclagem	Incineração	Aterro
Saúde humana	DALY	1,1326E+00	6,4611E-03	7,8715E-05
Ecossistemas	espécie.ano	2,6662E-03	1,8297E-05	-9,2724E-07
Recursos	\$	1,8327E+04	-6,3342E+01	-6,5452E+01

Na comparação para os indicadores Endpoint mostram que o impacto ambiental menor é alcançado para o cenário de aterro. A reciclagem apresentou maior impacto em relação às outras formas de tratamento avaliadas, provavelmente pelo maior consumo de energia e de substâncias químicas.

A avaliação também confirma a importância de aprofundar os estudos de ACV para as alternativas de gestão de fim de vida em cenários que envolvam a recuperação de materiais e energia.

5. RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA DA GESTÃO DE FIM DE VIDA

Nessa seção são apresentados os resultados da análise de viabilidade econômica da implantação do cenário de reciclagem para tratamento dos resíduos de módulos FV.

5.1. EXPECTATIVA DA POTÊNCIA INSTALADA DA TECNOLOGIA C-SI

A partir dos dados disponibilizados na seção 2.5 desse estudo, onde foi apresentada a capacidade acumulada instalada em GW de 2012 a 2018 e as projeções para os anos de 2019, 2020, 2030, 2040 e 2050, foi possível projetar a potência instalada de cada ano no intervalo de 2020 a 2050. Foi traçada a linha de tendência linear a cada período de 10 anos (2020 a 2030; 2030 a 2040 e 2040 e 2050) e gerado os valores para cada ano. Os resultados podem ser observados na figura 28 e em detalhe na tabela 42.

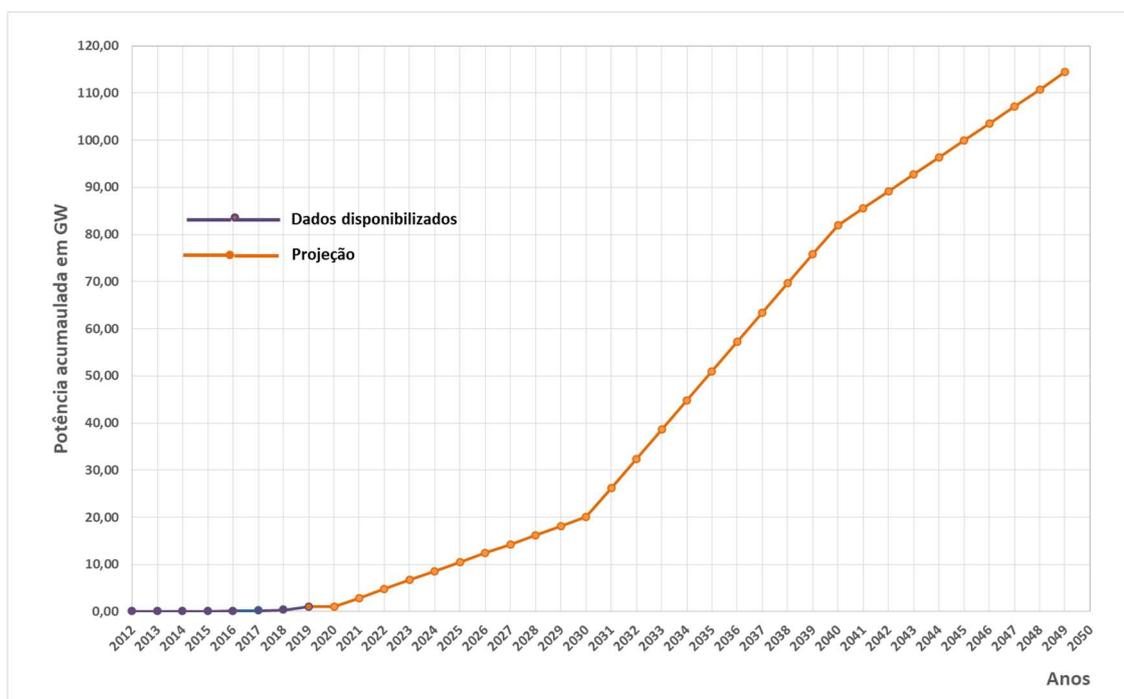


Figura 28 - Potência acumulada instalada no período de 2012 a 2050

Tabela 42² – Potência acumulada instalada – realizado até 2018 e projeção até 2050

