



AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DE FONTES
RENOVÁVEIS DE ENERGIA: PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDO DE
CASO PARA A FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA

João Gabriel Gonçalves de Lássio

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: David Alves Castelo Branco

Alessandra Magrini

Rio de Janeiro

Agosto de 2022

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DE FONTES
RENOVÁVEIS DE ENERGIA: PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDO DE
CASO PARA A FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA

João Gabriel Gonçalves de Lássio

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Prof. David Alves Castelo Branco
Prof^a. Alessandra Magrini

Aprovada por: Prof. David Alves Castelo Branco
Prof^a. Alessandra Magrini
Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior
Prof^a. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Prof. Sérgio Almeida Pacca

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2022

Lassio, João Gabriel Gonçalves de

Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida de fontes renováveis de energia: proposta metodológica e estudo de caso para a fonte solar fotovoltaica/ João Gabriel Gonçalves de Lassio. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XVII, 220 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: David Alves Castelo Branco

Alessandra Magrini

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 159-178.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Sustentabilidade. 3. Fontes renováveis. I. Magrini, Alessandra. II. Castelo Branco, David Alves. III. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. IV. Título

À minha mãe Marlene Lassio,
cuja doação incondicional permitiu
que eu trilhasse o meu caminho até aqui.
Aos meus avós Arlete Gomes e
Sebastião Gonçalves (*in memoriam*)
que partiram durante a realização deste trabalho.

The presence of man in the world had been a first and unquestionable given, from which all idea of obligation in human conduct started out. Now it has itself become an object of obligation.

Hans Jonas, *The Imperative of Responsibility*

AGRADECIMENTOS

Ao longo dos meus anos de doutoramento, muitas foram as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese e que merecem meus sinceros agradecimentos.

Começo pelos professores Alessandra Magrini e David Castelo Branco, os quais me acolheram no PPE e apostaram neste projeto, ajudando a transformá-lo em realidade. A ambos também devo um agradecimento adicional. À Alessandra, pela paciência e dedicação nas nossas longas conversas. Muito obrigado pelos seus apontamentos sempre oportunos e precisos. Ao David, pela serenidade e disponibilidade em compartilhar todo o seu conhecimento técnico em um sem número de videoconferências em tempos de isolamento social. Sou muito grato por trazer novas perspectivas e desafios para enriquecer esta tese. Agradeço a vocês ainda pela oportunidade de integrar equipes de alguns projetos de pesquisa.

Sou grato também aos demais professores e funcionários do PPE. Ao professor Amaro Pereira, agradeço especialmente pelo apoio e confiança depositada em mim em diferentes momentos do meu doutoramento. À Sandra e ao Paulo, por sempre atenderem prontamente às minhas demandas e ajudarem com os inúmeros trâmites acadêmicos.

Ao CNPq, agradeço pelo financiamento que viabilizou a realização desta pesquisa. Em tempos como este em que vivemos, nunca é demais ressaltar a importância dessa e de outras agências de fomento à pesquisa que possibilitam o desenvolvimento de outros trabalhos acadêmicos relevantes para o país e o mundo.

Aos membros integrantes da minha banca, meu obrigado por aceitarem o convite, pela leitura cuidadosa e atenta e por compartilharem valiosos comentários que trouxeram contribuições essenciais a este trabalho.

Ao CEPEL que apoiou a minha formação acadêmica e profissional durante os nossos últimos quatro anos de colaboração e forneceu a infraestrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço à equipe do projeto AAEXP-MATRIZ do DTS, Kátia Garcia, Igor Raupp, Alexandre Mollica, Luciana Paz e Valdir Correa pelas reflexões e diálogos que em muito contribuíram para o amadurecimento da minha pesquisa. Em especial, à Denise Matos, minha supervisora e colega de doutorado, pela credibilidade e possibilidade de compartilhar e discutir meus achados e dúvidas.

Estendo meus agradecimentos aos meus amigos da sala C-26, Pedro Lira, Rafael Rates, Miryam Gerk, Rafael França, David Silva e Daniel Argôlo, por tornarem os intensos dias de trabalho no CEPEL mais leves. Sobram boas lembranças dos nossos almoços e os bate-papos que se seguiam na Baía 3. À Cibelle Trama, sou grato também por construirmos um espaço muito precioso de troca ao longo da dura caminhada que é o doutorado.

Ao CENPES, agradeço pela disposição em fornecer informações técnicas da UFV-AR. Em especial, à Ana Paula Guimarães do DTS do CEPEL e ao Adriano Couto e Rodrigo Guido do CENPES, assim como às suas respectivas equipes de trabalho, que viabilizaram a realização do estudo de caso desta tese.

Com a mesma gratidão, não posso deixar de mencionar aqui amigos que sempre se fizeram presentes nesses anos de doutorado. À Caroline Rangel e Mayara Amario, que tanto me incentivaram ao longo do percurso desde a graduação até aqui. À Fernanda Dutra e Carolina Dutra, que me acompanham há tanto tempo e estiveram sempre na torcida. À Kallie Borba e sua família, que tenho o privilégio de tê-los vibrando e celebrando cada conquista. E ao André Zuzarte, essencial nessa jornada, onde encontrei, por diversas vezes, o ânimo necessário para a conclusão desta pesquisa.

Por fim, mas longe de ser menos importante, gostaria de expressar profunda gratidão à minha família, minha célula de segurança e meu maior refúgio. À minha irmã Caroline Lasso, pela parceria incondicional e por sempre acreditar em mim. Ao Roberto Jardim, pela presença e por todo o suporte e apoio nas minhas decisões. E à minha mãe Marlene Lasso, por todo amor, cuidado e doação, sem medir esforços. Obrigado!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA DE FONTES
RENOVÁVEIS DE ENERGIA: PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDO DE
CASO PARA A FONTE SOLAR FOTOVOLTAICA

João Gabriel Gonçalves de Lássio

Agosto/2022

Orientadores: David Alves Castelo Branco

Alessandra Magrini

Programa: Planejamento Energético

Embora correspondam a principal resposta à expansão do consumo de energia e à descarbonização da economia global, as tecnologias de transformação de energia de origem renovável não estão isentas de interações socioambientais, especialmente no que se refere às suas cadeias de produção. Dentro desse contexto, a presente pesquisa tem por objetivo desenvolver uma metodologia de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) para avaliar os seus desempenhos ambiental, social e econômico sob uma perspectiva de ciclo de vida. Assim, propõe a integração da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), da Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e do Custo do Ciclo de Vida (CCV) com o Processo Hierárquico Analítico (AHP) para avaliá-las segundo 28 indicadores de sustentabilidade. Para efeito de validação, a metodologia de ASCV proposta foi aplicada em um estudo de caso dedicado à comparação de quatro sistemas de uma usina solar fotovoltaica a fim de ranqueá-los em termos de sustentabilidade. De um modo geral, a metodologia se mostrou consistente com relação ao seu propósito central e gerou resultados coerentes com as hipóteses adotadas nas análises de sensibilidade. Desse modo, demonstrou ter o potencial de apoiar o processo decisório do setor energético nacional quanto à seleção de alternativas tecnológicas mais sustentáveis para geração de energia de origem renovável.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF RENEWABLE ENERGY
SOURCES: METHODOLOGY PROPOSAL AND CASE STUDY OF A SOLAR PV
POWER PLANT IN BRAZIL

João Gabriel Gonçalves de Lassio

August/2022

Advisors: David Alves Castelo Branco

Alessandra Magrini

Department: Energy Planning Program

Although renewable energy sources are the primary way out of the expansion of energy consumption and the decarbonization of the economy at a global level, they are not exempt from socio-environmental interactions, especially when considering their complete production chains. In this context, this research aims to develop a Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) methodology to assess the environmental, social, and economic performance of these energy sources from a life cycle perspective. For this purpose, it proposes the integration of Life Cycle Assessment (LCA), Social Life Cycle Assessment (S-LCA), and Life Cycle Costing (LCC) with the Analytic Hierarchy Process (AHP) to assess them against 28 sustainability indicators. For validation purposes, the proposed LCSA methodology is applied in a case study dedicated to comparing four systems of a solar PV power plant, ranking them in terms of sustainability. In general, the methodology proved to be consistent with its central purpose and provided results per the hypotheses adopted in the sensitivity analysis. Thus, it has the potential to support the decision-making process of the national energy sector regarding the selection of more sustainable technological alternatives for the generation of energy from renewable sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema simplificado da estrutura metodológica.....	17
Figura 2.1 – Integração dos principais ODS relacionados a energia.....	27
Figura 2.2 – Evolução prevista da capacidade instalada no período de dez anos para as fontes alternativas e renováveis de energia (excluindo PCHs e mini-UHEs)	32
Figura 2.3 – Ilustração da estrutura da ASCV	37
Figura 2.4 – Etapas da ACV	38
Figura 2.5 – Esquema da revisão sistemática	45
Figura 2.6 – Subconjuntos dos artigos selecionados a partir da revisão sistemática.....	47
Figura 2.7 – Distribuição geográfica dos artigos a partir da revisão sistemática	48
Figura 2.8 – Distribuição temporal da literatura revisada	49
Figura 2.9 – Distribuição da literatura revisada por periódico	49
Figura 2.10 – Distribuição dos artigos segundo as fontes de energia abordadas	50
Figura 2.11 – Distribuição dos artigos segundo indicadores ambientais	52
Figura 2.12 – Distribuição dos artigos segundo indicadores sociais	53
Figura 2.13 – Distribuição dos artigos segundo indicadores econômicos.....	55
Figura 2.14 – Ilustração da integração de métodos de AMD com a ASCV.....	57
Figura 2.15 – Esquema de uma estrutura hierárquica simples do método AHP	60
Figura 2.16 – Fluxograma geral da aplicação do método AHP.....	61
Figura 2.17 – Ilustração do conceito de <i>verdade absoluta</i> e de <i>verdade parcial</i>	69
Figura 2.18 – Gráfico da função de meia-idade segundo a teoria clássica dos conjuntos e a Teoria dos Conjuntos Nebulosos	70
Figura 2.19 – Ilustração de um conjunto nebuloso genérico e seus componentes	72
Figura 3.1 – Esquema da proposta metodológica para estudos de ASCV	80
Figura 3.2 – Fronteira do sistema <i>cradle-to-grave</i> para geração de energia	83
Figura 3.3 – Fluxos de entrada e saída para um processo unitário	93
Figura 3.4 – Estrutura hierárquica do método AHP aplicada na presente tese.....	105
Figura 3.5 – Diagrama holístico de sustentabilidade.....	108
Figura 4.1 – Localização da UTE-JSP e da UFV-AR (sem escala)	110

Figura 4.2 – Vista superior da UFV-AR e seus sistemas	111
Figura 4.3 – Diagrama unifilar simplificado da UFV-AR.....	111
Figura 4.4 – Três grupos principais de tecnologias solares fotovoltaicas	114
Figura 4.5 – Tipos de estrutura de suporte para sistemas solares fotovoltaicos	116
Figura 4.6 – Esquema da fronteira do sistema definido para a ASCV da UFV-AR	118
Figura 4.7 – Geração de energia elétrica a partir do <i>sistema S1</i>	122
Figura 4.8 – Geração de energia elétrica a partir dos sistemas <i>S2, S3 e S4</i>	122
Figura 4.9 – Esquema da fronteira do sistema definido para a ASCV da UFV-AR	125
Figura 4.10 – Relação dos processos com a dimensão ambiental	126
Figura 4.11 – Relação dos processos com a dimensão social	128
Figura 4.12 – Relação dos processos com a dimensão econômica	131
Figura 4.13 – Resultados da avaliação dos impactos negativos sobre a dimensão ambiental associados a geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR	134
Figura 4.14 – Resultados da avaliação dos impactos positivos sobre a dimensão ambiental dos sistemas da UFV-AR	134
Figura 4.15 – Resultados da avaliação dos impactos negativos sobre a dimensão social associados a geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR.....	135
Figura 4.16 – Resultados da avaliação dos impactos positivos sobre a dimensão social dos sistemas da UFV-AR	136
Figura 4.17 – Resultados da avaliação dos custos associados a geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR	137
Figura 4.18 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para os indicadores <i>ENV01-ENV17</i>	144
Figura 4.19 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para o indicador ambiental <i>ENV18</i>	145
Figura 4.20 – Contribuição das etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR para os indicadores sociais <i>SOC01 e SOC03</i>	145
Figura 4.21 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para o CCV.....	146
Figura 4.22 – Representação gráfica da ASCV dos sistemas da UFV-AR	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Temas socioambientais dos PDEs mais recentes.....	29
Tabela 2.2 – Indicadores ambientais e socioeconômicos considerados pela análise socioambientais dos PDEs para as fontes solar fotovoltaica e eólica.....	31
Tabela 2.3 – Categorias de impacto <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> do <i>ReCiPe 2016</i>	39
Tabela 2.4 – Categorias e subcategorias de impactos sociais da UNEP (2020).....	41
Tabela 2.5 – Escala de valor para julgamentos paritários	62
Tabela 2.6 – Valores de <i>CA</i> para matrizes de comparação.....	63
Tabela 3.1 – Conjunto de indicadores ambientais, sociais e econômicos da ASCV sobre a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis	92
Tabela 3.2 – Tipos de impactos sociais positivos na ACV-S.....	101
Tabela 3.3 – Principais métodos de normalização interna em estudos de ACV	103
Tabela 4.1 – Indicadores ambientais, sociais e econômicos considerados na ASCV ..	119
Tabela 4.2 – Características dos sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR.....	121
Tabela 4.3 – Principais parâmetros adotados para os sistemas da UFV-AR.....	121
Tabela 4.4 – Informações sobre a geração de energia dos sistemas da UFV-AR	121
Tabela 4.5 – Estimativas adotadas para os módulos dos sistemas da UFV-AR.....	123
Tabela 4.6 – Premissas adotadas para outros equipamentos dos sistemas	123
Tabela 4.7 – Estimativas para as quantidades de insumos empregados nos centros de transformação da UFV-AR.....	124
Tabela 4.8 – Principais ICVs da base de dados do <i>Ecoinvent</i> adaptados para a avaliação da UFV-AR com relação a dimensão ambiental	127
Tabela 4.9 – Número de postos de trabalho criados em cada etapa do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR (empregos.ano/MW).....	129
Tabela 4.10 – Número de acidentes em cada uma das etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR (acidentes.ano/kWh)	130
Tabela 4.11 – Avaliação das liberdades civis dos países de origem das tecnologias fotovoltaicas.....	130
Tabela 4.12 – Custos envolvidos nos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR.....	132

Tabela 4.13 – Resultados da AICV ambiental dos sistemas da UFV-AR.....	133
Tabela 4.14 – Resultados da AICV social dos sistemas da UFV-AR.....	135
Tabela 4.15 – Resultados da AICV econômico dos sistemas da UFV-AR.....	137
Tabela 4.16 – Resultados da AICV dos sistemas da UFV-AR normalizados.....	138
Tabela 4.17 – Pesos atribuídos aos indicadores de sustentabilidade.....	139
Tabela 4.18 – Pesos atribuídos as dimensões de sustentabilidade	140
Tabela 4.19 – Resultados da ASCV dos sistemas da UFV-AR.....	141
Tabela 4.20 – Resultados simplificados da ASCV dos sistemas no <i>Cenário 1</i>	149
Tabela 4.21 – Pesos atribuídos as dimensões de sustentabilidade no <i>Cenário 2</i>	150
Tabela 4.22 – Resultados simplificados da ASCV dos sistemas no <i>Cenário 2</i>	151

SIGLAS E ABREVIATURAS

a-Si	Silício amorfo
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACV-S	Avaliação do Ciclo de Vida Social
AED	Análise Envoltória de Dados
AHP	Processo Hierárquico Analítico
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APOS	Allocation at the Point of Substitution
ASCV	Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida
CA	Índice de consistência aleatória
CALCAS	Coordination Action for Innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CdTe	Telureto de cádmio
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGS	Disseleneto de cobre índio e gálio
CML	Institute of Environmental Sciences of Leiden University
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq.	Dióxido de carbono equivalente

COP 21	21ª Conferência das Partes
DEA	Depto. de Otimização Energética e Meio Ambiente
DME	Depto. de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar
DSSC	Células solares fotovoltaicas sensibilizadas por corante
DTS	Depto. de Transição Energética e Sustentabilidade
EC-JCR	Centro Comum de Investigação da Comissão Europeia
E-LCA	Environmental Life Cycle Assessement
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GaAs	Arseneto de gálio
GEE	Gás do efeito estufa
GW	Gigawatt
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IC	Índice de consistência
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEA	Agência Internacional de Energia
ILCD	The International Reference Life Cycle Data System
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
ISO	International Organization for Standardization
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
LCOE	Levelized Cost of Energy
MADM	Multi-attribute Decision Making

MAUT	Teoria da Utilidade Multiatributo
MAVT	Teoria do Valor Multiatributo
MELP	Modelo de Expansão da Geração de Longo Prazo
MIP	Matriz de Insumo-Produto
MME	Ministério de Minas e Energia
MODM	Multi-objective Decision Making
mono-Si	Silício monocristalino
multi-Si	Silício multicristalino
MW	Megawatt
NIMBY	Not in my backyard
NREL	Laboratório de Energia Renovável dos Estados Unidos
NYSERDA	Autoridade de Pesquisa e Desenvolvimento Energético do Estado de Nova York
O&M	Operação e manutenção
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PCH	Pequena central hidrelétrica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PET	Polietileno tereftalato
PLANEL	Modelo de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico
PNE	Plano Nacional de Energia
PSILCA	Product Social Impact Life Cycle Assessment
PVC	Policloreto de vinila
RC	Razão de consistência
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

SHDB	Social Hotspot Database
SIN	Sistema Integrado Nacional
TBL	Triple Bottom Line
TCPO	Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos
TiO ₂	Dióxido de titânio
U.S. DOE	Depto. de Energia dos Estados Unidos da América
UC	Unidade de conservação
UFV-AR	Usina Solar Fotovoltaica de Alto do Rodrigues
UHE	Usina hidrelétrica
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
UTE-JSP	Usina Termelétrica Jesus Soares Pereira

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e relevância da pesquisa	1
1.2. Hipóteses, objetivos e metodologia da pesquisa	12
CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. O planejamento sustentável do setor elétrico e as fontes renováveis.....	20
2.2. A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida	33
2.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida.....	37
2.2.2. Avaliação do Ciclo de Vida Social.....	39
2.2.3. Custo do Ciclo de Vida	42
2.2.4. Desafios na aplicação da ASCV	43
2.3. Indicadores de sustentabilidade: revisão sistemática da literatura	45
2.3.1. Formulação da pergunta	46
2.3.2. Localização dos estudos	46
2.3.3. Seleção e análise dos estudos	46
2.3.4. Análise e síntese	47
2.3.5. Relato e uso dos resultados	56
2.4. Métodos de Apoio Multicritério à Decisão	57
2.4.1. Processo Hierárquico Analítico	59
2.4.2. Lógica Nebulosa.....	68
CAPÍTULO 3. PROPOSTA METODOLÓGICA.....	78
3.1. Etapa 1: Definição de objetivo e escopo	80
3.2. Etapa 2: Processo de modelagem	82
3.2.1. Fronteiras do sistema.....	82

3.2.2. Seleção de indicadores de sustentabilidade	84
3.2.3. Inventário do Ciclo de Vida	93
3.2.4. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida	98
3.2.5. Integração dos resultados	101
3.3. Etapa 3: Interpretação dos resultados.....	106
CAPÍTULO 4. ESTUDO DE CASO	109
4.1. A Usina Solar Fotovoltaica de Alto do Rodrigues	110
4.2. Caracterização ambiental e socioeconômica de Alto do Rodrigues.....	112
4.3. Aplicação da proposta metodológica	113
4.3.1. Etapa 1: Definição de objetivo e escopo	113
4.3.2. Etapa 2: Processo de modelagem	118
4.3.3. Etapa 3: Interpretação dos resultados	142
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
ANEXOS.....	181
A. Anexo A	182
B. Anexo B.....	183
Inventário do Ciclo de Vida Ambiental.....	183
Inventário do Ciclo de Vida Social.....	215
Inventário do Ciclo de Vida Econômico	216
C. Anexo C	218
Resultados da verificação de sensibilidade	218

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Tradicionalmente pensada sob a lógica de uma economia isolada da natureza e dependente de combustíveis de origem fóssil, a noção de suprimento energético foi, durante muito tempo, vinculada a um progresso estritamente econômico e contínuo. Fenômenos externos aos mecanismos do mercado passavam despercebidos à visão dos economistas neoclássicos (Georgescu-Roegen, 1971; Passet, 1996). À luz dos crescentes riscos e degradação ambientais das últimas décadas, o mundo vem experimentando um movimento, ainda incipiente, de afastamento deste paradigma mecanicista na medida em que se orienta para uma economia de baixo carbono. Neste sentido, a compreensão mais nuançada acerca das implicações ambientais e sociais vinculadas à produção, conversão e uso de energia vem compelindo uma transição energética no sentido das ditas energias renováveis (Mancebo & Sachs, 2015; Yergin, 2014).

Desde os tempos pré-industriais, o homem vem produzindo e alocando o excedente econômico sob uma demanda energética crescente (Sachs, 2007). A construção das sociedades modernas, bem como o aprimoramento do bem-estar humano até aos níveis atuais, só foi possível à custa de uma forte dependência em energia barata, abundante e, talvez, em última análise, *suja* (Mancebo & Sachs, 2015; Passet, 1996). Somente nos últimos cinquenta anos, a oferta de energia quase que triplicou (IEA, 2021a). O mais recente balanço energético mundial, preparado pela Agência Internacional de Energia (IEA), revela que essa tendência se refletiu em um incremento de aproximadamente 2,2% sobre a produção de energia no período de 2018 a 2019. Reitera, ainda, o predomínio continuado do trio carvão mineral, petróleo e gás natural – que responde por mais de 80% do total da energia ofertada mundialmente (IEA, 2021a).

O Brasil se insere no grupo de países em desenvolvimento e propulsores da ampliação da oferta de energia mundial. Na última década, o país vivenciou um aumento anual médio de cerca de 2,0% na sua oferta interna de energia (Brasil, 2020a, 2021a). Olhando à frente, as projeções atuais sugerem uma evolução semelhante até meados da próxima década, cujo crescimento médio é estimado em 2,5% ao ano¹. Longe de ser uma exclusividade brasileira, o aumento na oferta de energia é resultado da dilatação não só demográfica, mas também do consumo de energia *per capita* – fundamental para se atingir os padrões socioeconômicos análogos aos de países desenvolvidos (Brasil, 2021b; WCED, 1987).

Diferentemente do cenário global, a oferta de energia nacional dispõe de uma maior participação de fontes renováveis. Mais de 45% do conjunto de fontes de energia utilizado no país possuem a capacidade de se renovar naturalmente dentro de uma escala de tempo humana – com destaque para os produtos da cana-de-açúcar e a hidroeletricidade (Brasil, 2020a, 2021a). Entretanto, a sua maior parte é ainda atribuída às fontes não renováveis de energia, sendo dominada pelos combustíveis fósseis, quais sejam, o petróleo, o gás natural e o carvão mineral (Brasil, 2021a).

A predominância desse aproveitamento energético atual e sua dependência continuada sob a forma de hidrocarbonetos estão atrelados aos desafios de abastecimento de energia e do (re)conhecimento da degradação e dos limites do meio ambiente (Sachs, 2005; Yergin, 2014). As mudanças climáticas – que surgem como um ponto de apoio fundamental à escalada das preocupações ambientais – ocupam um lugar central no quadro restritivo à sustentabilidade do paradigma energético atual. Esse fenômeno de caráter irreversível acentua as demais agressões às bases biogeofísicas das atividades humanas. Mais do que um problema ambiental, é o maior dos problemas globais tendo em vista que tem ampla ressonância sobre as diversas dimensões do desenvolvimento sustentável e exige uma profunda e urgente mudança nas matrizes energéticas em nível mundial (Veiga, 2015; WCED, 1987).