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
GW	-	-	0,01	0,02	0,08	0,18	0,31	1,00	1,00	2,90	4,80	6,70	8,60
Ano	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
GW	10,50	12,40	14,30	16,20	18,10	20,00	26,20	32,40	38,60	44,80	51,00	57,20	63,40
Ano	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
GW	69,60	75,80	82,00	85,60	89,20	92,80	96,40	100,00	103,60	107,20	110,80	114,40	118,00

Para a participação da tecnologia de c-Si no mercado brasileiro, ao longo do período de 2012 a 2050, foi assumido o *market share* atual e a previsão conforme apresentado na seção 2.3, ou seja, 92% durante o período de 2012 a 2019, 75% durante o período de 2020 a 2029 e de 45% para o período de 2030 a 2050. A partir dessas informações e dos valores apresentados na tabela 43 foi possível calcular a potência total instalada acumulada para tecnologia c-Si em GW. O resultado está na tabela 43.

Tabela 43³ – Estimativa da potência total instalada acumulada para a tecnologia c-Si em GW de 2012 a 2050

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
GW	-	-	-	0,02	0,08	0,17	0,28	0,92	0,75	2,18	3,60	5,03	6,45
Ano	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
GW	7,88	9,30	10,73	12,15	13,58	9,00	11,79	14,58	17,37	20,16	22,95	25,74	28,53
Ano	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
GW	31,32	34,11	36,90	38,52	40,14	41,76	43,38	45,00	46,62	48,24	49,86	51,48	53,10

Para o cálculo em toneladas do total que será instalado no mesmo período é necessário conhecer o peso estimado dos módulos FV de c-Si. De acordo com Greener (2019), os módulos mais comercializados no Brasil são os de 250 Wp com peso de 22 kg. Isso levaria a um fator de 0,088 t/GW que está em acordo com o range pesquisado na literatura. Esse fator foi adotado para estimar o total acumulado instalado, em toneladas, de módulo FV de c-Si por ano. Ainda que as tendências indiquem a redução no tamanho e peso dos módulos FV ao longo dos anos, devido a dificuldade de avaliação da extensão exata e a natureza dessa mudança, o potencial

² Para os anos de 2012 e 2013 as potências acumuladas em GW são de 0,0004 e 0,0018 respectivamente

³ Para os anos de 2012, 2013 e 2014 as potências acumuladas em GW são inferiores a 0,01.

dessa redução não foi considerado no presente estudo. Dessa forma, os totais acumulados da tabela 43 foram multiplicados pelo fator de 0,088 t/GW, totalizando os valores de módulos FV da tecnologia c-Si, em toneladas, mostrados na tabela 44.

Tabela 44 – Estimativa do total instalado acumulado de módulo FV da tecnologia c-Si em toneladas no período de 2012 a 2050

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
t x 10³	0,03	0,14	0,41	1,31	6,67	14,58	24,68	80,13	65,32	189,43	313,53
Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
t x 10³	437,64	561,75	685,86	809,96	934,07	1.058,18	1.182,29	783,84	1.026,82	1.269,81	1.512,80
Ano	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
t x 10³	1.755,79	1.998,78	2.241,77	2.484,76	2.727,75	2.970,74	3.213,73	3.354,82	3.495,91	3.637,00	3.778,09
Ano	2045	2046	2047	2048	2049	2050					
t x 10³	3.919,18	4.060,27	4.201,36	4.342,45	4.483,54	3.354,82					

5.2. EXPECTATIVA DO TOTAL DE RESÍDUOS GERADOS

A fim de calcular o total de módulos que serão descartados por ano utilizou-se o tempo de vida útil estimado de 25 anos. Observou-se também, de acordo com IRENA/IEA-PVPS (2016) que no cálculo dessa projeção deve-se considerar cenários de perda. Essas perdas estão distribuídas ao longo dos anos de vida útil dos módulos e seus percentuais estão apresentadas na tabela 45.

Tabela 45 – Coeficientes de perdas durante o ciclo de vida dos módulos FV

0,50%	Perdas transporte - aplicado sobre a massa acumulada de resíduo ao longo de todo período de 2012 a 2050
0,50%	Aplicado sobre a massa acumulada de resíduo após 2 anos – de 2014 a 2050
2,00%	Aplicado sobre a massa acumulada de resíduo após 10 anos – de 2022 a 2050
4,00%	Aplicado sobre a massa acumulada de resíduo após 15 anos – de 2027 a 2050
100,00%	Aplicado sobre a massa acumulada de resíduo para o fim da vida útil, após 25 anos – de 2037 a 2050

Por fim, os coeficientes de perdas foram aplicados aos totais da tabela 44, obtendo-se assim o totais acumulados, em toneladas, de resíduo de módulos FV da tecnologia c-Si que serão gerados ao longo de 2012 a 2050 (tabela 46).

Tabela 46 – Estimativa do total de resíduo de módulo FV da tecnologia c-Si em toneladas no período de 2012 a 2050

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
t x 10³	-	-	-	0,01	0,04	0,08	0,16	0,47	0,45	1,35	1,89
Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
t x 10³	3,14	4,38	5,64	6,99	8,40	9,85	12,24	10,78	15,42	17,53	24,66
Ano	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
t x 10³	28,98	38,85	48,73	58,63	68,62	78,74	79,00	95,73	114,83	135,46	177,36
Ano	2045	2046	2047	2048	2049	2050					
t x 10³	179,58	310,99	442,40	573,81	705,22	830,28					

5.3. CÁLCULO DOS CUSTOS DE RECICLAGEM E DAS RECEITAS ESPERADAS COM A RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS

De acordo com Choi e Fthenakis (2014) e Cucchiella et al. (2015), para o caso de uma planta de reciclagem automatizada, que permitiria a separação dos materiais e um eficiente sistema térmico e químico para a maior recuperação de materiais, a rentabilidade do processo de reciclagem é garantida somente dentro de uma capacidade mínima de resíduos gerados de 20.000 toneladas por ano, ou seja, em plantas industriais. Adotando a conclusão desses autores, temos na tabela 46 que esse total é alcançado no ano de 2033, quando o total acumulado de resíduo será de 24.656,00 toneladas. Desta forma, a análise de viabilidade econômica proposta nesse estudo usará os totais estimados para o ano de 2033.

O cálculo do total de material recuperado leva em consideração o percentual de cada componente na composição do módulo FV c-Si, assim como a eficiência de recuperação considerada no processo estudado. A estimativa do total em tonelada de cada componente que poderá ser recuperado está apresentado na tabela 47.

Tabela 47 – Estimativa do total de componentes recuperados para o ano de 2033

Componente	Vidro	Alumínio (moldura)	Silício	Prata	Cobre	Al
% do material na composição do módulo FV	72,30%	11,95%	3,65%	0,05%	0,20%	0,32%
Taxa de recuperação	98,00%	100,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%
Total recuperado (t x 10 ³)	17,47	2,95	0,85	0,01	0,05	0,07

Os percentuais dos componentes nos módulos FV podem sofrer alterações ao longo dos anos devido à escassez de recursos e ao aumento de preço, principalmente dos metais preciosos como a prata, além da possibilidade de haver pesquisas e desenvolvimento de materiais substitutos. Porém, para efeito de análise, nesse estudo essa tendência não foi considerada.

O processo de reciclagem gera resíduos comuns e resíduos perigosos. De acordo com o processo analisado nesse estudo, para a quantidade de 1.000 kg de resíduo reciclado, foi gerado os seguintes totais de resíduos: 14,46 de resíduo comum (vidro) e 70,41 kg de resíduo perigoso (cinzas do processo térmico e lodo do processo químico). Esses valores representam 0,01% e 7% respectivamente do total de 1.000 kg. Assim, considerando esses percentuais, o total de resíduo comum será de 246,56 toneladas e o total de resíduo perigoso será de 1.725, 92 toneladas.