Para Ignacy Sachs, proponente do termo *ecodesenvolvimento*, o atual paradigma energético mundial não é compatível com o desenvolvimento sustentável (Sachs, 2007). As origens desse conceito remontam a década de 1970, quando uma nova concepção de desenvolvimento foi introduzida durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, ocorrida em 1972 na capital da Suécia, Estocolmo (UN, 1973). Em 1987, o

¹ Essas projeções levam em conta os impactos da crise sanitária causada pela pandemia do COVID-19 (Brasil, 2021b).

desenvolvimento sustentável voltou a ser pauta da agenda internacional ao ser abordado no relatório *Our Common Future*² (WCED, 1987), liderado pela ex-primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. Já em meados dos anos 1990, John Elkington cunhou um modelo de gestão empresarial denominado *Triple Bottom Line* (TBL) (Elkington, 1998) (ou tripé da sustentabilidade) focado no equilíbrio dos resultados econômicos com a preservação ambiental e desenvolvimento social que logo se tornou popular entre empresas de diferentes setores. Às vésperas do novo milênio, a Declaração do Milênio da Organização das Nações Unidas (ONU) (UN, 2000) definiu em setembro de 2000 oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM)³ com 21 metas mensuráveis para desenvolver setores e temas, como meio ambiente, saúde, direitos humanos e igualdade social e de gênero, as quais deveriam ser implementadas até 2015 (Veiga, 2015).

Mais recentemente, os ODM deram lugar aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)⁴ através de um plano de ação com horizonte até 2030 estabelecido na Assembleia Geral das Nações Unidas em setembro de 2015. Intitulado como “Agenda 2030 – Transformando o Nosso Mundo”, define metas para diversos temas, dentre os quais energia (ODS 7) e clima (ODS 13). E, talvez, o mais importante, inaugura um comprometimento efetivo por parte da cúpula mundial no sentido de se perseguir um desenvolvimento pautado pela sustentabilidade. Representa, assim, um avanço cognitivo relevante do processo institucional iniciado desde o lançamento do relatório *Our Common Future* (WCED, 1987) (Magrini & Veiga, 2018; UN, 2015; Veiga, 2015).

Atualmente, em tempos marcados pela crise sanitária provocada pela pandemia do COVID-19, a ideia de sustentabilidade vem ganhando novos contornos e se consolidando junto aos diversos setores da sociedade na medida em que a interligação das questões ambientais, sociais e econômicas ficou mais nítida. A exposição de

² Relatório acatado durante a 96ª plenária da Assembleia Geral das Nações Unidas em 1987 e também conhecido como *Relatório Brundtland* (WCED, 1987).

³ Os oito ODM buscaram *erradicar a pobreza extrema e a fome* (ODM 1); *alcançar o ensino primário universal* (ODM 2); *promover a igualdade de gênero e empoderar as mulheres* (ODM 3); *reduzir a mortalidade infantil* (ODM 4); *melhorar a saúde materna* (ODM 5); *combater o HIV/AIDS, a malária e outras doenças* (ODM 6); *garantir a sustentabilidade ambiental* (ODM 7); *desenvolver uma parceria global para o desenvolvimento* (ODM 8) (UN, 2000).

⁴ Os 17 ODS buscam assegurar a *erradicação da pobreza* (ODS 1); *fome zero e agricultura sustentável* (ODS 2); *saúde e bem-estar* (ODS 3); *educação de qualidade* (ODS 4); *igualdade de gênero* (ODS 5); *água potável e saneamento* (ODS 6); *energia limpa e acessível* (ODS 7) *trabalho decente e crescimento econômico* (ODS 8); *indústria, inovação e infraestrutura* (ODS 9); *redução das desigualdades* (ODS 10); *cidadãos e comunidades sustentáveis* (ODS 11); *consumo e produção responsáveis* (ODS 12); *ação contra a mudança global do clima* (ODS 13); *vida na água* (ODS 14); *vida terrestre* (ODS 15); *paz, justiça e instituições eficazes* (ODS 16); *parcerias e meios de implementação* (ODS 17); e se desdobram em 169 metas (UN, 2015).

fragilidades estruturais nas esferas social e ambiental, bem como a retração econômica experienciada em nível global, vem posicionando hoje questões socioambientais no topo da agenda de investidores ao redor do mundo (Hill, 2020; Sorkin, 2020; Talman, 2020). Conseqüentemente, o mercado financeiro tem impulsionado uma mudança do ambiente corporativo no sentido de se adotar estratégias baseadas em fatores ambientais, sociais e de governança (*ESG* do inglês *environmental, social and governance*) (Hill, 2020).

O próprio Elkington vem ampliando suas reflexões acerca da sustentabilidade. Em sua mais recente obra *Green Swans: The Coming Boom in Regenerative Capitalism* (Elkington, 2020) introduz a ideia de *Cisnes Verdes*⁵, a qual define como "soluções sistêmicas para desafios globais" de modo a promover um "progresso exponencial sob a forma de criação de riqueza econômica, social e ambiental." Sob essa perspectiva, a adoção de carros elétricos, a implementação de modelos de negócios circulares e a transição energética rumo às fontes renováveis são referenciadas como alguns dos principais *Cisnes Verdes* que apontam para um futuro sustentável para todos (Elkington, 2020).

Essa pluralidade de visões de sustentabilidade se reflete em inúmeras discussões sobre o tema na literatura especializada e contribui para mal-entendidos, podendo, até mesmo, levar a conceituações divergentes. Ignacy Sachs fornece uma interpretação abrangente para esse (*novo*) desenvolvimento, definindo-o como uma assíntota ética de solidariedade sincrônica e diacrônica com as gerações humanas e de responsabilidade para com as demais espécies vivas na Terra (Mancebo & Sachs, 2015; Sachs, 2000). Tal compreensão permite lançar luz sobre um dos aspectos mais importantes e antagônicos ao desenvolvimento sustentável referente ao uso demasiado de combustíveis de origem fóssil: o lançamento e o conseqüente acúmulo de carbono de armazenamento subterrâneo de longo prazo na atmosfera, os quais contribuem para a mudança do clima que, por sua vez, se faz sentir em um nível global (UNEP, 2009).

De acordo com estimativas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), as atividades humanas provocaram um aumento de cerca de 1,1°C na temperatura média global em relação aos níveis pré-industriais (IPCC, 2021). Os últimos quarenta anos foram marcados pela sincronia das emissões de dióxido de carbono (CO₂) – principal

⁵ Vale ressaltar que, ao introduzir a ideia de *Cisnes Verdes*, Elkington não pretende substituir o modelo TBL ou qualquer outra concepção de sustentabilidade. Sobre esse aspecto, o autor pontua que os *Cisnes Verdes* correspondem, na realidade, a "mais uma ideia necessária em nossa cesta de sustentabilidade" (Kraaijenbrink, 2022).

gás do efeito estufa (GEE), em termos de forçamento radiativo – com o crescimento econômico e o avanço da demanda energética mundial. A persistência desse cenário elevará a temperatura em até 1,5°C nas próximas décadas (IEA, 2016; IPCC, 2018, 2014). Os mais recentes estudos da IEA mostram que o sistema de energia como um todo emitiu cerca de 33,5 Gt de CO₂ no ano de 2019 (IEA, 2021b).

Interessante notar que no ano de 2015 essas emissões associadas à energia desaceleraram pela primeira vez em um período de crescimento econômico graças tanto a medidas em prol da conservação e eficiência de energia quanto à proeminência de fontes renováveis na matriz energética global, resultando em uma emissão de aproximadamente 32,4 Gt de CO₂. Na esteira do crescente apoio político à energia de baixo carbono, as energias renováveis alcançaram, assim, mais da metade da nova capacidade de energia instalada no planeta (IEA, 2016).

Em dezembro do mesmo ano, o Acordo de Paris⁶ – tratado internacional adotado durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21) – surge como um marco importante nas negociações sobre o clima uma vez que formaliza um acordo sem precedentes a fim de se reduzir as emissões globais de GEE. Ao compor o grupo de países signatários para manter a temperatura média global em até a 2°C – em relação aos níveis pré-industriais⁷ –, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, e em 43%, em 2030 (Brasil, 2015a). Apesar disso, estima-se que a ampliação da oferta interna de energia vai chefiar um aumento anual nas emissões antrópicas associadas ao setor energético de 1,4%, totalizando cerca de 421 Mt de CO₂eq.⁸ no final desse período (Brasil, 2021b). Reverter esse cenário requer esforços no sentido de se favorecer a expansão da cota referente às fontes renováveis no misto de oferta interna de energia.

Embora o aproveitamento hidrelétrico seja um vetor importante de ampliação da energia fornecida em território nacional, a maior parte de seu potencial se encontra na

⁶ O Acordo de Paris representa um marco nas negociações internacionais após o período de vigência do Protocolo de Kyoto (ou *Pós-Kyoto*). O Protocolo de Kyoto corresponde ao primeiro acordo internacional sobre o controle das emissões de GEE em nível global. Ele foi selado em 1997, durante a 3ª Conferência das Partes (COP 3) da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), em Kyoto, Japão. Em linhas gerais, estabeleceu metas de redução de emissões de GEE com relação aos níveis de 1990 no período compreendido entre os anos 2008 e 2012 (Ki-moon, 2008).

⁷ A meta de 2°C acima da temperatura média, estabelecida antes da Revolução Industrial, se justifica como o patamar a partir do qual a mudança do clima se torna perigosa em razão das consequências negativas para os ecossistemas, a biodiversidade e o suprimento de água e alimentos (IPCC, 2018).

⁸ Emissões em termos de CO₂eq. corresponde a quantidade de CO₂ que ao ser emitido na atmosfera causaria o mesmo forçamento radiativo ou mudança de temperatura, ao longo de um determinado horizonte de tempo, que uma quantidade de um GEE ou mistura de GEEs (IPCC, 2018).

região norte do país, trazendo consigo uma série de desafios técnicos e socioambientais. Restrições relativas a impactos ambientais, interferências em terras indígenas e a distância em relação aos principais centros consumidores são de especial relevância para a viabilidade de projetos hidrelétricos e suas linhas de transmissão na região amazônica (Brasil, 2021b; Dias, 2017). Diante desse quadro, o governo brasileiro pressupõe uma penetração de fontes renováveis, além da hidrelétrica, na matriz energética nacional – que responderão por cerca de 35% do conjunto de fontes de energia disponível para a oferta interna no ano de 2030 (Brasil, 2021b).

Quando se volta o olhar para a matriz elétrica nacional, verifica-se um conjunto de fontes de energia diversificado e complementar que dispõe ainda de potencial para ampliar sua pluralidade (MME, 2017). Destacam-se como as tecnologias mais promissoras as fontes solar fotovoltaica e eólica, as quais apresentaram, dentre as renováveis, as ofertas que mais cresceram, em termos percentuais, no período de 2018 a 2019 (Brasil, 2021a). Esse avanço ilustra a potencialidade destas fontes conquistarem, em um futuro próximo, uma parcela significativa da matriz elétrica nacional na medida em que seus custos associados, sobretudo, a etapa de implantação vêm experimentando sucessivas e aceleradas quedas.

Estima-se, assim, que a expansão da capacidade instalada da geração centralizada a partir das fontes solar fotovoltaica e eólica será, respectivamente, de 5,3 gigawatt (GW) e 16,4 GW em 2030 (Brasil, 2021b). Cabe destaque também a evolução da geração distribuída que – impulsionada por essa ascensão das fontes renováveis no país – ostentou um aumento de cerca de 170% na oferta de energia por meio das modalidades de micro e minigeração (Brasil, 2021a).

Uma ampliação da participação de fontes renováveis na matriz elétrica nacional significa aumentar uma parcela que supera hoje os 83% – com destaque para a hidráulica, bioenergia e eólica (Brasil, 2021a). A expectativa é que as fontes renováveis de energia, como um todo, alcancem o patamar de 86% até 2030. As perspectivas para a oferta interna de energia elétrica estão pautadas por uma tendência crescente de eletrificação das classes residencial, comercial e, particularmente, industrial. Durante a próxima década estima-se um incremento médio anual no consumo de energia elétrica de mais de 3,0%. Para o consumo na rede é esperada uma expansão anual similar – compreendida no intervalo de 3,0-4,0%. Seus principais vetores são representados pelas classes residencial e comercial; e o setor agropecuário (Brasil, 2021b).

No que diz respeito às emissões de CO₂ associadas à matriz elétrica nacional, a predominância da geração hidrelétrica coloca o Brasil em uma posição de destaque uma vez que lança na atmosfera quantidades de CO₂ inferiores aos de países europeus, Estados Unidos (EUA) e China. Elas decorrem da queima de combustíveis fósseis que se dá principalmente em usinas termelétricas, e somaram aproximadamente 47 Mt de CO₂eq. em 2021. No mesmo ano, cerca de 90% dos 34 Mt de CO₂eq. provenientes do Sistema Integrado Nacional (SIN) foram gerados a partir da queima de gás natural e carvão (Brasil, 2021a).

Diante dessa conjuntura que combina a inevitável expansão do consumo de energia e a emergente descarbonização da economia em nível global, as fontes de energia renováveis se revelam como um dos principais pilares da estrutura em torno da qual se desdobra o que Sachs denomina como *revolução energética (do século XXI)* (Sachs, 2007). Para além do aproveitamento de uma energia segura, ambientalmente saudável e economicamente viável que seja capaz de sustentar o progresso humano por um futuro longínquo, Sachs chama a atenção para a necessidade de se “(...) privilegiar um tratamento simétrico das dimensões *social* e *ambiental*” (Sachs, 2007, 2005; WCED, 1987). Esse seu alerta vai ao encontro da já tão conhecida noção de sustentabilidade definida pelo modelo do TBL, o qual preconiza o equilíbrio da tríade meio ambiente, sociedade e economia (ou, *planeta, pessoas e lucro*, respectivamente)⁹ (Elkington, 1998).

Sob essa mesma perspectiva, Gro Brundtland já havia declarado, em seu relatório *Our Common Future*, que:

[...] “Energy is necessary for daily survival. Future development crucially depends on its long-term availability in increasing quantities from sources that are dependable, safe, and environmentally sound. (...) no single source or mix of sources is (yet) at hand to meet this future need. (...) In theory, all the various energy sources can contribute to the future energy mix worldwide. But each has its own economic, health, and environmental costs, benefits, and risks (...)”¹⁰ (WCED, 1987).

⁹ Em linhas gerais, Elkington parte da ideia de que é possível gerar lucros ao mesmo tempo em que se dedica atenção ao bem-estar da sociedade e à preservação do meio ambiente para, então, introduzir o TBL como um modelo de avaliação da sustentabilidade de organizações, seja ela pública ou privada, com relação às dimensões ambiental, social e econômica (Elkington, 1998).

¹⁰ “[...] A energia é necessária para a sobrevivência diária. O desenvolvimento futuro depende de sua disponibilidade em quantidades crescentes a longo prazo a partir de fontes confiáveis, seguras e ambientalmente responsáveis. (...) nenhuma fonte ou *mix* de fontes está (ainda) disponível para atender esta necessidade futura”, e complementa que “Em teoria, todas as fontes de energia podem contribuir para o *mix* futuro de energia. Mas cada fonte de energia tem seus próprios custos, benefícios e riscos econômicos, ambientais e no que diz respeito a saúde humana (...)” (tradução livre);

Ainda nessa mesma linha, o físico, professor e membro do IPCC, Luiz Pinguelli Rosa é mais pragmático ao afirmar que “não há energia *santa*”¹¹ (Cariello, 2013). Portanto, romper os laços com a indústria fóssil implica, antes de tudo, lançar um debate amplo e esclarecido que trate da transversalidade das tecnologias de transformação de energia de origem renovável, tidas como panaceias ecológicas do mundo atual.

As primeiras considerações dos aspectos socioambientais relacionados ao setor energético do país foram impulsionadas pelos primeiros planos de expansão de longo prazo do setor elétrico e fundamentais para o desenvolvimento e consolidação do arcabouço técnico-científico disponível atualmente acerca do tema (MME, 2017). Hoje, essa questão é abordada de modo mais notório e claro nos casos da bioenergia e hidroeletricidade. Se por um lado, a bioenergia se revela como uma das opções mais complexas de se obter energia do ponto de vista da sustentabilidade em razão não só da necessidade de se avaliar suas matérias-primas, localização, modos de produção, uso da terra, rotas tecnológicas de conversão e infraestrutura, mas também de preocupações relacionadas à segurança alimentar e agricultura familiar de pequena escala (IEA & World Bank, 2013; Sachs, 2005); por outro, a experiência adquirida em razão da intrínseca complexidade socioambiental do aproveitamento hidrelétrico permitiu tratar o tema com uma maior maturidade a julgar pela existência de um conjunto de recomendações¹² em escalas nacional e internacional que visa orientar seus planejadores no sentido de se minimizar seus transtornos ambientais, sociais e econômicos (Brasil, 2021b; Goldemberg, 2012; IEA & World Bank, 2013).

À medida que a participação de outras fontes renováveis avança na matriz energética mundial, suas relações com o tema estão ganhando cada vez mais relevância. Pululam questões que põem em xeque a neutralidade socioambiental de alternativas para a geração de uma energia legitimamente *limpa*. Em 2011, uma declaração da então ministra francesa de *l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du*

¹¹ Entrevista concedida à revista *Piauí* sobre a oposição de um líder indígena com relação à construção de uma hidrelétrica a centenas de quilômetros de sua aldeia. Para saber mais: Cariello (2013).

¹² Podem-se citar alguns exemplos: as diretrizes ambientais estabelecidas pela IEA que compõem o *Hydropower and the Environment*; as orientações da *World Commission on Dams* para a proteção socioambiental diante dos impactos gerados por projetos de água e energia reunidas no documento *Decision Making Framework*; a plataforma de avaliação do desempenho de projetos hidrelétricos segundo um conjunto de tópicos de sustentabilidade *The Hydropower Sustainability Assessment Protocol*; e os manuais nacionais detalhados sobre inventários de bacias hidrográficas (IEA & World Bank, 2013);

*Logement*¹³, Nathalie Kosciusko-Morizet, teve grande repercussão ao afirmar de modo categórico, porém controverso¹⁴, que (Pereira, 2011; Phillipe, 2014):

[...] “On n'a pas trouvé de solutions parfaites, ça c'est sûr. (...) Il n'y a pas d'énergie idéale. (...) Je trouve que (...), en matière d'environnement, la filière photovoltaïque n'atteint pas ses objectifs. Pourquoi ? Parce que rien n'était prévu pour le recyclage des panneaux (photovoltaïques) et rien n'était prévu pour le démantèlement des fermes solaires. (...) Vous savez comment c'est de construire un panneau photovoltaïque ? (...) il faut du silicium, il y a des mines, c'est polluant avant à la construction, (...) ça demande beaucoup d'énergie”¹⁵ (Kosciusko-Morizet, 2011).

Apesar de estarem fortemente atrelados a preocupações relacionadas à segurança energética e a sua saliência para o contexto francês, os argumentos de Kosciusko-Morizet trazem à tona o que não é tão evidente: a contrapartida ambiental das tecnologias de transformação de energia proveniente de fontes renováveis. Assim, sua colocação ganha relevância a partir do momento em que ela conduz a uma reflexão crítica sobre as implicações socioambientais para além das fronteiras de suas etapas de implantação e geração de energia.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. DOE), muitas dessas tecnologias dependem geralmente de componentes produzidos a partir de metais conhecidos pela designação “terras raras” (Bauer *et al.*, 2011). Eles não são de fato raros; pelo contrário, são abundantes na crosta terrestre. No entanto, a forma sob a qual são encontrados requer processos de extração e refino onerosos, sobretudo, dos pontos de vista ambiental e econômico (Pitron, 2018; Voncken, 2016). Os casos mais delicados envolvem as tecnologias eólica e solar fotovoltaica. Enquanto aerogeradores requerem o emprego de ímãs permanentes; células fotovoltaicas são produzidas a partir de materiais com propriedades semicondutoras (Abraham, 2017; Bauer *et al.*, 2011).

Quando se volta o olhar para o cenário nacional, esse quadro tende a se agravar na medida em que o país depende da importação de componentes e subcomponentes de aerogeradores e módulos fotovoltaicos. Isso porque não dispomos ainda de um parque

¹³ Ministra da Ecologia, do Desenvolvimento Sustentável, dos Transportes e da Habitação;

¹⁴ Entrevista concedida ao programa *Complément d'Enquête* do canal *France 2* em abril de 2011, após o acidente nuclear de Fukushima, em que Nathalie Kosciusko-Morizet se mostrou claramente mais preocupada com questões de maior pragmatismo que a ambiental ao comparar diferentes tecnologias de energia renovável com a nuclear (Kosciusko-Morizet, 2011). Para saber mais: Bovet (2014);

¹⁵ [...] “Nós não descobrimos soluções perfeitas, isto não há dúvidas. (...) Não há energia ideal. (...) Eu acho que (...), em matéria de meio ambiente, o setor fotovoltaico não atinge seus objetivos. Por quê? Porque nada foi previsto para a reciclagem; e nada foi previsto para o desmantelamento de centrais solares. (...) Você sabe como é que se fabrica um painel fotovoltaico? (...) é preciso silício, tem mineração, (...) é poluente antes da construção e demanda muita energia.” (tradução livre).

industrial e tecnológico capaz de produzi-los mais baratos que seus equivalentes importados, de refinar o silício em grau solar e de fabricar células fotovoltaicas (ABDI, 2014; UNEP, 2011). Atualmente, a China é a principal fornecedora desses insumos uma vez que se tornou ao mesmo tempo o maior mercado de energia eólica e o maior fabricante e exportador de células fotovoltaicas do mundo (Tolmasquim, 2016; UNEP, 2011). Para se ter uma ideia, a China fornece cerca de 95% dos elementos de *terras raras* utilizadas nas tecnologias de energia renovável, baterias e fibra óptica (Weetman, 2019). Assim, quando comparada com uma produção nacional, a importação de bens de consumo exige uma logística mais extensa e, portanto, onerosa não só em termos financeiros, mas também socioambientais (Sarker *et al.*, 2018).

Outro aspecto importante citado por Kosciusko-Morizet se refere à destinação desses equipamentos uma vez finalizada a sua vida útil. Metais e outros elementos constituintes deverão de alguma forma ser descartados na natureza ou reintegrados pela cadeia produtiva. No caso das *terras raras*, para citar apenas um exemplo, a reciclagem é complexa e menos de 1% da sua parcela contida em produtos de um modo geral são atualmente reciclados (UNEP, 2011; Weetman, 2019). O seu reprocessamento é, no entanto, determinante para superar sua criticidade no que diz respeito à segurança de suprimento, toxicidade e desequilíbrio do mercado em escala mundial (Bauer *et al.*, 2011). Apesar do apelo verde, é importante ressaltar que amenizar esses problemas por meio da reciclagem não se configura como uma operação ambiental uma vez que está também sujeita a transformações irreversíveis (Abraham, 2017; Georgescu-Roegen, 1971; Lisboa, 2009).

Tampouco termina aqui a crítica de Kosciusko-Morizet, a ex-ministra francesa prossegue e amplia a problemática socioambiental das tecnologias de transformação de energia proveniente de fontes renováveis ao levantar a questão da aceitação social em relação a empreendimentos eólicos:

[...] “Sur l’éolien « on shore », on avance. On a encore (...) un gros problème d’acceptabilité (...) C’est quelque chose à travailler (...). Donc, on a un vrai problème d’acceptabilité sur l’éolien ‘on shore’ (...) Les gens, au niveau national, veulent tous d’éolien, mais quand on dit « il va y avoir une (turbine) éolienne à côté de chez vous », il n’y a plus personne d’accord”¹⁶ (Kosciusko-Morizet, 2011).