Os valores médios de mercado para os materiais reciclados (vidro, alumínio, cobre, silício e prata) e dos custos de envio para aterros foram obtidos a partir de uma média dos valores citados, em dólar, de diferentes referências na literatura (CHOI; FTHENAKIS, 2014; MASOUMIAN, 2014; CUCCHIELLA et al., 2015; D'ADAMO et al., 2017; HUANG, 2017). Os valores dos metais consideram que a tecnologia de reciclagem disponível no mercado consegue recuperar os materiais com 100% de pureza. O valor para o processo de reciclagem de módulos FV de c-Si foi obtido do estudo de McDonald e Pearce (2010) que cita um processo de reciclagem similar ao considerado no item 3.6 desse estudo. Há uma tendência no aumento dos valores de mercados dos metais utilizados nos módulos FV e também nos custos para tratamento de resíduos. Porém, essa perspectiva não foi considerada nessa avaliação. Os valores obtidos foram convertidos para reais, utilizando a cotação de 1 dólar igual a 3,80 reais, conforme cotação do BACEN de Junho de 2019 (tabela 48).

Tabela 48 – Valores de mercado de materiais e tratamento de resíduos

Material	Preço mercado (R\$/kg)
Vidro	0,44
Alumínio	7,04
Cobre	21,56
Silício	58,05
Prata	2.211,43

Tratamento	Preço mercado (R\$/kg)
Aterro comum	0,19
Aterro perigoso	1,50
Reciclagem	7,06

A partir das quantidades estimadas de materiais que serão recuperados da tabela 47 e dos valores apresentados na tabela 48, foi possível calcular o total que seria gerado de receita através da venda dos materiais recuperados na reciclagem, os custos do processo de reciclagem desses materiais e os custos para disposição em aterro dos resíduos gerados no processo. Como benefício econômico do processo de reciclagem deve-se somar também os custos evitados de disposição em aterro dos materiais que foram recuperados na reciclagem. Esse valor é obtido considerando os mesmos totais recuperados em toneladas da tabela 47 e o valor de custo de envio para aterro comum da tabela 48. Os valores estimados de receitas e custos estão apresentados na tabela 49.

Tabela 49 – Receitas e custos para a reciclagem dos módulos FV

Totais	R\$
(1) Receita obtida com o material recuperado	59.459.637,29
(2) Receita obtida com o custo evitado com aterro	4.088.657,34
(3) Custo de reciclagem	168.580.387,48
(4) Custo para disposição em aterro comum	46.215,18
(5) Custo para disposição em aterro especial	2.499.821,32

Finalmente subtraiu-se das receitas (1) e (2), os custos da reciclagem (3) e de disposição em aterros (4) e (5), para se obter o que seria a provável viabilidade financeira do

processo de reciclagem. O valor negativo encontrado de R\$ 107. 578.129,36 indica que os custos de reciclagem excedem a receita obtida da revenda de materiais recuperados (vidro, plástico, alumínio e metais) dos módulos FV e do custo evitado com o descarte desses resíduos em aterros. Comparando os custos de tratamento, por kg de resíduo, expostos na tabela 48, verificamos que o custo da disposição em aterro é extremamente baixo em relação ao custo de reciclagem. Ainda que considerando que parte do resíduo gerado é perigoso e que o custo de descarte desse tipo de material em aterro tem valor diferenciado, o custo da reciclagem dos módulos FV como opção de gestão de fim de vida é claramente maior que as receitas obtidas.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou a aplicação da ACV para analisar os potenciais impactos e benefícios ambientais do fim de vida dos módulos FV de c-Si, comparando três cenários simulados como alternativas de gestão do fim de vida desses sistemas. Conforme a metodologia de ACV demanda, os inventários de ciclo de vida foram apresentados de forma clara, assim como as considerações e premissas, de maneira a garantir a correta interpretação dos resultados fornecidos.

Os resultados apresentados demonstraram que o cenário de reciclagem, comparado aos outros dois cenários propostos (incineração e disposição em aterro) produziu maior impacto ambiental. Na categoria de mudanças climáticas, por exemplo, enquanto o indicador para o cenário de reciclagem foi de $3,309E+05$ kg CO₂ eq, para o cenário de disposição em aterro foi de $-3,214E+01$ kg CO₂ eq.

Em todos os cenários para tratamento do resíduo de módulo FV o uso de energia elétrica contribuiu significativamente para os resultados gerais da AICV. Contudo na reciclagem, há etapas com elevado consumo de energia, como por exemplo a etapa de tratamento químico que consome cerca de 50% de toda energia envolvida na reciclagem. Enquanto na incineração e aterro o consumo é da ordem de 0,06 kWh/kg de resíduo, na etapa de tratamento químico o consumo é de 1,29 kWh/kg de resíduo. Melhorar a eficiência, substituir a fonte energética ou recuperar a energia nos processos pode ser a chave para reduzir o impacto ambiental. Tornar o processo de reciclagem dos módulos industrial, com maiores volumes de resíduos processados, otimizaria o consumo de kWh por kg de material processado, uma vez que esse consumo passaria a ser dividido por uma quantidade maior de material processado.

O impacto ambiental do processo de reciclagem está relacionado também ao uso de HNO₃ na etapa de recuperação dos metais. Pode ser interessante que pesquisas e desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem explorem alternativas para minimizar o uso desses insumos.

No entanto, conforme demonstrou a AICV, a recuperação de materiais no cenário da reciclagem para tratamento de resíduos de módulos FV permitiu benefício ambiental significativo em 9 categorias de impacto em relação aos outros cenários verificados. Na categoria de ocupação do solo, por exemplo, o indicador foi de $-5,775E+01$ m².ano para a reciclagem e de $-1,122E+01$ m².ano para o cenário de aterro.

O benefício ambiental da reciclagem está relacionado à recuperação de 100% do alumínio da moldura e das altas taxas de recuperação dos metais da célula FV que são alcançadas com a tecnologia de reciclagem do estudo de referência, especialmente em relação ao SiMG. A recuperação da prata também tem contribuição significativa, especialmente na categoria de impacto de depleção de recursos minerais. A possibilidade de recuperação desses metais e seu uso para a produção de novas células FV é um fator que deve ser melhor investigado.

A produção de energia e calor, através do aproveitamento energético e cogeração que ocorre em uma das etapas do processo de reciclagem não produziu benefício relevante.

O benefício ambiental da recuperação do vidro e do plástico foi excluído na estratégia da incineração e disposição em aterro durante a ACV desse trabalho. A inclusão da recuperação desses materiais poderia gerar benefício ambiental a essas duas alternativas de tratamento, o que tornaria o processo de reciclagem estudado um cenário ainda menos favorável ambientalmente.

Na análise econômica sucinta realizada nesse trabalho, verificou-se que o processo de reciclagem da tecnologia avaliada é uma opção desfavorável, pois os custos de reciclagem superaram em quase 3 vezes as receitas que poderiam ser motivadas pelas vendas dos materiais recuperados no processo. Desta forma a reciclagem não possui incentivo para sua aplicação no presente momento. As quantidades de silício e de prata, que possuem maior valor comercial, representam baixos percentuais no total de componentes dos módulos. A prata por exemplo, representa 0,05% do total de material na composição do módulo.

Sob o aspecto econômico portanto, os resultados indicaram que precisaria haver outra abordagem não baseada no aspecto comercial, para assegurar o uso da reciclagem em escala industrial. A presença de metais pesados e de substâncias tóxicas nos componentes dos módulos FV, o reaproveitamento de recursos raros e energia evitada, além de regulamentação que impõem a responsabilidade aos fabricantes após a desinstalação dos sistemas, tem motivado

algumas ações voluntárias e investimentos em sistemas de reciclagem para os sistemas FV instalados. Contudo o lado econômico dessa prática não está bem explorado na literatura.