¹⁶ [...] “Sobre a eólica *onshore*, nós estamos avançando. Nós temos ainda (...) um grande problema de aceitação (social) (...) É algo que deve ser trabalhado (...). As pessoas, no nível nacional, querem a energia

Robert Righter se deparou pela primeira vez com esse fenômeno quando elaborava seu livro acerca da história da energia eólica nos EUA. Não obstante o grande apoio à geração de energia elétrica a partir dos ventos no país, existiam algumas objeções quanto ao local onde se instalariam os parques eólicos. As pessoas que por ele foram interrogadas declararam que as turbinas eólicas deveriam “ser construídas em locais distantes” ou, pelo menos, “*not in my backyard*”¹⁷ (NIMBY) (Righter, 1996). Dentro desse contexto, Pasqualetti *et al.* (2002) argumentam que:

[...] “It is renewable and releases no pollutants; it can be installed in small, affordable increments; and the potential contribution it can make in industrialized and developing countries is impressive. What is there not to like? The answer to that question is simple: wind turbines are unavoidably visible, even intrusive. (...) It transforms natural landscapes into landscapes of power”¹⁸ (Pasqualetti *et al.*, 2002).

Embora esse dilema de cunho majoritariamente social não seja algo novo, a rápida expansão da tecnologia de geração eólica vem impulsionando a intensificação de conflitos entre comunidades e empreendimentos eólicos no mundo, e também no Brasil (Chaves *et al.*, 2018; Gorayeb & Brannstrom, 2016; Pasqualetti *et al.*, 2002). Mesmo que em menor grau, é interessante notar que essa interferência sobre a estética da paisagem (natural) pode também ser percebida junto às instalações de outras tecnologias de transformação de energia de origem renovável. Sovacool & Ratan (2012) revelam que o impacto visual produzido por painéis fotovoltaicos, em uma região norte-americana, impulsionou a oposição por parte da comunidade local à energia solar, o que, por sua vez, culminou em uma queda na sua adesão pelos habitantes (Sovacool & Ratan, 2012).

Entende-se, assim, o futuro da energia como uma equação que envolve muitas variáveis cujas interações são complexas e as divergências de interesses e perspectivas têm grande relevância. Com efeito, a escalada sem volta da sustentabilidade como um valor fundamental da sociedade contemporânea vem tornando a integração de questões socioambientais uma das prioridades ao longo da cadeia de produção de energia (Yergin, 2014). Em outras palavras, a tomada de decisão que antes era orientada apenas por

eólica, mas quando dizemos que “haverá uma (turbina) eólica ao lado de sua casa”, não há mais ninguém apoiando” (tradução livre).

¹⁷ “Não no meu quintal”;

¹⁸ “É renovável e não emite poluentes; pode ser instalada por meio de pequenas operações; e seu potencial de contribuição em países desenvolvidos e em desenvolvimento é impressionante. Por qual razão não gostar (da energia eólica)? A resposta para esta pergunta é simples: as turbinas eólicas são inevitavelmente visíveis, até mesmo intrusivas. (...) Elas transformam paisagem naturais em *landscapes of power*” (tradução livre).

critérios econômico-financeiros vem progressivamente sendo trabalhada em prol do interesse mais coletivo (Meadows, 2008). Resolver essa nova equação demanda uma visão de mundo mais holística para se decidir quais riscos correr em razão de quais benefícios esperados ao se buscar atender a demanda energética futura por intermédio das tecnologias de transformação de energia que se tem à disposição.

1.2. HIPÓTESES, OBJETIVOS E METODOLOGIA DA PESQUISA

A problemática na qual se enquadra o tema da presente tese suscita a seguinte questão central: *como avaliar a sustentabilidade das tecnologias de transformação de energia proveniente de fontes renováveis?* Para encarar de frente esse desafio, há a necessidade de se estabelecer, antes de tudo, uma lógica sob a qual se desenvolva de modo mais conveniente a resposta desta questão. Nesse sentido, é importante ter em mente a hipótese básica sob a qual reside a ideia de que *o aproveitamento energético por meio de fontes renováveis de energia ao mesmo tempo em que traz benefícios também gera custos ambientais, sociais e econômicos* visto que:

- 1) A dependência energética sob a forma de combustíveis fósseis vem ocasionando o acúmulo de GEE na atmosfera e, conseqüentemente, a mudança do clima em uma escala planetária. Frear o avanço da temperatura média global requer uma descarbonização da economia mundial nas próximas décadas;
- 2) A transição energética rumo às fontes renováveis é a premissa básica para se caminhar rumo à descarbonização da economia mundial na medida em que proporciona uma redução nas emissões de GEE durante a etapa de geração de energia em relação aos combustíveis fósseis. No entanto, há de se levar em conta a ocorrência da emissão desses gases e outros tipos de impactos ao longo da cadeia de geração de energia proveniente de fontes renováveis.

Assim, foram definidas três hipóteses ancilares que deverão ser validadas e a partir das quais esta tese foi construída, são elas:

- 1) (Re)conhecer as implicações do aproveitamento energético por meio de fontes renováveis demanda uma observação mais holística sobre os seus ciclos de vida completos já que seus potenciais impactos ambientais, sociais e econômicos não

estão concentrados na etapa de geração de energia, mas distribuídos ao longo de toda a cadeia de produção;

- 2) Empregar a abordagem de ciclo de vida é o caminho mais adequado para se avaliar todas as etapas da cadeia produtiva de produtos ou serviços, garantindo, assim, que as melhorias conquistadas em uma etapa não ocasionem impactos cumulativos maiores em outra(s);
- 3) Analisar a sustentabilidade de fontes renováveis de energia requer o emprego de uma abordagem tal como oferecida pelo conceito do TBL, o qual se revela adequado aos principais desafios de um aproveitamento elétrico sustentável na medida em que a incorporação da sustentabilidade no setor elétrico em nível mundial tem evoluído principalmente em torno das dimensões ambiental, social e econômica;

Em síntese, avaliar a sustentabilidade de fontes renováveis de energia consiste, portanto, no emprego de uma metodologia baseada na abordagem de ciclo de vida que leve em consideração indicadores de relevância social, prudência ecológica e viabilidade econômica.

Sendo assim, a presente pesquisa tem por principal objetivo *desenvolver uma metodologia para avaliar o desempenho ambiental, social e econômico de tecnologias de transformação de energia de origem renovável sob uma perspectiva de ciclo de vida*. Para sua demonstração e validação, a proposta metodológica é aplicada em um estudo de caso para a fonte solar fotovoltaica. Assim, busca-se apoiar a tomada de decisões estratégicas no que se refere ao planejamento da expansão da geração de energia elétrica nacional orientada pelos preceitos do desenvolvimento sustentável. Os objetivos específicos que viabilizam o alcance do objetivo geral são os seguintes:

- 1) Definir um conjunto de indicadores ambientais, sociais e econômicos baseados na abordagem de ciclo de vida relevante para o setor elétrico nacional de energias renováveis;
- 2) Utilizar um método de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) para apoiar a condução de uma avaliação da sustentabilidade sobre tecnologias de transformação de energia de origem renovável a partir de uma perspectiva de ciclo de vida;

- 3) Estabelecer um índice de sustentabilidade para cada uma das tecnologias de geração de energia contempladas pelo estudo de caso piloto de modo a viabilizar o ranqueamento das mesmas;
- 4) Consolidar a proposição metodológica com base nos resultados obtidos no estudo de caso piloto visando sua extrapolação para tecnologias de transformação de energia de origem renovável em geral.

À luz das projeções do cenário energético no país e da guinada mundial no sentido de um futuro mais sustentável, a presente tese busca, de um modo geral, fomentar o pensamento do ciclo de vida dentro do setor elétrico nacional. Mais especificamente, lhe oferece uma ferramenta de auxílio ao processo decisório no que se refere ao planejamento da sua expansão de modo a favorecer a seleção de alternativas de tecnologias de transformação de energia mais adequadas ao horizonte sustentável.

Isso porque caminhar no sentido de uma descarbonização da economia consiste em mobilizar o sistema energético global com o amparo de dispositivos que apresentam consequências socioambientais inevitáveis, porém, não intencionais. A necessidade de se explorar recursos minerais e a interferência sobre a estética da paisagem natural – temas que foram tratados anteriormente – são apenas alguns dos efeitos colaterais provocados pela prescrição e adesão do tratamento através de energias renováveis mediante o diagnóstico ecológico atual. Existem outros, como os impactos tanto sobre a saúde humana quanto sobre a qualidade dos ecossistemas naturais.

Tendo em vista que o meio socioambiental é acometido não só pela produção, conversão e uso de energia, mas por toda e qualquer atividade humana e que, portanto, não há *bondade absoluta*; é preciso lançar luz sobre os reais impactos positivos e negativos de cada uma dessas tecnologias de geração de energia a fim de orientar ações no sentido de se minimizar os seus ônus e potencializar os seus ganhos ambientais, sociais e econômicos a partir de bases mais sólidas.

Envidar esforços nesse sentido requer um pensamento sistêmico (Meadows, 2008), através do qual tradicionais pontos focais dão lugar a campos de visão mais amplos. Isso significa ser capaz de observar criticamente o conjunto de etapas consecutivas nas quais os diversos insumos das tecnologias de transformação de energia proveniente de fontes renováveis experimentam algum tipo de transformação, bem como a sua conexão com as dimensões ambiental, social e econômica. Esse tipo de abordagem possibilita identificar deslocamentos de impactos que porventura venham a ocorrer entre

as etapas dessa cadeia produtiva e, até mesmo, entre diferentes zonas geográficas. Por exemplo, embora a virtude de alguma dessas tecnologias em neutralizar emissões de GEE durante a etapa de geração de energia seja por demais conhecida, outras etapas do seu ciclo de vida podem acabar se revelando intensivas na emissão destes gases. Sob o ponto de vista do aquecimento global, a sua viabilidade vai depender, portanto, do balanço de emissões de GEE desde a extração de matérias-primas até a disposição final de resíduos. Além disso, a abordagem de ciclo de vida permite detectar a compensação entre diferentes categorias de impactos, impedindo que haja a substituição de um problema por outro.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica focada estritamente nos impactos ambientais, dispõe de uma metodologia internacionalmente padronizada (ISO, 2006a) e, conseqüentemente, se encontra em um estágio mais maduro em termos de aplicação com relação a outras ferramentas baseadas na abordagem de ciclo de vida. Assim, a ACV integra o quadro de instrumentos de gestão ambiental necessários às mais recentes políticas e decisões corporativas pautadas pela responsabilidade ambiental. No setor energético, mais especificamente, tem sido empregada, sobretudo, na incorporação de aspectos ambientais na tomada de decisão acerca de diferentes opções tecnológicas e de demandas e ofertas de energia (WCD, 2000).

Ao admitir que a mensuração da sustentabilidade significa avaliar, além da prudência ecológica, relevância social e viabilidade econômica, restam ainda duas lacunas a serem preenchidas para contemplar os objetivos da presente tese. A primeira delas corresponde à esfera social que vem cada vez mais ganhando proeminência nos debates políticos das sociedades modernas na medida em que se evidencia que o crescimento econômico não é condição suficiente para o seu desenvolvimento (Meadows, 2008). Uma das implicações disso é a intensificação das preocupações com relação à redução dos níveis de bem-estar e às transformações sociais (Jannuzzi, 2012; Lisboa, 2009; Wilkinson & Pickett, 2015). Diante dessa realidade, o pensamento do ciclo de vida oferece como ferramenta a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S), através da qual é possível levar em conta os efeitos do fornecimento de produtos e serviços sobre o bem-estar humano ao longo de suas cadeias de valor. Embora ainda incipiente, a ACV-S pode ser vista como uma garantia de que a abordagem de ciclo de vida não relegue a segundo plano a dimensão social em um contexto em que a noção de sustentabilidade fica frequentemente restrita à questão ambiental.

A segunda lacuna faz referência a esfera econômica e tem como principal demanda verificar, por exemplo, a viabilidade de tecnologias de transformação de energia

por meio de indicadores econômico-financeiros. Em meio a hegemonia dos interesses econômicos, a viabilidade econômica se encontra no topo da lista de prioridades tanto de empresas – determinadas a buscar de modo invariável receita financeira – quanto dos próprios consumidores e recentes (auto)produtores em potencial de energia elétrica – cujas decisões são, acima de tudo, pautadas por critérios de custo-benefício (Reinders *et al.*, 2017; Wilkinson & Pickett, 2015). Desse modo, o Custo do Ciclo de Vida (CCV) complementa a ACV e a ACV-S em termos de avaliação de sustentabilidade baseada na abordagem de ciclo de vida, permitindo avaliar o desempenho econômico de um produto ou serviço em função dos custos financeiros associados à sua cadeia de valor completa.

Assim, o alargamento da ACV às dimensões social e econômica permite relativizar a sua ênfase atribuída quase que de modo exclusivo à proteção ambiental. Como não há ainda registros de uma metodologia padronizada ou resultante de um amplo consenso técnico-científico que compreenda aspectos ambientais, sociais e econômicos ao longo do ciclo de vida de produtos ou serviços; esta tese se revela pertinente uma vez que sugere evidenciar os temas prioritários das tecnologias de geração de energia mais promissoras do país frente a conjuntura mundial atual em prol da sustentabilidade. Logo, providencia igualmente a capacidade de se avaliar a sustentabilidade de empreendimentos energéticos levando em conta os seus ciclos de vida completos.

Ao propor uma metodologia para avaliar a sustentabilidade de tecnologias de transformação de energia de origem renovável, a presente tese foi desenvolvida e embasada segundo atividades sistemáticas que podem ser divididas em três partes principais, são elas: (i) *fundamentação teórica*, (ii) *desenvolvimento da proposta metodológica* e (iii) *estudo de caso* (Figura 1.1).

A primeira parte se atém aos temas-chave da pesquisa e faz referência ao que tem sido feito para incorporar a sustentabilidade ao planejamento do setor elétrico, dando maior enfoque ao tratamento dedicado às fontes alternativas e renováveis de energia e ao emprego de ferramentas baseadas no ciclo de vida. Assim, a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) é apresentada como uma forma de ampliar a lógica dominante do setor para além das fronteiras da esfera técnico-econômica e dos processos *midstream* da cadeia de geração de energia. A ausência de um consenso científico acerca de sua estrutura metodológica conduz a pesquisa a uma análise mais profunda sobre indicadores ambientais, sociais e econômicos relevantes e adequados e sobre o emprego de métodos de AMD para apoiar a sua aplicação.

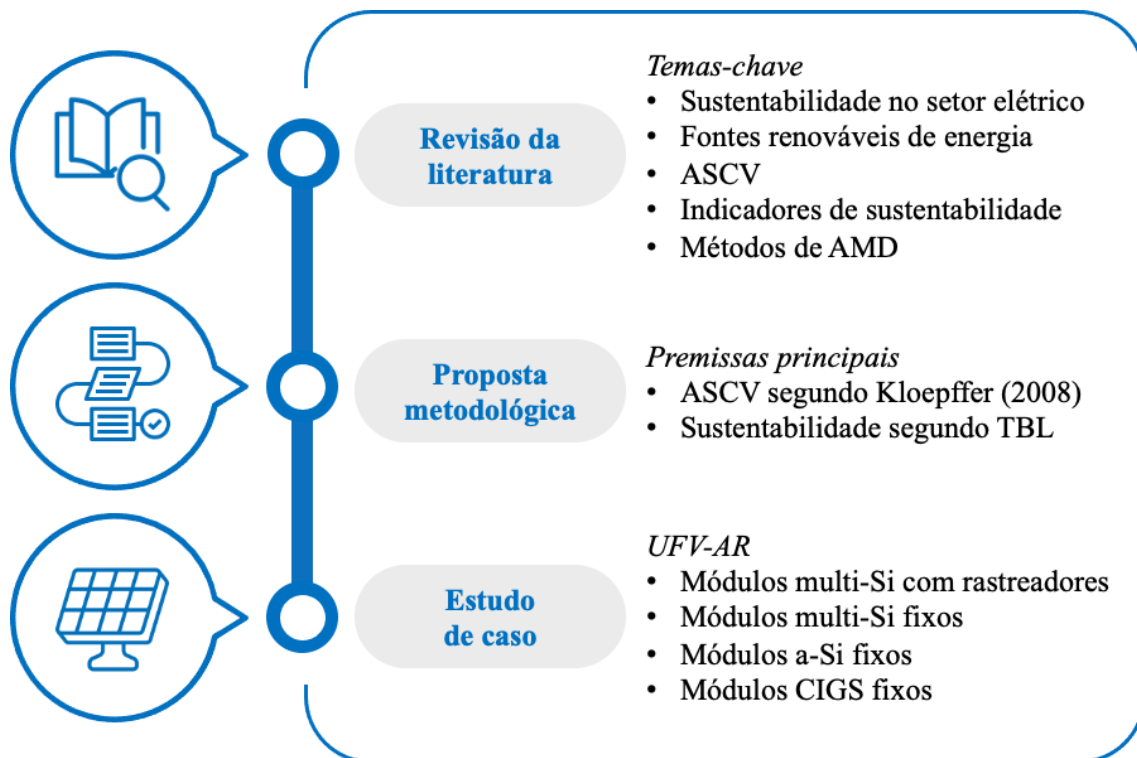


Figura 1.1 – Esquema simplificado da estrutura metodológica

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo como base o referencial teórico esquadrinhado acima, a segunda parte compreende as atividades referentes à proposição metodológica para avaliação da sustentabilidade de tecnologias de transformação de energia de origem renovável. Desse modo, a tese trata do seu desenvolvimento que tem como pontos de partida a ideia de sustentabilidade segundo o conceito TBL e a abordagem de ASCV fornecida por Kloepffer (2008), a qual mobiliza a aplicação e integração da ACV, ACV-S e CCV.

Na terceira parte, será ilustrada a sua aplicação através de um estudo de caso centrado na comparação de quatro sistemas da Usina Solar Fotovoltaica de Alto do Rodrigues (UFV-AR), localizada no Rio Grande do Norte. Em linhas gerais, o primeiro desses sistemas é composto por módulos de silício policristalino (multi-Si) montados em rastreadores de um eixo horizontal norte-sul e com potência instalada de 1,0 MW_p. O sistema 2 é também composto por módulos multi-Si, mas montados em estruturas fixas com potência instalada de 0,05 MW_p. Já o sistema 3 corresponde a um conjunto de módulos de silício amorfo (a-Si) montados em estruturas fixas com potência instalada de 0,025 MW_p. Por fim, o sistema 4 é constituído por módulos de filme fino de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) montados em estruturas fixas com potência instalada de 0,025 MW_p.

É importante destacar que a escolha da tecnologia solar fotovoltaica para o estudo de caso se deu, sobretudo, pelo seu potencial em ocupar um lugar de destaque na matriz elétrica nacional na medida em que apresentou as ofertas de energia que mais evoluíram, em termos percentuais, nos últimos anos no país (Brasil, 2021a).

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Atualmente, está em curso uma revolução energética comandada por fontes de energia de origem renovável que vêm se expandindo na matriz energética mundial em prol de uma economia de baixo carbono. Nesse movimento de escala planetária, não se pode ignorar que, por detrás da aparente neutralidade de carbono, essas fontes estão inevitavelmente associadas a emissões de gases de efeito estufa (GEE) que são lançados na atmosfera ao longo das suas cadeias produtivas. Não se pode, mais ainda, desconsiderar as consequências socioambientais atreladas ao aproveitamento energético através dessas fontes frente à consolidação da sustentabilidade como um valor fundamental das sociedades modernas. Dentro desse contexto, o presente capítulo analisa as discussões mais recentes em torno do planejamento sustentável do setor elétrico. A ideia é lançar luz sobre o que a literatura vem fazendo com relação a avaliação da sustentabilidade da geração de energia elétrica considerando o avanço de fontes alternativas e renováveis de energia, com foco especial em estudos baseados na abordagem de ciclo de vida.

Além disso, será visto que a Agência Internacional de Energia (IEA) se mostra bastante atenta às preocupações e metas socioambientais atuais ao projetar cenários para a matriz elétrica mundial. Do outro lado, o planejamento elétrico nacional replica por meio dos Planos Decenais de Expansão de Energia (PDEs) uma visão simplista do conceito de sustentabilidade, limitando-se em alguns poucos aspectos socioambientais e carecendo de um tratamento que abarque de modo efetivo as particularidades de fontes alternativas e renováveis de energia com forte potencial de desenvolvimento no país.

Em razão dessa realidade, a seção seguinte tratará da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV), a qual se mostra como uma ferramenta

interessante para apoiar o planejamento sustentável do setor elétrico nacional na medida em que cobre os ciclos de vida completos de produtos e serviços e consegue lidar sistematicamente com aspectos ambientais, sociais e econômicos. No entanto, é importante salientar que, como a ASCV não dispõe ainda de uma estrutura metodológica padronizada ou amplamente aceita em nível internacional, alguns desafios se colocam à sua aplicação, dentre os quais se destacam tanto a seleção de indicadores de sustentabilidade relevantes, acessíveis e quantificáveis, sobretudo, aqueles que abordam questões sociais, quanto a integração dos resultados obtidos por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV).

Diante desse quadro, serão investigados, em um primeiro momento, quais são os principais indicadores ambientais, sociais e econômicos utilizados de modo combinado por artigos científicos que tratem da ASCV no âmbito da geração de energia elétrica e que considerem em tal análise fontes alternativas e renováveis de energia. Na sequência, a presente tese irá se debruçar sobre os métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD) que se mostram mais relevantes no auxílio ao planejamento energético atualmente: o Processo Hierárquico Analítico (AHP) e a Lógica Nebulosa. Do extenso corpo literário existente, serão analisados seus principais referenciais teóricos e aplicações na literatura disponível de modo a explorar seus potenciais em apoiar a integração dos resultados da ACV, ACV-S e CCV provenientes de estudos práticos de ASCV.

2.1. O PLANEJAMENTO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO E AS FONTES RENOVÁVEIS

Até a década de 1970, pouco esforço tinha sido empreendido para planejar formalmente sistemas energéticos. A crise do petróleo e o conseqüente medo de escassez permanente deste combustível fóssil que se abateram sobre o mundo nos anos 70 deram início a uma busca sem precedentes por diversificação e segurança energética. Na época, esse clima se traduziu na formulação de novas políticas governamentais orientadas por critérios estritamente econômico-financeiros para a garantia de um suprimento energético mais confiável. A partir da década de 1980, o avanço dos debates acerca do meio ambiente na agenda internacional, incluindo a percepção dos impactos ambientais associados à produção e consumo de energia, motivou as primeiras reflexões sobre a necessidade de

se considerar também aspectos socioambientais no planejamento energético (Løken, 2007; Nijkamp & Volwahren, 1990).

De lá pra cá, diversos autores vêm se debruçando sobre essa temática em prol de um tratamento mais simétrico para as dimensões social e ambiental perante o domínio da dimensão econômica no setor energético. Sabendo que essa iniciativa envolve a consideração de múltiplas variáveis de interações complexas e geralmente conflitantes, o pensamento multicriterial de tomada de decisão ganhou relevância no planejamento do suprimento energético, impulsionando, assim, o avanço de técnicas multicriteriais no apoio e condução de decisões acerca da avaliação e escolha de alternativas-solução. Seguindo essa nova forma de encarar problemas de decisão, a maioria dos estudiosos se dedicaram tanto na comparação de métodos de AMD (Hobbs & Meier, 1994) quanto no emprego dessas ferramentas de modo a explorar os seus potenciais no apoio ao processo decisório do setor (Afgan & Carvalho, 2003; Borges & Antunes, 2003; Cormio *et al.*, 2003; Mirasgedis & Diakoulaki, 1997; Xiaohua & Zhenmin, 2003). Dessa literatura, foi dado destaque a alguns dos principais trabalhos pertencentes ao segundo grupo de autores.