Uma vez que se espera que os resíduos de módulos FV aumentará nas próximas décadas, a partir da ACV proposta nesse trabalho, sugestões para trabalhos futuros poderão ser:

- Pesquisar outros processos de tratamento e recuperação de componentes dos módulos FV que tenham sido desenvolvidos e testados a fim de avaliar a melhor prática de gestão de fim de vida;
- Ampliar o estudo de ACV da etapa de fim de vida para outras tecnologias de módulos FV como forma de comparar tecnologias de menor impacto ambiental nessa etapa de ciclo de vida;
- Aprofundar sob a perspectiva econômica, elaborando estudos de viabilidade financeira de gestão de fim de vida de outras tecnologias FV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos. Análise de viabilidade técnica e econômica.** Campinas: Inventta Consultoria, 2013.

ABELIOTIS, K. **Life cycle assessment in municipal solid waste management.** Harokopio University of Greece, 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Classificação de resíduos sólidos.** NBR 10004. Disponível em: <<http://aslaa.com.br/legislacoes/NBR%20n%2010004-2004.pdf>>. Acesso em: Junho de 2019.

ALSEMA, E.A. et al. **Environmental impacts of PV electricity generation – a critical comparison of energy supply options.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v.156, pp 101–111, 2006.

ANEEL. **Geração distribuída.** Disponível em: < www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em Junho de 2019.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2017.** Rio de Janeiro: ANP, 2017.

AUER, A. **Photovoltaic module decommissioning and recycling in Europe and Japan - current methodologies, norms and future trends.** Master's thesis. European Master in Environmental Science (EnvEuro). Uppsala, 2015.

BACEN - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação do dólar.** Disponível em: < <https://www.bcb.gov.br>>. Acesso em Julho de 2019.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos. Gestão, uso e sustentabilidade.** Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. Lei n. 12.305,2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Disponível em: < <http://www.planalto.gov.br>> Acesso em Outubro de 2017.

BRASIL. Decreto nº 7.404, 2010. **Regulamenta a lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos, cria o comitê interministerial da política nacional de resíduos sólidos e o comitê orientador para a implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências.** Disponível em: < <http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em Outubro de 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários.** Relatório final, 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Cenário econômico 2050.** Rio de Janeiro: MME/EPE, 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Demanda de Energia 2050.** Rio de Janeiro: MME/EPE, 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica,** 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em Junho de 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário do setor de transformação de não-metálicos.** Brasília: MME, 2018b

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Proposta de resolução sobre REE**, 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/4E1B1104/MinutaREEE_Recladores.pdf>. Acesso em Julho de 2018.

BÜHLER, A. J. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, 2018.

CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. **Relatório: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações**. Florianópolis, 2017.

CHOI, J-K; FTHENAKIS, V. **Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives**. Journal of Cleaner Production, v. 66, pp 443-449, 2014.

COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

CORCELLI, F. et al. **Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life**. Ecological Indicators, 2016.

CORCELLI, F. et al. **End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels. An energy-based case study**. Journal of Cleaner Production, v. 161 pp 1129-1142, 2017.

CUCCHIELLA, F. et al. **End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 47, pp 552-561, 2015.

D' ADAMO, I. et al. **Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules**. International Journal of Photoenergy, v. 2017, 2017.

DIAS P. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos Fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado. UFRGS. Porto Alegre, 2015.

DIAS P. et al. **Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules**. Waste Management, v. 60, pp 716-722, 2016.

DOI, T. et al. **Experimental study on PV module recycling with organic solvent method**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 67, pp 397-403, 2001.

DOKA G. Life cycle inventories of waste treatment services. Part II. Waste management. Ecoinvent report no. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.

EUROPEAN COMMISSION. **Diretiva 2012/19/EU, Diretiva do Parlamento Europeu do Conselho de 4 Julho de 2012 sobre resíduo de equipamentos eletro-eletrônicos (REEE)**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>>. Acesso em Agosto de 2018.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for life cycle assessment - Detailed guidance**. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

EUROPEAN COMMISSION - DG ENV. **Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive**. Final Report, 2011.

FARRELL, C. et al. **Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules**. Scientific Reports, v. 9, article number: 5267, 2019.

FRISSON, L. et al. **Recent improvements in industrial PV module recycling**. 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow, 2000.

FTHENAKIS, V. **End-of-life management and recycling of PV modules**. Energy Policy, v. 28, pp 1051-1058, 2000.

FTHENAKIS, V. et al. **Life cycle greenhouse gas emission of thin-film photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization**. J. Ind. Ecol., vol. 16, pp 110-121, 2012.

GOE, M.; GAUSTAD, G. **Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis**. Applied Energy, v. 120, pp. 41-48, 2014.

GOEDKOOOP, M. et al. **Recipe 2008: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. First edition. Netherlands: PRé Consultants., 2013.

GOEDKOOOP, M. et al. **Introduction to LCA with SimaPro**. PRé Consultants, 2016. Disponível em: <<https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro8IntroductionToLCA.pdf>>. Acesso em Julho de 2018.

GONZÁLEZ, J. A. C. et al. **Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables**. Madrid: Pearson Educación S.A., 2009.

GREENER. **Sumário executivo. Estudo estratégico. Mercado fotovoltaico de geração distribuída. 1o semestre de 2019**. Disponível em: <greener.com.br>. Acesso em Junho de 2019.

HELD, M. **Life cycle assessment of CdTe module recycling**. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg, 2009.

HELD, M. **LCA screening of a recycling process for silicon based PV modules**. Fraunhofer IBP, dept. Life Cycle Engineering, 2013. Disponível em< http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf>. Acesso em Julho de 2018.

HUANG, W-H; TAO, M. **A simple green process to recycle Si from crystalline-Si solar cells**. IEEE, 978-1-4799-7944-8, 2015.

HUANG, W-H. et al. **Recovery of valuable and toxic metals from crystalline-Si modules**. IEEE, 978-1-5090-2724-8, 2016.

HUANG, W-H. et al. **Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules**. Solar Energy, v. 144, pp 22–31, 2017.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, 2016.

IEA-PVPS - International Energy Agency - **Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity**. 3rd Ed. Report IEA-PVPS T12-08, 2016.

IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme. **Snapshot of global photovoltaic markets**. Report IEA-PVPS T1-33, 2018 a.

IEA-PVPS - International Energy Agency - Photovoltaics Power Systems Programme. **End-of-life management of photovoltaic panels: trends in PV module recycling technologies**. Report IEA-PVPS T12-10, 2018 b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO . **Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Europe standard EN ISO 14040 and 14044**. Genève, 2009. Disponível em: <https://social.stoa.usp.br/articles/0028/6085/ABNT_NBR_ISO_14040_Parte_1.pdf> Acesso em Julho de 2018

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. Report. 2001. Disponível em: <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gp/english/>> Acesso em Maio de 2019.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY; IEA-PVPS - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - PHOTOVOLTAICS POWER SYSTEMS PROGRAMME. **End of life management: solar photovoltaics panels**. Relatório IRENA e IEA-PVPS, 2016.

ITO, M. **Life Cycle Assessment of PV Systems**. Japão: Tokyo Institute of Technology Intech, 2011.

ITRPV-VDMA. **International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRV). 2018 Results**. 10th Edition, 2019. Disponível em: <<https://itrvp.vdma.org/>>. Acesso em Junho 2019.

JUNGBLUTH, N. et al. **Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss Ecoinvent database**. Progress in photovoltaics: Research and applications, 2004. Disponível em: <www.esu-services.ch>. Acesso em Julho 2018.

KANG, S. et al. **Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules**. Renewable Energy, v. 47, pp 152-159, 2012.

LATUNUSSA, C. E. L. et al. **Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels. Life Cycle Assessment and Implications for Critical Raw Materials and Ecodesign**. European Commission. JRC Technical Report, 2016.

MARGALLO, M. et al. **Best Available Techniques in Municipal Solid Waste Incineration: State of the Art in Spain and Portugal**. Chemical Engineering Transactions, v. 29, 2012.