Mirasgedis & Diakoulaki (1997) utilizam um método de AMD para avaliar a geração de energia elétrica a partir de diferentes fontes de energia segundo critérios socioambientais. Em Afgan & Carvalho (2003), os autores combinam critérios econômico-financeiros e ambientais para avaliar fontes alternativas e renováveis de energia. Com intuito de classificar as opções de geração de energia disponíveis em termos de prioridade, empregam um método de AMD para obter um índice único de sustentabilidade. Xiaohua & Zhenmin (2003) tratam da sustentabilidade da geração de energia nas zonas rurais da China por meio da consideração de critérios técnicos, socioeconômicos e ambientais e da aplicação do método AHP. Borges & Antunes (2003) oferecem um modelo multiobjetivo para apoiar a decisão no setor energético considerando aspectos econômicos e ambientais. Em Cormio *et al.* (2003), os autores fornecem um modelo de múltiplas variáveis para dar suporte ao planejamento energético regional. Visando promover o uso de fontes renováveis de energia, avaliam a geração de energia segundo critérios técnico-econômicos e ambientais.

É no bojo da consolidação da ACV como uma das mais abrangentes e robustas ferramentas de gestão ambiental¹⁹ em nível internacional que estudos baseados na

¹⁹ É importante mencionar que a ACV é apenas uma das ferramentas de gestão ambiental disponíveis atualmente. Existem outras ferramentas como, por exemplo, Avaliação de Desempenho Ambiental,

abordagem de ciclo de vida vêm se multiplicando e angariando espaço na literatura acerca da sustentabilidade da geração de energia na última década. Podendo ser divididos em duas categorias principais, esses estudos mais modernos geralmente estão centrados na avaliação de tecnologias específicas em nível de usina (micro escala) ou na avaliação de sistemas energéticos complexos em níveis regional e nacional (meso e macro escalas) (Laurent *et al.*, 2018).

Em linhas gerais, na primeira categoria, encontram-se trabalhos que visam, sobretudo, identificar pontos críticos na cadeia de produção e comparar tecnologias de geração de energia. Dentro desse contexto, Dorini *et al.* (2011) propõem uma metodologia baseada na abordagem de ciclo de vida para lidar com a incerteza na tomada de decisão. Tal metodologia é aplicada em um estudo de caso que compara a geração de energia elétrica por meio do carvão e da biomassa. Considerando três cenários de incertezas, os autores utilizam um método de AMD para avaliar ambas as fontes segundo 13 critérios ambientais e socioeconômicos. Os resultados indicam que a biomassa é preferível em dois dos três cenários considerados, enquanto que o carvão, em apenas um deles.

Em Traverso *et al.* (2012), os autores avaliam a sustentabilidade da etapa de montagem de diferentes módulos fotovoltaicos por meio da ASCV. Desse modo, comparam dois módulos alemães, um datando de 2008 e outro de 2009, e um módulo italiano de 2008 através da aplicação integrada da ACV, da ACV-S e do CCV. Os resultados do estudo são apresentados de forma agregada por meio de um painel de indicadores de sustentabilidade, referido como *Life Cycle Sustainability Dashboard* (LCSD) e desenvolvido pelos autores. Nele, é possível observar que o módulo alemão de 2008 apresenta o melhor desempenho geral de sustentabilidade, sendo seguido pelo seu compatriota de 2009 e pelo módulo italiano de 2008.

Noori *et al.* (2015) avaliam os impactos ambientais e socioeconômicos da geração de energia elétrica através de usinas eólicas nos Estados Unidos (EUA). Nesse sentido, os autores analisam dois tipos diferentes de aerogeradores *onshore* e *offshore* segundo nove indicadores. Para isso, lançam mão de um método de AMD baseado na integração do método AHP com a simulação de Monte Carlo. Os resultados revelam desempenhos distintos conforme a tipologia do aerogerador. Além disso, quando as questões ambientais

Avaliação de Risco, Auditoria Ambiental, Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) (ISO, 2006a; Magrini, 1990). Como será visto ao longo do capítulo, existem, além dessas, outras ferramentas que se baseiam no pensamento do ciclo de vida e abordam aspectos sociais e econômicos, são elas: a ACV-S e o CCV, respectivamente. Desse modo, a ACV pode não ser a ferramenta mais apropriada para todas as situações, mas sim apenas para casos específicos (ISO, 2006a).

são priorizadas com relação às questões socioeconômicas, os aerogeradores *offshore* se apresentam como a opção preferencial entre as alternativas consideradas.

Ainda com relação a energia eólica, Bitter *et al.* (2017) fornecem uma metodologia baseada na abordagem de ciclo de vida para avaliar a sustentabilidade de fontes renováveis de energia. Assim, integram a Lógica Nebulosa com uma ferramenta que organiza os indicadores e resultados, referida como *Integrative Sustainability Triangle* (IST) e desenvolvida pelos autores. Essa metodologia tem sua aplicação ilustrada através de um estudo de caso referente a um projeto para um parque eólico localizado na Alemanha, o qual é analisado segundo 24 indicadores ambientais, sociais e econômicos, podendo ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Como resultado, os autores indicam que para a implantação do referido projeto existem ainda recomendações do ponto de vista da sustentabilidade que devem ser atendidas.

Em Corona & San Miguel (2019), os autores avaliam a sustentabilidade de uma nova tecnologia heliotérmica que opera usando energia solar e combustíveis auxiliares denominada HYSOL (*HYbrid SOLar*). Para isso, os autores analisam comparativamente duas configurações para a HYSOL, uma utilizando biometano e a outra gás natural como combustível de hibridização. Além disso, levam em consideração 11 critérios ambientais, sociais e econômicos e utilizam a ACV (*atribucional e consequential*), a ACV-S, o CCV e uma Matriz de Insumo-Produto (MIP). Os principais resultados do estudo mostram que a introdução de ambas as tecnologias HYSOL reduz as emissões de GEE e proporciona uma melhora do bem-estar social.

Em níveis de sistemas energéticos mais complexos, observam-se trabalhos que se baseiam na abordagem de ciclo de vida dedicados principalmente à análise de políticas energéticas, cenários futuros e penetração de fontes renováveis na matriz energética em escalas regional e nacional. À luz da necessidade de se substituir a infraestrutura de eletricidade à carvão por opções com baixo teor de carbono, Hong *et al.* (2013) examinam cenários alternativos para a geração de eletricidade sustentável na Coreia do Sul. Considerando os limites físicos e econômicos das tecnologias disponíveis atualmente no país, incluindo fontes alternativas e renováveis de energia, analisam seus aspectos ambientais, sociais e econômicos por meio da aplicação de um método de AMD. Para isso, os autores utilizam 10 dos 30 indicadores de sustentabilidade fornecidos pela Agência Internacional de Energia Atômica²⁰ (IAEA) (2005), seguindo critérios de

²⁰ A IAEA corresponde ao fórum intergovernamental para a cooperação científica e técnica do uso seguro e pacífico da ciência e tecnologia nuclear. Nessa publicação de 2005, intitulada *Energy indicators for*

relevância e disponibilidade de dados para o contexto sul-coreano. Os resultados do estudo indicam que o cenário que prioriza a energia nuclear está associado aos menores impactos negativos, enquanto que o cenário que privilegia energias renováveis com células à combustível apresenta os maiores impactos negativos.

Em Santoyo-Castelazo & Azapagic (2014), os autores fornecem uma metodologia baseada na abordagem de ciclo de vida para avaliar a sustentabilidade de diferentes sistemas de energia segundo aspectos ambientais, sociais e econômicos. Assim, propõem a integração entre a ACV, a ACV-S, o CCV e um método de AMD. Tal metodologia é ilustrada através de um estudo de caso que analisa 11 cenários futuros para o fornecimento de eletricidade no México com relação a 17 indicadores de sustentabilidade. Como resultado, os autores apontam que o cenário baseado em combustíveis fósseis é insustentável, enquanto que aqueles com maior penetração de fontes renováveis de energia são os mais sustentáveis para o país.

Tendo em vista a meta de redução de 80% das emissões nacionais de GEE até 2050, Stamford & Azapagic (2014) avaliam a sustentabilidade de diferentes configurações da matriz elétrica do Reino Unido a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. Para isso, os autores consideram três níveis de descarbonização sob os quais analisam três cenários que incluem as mais relevantes fontes de energia para o país, sendo elas, nuclear, gás natural, carvão, energia eólica, solar fotovoltaica e biomassa. Os principais resultados do estudo indicam que, apesar dos cenários com baixo teor de carbono ostentarem os melhores desempenhos ambientais, apresentam incertezas com relação a *despachabilidade*²¹ e estabilidade da rede. Além disso, apontam que o cenário que dispõe de uma parcela igual de energia nuclear e renováveis é o mais sustentável.

Em Klein & Whalley (2015), os autores partem do princípio que a tomada de decisão orientada pela sustentabilidade no âmbito do setor energético requer a consideração de aspectos econômicos, ambientais, sociais e técnicos, para analisar comparativamente 13 opções tecnológicas de geração de energia atualmente disponíveis nos EUA. Empregando um método de AMD e utilizando 10 cenários representativos, consideram 8 critérios de sustentabilidade, sendo a maioria deles baseados na abordagem

sustainable development: guidelines and methodologies, a agência fornece um conjunto de indicadores relevantes para que os países possam acompanhar seus progressos em termos energéticos tendo em vista o desenvolvimento sustentável (IAEA, 2005).

²¹ A *despachabilidade* se refere à capacidade efetiva das fontes de energia serem prontamente controladas, aumentando sua produção de energia para a capacidade máxima nominal ou reduzindo-a a zero, de modo a adequar a oferta de energia do sistema à demanda (IEA, 2020).

de ciclo de vida. A partir dos resultados, as tecnologias de bioenergia e geotérmica aparecem com a maior pontuação em termos de sustentabilidade para o país. Além disso, outras tecnologias de energia renovável se revelam como melhores opções em relação aos combustíveis fósseis e a fonte nuclear.

Atilgan & Azapagic (2016) se debruçam sobre a sustentabilidade do setor elétrico na Turquia, avaliando segundo aspectos ambientais, sociais e econômicos as fontes de energia disponíveis atualmente no país. Assim, consideram as fontes carvão, gás natural, hidrelétrica, energia eólica e geotérmica e utilizam o método de AMD baseado na Teoria do Valor Multiatributo, referida frequentemente por MAVT (do inglês *Multi-Attribute Value Theory*). De acordo com os resultados do estudo, a energia hidrelétrica se mostrou como a opção mais sustentável para a Turquia, seguida pela geração geotérmica e eólica.

Diante de uma conjuntura que combina uma crise energética com o agravamento dos impactos ambientais causados por fontes não-renováveis de energia, Akber *et al.* (2017) buscam apoiar a formulação de políticas orientadas pela sustentabilidade no setor energético do Paquistão. Com isso em mente, adotam uma abordagem de ciclo de vida para analisar a sustentabilidade de sete fontes de energia segundo os mesmos indicadores ambientais, sociais e econômicos utilizados por Atilgan & Azapagic (2016). Os resultados indicam que a energia hidrelétrica é a opção mais sustentável, apresentando os menores impactos ambientais e econômicos. Por outro lado, as fontes térmicas baseadas no petróleo se mostraram como as menos sustentáveis para o país.

Em Shaaban *et al.* (2018), os autores buscam preencher a lacuna no que diz respeito a uma avaliação da sustentabilidade dos sistemas energéticos do Egito. Nesse sentido, conduzem uma avaliação das fontes de energia em potencial no país segundo aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais. Assim, consideram sete fontes, quais sejam, carvão, gás natural, energia eólica, solar heliotérmica, solar fotovoltaica, biomassa e nuclear. Além disso, utilizam dois métodos de AMD, são eles, o método AHP, para ponderação dos critérios, e o Método da Soma Ponderada, para obtenção de um índice único de sustentabilidade para cada fonte. Os resultados apontam uma melhor classificação para o gás natural, o qual é seguido pelas fontes renováveis, enquanto que as fontes nuclear e carvão se encontram nas últimas posições em termos de sustentabilidade.

Mais recentemente, Kabayo *et al.* (2019) avaliaram a sustentabilidade dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal: carvão, gás natural, hidrelétricas, energia eólica e solar fotovoltaica. Sob uma perspectiva de ciclo de vida,

analisaram seus desempenhos ambiental e socioeconômico. Seus resultados apontaram que a eletricidade gerada à base de carvão apresenta o pior desempenho ambiental e posicionaram as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) no topo dos sistemas mais ambiental e socioeconomicamente sustentáveis.

Roinioti & Koroneos (2019) conduzem uma ASCV do sistema elétrico da Grécia. Desse modo, avaliam 7 opções de tecnologias de geração de energia de origem renovável e não-renovável (carvão, gás natural, hidrelétrica, energia eólica, solar fotovoltaica e biomassa) sob 15 indicadores ambientais, sociais e econômicos. Tais opções tecnológicas são classificadas quanto à sustentabilidade usando a Teoria da Utilidade Multiatributo, referida frequentemente como MAUT (do inglês *Multi-Attribute Utility Theory*). Dando prioridade às dimensões ambiental e econômica, os resultados indicam que a energia eólica é a opção mais sustentável, a qual é seguida pela geração de energia a partir de PCHs. Já quando a dimensão social é priorizada, a fonte solar fotovoltaica se mostra como a opção mais sustentável.

Em Bhandari *et al.* (2021), os autores se mostram preocupados com a situação energética da República do Níger, onde se importa grande parte da eletricidade e a população enfrenta sérios problemas de acesso à energia. Assim, se debruçam sobre diferentes tecnologias de geração de energia visando a expansão da oferta energética interna no país. Com base em uma abordagem de AMD e no pensamento de ciclo de vida, os autores avaliam o desempenho de 8 alternativas energéticas com relação a 40 indicadores distribuídos em 6 dimensões, são elas: disponibilidade, risco, tecnologia, economia, meio ambiente e social. Um dos principais resultados do estudo indica a tecnologia solar fotovoltaica como a opção mais favorável à expansão da oferta interna de energia no país, uma vez que a mesma obteve os melhores desempenhos nas dimensões de disponibilidade e econômica.

Esse movimento de maior preocupação com a sustentabilidade da geração de energia não se restringe ao meio acadêmico, ele vem se refletindo no avanço de uma agenda energética internacional mais atenta às questões socioambientais e, conseqüentemente, na construção de futuros mais ambiciosos para a matriz elétrica mundial. Desde 2019, a IEA, agência internacional responsável por orientar a política energética de seus países membros, passou a adaptar seus relatórios sobre os padrões futuros do sistema global de energia visando incorporar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Como resultado, os cenários mais otimistas para a oferta de energia elétrica são atualmente pautados por ODS que, segundo a agência, estão mais

intimamente ligados à energia, são eles: boa qualidade do ar (ODS 3.2), acesso universal de energia (ODS 7) e combate às mudanças climáticas (ODS 13) (Figura 2.1) (IEA, 2019, 2018, 2017).

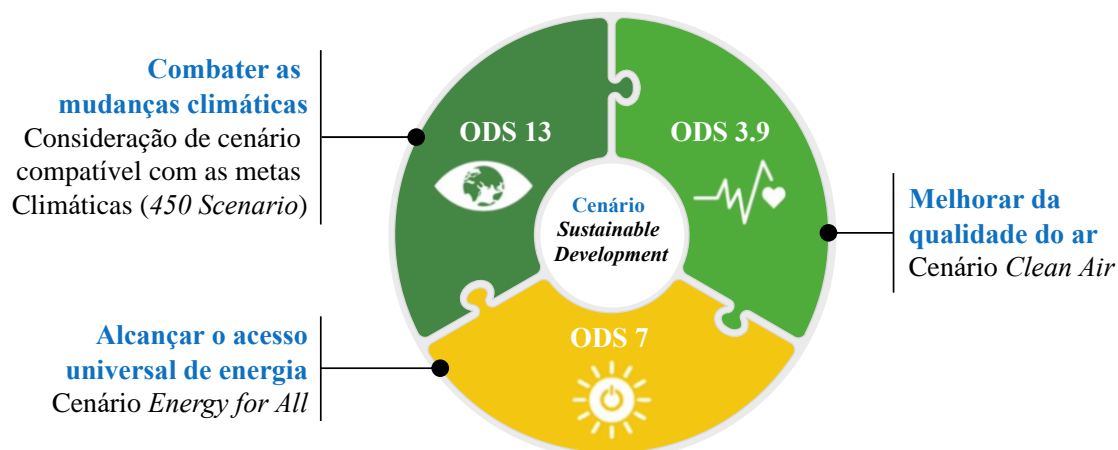


Figura 2.1 – Integração dos principais ODS relacionados a energia no cenário *Sustainable Development* da IEA
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em IEA (2019)

Nessa abordagem, a IEA preserva como objetivo central a segurança energética ao mesmo tempo em que avança no desenho de um futuro mais limpo e inclusivo. Ou, em outras palavras, os fundamentos básicos da política energética coexistem junto a metas de acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia; redução da poluição do ar, responsável por mortes e doenças; e tomada de medidas para combater as mudanças climáticas. Sob essa perspectiva, a agência chama a atenção dos governos para a necessidade de se priorizar o uso de recursos domésticos e renováveis e, sobretudo, tecnologias descentralizadas de baixo carbono (IEA, 2019).

Quando se volta o olhar para o cenário nacional, é possível observar que pouco tem sido feito para orientar o processo decisório do setor elétrico no sentido da sustentabilidade, principalmente no que se refere a adoção da abordagem de ciclo de vida e a consideração das particularidades de fontes alternativas e renováveis de energia com forte potencial de crescimento no país. Apesar da relevância do tema, há ainda poucos trabalhos a seu respeito no meio acadêmico nacional. Conde (2013) oferece um estudo que busca incluir critérios ambientais no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica no Brasil. Nesse sentido, propõe a ampliação do Modelo de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico (PLANEL), desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e baseado em critérios exclusivamente econômicos, de modo a transformá-lo em um problema de otimização multiobjetivo que incorpore

indicadores ambientais em sua formatação. Denominado como PLANEL-MO, esse novo modelo lança mão tanto de uma função objetivo ambiental composta por três funções quanto do método Delphi-AHP para definição dos pesos dos indicadores. O modelo PLANEL-MO foi testado por meio de um estudo de caso aplicado à expansão da oferta de energia elétrica no país, no qual foram considerados três indicadores ambientais sob uma abordagem de ciclo de vida.

Ginaid (2017), por sua vez, propõe a adaptação do Modelo de Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP) (Lisboa *et al.*, 2008), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) da Eletrobras, para uma versão multiobjetivo denominada MELP-SUSTENTÁVEL de modo a incorporar as principais questões socioambientais atinentes ao planejamento do setor elétrico nacional. Assim sendo, o problema que era originalmente pautado por critérios técnico-econômicos dá lugar a um problema multiobjetivo visando não apenas a minimização dos custos, mas também restrições relativas a impactos socioambientais. Os critérios socioambientais sugeridos pela autora se baseiam na abordagem de ciclo de vida e foram obtidos a partir de um estudo prévio realizado pelo CEPEL.

No que tange a política energética nacional, verifica-se que o planejamento da expansão da oferta de energia elétrica no país tem se apoiado em estudos e pesquisas produzidas pela EPE, braço operacional do Ministério de Minas e Energia (MME). Dentre suas principais atribuições, se destacam o Plano Nacional de Energia (PNE) (longo prazo) e o PDE (curto prazo). Em razão do seu horizonte de longo prazo e, conseqüentemente, das suas incertezas maiores, os PNEs têm sido preteridos pela política energética nacional em favor do PDE. De acordo com suas publicações mais recentes, os PDEs afirmam analisar, sob uma perspectiva sustentável, temas socioambientais que estão atrelados ao conjunto de projetos de energia elétrica previstos para o país, destacando aqueles temas que são prioritários para a gestão do setor elétrico no horizonte decenal (ver na Tabela 2.1) (Brasil, 2019a).

Por um lado, ao tomarem o conceito de sustentabilidade como norteador de suas análises socioambientais, os PDEs recorrem a um discurso corriqueiramente simplista de sustentabilidade, o qual não apenas está limitado e/ou focado em alguns poucos aspectos e/ou dimensões, mas carece também de uma definição clara de sustentabilidade sobre a qual se apoia. Dentro dessa lógica, se restringem a estabelecer premissas relativas à minimização de impactos socioambientais e discutir sobre as mudanças climáticas. Contudo, como alerta Pezzey (1989), a utilização do conceito de sustentabilidade sem o

fornecimento de uma definição detalhada pode facilmente levar a mal-entendidos e confusões. Tal situação destoa bastante daquilo que vem sendo feito pelos trabalhos até aqui mencionados e, sobretudo, pela IEA no sentido de incorporar as principais questões socioambientais atinentes à energia ao processo de tomada de decisão do setor elétrico ao redor do mundo.

Tabela 2.1 – Temas socioambientais dos PDEs mais recentes
 Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Brasil (2019a).

Temas socioambientais	Descrição resumida
Fauna	Interferências em vertebrados; perda direta de indivíduos; e transformação de ambientes relevantes ou únicos.
Organização territorial	Atração de contingentes populacionais; pressão sobre a infraestrutura local, equipamentos e serviços; e surgimento de limitações ao uso e ocupação do solo.
Paisagem	Impacto visual em paisagens naturais e urbanas.
Povos e terras indígenas	Relativo à diversidade étnica, questão territorial, gestão de conflitos pelo uso de recursos e participação dos indígenas nas discussões de projetos energéticos.
Comunidades quilombolas	Sensibilidade das comunidades quilombolas e gestão dos conflitos em função da interferência em terras tradicionalmente por elas ocupadas.
Qualidade do ar	Emissões de poluentes atmosféricos decorrentes da geração de energia elétrica ou da produção de combustíveis.
Recursos hídricos	Possíveis conflitos pelo uso dos recursos hídricos, especialmente nos locais onde a disponibilidade é crítica.
Resíduos	Produção de resíduos sólidos ou efluentes líquidos resultantes dos processos de transformação para geração de energia ou produção de combustíveis.
Unidades de conservação	Relacionado às unidades de conservação (UC) que são espaços territoriais definidos com objetivos de conservação da natureza.
Vegetação nativa	Efeitos associados à supressão da vegetação nativa, como a perda de habitat e de biodiversidade.

Convém lembrar que, apesar de inúmeras definições existentes, na concepção mais tradicional do termo “sustentabilidade”, a *World Commission on Environment and Development* (WCED, 1987) faz referência a um desenvolvimento que “atende as

necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras”. Também é de amplo conhecimento a popularização do conceito do *Triple Bottom Line* (TBL) como modelo de avaliação da sustentabilidade de empresas, produtos e tecnologias com relação às dimensões ambiental, social e econômica (Elkington, 1998). Tal modelo se revela adequado aos principais desafios de um aproveitamento elétrico sustentável na medida em que a incorporação da sustentabilidade no setor elétrico em nível mundial tem evoluído principalmente em torno dessas três dimensões (Maxim, 2014).

Por outro lado, fica evidente que a análise socioambiental dos PDEs não está atenta às particularidades de grande parte das fontes alternativas e renováveis de energia. Isso porque seu enfoque está voltado exclusivamente para as interferências socioambientais negativas relativas às etapas de geração e transmissão de energia. Não à toa, as tecnologias solar fotovoltaica e eólica ganham destaque por não emitirem GEE na etapa de geração de energia elétrica. Disso decorre uma não contabilização de suas emissões de GEE e outros potenciais problemas associados a etapas anteriores e posteriores. Para citar apenas um exemplo, a depleção de recursos minerais, que é frequentemente reportada como um aspecto relevante, em se tratando de algumas tecnologias de geração de energia proveniente de fontes alternativas e renováveis, tal como apontam Laurent *et al.* (2017), não é considerada pela análise socioambiental dos PDEs.

Esse quadro é corroborado pela *Nota Técnica referente à Análise Socioambiental das Fontes Energéticas do PDE 2029* (Brasil, 2019b). Ao fornecer subsídios socioambientais para a expansão decenal, o documento aborda os principais benefícios, interferências, desafios e indicadores socioambientais para cada fonte de energia prevista no período. Nele, os indicadores socioambientais selecionados para geração solar fotovoltaica e eólica ficam limitados às etapas de implantação e operação dos empreendimentos energéticos (Tabela 2.2). No que diz respeito mais especificamente a fonte solar fotovoltaica, o documento reconhece não só os desafios relacionados ao descarte de resíduos, quando do descomissionamento de usinas solares, como também a intensificação de problemas socioambientais associados à sua cadeia de produção com o eventual desenvolvimento de um parque industrial voltado para a fabricação de células fotovoltaicas no país. Apesar de prever a necessidade de se adaptar a gestão ambiental a essas preocupações, utiliza indicadores que não abordam questões sobre o fim de vida tampouco outros impactos atrelados aos processos *upstream* e *downstream* da cadeia de produção da tecnologia solar fotovoltaica.