MARGALLO, M. et al. **Life cycle assessment modelling of waste-to-energy incineration in Spain and Portugal**. Waste Management & Research, v. 32, pp 492–499, 2014.

MASOUMIAN, M. **End-of-life management of photovoltaic modules**. Dissertation. Technische Universität Wien, 2014.

MCDONALD, N.C.; PEARCE, J.M. **Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules**. Energy Policy, v. 38, pp 7041-7047, 2010.

MUCHOVA, L. et al. **End-of-waste Criteria for Copper and Copper Alloy Scrap: Technical Proposals**. European Commission. Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, 2011.

MÜLLER, A. et al. **Life cycle analysis of solar module recycling process**. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., v. 895, 2006.

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia Fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, 2008.

OLIVEIRA, M. C. B. R. **Avaliação de ciclo de vida de embalagens plásticas de óleo lubrificante: um estudo de caso**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Acompanhamento mensal dos intercâmbios internacionais**. ONS. Brasília, 2018.

PARK, J.; PARK, N. **Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules**. Royal Society of Chemistry – RSC. Advances, 2014.

PARK, J. et al. **Eco-friendly method for reclaimed silicon wafer from photovoltaic module: from separation to cell fabrication**. Royal Society of Chemistry -RSC. Green Chemistry, 2015.

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

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPREL-CRESESB, 2014.

- PV CYCLE. **Annual Report 2017**. Disponível em <<http://www.pvcycle.org/>>. Acesso em: Agosto de 2018.
- RADZIEMSKA, E. K. et al. **Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods**. *Solar Energy Materials and Solar Cells* v. 94, pp 2275-2282, 2010.
- RADZIEMSKA, E. K.; OSTROWSKI, P. **Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules**. *Renewable Energy*, v. 35, pp. 1751-1759, 2010.
- RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. Tese de doutorado Escola Politécnica da universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- ROSA, L.P. et al. **Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais**. In: TOLMASQUIM, M.T. **Fontes Alternativas de Energia no Brasil - CENERGIA**. 1a Ed. Editora Interciência, 2003.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.
- RÜTHER, R. et al. **Contribuições à consulta pública 010/2018 ANEEL. Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC**. Florianópolis: Laboratório FOTOVOLTAICA-UFSC, 2018.
- SERI - SoLar Energy Research Institute. U.S. Department of Energy. **Basic Photovoltaic Principles and Methods**. Colorado, 1982.
- SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry. **Guidelines for life-cycle assessment: a code of practice**. Ed. 1. Pensacola, 1993.
- SIMAPRO. **Database manual**. PRé Consultants, 2008. Disponível em < [https:// http://www.pre.nl](https://http://www.pre.nl) >. Acesso em Setembro de 2018.
- TAMMARO et al. **Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emission and in ashes**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, pp 103-112, 2015.
- TAO, J.; YU, S. **Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 141 pp 108–124, 2015.
- TIAGO, G. L. F. et al. **Study of the energy balance and environmental liabilities associated with the manufacture of crystalline Si photovoltaic modules and deployment in different regions**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 144 pp 383-394, 2016.
- TOLMASQUIM, M.T. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- TOYOTA. **Technical Publications**. Sweden, 2017. Disponível em: < <https://toyota-forklifts.eu/>>. Acesso em Julho de 2018.
- VCSOLAR. Disponível em: <<https://vocsolar.com.br/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em Maio de 2019.
- VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP. Mestrado Engenharia Química. São Paulo, 2008.
- WANG, T-H. et al. **Recycling of Materials from Silicon Base Solar Cell Module**. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012 38th IEEE, pp 2355-2358, 2012.
- WILD-SCHOLTEN, M. **Energy payback times of PV modules and systems**. *Workshop Photovoltaik-Modultechnik*. Köln, 2009.
- ZBICINSKI et al. **Product design and life cycle assessment**. The Baltic University Press: Uppsala, 2006.

ZHONG, Z.W. et al. **LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine**. *Renewable Energy*, v. 36, pp 2227–2237, 2011.