Tabela 2.2 – Indicadores ambientais e socioeconômicos considerados pela análise socioambientais dos PDEs para as fontes solar fotovoltaica e eólica
 Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Brasil (2019b)

Fonte solar fotovoltaica	Unidade
Indicadores ambientais	
Área das plantas fotovoltaicas	km ²
Área das plantas fotovoltaicas por potência instalada	km ² /MW
Indicadores socioeconômicos	
Empregos diretos gerados no pico das obras	empregos
Fonte eólica <i>onshore</i>	Unidade
Indicadores ambientais	
Área total dos parques eólicos	km ²
Área total dos parques eólicos por potência instalada	km ² /MW
Nº. de parques eólicos com interferência em UC de uso sustentável	un.
Indicadores socioeconômicos	
Nº. de parques eólicos com interferência direta em terras indígenas	un.
Empregos diretos	empregos/MW
Empregos diretos gerados na construção	empregos

Interessante notar também que o documento dá maior ênfase às usinas hidrelétricas (UHEs) de médio e grande portes. Nesses casos em particular, o número de informações e indicadores considerados é significativamente superior àquele relativo às demais tecnologias de geração de energia elétrica²². Se por um lado, tais aspectos denotam a experiência adquirida pelo setor elétrico brasileiro no que diz respeito ao tratamento dos problemas socioambientais gerados por essas fontes renováveis de energia mais tradicionais; por outro, implicam na condução de uma análise socioambiental desequilibrada uma vez que as diferentes tecnologias não são avaliadas segundo as mesmas bases e critérios. O gráfico da Figura 2.2 evidencia que essa lógica persiste

²² Para se ter uma ideia, enquanto as fontes solar fotovoltaica e eólica dispõem de 3 e 6 indicadores socioambientais, respectivamente (ver Tabela 2.2), as UHEs dispõem de 19 indicadores, sendo eles 7 ambientais e 12 socioeconômicos. Os indicadores ambientais são os seguintes: área alagada (km²), área alagada por potência instalada (km²/MW), perda de vegetação nativa (km²), perda de vegetação nativa por MW (km²/MW), transformação do ambiente lótico em lêntico, número de UHEs com interferência em UC de proteção, e número de UHEs com interferência em UC de uso. Já os indicadores socioeconômicos são: população diretamente afetada (hab.), população diretamente afetada por MW (hab./MW), interferência na infraestrutura (população atraída/população dos municípios), número de UHEs que interferem em quilombos, número de UHEs que interferem diretamente em terras indígenas, número de UHEs situadas até 40 km de terras indígenas na Amazônia Legal e 15 km nas demais regiões, empregos diretos gerados no pico das obras, empregos diretos gerados no pico das obras por MW (empregos/MW), compensação financeira (R\$ em milhões), compensação financeira para os estados no decênio (R\$ em milhões), compensação financeira para os municípios no decênio (R\$ em milhões), e Imposto Sobre Serviços (ISS) gerado nas obras no decênio (R\$ em milhões) (Brasil, 2019b).

mesmo diante da evolução prevista para as fontes alternativas e renováveis de energia na matriz elétrica nacional, revelando, assim, uma descontextualização da análise socioambiental dos PDEs mais recentes com relação à realidade atual e, sobretudo, dos futuros por eles projetados para o setor elétrico nacional.

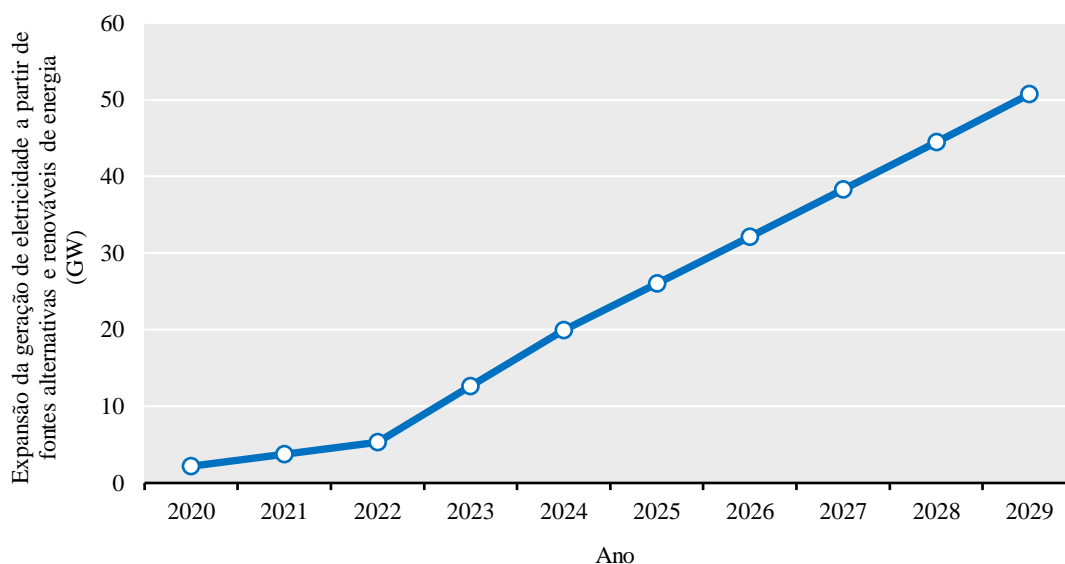


Figura 2.2 – Evolução prevista da capacidade instalada no período de dez anos para as fontes alternativas e renováveis de energia (excluindo PCHs e mini-UHEs)
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Brasil (2020, 2018, 2017, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011).

Outro aspecto a ser levado em conta diz respeito à definição das fronteiras da análise socioambiental dos PDEs. Sobre isso, é importante enfatizar que impactos socioambientais se propagam tanto no tempo quanto no espaço, especialmente nos casos de sistemas amplamente distribuídos, tal como de fontes alternativas e renováveis de energia (Rathore *et al.*, 2013). Dessa realidade decorre a necessidade de se *discretizar* espaço-temporalmente suas consequências socioambientais de modo a categorizá-las e, conseqüentemente, favorecer sua identificação, predição e avaliação. Uma vez que se mostra preocupada com as realidades locais, a análise socioambiental dos PDEs está atenta à escala espacial dessa *discretização* de impactos, porém relega a segundo plano sua escala temporal.

Todos os pontos aqui sintetizados com relação a análise socioambiental dos PDEs evidenciam que o planejamento elétrico nacional está apoiado sobre uma lógica predominantemente economicista que pouco contribui para incorporar a sustentabilidade no seu processo de tomada de decisão. Além disso, os temas socioambientais estabelecidos pelos PDEs, deficientes ou não, não afetam a seleção dos projetos

energéticos previstos para o horizonte decenal. Como foi visto aqui, esse quadro vai de encontro à crescente atenção dedicada à sustentabilidade e a cadeia de produção de fontes alternativas e renováveis de energia em nível internacional. Embora a presente pesquisa esteja restrita ao setor elétrico do país, cabe ressaltar que os aspectos aqui abordados são *a priori* atribuíveis também ao setor energético nacional como um todo.

2.2. A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO CICLO DE VIDA

Em contraposição ao enfoque da análise socioambiental dos PDEs, as crescentes preocupações com a degradação do meio natural e com o acesso cada vez mais limitado a recursos naturais vêm mobilizando novas formas de pensar o planejamento energético ao redor do mundo, tal como a abordagem oferecida pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Hirschberg & Burgherr, 2015; Hong *et al.*, 2013; Kabayo *et al.*, 2019; Maxim, 2014; Santoyo-Castelazo & Azapagic, 2014; Wang *et al.*, 2009). Essa técnica compõe o quadro de instrumentos de gestão ambiental necessário às modernas políticas e decisões empresariais voltadas para a produção e consumo ambientalmente responsáveis (EC-JCR, 2010). Dispõe de uma metodologia amplamente reconhecida, estruturada e internacionalmente padronizada sobre a qual converge a necessidade de se estudar os potenciais impactos ambientais associados à cadeia produtiva de bens de consumo ou serviços (ISO, 2006a, 2006b).

Sua abordagem se mostra não apenas adequada à incorporação de aspectos ambientais na tomada de decisão do setor elétrico como também particularmente interessante para o tratamento de fontes alternativas e renováveis de energia, tendo em vista que a maior parte dos seus impactos não está concentrada na etapa de geração de energia elétrica, mas distribuída ao longo de suas cadeias produtivas (Laurent *et al.*, 2018). Isso porque proporciona uma visão ampliada da cadeia de geração de energia elétrica de modo a abranger o ciclo de vida completo das diferentes tecnologias de geração de energia elétrica. Em outras palavras, um olhar mais atento sobre as etapas em que os seus insumos passam por algum tipo de transformação, o que é indispensável para a condução de comparações mais *justas* entre as diferentes fontes de energia.

Na esteira das discussões acerca do desenvolvimento sustentável, vem se dando mais recentemente o alargamento do escopo da ACV no sentido de englobar também aspectos sociais e econômicos, resultando, assim, na Avaliação da Sustentabilidade do

Ciclo de Vida (ASCV)²³. Para o grupo de trabalho composto pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e pela Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011)

“Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) refers to the evaluation of all environmental, social and economic negative impacts and benefits in decision-making processes towards more sustainable products throughout their life cycle. (...) The life cycle perspective considers all life cycle stages for products, and for organizations the complete supply or value chains, from raw material extraction and acquisition, through energy and material production and manufacturing, to use and end-of-life treatment and final disposal. Through such a systematic overview and perspective, the unintentional shifting of environmental burdens, economic benefits, and social well-being between life cycle stages or individual processes can be identified and possibly avoided”.²⁴

Embora a cobertura desses aspectos não seja tratada pela série de normas ISO 14.040 e 14.044 (ISO, 2006a, 2006b) voltada para a ACV, devido a sua restrição explícita aos aspectos ambientais, existem outros documentos voltados para esse fim. O projeto *Co-ordination Action for Innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability* (CALCAS) liderado pelo *Institute of Environmental Sciences of Leiden University* (CML) fornece uma estrutura lógica e um roteiro com indicações capazes de combinar as dimensões ambiental, social e econômica e facilitar a condução de uma ASCV (CALCAS, 2009; Guinée, 2016). Paralelamente, o grupo de trabalho UNEP/SETAC fornece orientações sobre como combinar essas três dimensões da sustentabilidade de modo a tornar possível a ampliação da ACV clássica para a ASCV (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011).

A despeito dessas publicações, se multiplicam relatos de pesquisadores do tema acerca dos inúmeros desafios²⁵ enfrentados na operacionalização de uma ASCV, dentre

²³ As primeiras discussões acerca da consideração de aspectos sociais e econômicos ao longo do ciclo de vida de produtos datam da década de 1980. Foi nessa época que o instituto alemão *Öko-Institute* inaugurou a integração da abordagem do ciclo de vida com o conceito do TBL e lançou em 1987 o método denominado “*Produktlinien-analyse*” (Guinée, 2016; UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011).

²⁴ “A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) se refere à avaliação dos impactos ambientais, sociais e econômicos, sejam eles positivos ou negativos, durante os processos de tomada de decisão voltada para a concepção de produtos mais sustentáveis considerando o seu ciclo de vida completo. (...) A perspectiva de ciclo de vida leva em conta todos os estágios do ciclo de vida de produtos, e para organizações, as cadeias completas de suprimento ou de valor, desde a extração e aquisição de matérias-primas, passando pela produção, até o uso e o tratamento e disposição final de fim de vida. Por meio de uma visão e perspectiva abrangente, a transferência não intencional de impactos entre as dimensões ambiental, social e econômica, bem como entre os diferentes estágios do ciclo de vida, pode ser identificada e possivelmente evitada” (tradução livre) (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011).

²⁵ Como será visto nas seções a seguir, existem, além desses, outros desafios reportados pela literatura quando da aplicação de uma ASCV como, por exemplo, a escassez de exemplos práticos, a dificuldade em comunicar de modo claro e transparente os resultados, a falta de modelos mais dinâmicos, a necessidade de

os quais se destacam tanto a definição de indicadores de sustentabilidade adequados e preferencialmente quantitativos e práticos, sobretudo, no que tange a dimensão social, quanto a integração das dimensões ambiental, social e econômica (Guinée, 2016).

De um modo geral, o desenvolvimento de trabalhos que favoreçam a aplicação da ASCV em benefício do tratamento mais simétrico de aspectos socioambientais dentro de um setor em evolução, tal como a presente pesquisa, vem se revelando bastante oportuno tendo em vista as perspectivas de Guinée *et al.* (2011), Guinée (2015) e Gloria *et al.* (2017) no que se refere aos desdobramentos da ACV clássica. Para esses autores, a ASCV se encontra em um estágio de evolução contínua no sentido de contribuir na solução de questões em diferentes níveis de produtos, setores e economias através da crescente aplicação deste conceito em estudos preocupados com o desenvolvimento e a sustentabilidade (Gloria *et al.*, 2017; Guinée *et al.*, 2011).

Além disso, os resultados obtidos por meio das ferramentas de ciclo de vida estão cada vez mais apoiando a formulação de políticas públicas e regulamentações baseadas em desempenho (Guinée, 2016). Na Alemanha e na França, a ACV auxilia na gestão do fim de vida e na certificação de produtos, respectivamente. Dentro do setor energético, apoia a legislação de biocombustíveis na Alemanha, México, Peru e Chile. Esses exemplos denotam o potencial da ASCV em fomentar políticas públicas em benefício da sustentabilidade de um modo geral, mas também dentro do setor energético em nível nacional. No entanto, mesmo com uma ampla disseminação internacional, o pensamento do ciclo de vida é ainda pouco difundido e aplicado no Brasil²⁶ (Filho *et al.*, 2016).

Antes de prosseguir, devo salientar que a abordagem de ciclo de vida tem ampla aceitação no meio acadêmico nacional ligado à sustentabilidade. Assim, os especialistas da área vêm canalizando esforços para que suas ferramentas sejam utilizadas na formulação de políticas públicas e na gestão da sustentabilidade de empresas privadas²⁷.

se evitar dupla contagem entre as questões abordadas pela ACV, ACV-S e CCV, a complexidade em lidar com as diferentes perspectivas do produtor, consumidor e sociedade no CCV, entre outros (Guinée, 2016).

²⁶ É interessante notar que a reflexão mais próxima do pensamento do ciclo de vida verificada de modo mais abrangente no país se deu durante a greve dos caminhoneiros em 2018. Sua consequente interrupção das cadeias de abastecimento no mês de maio do mesmo ano provocou inquietações em todo o território nacional. Quando a população se deu conta que os bens de consumo que ela estava acostumada a adquirir não estavam mais disponíveis nas gôndolas dos estabelecimentos comerciais, o país como um todo se viu forçado a voltar suas atenções sobre a cadeia de suprimentos de produtos e serviços.

²⁷ Vale ressaltar que o emprego de ferramentas monocrítérios e baseadas na abordagem de ciclo de vida, tal como as metodologias de Pegada de Carbono e Pegada Hídrica, pode ser visto como os primeiros passos neste sentido. Isso porque tais ferramentas são uma das formas mais acessíveis e relativamente simples de introduzir o pensamento do ciclo de vida em uma organização. Enquanto a Pegada de Carbono corresponde a soma de emissões e remoções de GEE em um sistema de produto, expressa em CO₂ equivalente; a Pegada

Tal iniciativa se revela fundamental tanto para responder a demandas externas originárias de economias mais desenvolvidas e avançadas em termos de proteção ao meio ambiente e sustentabilidade quanto para valorizar algumas cadeias produtivas nacionais que possuem bons desempenhos socioambientais²⁸ (Filho *et al.*, 2016).

Retomando as discussões acerca da ASCV, a abordagem de ASCV fornecida por Kloepffer (2008) é a mais empregada pela literatura e mobiliza a aplicação e integração do trio Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV). Tal proposta é conceitualmente colocada pelo autor segundo a Equação 2.1, evidenciando a importância de se considerar e analisar os resultados provenientes dessas três técnicas.

$$ASCV = ACV + CCV + ACV-S \quad 2.1$$

Essa abordagem mais holística que aquela oferecida pela ACV clássica, se mostra igualmente adequada à incorporação da sustentabilidade ao processo decisório do setor elétrico e ao tratamento de tecnologias de geração de energia a partir de fontes alternativas e renováveis. Ademais, é compatível com o conceito do TBL (Elkington, 1998) já que consegue lidar sistematicamente com aspectos ambientais, sociais e econômicos (Figura 2.3). No mesmo sentido, Guinée *et al.* (2011) propõe a ampliação dessa ideia de ASCV que abranja não só aspectos ambientais, sociais e econômicos, mas também possibilite análises em nível setorial ou da economia como um todo.

Hídrica quantifica os impactos ambientais potenciais relacionados à água em um sistema de produto; ambas abarcam todos os estágios do ciclo de vida do sistema de produto em questão (ISO, 2014, 2013).

²⁸ Dentre a extensa lista de aspectos ambientais que podem ser abordados por meio da abordagem de ciclo de vida, pode-se constatar a presença de diversas questões que são chave para o Brasil. Ao possuir recursos naturais abundantes, dispor uma matriz energética considerada limpa e deter florestas e biodiversidade que permitem gerar serviços ecossistêmicos, o país dispõe de amplas oportunidades ambientais. Diante disso, os setores público e privado têm um papel fundamental a cumprir no sentido de sinalizar para o resto do mundo que o país está engajado em uma economia ambientalmente sustentável, combatendo a visão negativa do investidor estrangeiro ao mesmo tempo em que atrai novas demandas do exterior.

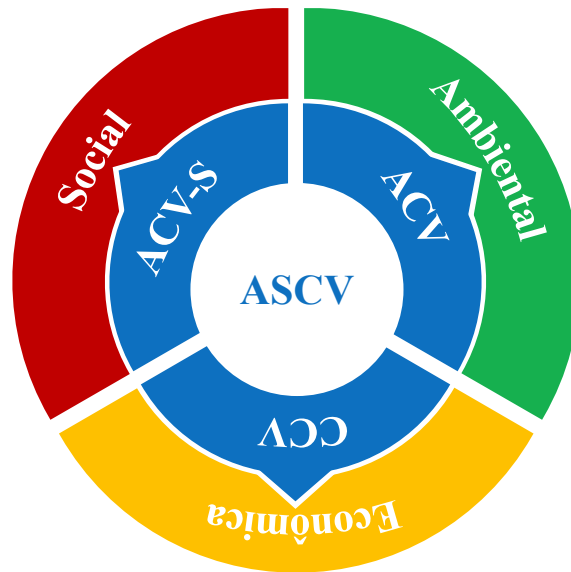


Figura 2.3 – Ilustração da estrutura da ASCV
 Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida

À medida que o processo econômico se revelava como responsável por engendrar transformações irreversíveis ao longo do tempo, se intensificavam as reflexões acerca das suas relações biofísicas com o meio natural. O sistema de (re)produção que transformava matéria-prima em bens de consumo e, em sequência, gerava algum tipo de resíduo não poderia, portanto, estar isolado da natureza (Georgescu-Roegen, 1971; Veiga, 2015). Sob essa perspectiva, a necessidade imperativa de se elaborar métodos que melhor compreendessem tais fluxos diante das preocupações acerca da degradação ambiental e, sobretudo, do acesso limitado aos recursos culminou na ACV²⁹ (Bjørn *et al.*, 2018).

Do ponto de vista ambiental, a ACV, também conhecida pela sigla E-LCA (do inglês *Environmental Life Cycle Assessment*), cobre sistematicamente aspectos ambientais desde a aquisição de matérias-primas até a disposição final de resíduos relativos a produtos ou serviços. Possui um roteiro metodológico padronizado pela série de normas ISO 14.040 e 14.044 (ISO, 2006a, 2006b), o qual estabelece quatro etapas para

²⁹ As origens da ACV como se conhece hoje remontam ao final da década de 1960 e ao início da década de 1970, quando as questões ambientais se tornaram um tema de amplo interesse público. Dentro desse contexto, os primeiros estudos que hoje são reconhecidos como sendo ACVs (*parciais*) estavam focados nos impactos ambientais de embalagens, as quais eram alvo de grande preocupação dos consumidores na época. Apesar disso, ao invés de serem divulgados diretamente ao público, os resultados dos estudos eram frequentemente usados para fins internos das organizações, como por exemplo, orientar a redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de seus produtos. Um dos estudos mais emblemáticos corresponde à análise encomendada pela Coca-Cola em 1969 para quantificar o consumo de insumos e a geração de emissões e resíduos de diferentes embalagens de bebidas (Bjørn *et al.*, 2018; Guinée *et al.*, 2011).

sua aplicação, quais sejam: (i) *definição de objetivo e escopo*, (ii) *análise de inventário do ciclo de vida (ICV)*, (iii) *avaliação de impactos ambientais do ciclo de vida (AICV)* e (iv) *interpretação de resultados* (Figura 2.4). De modo complementar, a União Europeia fornece, por meio da sua iniciativa científica *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD)*, indicações técnicas sobre a maneira de se elaborar diferentes estudos de ACV com qualidade e coesão³⁰ (EC-JCR, 2010).

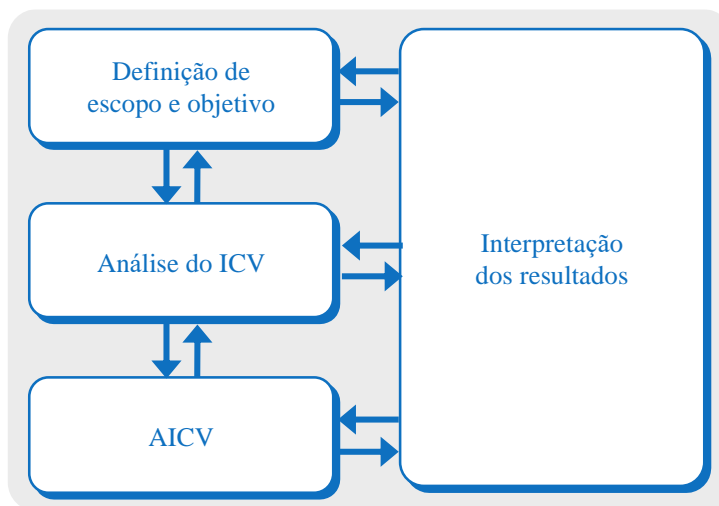


Figura 2.4 – Etapas da ACV
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em ISO (2006a).

Para a aplicação da ACV, existem duas abordagens, denominadas como *atribucional* e *consequencial*. Em linhas gerais, a ACV *atribucional* é a abordagem convencional que consiste na avaliação dos impactos ambientais de um sistema de produto sem interagir com outros sistemas. Por outro lado, a abordagem *consequencial* leva em consideração as mudanças no mercado em função da demanda de uma unidade funcional do sistema de produto. Portanto, avalia as consequências ambientais em um sistema dinâmico (Corona & San Miguel, 2019; EC-JCR, 2010).

Atualmente existe uma gama de *softwares* que auxiliam a realização de estudos de ACV. Eles dispõem de bancos de dados de ICV e métodos de cálculos de AICV que facilitam a análise dos fluxos de materiais e energia e a correlação desses fluxos com aspectos ambientais específicos, respectivamente. *OpenLCA*, *SimaPro*, *GaBi* e *Humberto* são apenas alguns deles. O *SimaPro* se destaca não só por reunir os principais bancos de

³⁰ A iniciativa *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD)* fornece um guia abrangente e detalhado para a realização da ACV, intitulado *The General Guide for Life Cycle Assessment* (EC-JCR, 2010). Além desse documento principal, fornece também guias específicos para as etapas de ICV e AICV, bem como outras publicações que visam orientar a condução de estudos de ACV consistentes e de qualidade.

dados e métodos de avaliação disponíveis, mas por ser também a ferramenta mais amplamente utilizada na avaliação do desempenho ambiental de produtos (EC-JCR, 2010). Cabe destacar que, enquanto o *Ecoinvent* (Wernet *et al.*, 2016) é a principal e mais completa base de dados internacional de ICV, o *ReCiPe 2016*³¹ (Huijbregts *et al.*, 2017) é o mais atual e consistente método de cálculo disponível para AICV (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Categorias de impacto *midpoint* e *endpoint* do *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017)

Categorias de impacto <i>ReCiPe 2016</i>	
<i>Midpoint</i>	<i>Endpoint</i>
Aquecimento global	Saúde humana
Depleção da camada de ozônio	Ecosistemas
Radiação ionizante	Recursos
Formação fotoquímica de ozônio, saúde humana	
Formação de material particulado fino	
Formação fotoquímica de ozônio, ecossistemas	
Acidificação terrestre	
Eutrofização em água doce	
Eutrofização marinha	
Ecotoxicidade terrestre	
Ecotoxicidade em água doce	
Ecotoxicidade marinha	
Toxicidade humana cancerígena	
Toxicidade humana não cancerígena	
Uso do solo	
Escassez de recursos minerais	
Escassez de recursos fósseis	
Consumo de água	

2.2.2. Avaliação do Ciclo de Vida Social

Incorporar a dimensão social em uma abordagem de ciclo de vida significa considerar as implicações da cadeia de processos envolvidos na provisão de bens de consumo e serviços sobre o bem-estar humano (Macombe *et al.*, 2013). Esse procedimento, ainda incipiente, intitulado como Avaliação do Ciclo de Vida Social

³¹ O *ReCiPe 2016* é um método de AICV que integra e harmoniza as abordagens de *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura consistente, oferecendo, resultados orientados a problemas e danos, respectivamente. Assim, transforma a longa lista de informações do ICV em um número limitado de indicadores, os quais podem descrever um problema ambiental (*midpoint*) ou avaliar o dano causado sobre uma área de proteção (*endpoint*) (Tabela 2.3) (Goedkoop *et al.*, 2008).

(ACV-S), se distingue de outras metodologias de avaliação de impactos sociais em razão do seu objeto (bens de consumo e serviços) e seu campo de estudo (ciclo de vida completo) (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2009; UNEP, 2020).

A publicação do *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products* (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2009) pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC em 2009 trouxe uma estrutura para a condução estudos de ACV-S, com elementos-chave e orientações específicas. Esse documento propõe uma abordagem geral com base em um conjunto de *stakeholders* e as categorias e subcategorias de impacto social mais adequadas (ver Tabela 2.4). Foi durante uma década a principal referência para a ACV-S até ser revisado pela UNEP no final de 2020 (UNEP, 2020), incorporando avanços metodológicos e experiências práticas mais recentes (Toniolo *et al.*, 2020).

Paralelamente, *The Methodological Sheets for Sub-Categories in Social Life Cycle Assessment* (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013) define indicadores genéricos e específicos para cada subcategoria e fornece fontes de dados potenciais para a coleta de ambos os tipos de indicadores. No caso de dados secundários³², as fontes podem ser a literatura científica, relatórios de organizações nacionais e internacionais e bancos de dados, como o *Social Hotspot Database* (SHDB) (Benoit-Norris *et al.*, 2012) e o *Product Social Impact Life Cycle Assessment* (PSILCA) (Ciroth & Eisfeldt, 2016), que abordam o desempenho social apenas em nível nacional ou setorial (Kühnen & Hahn, 2017; Toniolo *et al.*, 2020).

É importante mencionar que se pode identificar atualmente duas abordagens principais para a ACV-S, são elas: (i) *abordagem interpretativista* (também conhecida como *Reference Scale Assessment*), seguida pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC; e (ii) *abordagem pós-positivista* (também referida como *Impact Pathway Assessment*), desenvolvida por Macombe *et al.* (2013). Em geral, o primeiro grupo é o mais comum e contempla estudos de ACV-S focados principalmente em *stakeholders* e indicadores qualitativos e estáticos. Já a segunda vertente reúne os estudos de ACV-S que estão centrados nas vias de impacto, relações de causa-efeito e consequências quantificáveis por meio da aplicação de métodos quantitativos baseados essencialmente em modelagem matemática (Iofrida *et al.*, 2018).

³² Neste caso, os dados secundários correspondem a informações que, diferentemente dos dados primários, não são coletadas pelos condutores da ASCV junto aos seus objetos de estudo. Mas sim obtidas e analisadas, em um primeiro momento, por terceiros com objetivos eventualmente distintos da ASCV em questão, podendo ser representadas por informações disponíveis na literatura e bancos de dados.

Tabela 2.4 – Categorias e subcategorias de impactos sociais³³ recomendadas por UNEP (2020)

Categorias de Stakeholder	Subcategorias
Trabalhadores	Liberdade de associação e negociação coletiva Trabalho infantil Salário justo Jornada de trabalho Trabalho forçado Igualdade de oportunidades/Discriminação Saúde e segurança Benefícios sociais/Segurança social Relações de emprego ³⁴ Assédio sexual ³⁴ Pequenos produtores ³⁴
Comunidade local	Acesso a recursos materiais Acesso a recursos imateriais Deslocamento e migração Herança cultural Condições seguras e saudáveis de vida Respeito aos direitos indígenas Engajamento da comunidade Emprego local Condições protegidas de vida
Atores da cadeia de valor (não inclui consumidores)	Competição justa Promoção da responsabilidade social Relação com fornecedores Respeito aos direitos de propriedade intelectual Distribuição de riqueza ³⁴
Consumidores	Saúde e segurança Mecanismo de <i>feedback</i> Privacidade do consumidor Transparência Responsabilidade de fim de vida
Sociedade	Compromissos públicos com a sustentabilidade Contribuição para o desenvolvimento econômico Prevenção e mitigação de conflitos armados Desenvolvimento tecnológico Corrupção Tratamento ético dos animais ³⁴ Redução da pobreza ³⁴
Crianças ³⁴	Educação oferecida na comunidade local ³⁴ Preocupações com a saúde das crianças consumidoras ³⁴ Preocupações com as práticas de marketing ³⁴

³³ Tradução livre para as categorias (*Worker, Consumers, Local community, Society, Value chain actors e Children*) e subcategorias (*Freedom of Association and Collective Bargaining, Child Labour, Fair Salary, Working Hours, Forced Labor, Equal opportunities/Discrimination, Health and Safety, Social Benefits/Social Security, Employment relationship, Sexual harassment, Smallholders including farmers, Access to material resources, Access to immaterial resources, Delocalization and Migration, Cultural Heritage, Safe & healthy living conditions, Respect of indigenous rights, Community engagement, Local employment, Secure living conditions, Fair competition, Promoting social responsibility, Supplier relationships, Respect of intellectual property rights, Wealth distribution, Health & Safety, Feedback Mechanism, Consumer Privacy, Transparency, End of life responsibility, Public commitments to sustainability issues, Contribution to economic development, Prevention & mitigation of armed conflicts, Technology development, Corruption, Ethical treatment of animals, Poverty alleviation, Education provided in the local community, Health issues for children as consumers, Children concerns regarding marketing practices*).

³⁴ Categorias e subcategorias de impactos sociais adicionadas no âmbito da publicação do *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020* (UNEP, 2020).

2.2.3. Custo do Ciclo de Vida

O Custo do Ciclo de Vida (CCV) complementa a ACV e a ACV-S em termos de avaliação de sustentabilidade e, como o seu próprio nome sugere, permite avaliar o desempenho econômico de um produto ou sistema em função dos custos financeiros associados ao seu ciclo de vida. A condução de uma análise de CCV pode ter uma variedade de propósitos. Ele pode ser usado para apoiar a análise de viabilidade econômica, identificação de *hotspots* financeiros, tomada de decisão de investimento e alocação de recursos (Hunkeler *et al.*, 2008; Rödger *et al.*, 2018).

O CCV corresponde à primeira menção ao conceito de ciclo de vida, que foi registrada no final da década de 1950, quando Novick (1959) empregou uma abordagem baseada no ciclo de vida para avaliar os investimentos em armas militares (Huppés & Curran, 2012). Hoje, é utilizado por parte significativa da indústria e vários padrões setoriais específicos estão disponíveis. Por exemplo, *AS/NZS 4.536: Life Cycle Costing – An application guide* (AS/NZS, 1999), que fornece diretrizes para o uso do CCV nos setores públicos e privados na Austrália e Nova Zelândia; *ISO 15.663: Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Life Cycle Costing* (ISO, 2000), voltado para o setor petroquímico; *IEC 60300-3-3: Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life Cycle Costing* (IEC, 2017), específico para o setor eletrotécnico; e *ISO 15.686-5: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life Cycle Costing* (ISO, 2017), voltado para o setor de construção.

Procurando harmonizar o CCV dentro do pacote de ferramentas de gerenciamento do ciclo de vida, Hunkeler *et al.* (2008) descreve uma metodologia de CCV consistente com uma ACV. Seu alinhamento com a metodologia da ACV clássica se dá, sobretudo, pela compatibilização das fronteiras do sistema, unidade funcional e etapas metodológicas. Os autores estabelecem três tipos de CCV, são eles: (i) *convencional*, (ii) *ambiental* e (iii) *social*. Em geral, o CCV convencional está focado nos custos internos³⁵ associados ao ciclo de vida de um produto que são arcados pelo seu produtor ou usuário. O CCV ambiental corresponde a um aperfeiçoamento do CCV convencional na medida em que inclui custos de externalidades e outras despesas que são cobertos por mais de um ator da cadeia de valor de um produto, como, por exemplo, fornecedor, fabricante, usuário etc. Por fim, o CCV social avança em uma análise econômica sob a perspectiva de toda a

³⁵ Neste caso, os custos internos estão restritos à microeconomia e correspondem às despesas e receitas envolvidas nas etapas da cadeia de valor de produtos e serviços (Hunkeler *et al.*, 2008).

sociedade, na qual os custos associados ao ciclo de vida de um produto podem ser arcados por qualquer pessoa da sociedade como um todo (Hunkeler *et al.*, 2008).

Do ponto de vista dos sistemas de indicadores econômicos existentes para o CCV convencional, as normas setoriais específicas geralmente estruturam o ciclo de vida em torno dos estágios de pesquisa e desenvolvimento (P&D), produção e instalação, operação e manutenção (O&M) e atividades de fim de vida (Hunkeler *et al.*, 2008). Hunkeler *et al.* (2008) fornecem um conjunto equivalente de categorias de custos que parecem ser muito úteis como ponto de partida para um estudo de CCV genérico, são eles: custos de P&D, custos de investimento, custos de O&M e custos de fim de vida.

2.2.4. Desafios na aplicação da ASCV

Por em prática análises baseadas na abordagem de ciclo de vida que vão além das fronteiras da dimensão ambiental e incluam as dimensões social e econômica não tem sido uma tarefa fácil para estudiosos do tema. Inúmeros trabalhos vêm relatando a manifestação de diversos obstáculos na aplicação de uma ASCV. Ao conferir um maior reconhecimento à sua complexidade e se aprofundar nas dificuldades para sua aplicação, Guinée (2016) chama a atenção para a falta de exemplos práticos, necessidade de se evitar dupla contagem entre as questões abordadas pela ACV, ACV-S e CCV e a dificuldade tanto em definir indicadores de sustentabilidade quanto em comunicar de modo claro e transparente os resultados. De um modo geral, pode-se dizer que esses desafios giram em torno de duas questões centrais: a subjetividade inerente ao conceito de sustentabilidade e a integração das ferramentas ACV, ACV-S e CCV.

No que diz respeito à primeira delas, é importante enfatizar que a tomada de decisão orientada pela sustentabilidade envolve a consideração de múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes e intangíveis. Além disso, nem todas as questões que se relacionam à sustentabilidade, sobretudo, com a sua dimensão social, podem ser mensuradas em termos quantitativos, o que implica na necessidade de se empregar também métricas qualitativas (Bitter *et al.*, 2017). Tais métricas se valem geralmente de declarações expressas em linguagem natural que contém termos linguísticos ambíguos e imprecisos. Para efeito de exemplificação, a aceitação social com relação a um determinado projeto energético é *baixa* já que a sua interferência na paisagem é *grande*. Apesar dos conceitos de *baixa* e *grande* serem um consenso, a magnitude que cada um atribui a esses termos é distinta. Em decorrência disso, a tomada de decisão orientada pela

sustentabilidade seja em casos mais gerais seja no âmbito do setor energético está sujeita a ser modelada através de informações vagas e confusas (Shepard, 2005).

Esse quadro se reflete na dificuldade de se selecionar indicadores de sustentabilidade que sejam adequados e mensuráveis, bem como consistentes com uma ferramenta que relaciona diferentes disciplinas, tal como a ASCV. Isso se agrava especialmente quando se volta o olhar para a dimensão social em razão das suas questões mais subjetivas e indicadores que demandam informações muitas vezes restritas e confidenciais às organizações. É dentro desse contexto que a ausência de uma estrutura metodológica padronizada e amplamente aceita para a ASCV acentua o risco para a condução de análises desequilibradas, principalmente em uma sub-representação da dimensão social, e na ocorrência de indicadores eventualmente redundantes ou que abordam aspectos que se sobrepõem, o que, por sua vez, pode induzir conclusões imprecisas e equivocadas.

Paralelo a isso, integrar e harmonizar os resultados da ACV, ACV-S e CCV atuam como um obstáculo determinante na aplicação da ASCV (Guinée, 2016; Kalbar & Das, 2020; Zanni *et al.*, 2020). Na medida em que cada uma dessas ferramentas pode consistir em vários indicadores muitas vezes conflitantes, fica difícil para os tomadores de decisão determinar uma alternativa que atenda ou maximize a sustentabilidade (Demirtas, 2013). Assim, selecionar racionalmente fontes, formas de produção e cenários de expansão da oferta de energia vai normalmente requerer a transformação dos diversos indicadores ambientais, sociais e econômicos em um índice global de sustentabilidade e em outras eventuais medidas intermediárias (Wang *et al.*, 2009).

Do mesmo modo, a combinação dos desempenhos ambientais, sociais e econômicos impõe desafios na interpretação dos resultados da ASCV (Kalbar & Das, 2020). Isso porque, caso os índices globais obtidos por intermédio da integração dos resultados da ACV, ACV-S e CCV forem tomados como único parâmetro de avaliação das diferentes alternativas disponíveis, ações não balanceadas poderão ser favorecidas e tomadas de decisões intermediárias, que levam em conta indicadores e/ou dimensões específicos, serão impossibilitadas. Diante disso, a comunicação dos resultados deverá ser dar de forma clara e transparente de modo a permitir a identificação de *trade-offs*³⁶ entre os diferentes indicadores e dimensões da sustentabilidade considerados.

³⁶ *Trade-off* diz respeito à transferência de impactos de um determinado sistema de produto para outro, como também entre as suas diferentes etapas de ciclo de vida, categorias de impacto e dimensões de sustentabilidade.

2.3. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Como foi visto na seção anterior, a seleção de indicadores de sustentabilidade adequados e preferencialmente quantitativos e práticos, sobretudo, no que tange a dimensão social, se apresenta como um dos principais desafios na aplicação de uma ASCV. Soma-se ainda a isso, o fato de não existir na literatura internacional especializada um consenso sobre um conjunto de indicadores que sirva, ao menos, como base para incorporar a sustentabilidade na geração de energia elétrica, dando conta da cadeia completa e das especificidades de fontes alternativas e renováveis de energia. Essa situação se agrava quando se volta o olhar para o contexto nacional, no qual o pensamento do ciclo de vida é ainda pouco difundido e aplicado.

Diante desse quadro, esta seção consiste em uma revisão sistemática da literatura com o intuito de identificar os principais indicadores ambientais, sociais e econômicos utilizados de modo integrado por artigos científicos que tratem da ASCV no âmbito da geração de energia elétrica e que considerem em tal análise fontes alternativas e renováveis de energia. Nesse sentido, lançou-se mão da abordagem fornecida por Denyer & Tranfield (2009), a qual se divide em cinco etapas, quais sejam: (i) *formulação da pergunta*; (ii) *localização dos estudos*; (iii) *seleção e avaliação dos estudos*; (iv) *análise e síntese*; e (v) *relato e uso dos resultados* (Figura 2.5). A escolha de tal técnica se deu pela sua eficiência em resumir os resultados e avaliar a consistência de trabalhos científicos existentes, permitindo a obtenção de conclusões que *a priori* não são conhecidas (Denyer & Tranfield, 2009).

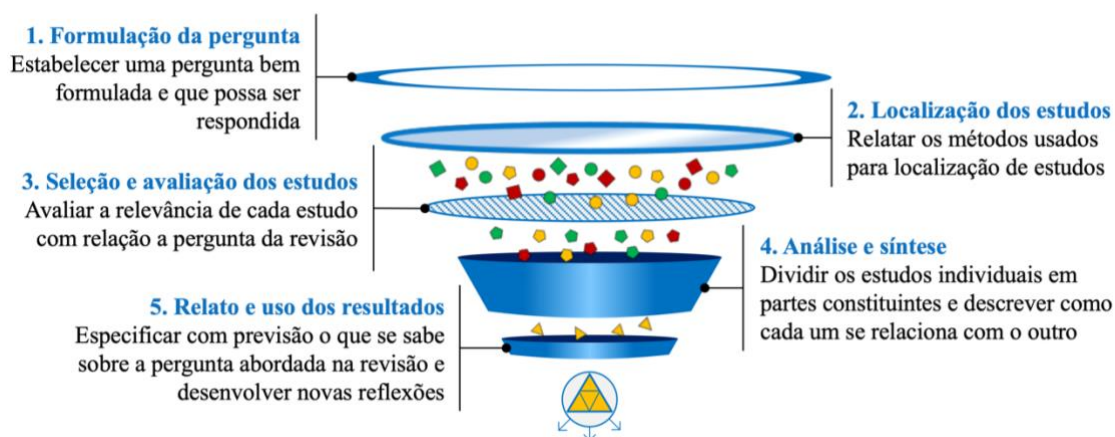


Figura 2.5 – Esquema da revisão sistemática
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Denyer & Tranfield (2009).

2.3.1. Formulação da pergunta

A primeira etapa da revisão sistemática adotada consiste na definição do seu foco. Assim, a revisão bibliográfica específica tem como ponto de partida a seguinte questão: “*Quais são os principais indicadores ambientais, sociais e econômicos utilizados de modo integrado para incorporar a sustentabilidade na tomada de decisão do setor elétrico que deem conta do comprimento da cadeia de geração de energia elétrica e das particularidades de fontes alternativas e renováveis de energia?*”

2.3.2. Localização dos estudos

Em seguida, a revisão sistemática prossegue para a definição e aplicação dos métodos e critérios que orientam a localização de artigos científicos. Nesse sentido, foi utilizado o software *Publish or Perish* (versão 7.18 e fornecido pela *Harzing*®) para buscar dentro da base de dados *Google Scholar* artigos sem restrições geográficas e publicados a partir do ano de 2010 – ano seguinte às publicações tanto do UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2009) acerca da ACV-S quanto da CALCAS (2009) acerca da ASCV. Assim, uma extensa combinação de palavras-chave e sequências de pesquisas adicionais foi conduzida visando localizar artigos sob o enfoque definido na primeira etapa. Foram utilizadas como palavras-chave principais “*sustainability*” ou “*sustainable*” e “*electricity*” ou “*electric*”, as quais foram complementadas por “*life cycle*” ou “*life-cycle*” e palavras-chave relativas à mensuração do desempenho sustentável e seleção de alternativas (“*assessment*”, “*analysis*”, “*evaluating*”, “*measuring*”, “*selecting*”, “*indicator*” ou “*criteria*”). O conjunto bruto de artigos identificado através desse procedimento se caracteriza como uma amostra preliminar na medida em que é necessária uma verificação relativa à ocorrência de duplicidades de artigos, a qual foi verificada junto ao software *Mendeley Desktop*.

Como resultado da primeira e segunda etapas da revisão sistemática empregada (itens 2.3.1 e 2.3.2), foram identificados inicialmente 388 artigos. Esse total já considera o desconto relativo à ocorrência de duplicidade de artigos.

2.3.3. Seleção e análise dos estudos

A partir de uma análise de relevância, esta terceira etapa busca selecionar dentro da amostra resultante da etapa anterior os artigos que estão em conformidade com o foco

da presente revisão sistemática, definido em sua primeira etapa (Denyer & Tranfield, 2009). Desse modo, conduziu-se uma avaliação da significância de cada um dos 388 artigos com relação à consideração dos seguintes aspectos: (i) *indicadores de sustentabilidade para o setor elétrico*, (ii) *abordagem de ciclo de vida*, (iii) *fontes alternativas e renováveis de energia* e as (iv) *dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade*. Com isso, chegou-se a uma amostra final composta por 41 artigos a serem analisados, dos quais 10 (24% da amostra) estão voltados exclusivamente para fontes renováveis de energia (Figura 2.6).

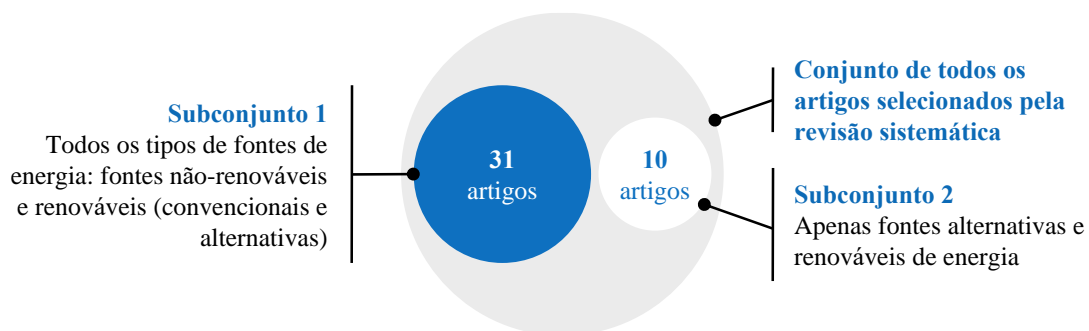


Figura 2.6 – Subconjuntos dos artigos selecionados a partir da revisão sistemática
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.4. Análise e síntese

Após a organização do conjunto final de artigos a serem analisados, a revisão sistemática segue para a sua quarta etapa. Além de fazer associações entre os artigos, seu objetivo principal consiste em reorganizar as informações de modo a favorecer compreensões que não são evidentes quando da leitura individual e isolada de cada um deles (Denyer & Tranfield, 2009). Desse modo, observou-se a tendência das publicações de ASCV sobre a geração de energia elétrica, focando em seus aspectos mais gerais, nas distribuições geográfica, temporal e por periódicos, e de uma síntese dos indicadores de sustentabilidade empregados.

Ao observar que parte dos 41 artigos selecionados (10 artigos; 24%; Figura 2.6) trata exclusivamente de fontes alternativas e renováveis de energia, optou-se por destacar os resultados das análises desse subconjunto de modo a tentar identificar particularidades relevantes de tais fontes de energia. Assim, busca-se evidenciar a relevância de cada indicador ambiental, social e econômico para o setor elétrico a partir da contabilização de suas ocorrências no conjunto de artigos selecionados.

No que tange à distribuição geográfica das publicações, verifica-se que a Europa se destaca uma vez que tal continente é retratado em 22 artigos (54% da amostra). Em seguida, aparece a Ásia (10 artigos; 24%), América do Norte (quatro artigos; 10%), África (três artigos; 7%) e Oceania e América Central (ambos retratados por um artigo; 2%) (Figura 2.7).

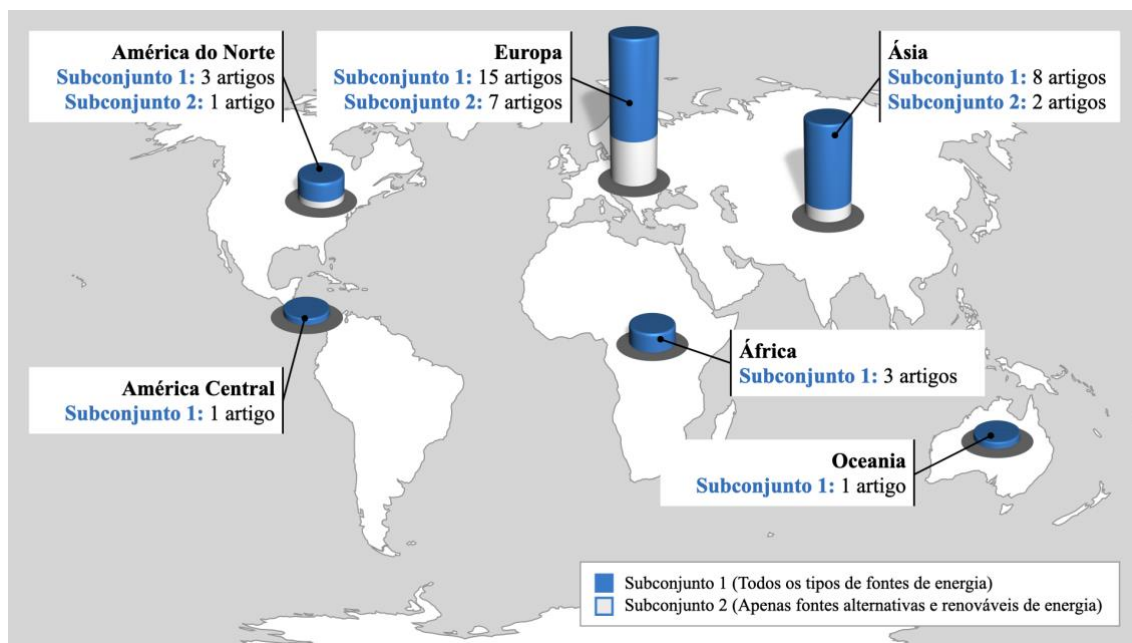


Figura 2.7 – Distribuição geográfica dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática
 Fonte: Elaborado pelo autor

A ausência de artigos que tratem da ASCV aplicada na geração de energia elétrica não apenas no continente sul-americano, mas também no Brasil, evidencia a necessidade de trabalhos, tal como a presente tese, que favoreçam o desenvolvimento de estudos desse tipo na região. No que diz respeito mais especificamente ao Brasil, observa-se que o pensamento do ciclo de vida é realmente pouco difundido e aplicado no país. Por outro lado, essa lacuna de publicações revela também que os indicadores de sustentabilidade considerados pelo conjunto dos 41 artigos analisados podem não cobrir completamente as preocupações ambientais, sociais e econômicas relevantes para o país.

Em relação a distribuição temporal, a Figura 2.8 ilustra a frequência de publicações desde o ano de 2010. O aumento no número total de artigos a partir de 2011 pode ser parcialmente atribuído às publicações voltadas para orientar a condução de estudos de ASCV fornecidas tanto pelo CALCAS (2009) quanto pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2011). Já a curva ascendente de publicações registrada no período 2014-2017 pode ter sido motivada por orientações metodológicas

mais detalhadas sobre as subcategorias da ACV-S fornecidas também pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2013).

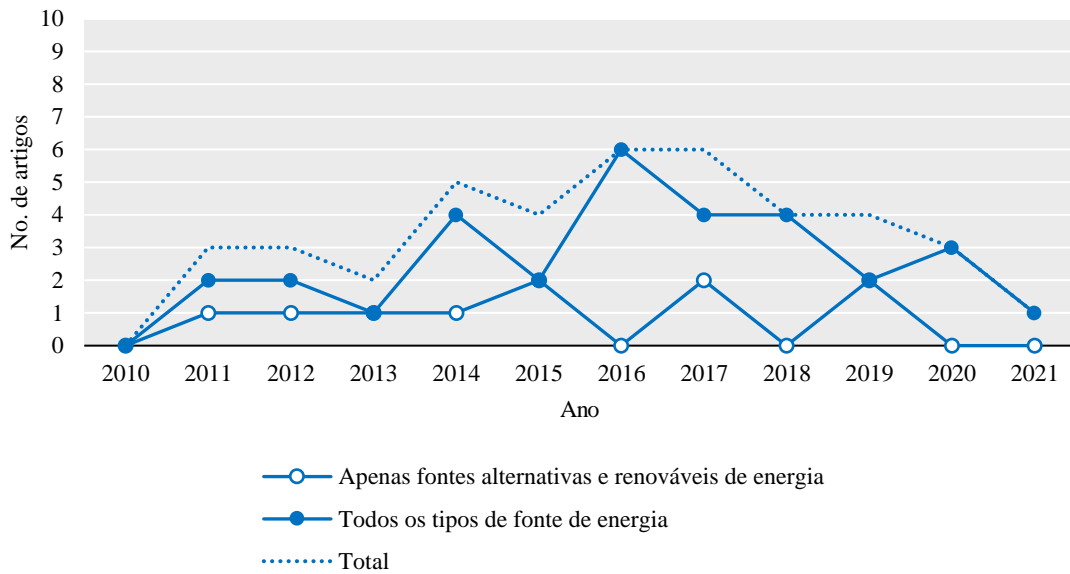


Figura 2.8 – Distribuição temporal dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática
Fonte: Elaborado pelo autor

Já na Figura 2.9 pode ser observado que a maior parte dos artigos foi publicada em periódicos relacionados à energia e à sustentabilidade. Apenas cinco periódicos publicaram três ou mais artigos, são eles: *Energy* (4 artigos), *Energy Policy* (4 artigos), *Journal of Cleaner Production* (3 artigos), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (4 artigos), e *Sustainable Production and Consumption* (3 artigos).

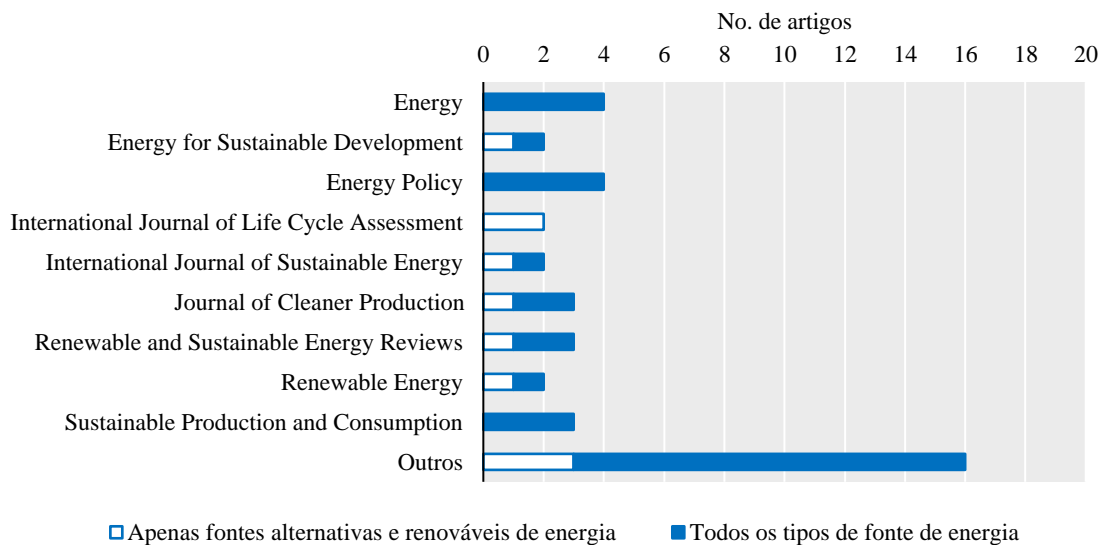


Figura 2.9 – Distribuição dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática por periódico
Fonte: Elaborado pelo autor

Na amostra de 41 artigos, as fontes carvão e solar fotovoltaica são as mais abordadas (29 artigos; cerca de 70% da amostra). Elas são seguidas pela energia eólica *onshore* (28 artigos; 68%) e gás natural (27; 66%). A Figura 2.10 resume graficamente as fontes de energia abordadas. Todos os estudos de ASCV estão focados na geração de energia centralizada, mas 11 (cerca de 27%) deles também consideram a geração distribuída. Com relação às abordagens de ACV empregadas, todos os artigos aplicam o modelo *atribucional*, e apenas Corona & San Miguel (2019) aplicam ao mesmo tempo os modelos *atribucional* e *consequencial*.

No que diz respeito às dimensões da sustentabilidade, destaca-se que, além das suas três dimensões convencionais, 13 artigos (32% da amostra) consideram uma dimensão relacionada aos aspectos técnicos das tecnologias de transformação de energia elétrica e cinco artigos (12%) consideram uma dimensão política.

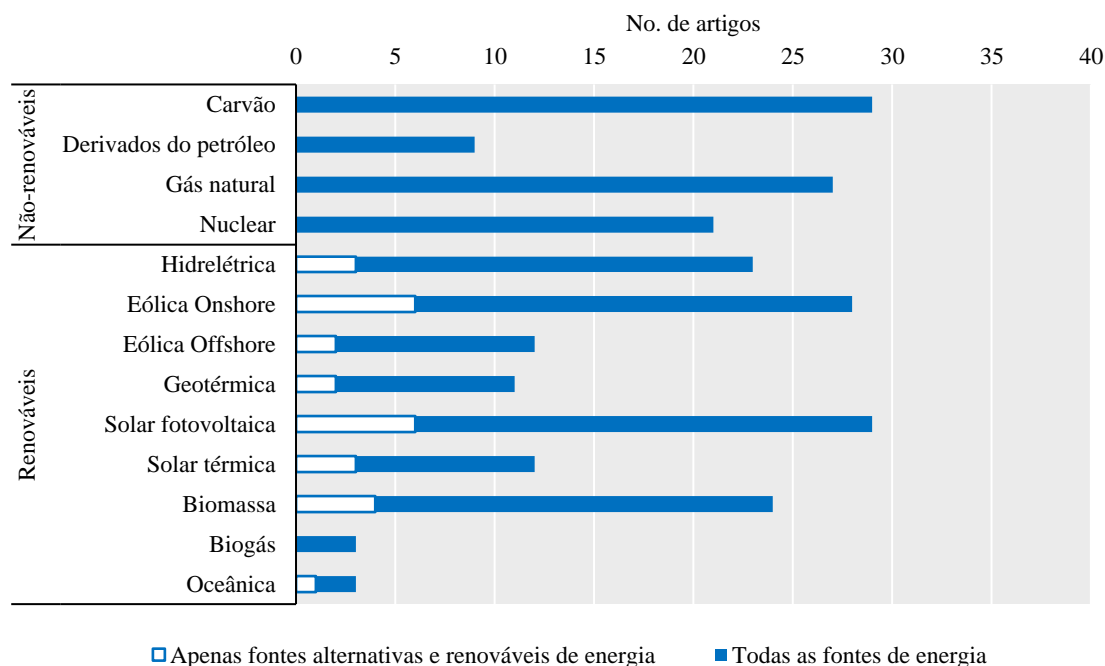


Figura 2.10 – Distribuição dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática segundo as fontes de energia abordadas
Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista que não há, até o momento, uma metodologia amplamente aceita e padronizada para a aplicação da ASCV, a seleção de indicadores, bem como sua classificação segundo as diferentes dimensões de sustentabilidade, ficam, muitas vezes, a cargo dos pesquisadores do tema. Diante dessa situação, os indicadores empregados pelo conjunto de artigos selecionados são relacionados com uma lista pré-definida de indicadores. Para a dimensão ambiental, as 18 categorias de impacto *midpoint* cobertas

pelo método de cálculo *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017) são utilizadas como parâmetro para a classificação dos indicadores ambientais (ver Tabela 2.3 e Figura 2.11). Para a dimensão social, as 31 subcategorias de impacto³⁷ classificadas por *stakeholders* recomendadas pelo relatório *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Product* (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2009) são utilizadas como referência para os indicadores sociais (ver Tabela 2.4 e Figura 2.12). Por fim, a relação composta por quatro indicadores econômicos fornecida por Hunkeler *et al.* (2008) é tomada como ponto de partida para análise da dimensão econômica (ver Figura 2.13).

Com intuito de não restringir a presente análise a essa lista pré-definida de indicadores, propõe-se a consideração de outros indicadores que eventualmente se mostrem relevantes em função do seu número de ocorrências no conjunto dos 41 artigos selecionados. Para evitar uma lista demasiadamente extensa de indicadores a serem analisados, delimitou-se em três a quantidade de indicadores adicionais por dimensão. A seguir, são apresentadas as frequências dos indicadores de sustentabilidade dentro do conjunto dos 41 artigos analisados³⁸.

Ao apresentarem uma frequência de observações média maior, os indicadores ambientais se destacam com relação aos demais. Para além do apoio fundamental que a dimensão ambiental proporciona à escalada das preocupações com a sustentabilidade, esse desequilíbrio evidencia, sobretudo, o enfrentamento de diferentes níveis de dificuldade na condução de uma ASCV segundo a dimensão analisada. Como os estudos de ACV se encontram em um estágio mais maduro de aplicação, é natural que se haja uma maior facilidade de se considerar aspectos ambientais na medida em que se tem à disposição uma gama de opções de softwares de ciclo de vida, bancos de dados de ICV ambiental e métodos de cálculos para a AICV. Além disso, é natural também que os pesquisadores tenham adquirido ao longo tempo uma maior experiência no tratamento de aspectos ambientais.

Dentre todos os indicadores ambientais considerados, as preocupações relativas às mudanças climáticas se destacam, estando presente em 95% (39 artigos) dos artigos analisados. Assim, o indicador *Aquecimento global* é seguido por *Uso do solo* (23 artigos;

³⁷ A presente revisão sistemática da literatura corresponde à pesquisa tratada no artigo *Life cycle-based sustainability indicators for electricity generation: A systematic review and a proposal for assessments in Brazil* (Lassio *et al.*, 2021) e na época de seu desenvolvimento a lista de categorias e subcategorias de impactos sociais não havia sido ainda atualizada pela UNEP (2020). Desse modo, levou em conta a primeira relação das 31 subcategorias de impactos sociais ao invés das atuais 40 (ver Tabela 2.4).

³⁸ Para mais detalhes dos resultados da revisão sistemática da literatura, ver Tabela A. 1 do Anexo A.

56% da amostra) e *Toxicidade humana* (20 artigos; 49%). Com relação aos artigos específicos de fontes alternativas e renováveis de energia, todos os 10 artigos consideram o indicador *Aquecimento global*, o qual é acompanhado por *Uso do solo* (oito artigos), *Consumo de água*, *Eutrofização marinha* e *Eutrofização em água doce*, estando presentes em quatro artigos analisados. Além da lista pré-definida de indicadores ambientais utilizada como referência para a revisão sistemática, aspectos relacionados à *Ruído* e *Reciclagem* se sobressaem, os quais são abordados por 14% (seis artigos) e 10% (quatro artigos) dos artigos analisados, respectivamente (Figura 2.11).

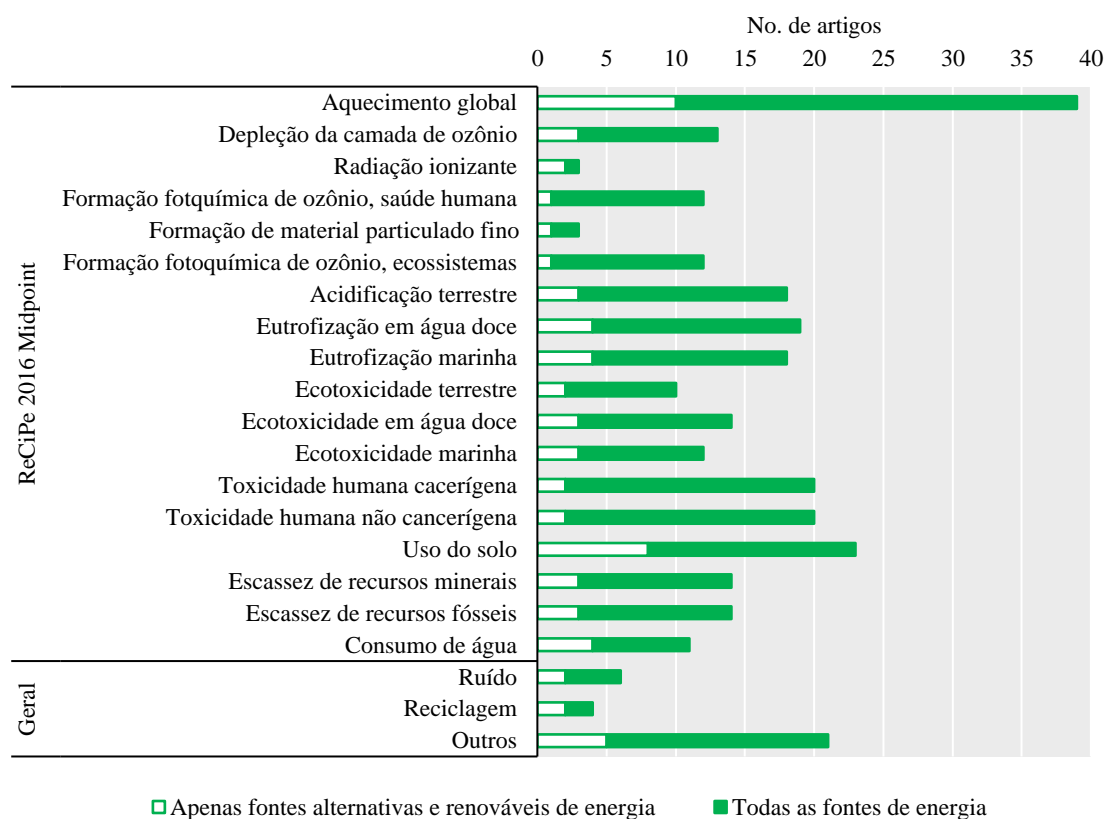


Figura 2.11 – Distribuição dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática segundo as categorias de impacto do método ReCiPe 2016 (Midpoint) (Huijbregts *et al.*, 2017) (Nota: Refere-se a estudos práticos de ASCV que consideram as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade e contemplam fontes renováveis de energia)

Fonte: Elaborado pelo autor

Embora as orientações fornecidas pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2013, 2009) para a condução de uma ACV-S possam ter contribuído para um aumento de publicações de artigos de ASCV, a dimensão social se mostra mal representada pelo conjunto dos 41 artigos analisados (Figura 2.12). Mais da metade dos indicadores sociais não é considerada por nenhum artigo. Daqueles que foram

considerados, quatro indicadores se destacam, enquanto o restante não está concentrado nem em 10% dos artigos analisados.

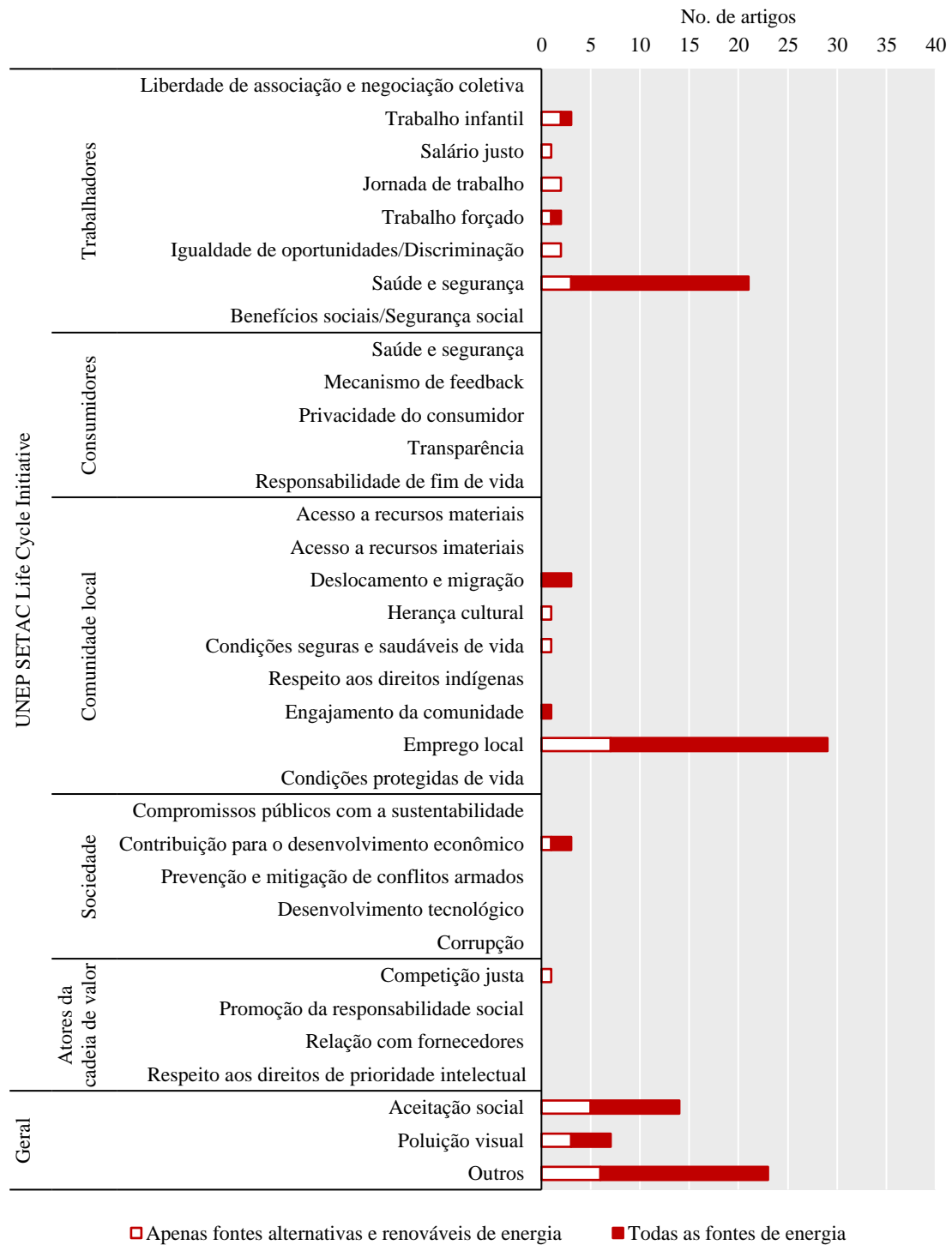


Figura 2.12 – Distribuição dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática segundo as categorias de impacto fornecidas pela UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2009) (Nota: Refere-se a estudos práticos de ASCV que consideram as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade e contemplam fontes renováveis de energia)

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 2.12 mostra que o indicador social destaque fica por conta de *Geração de empregos* (29 artigos; 71% da amostra), o qual é seguido por *Saúde e segurança dos trabalhadores* (21 artigos; 50%) e *Aceitação social* (14 artigos; 33%). No que diz respeito mais especificamente aos artigos voltados apenas para fontes alternativas e renováveis de energia, o indicador *Geração de empregos* (sete artigos) se apresenta como o mais importante, apresentando mais uma vez um maior número de ocorrências. Em seguida, aparecem *Aceitação social* (cinco artigos) e *Saúde e segurança dos trabalhadores* e *Poluição visual*, estando estes dois últimos indicadores presentes em três artigos. Desses destaques, cabe ressaltar que os indicadores *Aceitação social* e *Poluição visual* não fazem parte dos indicadores recomendados pelo UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2009).

No que diz respeito à dimensão econômica, foi visto no item 2.2.3 que os indicadores tomados como ponto de partida e fornecidos por Hunkeler *et al.* (2008) buscam contabilizar o custo interno total associado ao ciclo de vida completo de produtos e serviços. Nesse sentido, cada um deles é relacionado a uma etapa de uma cadeia produtiva genérica. Na Figura 2.13 é possível observar que *Custos de investimento* se destaca como o indicador com maior ocorrência nos artigos analisados (23 artigos; 55% da amostra), sendo seguido por *Levelized Cost of Energy (LCOE)* (17 artigos; 38%) e *Custos de operação e manutenção (O&M)* (16 artigos; 36%). No que diz respeito mais especificamente aos artigos voltados apenas para fontes alternativas e renováveis de energia, os destaques ficam por conta dos indicadores *Payback period* e *Custos de investimento* (presentes em três artigos) e *Custos de O&M* e *LCOE* (presentes em dois artigos). É importante observar que os indicadores *LCOE*, *Payback period* e *Custos de combustível* não fazem parte da lista pré-definida de indicadores econômicos utilizada como referência para a revisão sistemática.

Além disso, é possível constatar que há uma priorização dos processos *midstream* da cadeia de geração de energia elétrica em detrimento dos seus processos *upstream* e *downstream*. Isso porque os indicadores *Custos de investimento* e *Custos de O&M* são amplamente empregados, enquanto os indicadores *Custos de pesquisa e desenvolvimento (P&D)* e *Custos de fim de vida* não são considerados por quase nenhum dos artigos analisados. A partir de uma análise complementar acerca da delimitação da fronteira da ASCV adotada nos artigos, verifica-se que 14 dos 41 artigos (34%) consideram a abordagem *cradle-to-grave*. Disso decorre que a desconsideração desses indicadores não se justifica pela adoção de uma fronteira limitada ao nível *midstream* da cadeia, mas sim pela condução de uma ASCV possivelmente desatenta aos demais custos. Isso evidencia

também uma análise desequilibrada com relação às outras dimensões de sustentabilidade. Ao mesmo tempo em que aspectos ambientais e sociais podem ter sido considerados nos processos *upstream* e *downstream* da cadeia de geração de energia elétrica, custos financeiros relevantes não foram contabilizados.

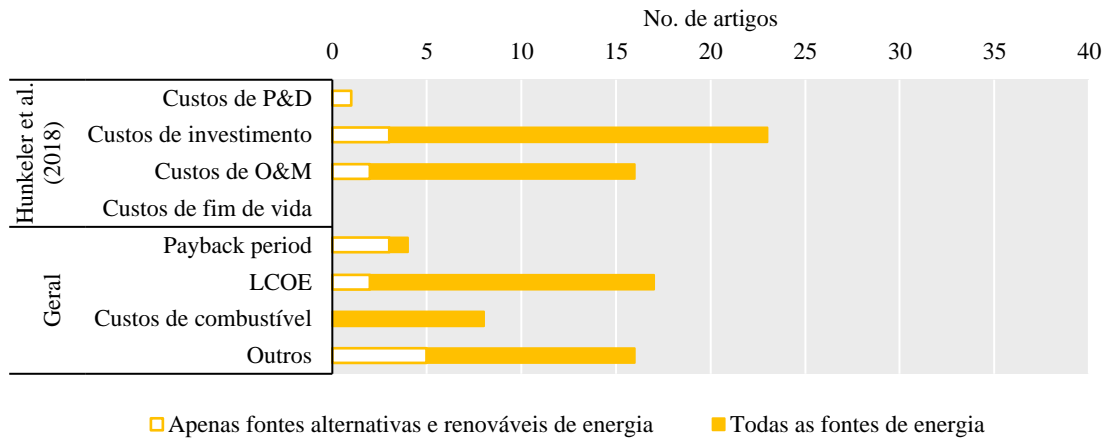


Figura 2.13 – Distribuição dos artigos obtidos a partir da revisão sistemática segundo os indicadores econômicos de Hunkeler *et al.* (2008)

(Nota: Refere-se a estudos práticos de ASCV que consideram as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade e contemplam fontes renováveis de energia)

Fonte: Elaborado pelo autor

Como foi visto anteriormente, além das dimensões ambiental, social e econômica, outras dimensões de sustentabilidade foram consideradas pelos artigos analisados. Ao estarem relacionadas, sobretudo, à aspectos políticos e técnicos das tecnologias de geração de energia elétrica, essas dimensões podem indicar uma tentativa dos autores em atender demandas específicas relativas ao contexto no qual a ASCV está inserida. Isso inclui o objetivo geral da análise, o objeto e escala do estudo, a fronteira do sistema, a região geográfica contemplada etc. Por outro lado, se caracteriza como mais um aspecto que evidencia a ausência de uma metodologia consensual e padronizada para orientar a condução de uma ASCV. Essa é uma queixa recorrente em estudos de ASCV e se reflete não só na maioria das dificuldades enfrentadas e relatadas pelos estudiosos do tema como também na incompatibilidade entre diferentes estudos de ASCV.

Na medida em que as preocupações com os aspectos técnicos das tecnologias de geração de energia elétrica aparecem em um número significativo de artigos (13 artigos, o equivalente a 32% do total), cabe uma análise um pouco mais profunda, mas não exaustiva acerca dos seus indicadores. Dentro do conjunto dos 41 artigos analisados, *Eficiência* e *Fator de capacidade* se destacam como os indicadores técnicos mais empregados. Apesar disso, é importante ressaltar que esses aspectos se revelam muito

mais como variáveis independentes que alimentam indicadores do que propriamente como indicadores de sustentabilidade de tecnologias de geração de energia elétrica. Isso porque afetam diretamente a geração final de energia elétrica de cada tecnologia, a qual é tida geralmente como parâmetro (ou unidade funcional) para o cálculo dos indicadores das outras dimensões de sustentabilidade.

2.3.5. Relato e uso dos resultados

Nesta etapa, a revisão sistemática avança sobre novas compreensões e discussões suscitadas pela etapa anterior cujos resultados não só trazem respostas para a questão que foi definida inicialmente mas motivam também o surgimento de outras indagações (Denyer & Tranfield, 2009). Desse modo, ficaram claros os diferentes níveis de dificuldades enfrentados pelos autores durante a condução de uma ASCV, segundo a dimensão de sustentabilidade analisada. Enquanto a dimensão ambiental foi amplamente representada, verificou-se uma sub-representação da dimensão social. Raros foram os casos em que essa dimensão foi bem retratada. Sobre essa situação, destacam-se os desafios relativos essencialmente à uma maior subjetividade das questões sociais e ao acesso muitas vezes restrito a informações necessárias para obtenção de indicadores. Em relação à dimensão econômica, sua consideração foi limitada a indicadores que não cobrem a cadeia de geração de energia elétrica por completo.

Esse quadro sugere que os indicadores sociais e econômicos identificados a partir dos 41 artigos analisados podem, portanto, dizer muito mais sobre a viabilidade de empregá-los do que sobre sua relevância para a sustentabilidade da cadeia de geração de energia elétrica. Desse modo, embora esse conjunto de artigos forneça análises mais holísticas que rompem com o *status quo* do planejamento elétrico tanto em nível nacional quanto internacional, seus indicadores parecem não ser suficientes para informar toda a gama de questões de sustentabilidade, sobretudo, sociais e econômicas, atinentes a cadeia completa de geração de energia elétrica e as fontes alternativas e renováveis de energia.

Um outro ponto a ser destacado corresponde a lacuna de publicações sobre a geração de energia elétrica no Brasil, a qual sinaliza uma não cobertura das preocupações ambientais, sociais e econômicas relevantes para o país pelo conjunto dos 41 artigos analisados. Um bom exemplo disso são as interferências sobre UCs e comunidades tradicionais não figurarem entre os principais indicadores identificados pela revisão

sistemática. Tais questões têm sido foco de preocupação no país na medida em que novos projetos energéticos avançam sobre regiões sensíveis a esses temas.

Foi visto também que a pertinência dos indicadores de sustentabilidade pode variar segundo os tipos de fontes de energia. Com a divisão do conjunto dos 41 artigos analisados em dois subconjuntos, ficou evidente que alguns indicadores se mostraram mais relevantes para fontes alternativas e renováveis de energia, como por exemplo *Uso do solo*, *Geração de emprego* e *Payback period*. Em última análise, esse estado atual da literatura indica um espaço significativo para expansão dos indicadores sociais e econômicos considerados em uma ASCV aplicada sobre a geração de energia elétrica.

2.4. MÉTODOS DE APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

Como foi visto nas seções anteriores, a execução de uma ASCV requer a aplicação sistemática do trio ACV, ACV-S e CCV. Dado que não existem ainda normas e consensos na literatura científica acerca da integração dessas ferramentas, combinar seus resultados impõe desafios aos estudiosos do tema que vêm encontrando no uso de métodos de AMD uma forma de superá-los (Figura 2.14). É diante desse contexto que a presente seção vai buscar entender como esses métodos podem fornecer caminhos para a condução de uma ASCV.

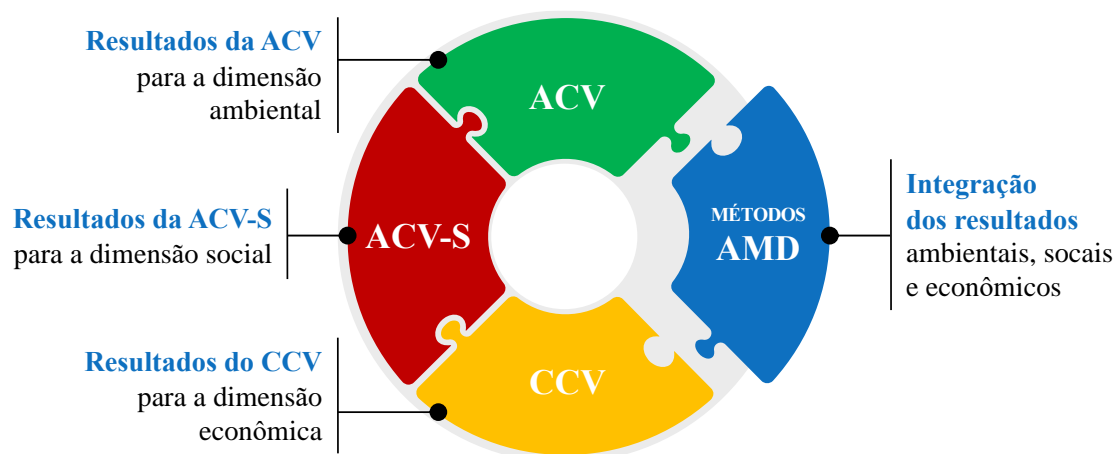


Figura 2.14 – Ilustração da integração de métodos de AMD com a ASCV.
Fonte: Elaborado pelo autor

Em geral, a tomada de decisão envolve a consideração de vários critérios que são geralmente conflitantes (Kalbar & Das, 2020). Nesse contexto, os métodos de AMD se apresentam como ferramentas eficazes que fazem frente a essa problemática. Tais

métodos podem ser classificados em dois grupos³⁹: (i) *métodos de apoio multiatributo à decisão* (MADM) e (ii) *métodos de apoio multiobjetivo à decisão* (MODM)⁴⁰. Os métodos MADM estão associados a problemas de tomada decisão que envolvem um número finito de alternativas (variáveis discretas), enquanto os métodos MODM, a problemas com infinitas alternativas (variável contínua) (Hwang & Yoon, 1981).

Ao se debruçarem sobre o emprego de métodos de AMD no planejamento energético sustentável, Wang *et al.* (2009) apontam que os métodos MADM têm sido amplamente empregados. Isso porque a tomada de decisão do setor energético orientada pela sustentabilidade envolve geralmente um número de cenários e opções tecnológicas pré-definidos. Dentro desse grupo, existem ainda diversos métodos de AMD e a seleção do mais adequado vai, sobretudo, requerer uma análise sobre a conveniência de se adotar ou não uma abordagem compensatória (Gomes & Gomes, 2019; Munda, 2005). Por abordagem compensatória entende-se formular uma medida de mérito global para as alternativas, enquanto que uma não-compensatória vai ordená-las em termos relativos, sem indicar seus méritos globais. As abordagens compensatórias vêm sendo favorecidas em função das vantagens que uma medida única de síntese proporciona, como a simplificação de sistemas e a comunicação de informações complexas. Por outro lado, ao agregar indicadores, o tomador de decisão precisa estar atento à identificação da taxa de substituição (ou *trade-off*) de um indicador com relação a outro. Além disso implicar em uma abordagem da *sustentabilidade fraca*⁴¹, pode favorecer ações não balanceadas, ou seja, aquelas cuja performance é excelente sob algum aspecto, mas ruim nos demais (Gomes & Gomes, 2019; Kalbar & Das, 2020).

Mapear e discutir em toda integralidade os métodos MADM compensatórios existentes fogem ao escopo da presente pesquisa. Sobre esse aspecto, Wang *et al.* (2009) destacam que o método AHP é atualmente o método de AMD mais popular e que a Lógica

³⁹ Cumpre ressaltar que existem outras classificações, como a adotada pela maioria dos autores que divide os métodos de AMD em Escola Americana, Escola Francesa e Métodos Interativos ou de Programação Matemática Multiobjetivo (Vincke, 1992).

⁴⁰ Do inglês *Multi-attribute Decision Making* (MADM) e *Multi-objective Decision Making* (MODM).

⁴¹ Pode-se dizer que existem duas interpretações para o conceito de sustentabilidade: o enfoque da economia neoclássica é denominado como *sustentabilidade fraca* e o enfoque da economia ecológica, *sustentabilidade forte*. Tendo em mente o desenvolvimento sustentável, essas visões se diferem sobre a possibilidade de substituição entre os capitais de origem natural e antropogênica. Para os defensores da *sustentabilidade fraca*, a soma de todos os capitais deverá ser mantida constante, sem diferenciação do tipo de capital, não existindo, portanto, limite para o crescimento econômico. Por outro lado, a segunda corrente de pensamento argumenta que o estoque de capital natural deve ser mantido constante, impossibilitando a sua substituição por qualquer forma de capital de origem antropogênica (Perman *et al.*, 2003).

Nebulosa vem sendo cada vez mais utilizada pelo setor energético. Ambos são métodos MADM compensatórios. Considerando tais colocações, esta tese se dedicará à análise dos principais referenciais teóricos e aplicações desses métodos de AMD, explorando seus potenciais em apoiar a integração da ACV, ACV-S e CCV em estudos de ASCV.

Antes de prosseguir, cumpre ressaltar que, para além dos métodos de AMD, a combinação de ferramentas baseadas na abordagem de ciclo de vida com a Análise Envolvória de Dados (AED) demonstra um potencial em apoiar processos complexos de tomada de decisão, tanto quanto aqueles envolvidos em um planejamento energético sustentável. Apesar disso, tal estrutura metodológica é ainda muito pouco explorada pela literatura (Martín-Gamboa *et al.*, 2017), não sendo, portanto, tratada nesta tese.

2.4.1. Processo Hierárquico Analítico

2.4.1.1. O que é o Processo Hierárquico Analítico

O Processo Hierárquico Analítico, mais conhecido como AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), foi desenvolvido pelo matemático e professor Thomas L. Saaty no início da década de 1970 enquanto lidava com um problema de planejamento de contingenciamento junto ao Departamento de Defesa dos EUA. Contudo, sua teoria foi somente publicada em 1980, com o livro *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process* (Golden *et al.*, 1989; Saaty & Vargas, 2012). Nesse ínterim, ela foi enriquecida e alcançou sua maturidade através de aplicações relevantes no racionamento de energia industrial e na projeção de cenários para os transportes no Sudão (Saaty, 1990).

Visando introduzir informações tanto tangíveis (quantificáveis) quanto intangíveis (não facilmente quantificáveis) na análise relativa de critérios por meio de uma escala absoluta, Saaty (1990) propôs decompor de forma lógica um problema de decisão complexo em subproblemas organizados conforme uma estrutura hierárquica (Cinelli *et al.*, 2014; Saaty, 1990). Em suas palavras,

[...] “Arranging the goals, attributes, issues, and stakeholders in a hierarchy serves two purposes. It provides an overall view of the complex relationships inherent in the situation; and helps the decision maker assess whether the issues in each level are of the same order of magnitude, so he can compare such homogeneous elements accurately”⁴² (Saaty, 1990).

⁴² Organizar metas, atributos, problemas e partes interessadas em uma hierarquia tem dois propósitos. Fornece uma visão geral dos relacionamentos complexos inerentes à situação; e ajuda o tomador de decisão

Mais do que facilitar a compreensão e a resolução de um problema de decisão complexo, a abordagem adotada no método AHP reflete a maneira pela qual a mente humana naturalmente conceitua e estrutura um problema. Isso porque, ao se deparar com uma situação complexa composta por um grande número de elementos (controláveis ou não), a mente humana tende naturalmente a agregar tais elementos em grupos segundo propriedades comuns (Gomes & Gomes, 2019).

Ao considerar essa perspectiva, Saaty (1990) argumenta que “quando pensamos, identificamos objetos ou ideias e também sua inter-relação; quando identificamos alguma coisa, decomponemos a complexidade encontrada; quando descobrimos relações, sintetizamos”. Tais colocações denotam que “decomposição” e “síntese” não apenas compõem o processo fundamental da percepção humana, mas se caracterizam também como o fundamento do método AHP.

Considerado um dos primeiros métodos dedicados ao ambiente de decisão multicritério, o método AHP é talvez ainda hoje o mais amplamente utilizado em todo o mundo (Saaty, 1984). Sua abordagem interativa alterna etapas de cálculo com etapas de diálogo com tomadores de decisão ou outros atores, permitindo uma intervenção contínua e direta na construção da solução e, não somente, na definição do problema (Baasch, 1995). Executando comparações entre pares em cada nível da estrutura hierárquica (Figura 2.15), os tomadores de decisão obtêm o ranqueamento das alternativas disponíveis (Saaty, 1984).



Figura 2.15 – Esquema de uma estrutura hierárquica simples do método AHP
 Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Saaty (1984)

Cabe aqui ressaltar que nem todos os problemas de decisão podem ser estruturados hierarquicamente. Muitos deles podem envolver a interação e dependência de elementos

a avaliar se os problemas em cada nível são da mesma ordem de magnitude, para que ele possa comparar esses elementos homogêneos com precisão (tradução livre) (Saaty, 1990).

de níveis distintos (Saaty & Vargas, 2012). Nesses casos, o método mais indicado corresponde ao Processo de Análise de Rede (ou ANP, do inglês *Analytic Network Process*). Tal abordagem – que não será tratada na presente pesquisa – pode ser vista como uma generalização do método AHP (Brunelli, 2015). Diante de tais concepções, é importante lembrar que uma hierarquia consiste em uma estrutura linear de cima para baixo (ver Figura 2.15); enquanto que uma rede se espalha em todas as direções, envolvendo ciclos entre *clusters* e *loops* dentro do mesmo *cluster* (Saaty & Vargas, 2012).

2.4.1.2. As etapas do método AHP

A aplicação do método AHP pode ser dividida em quatro etapas principais, são elas: (i) *estruturação hierárquica*, (ii) *comparação paritária*, (iii) *princípio de priorização* e (iv) *synetização de prioridades* (Figura 2.16).

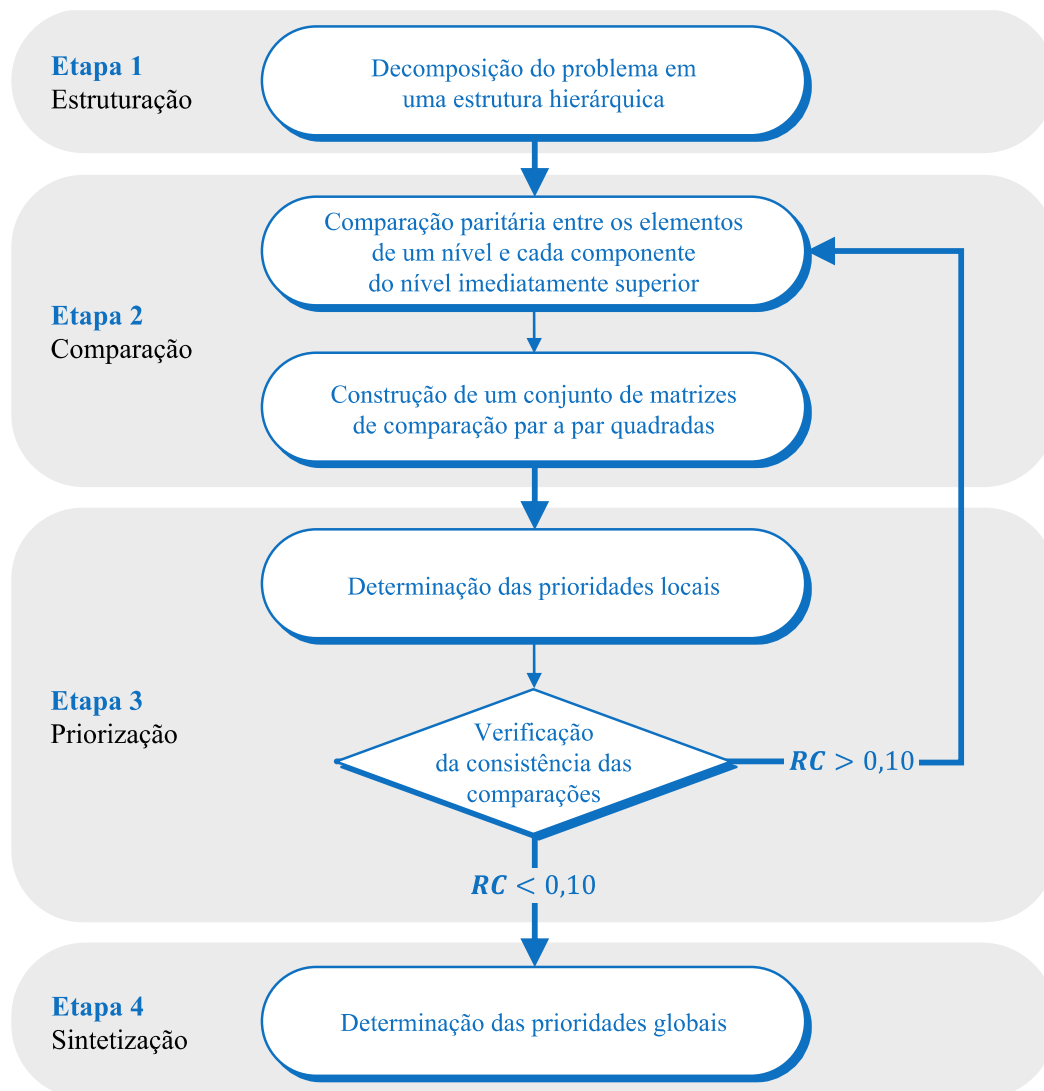


Figura 2.16 – Fluxograma geral da aplicação do método AHP
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Lucena (1999)

A primeira etapa é a mais importante na tomada de decisão, na qual o decisor define o objetivo global e organiza o problema, relativo à seleção da alternativa que melhor atende o conjunto de critérios, em vários níveis hierárquicos. Como foi visto na Figura 2.15, a forma mais simples de se estruturar um problema de decisão consiste em uma hierarquia de três níveis, onde o seu primeiro nível está destinado a um elemento correspondente à meta ou objetivo global; o seu segundo nível é composto pelos critérios de avaliação; e o terceiro, pelas as alternativas a serem avaliadas. Outras estruturas mais complexas podem ser construídas e envolvem geralmente o desdobramento dos critérios em subcritérios correspondentes, mantendo-se o primeiro e o último níveis associados ao objetivo geral e as alternativas, respectivamente (Saaty & Vargas, 2012).

Tabela 2.5 – Escala de valor para julgamentos paritários
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Saaty (1984)

Intensidade de importância	Escala verbal	Explicação
1	Igual importância	Ambos elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Fraca importância	A experiência e o julgamento favorecem levemente um elemento sobre o outro
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um elemento sobre o outro
7	Muito forte importância	Um elemento é muito fortemente favorecido com relação ao outro
9	Importância absoluta	A evidência favorece um elemento com relação ao outro com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de consenso entre duas definições

Mesmo em se tratando de julgamentos conduzidos por especialista, é importante destacar que as comparações *par a par* estão suscetíveis a incoerências, sobretudo, quando o problema de tomada de decisão envolve um número grande de critérios e alternativas. Diante dessa realidade, a aplicação do método AHP prevê uma verificação da consistência dos julgamentos de valores, dentro da qual tolera-se uma inconsistência que, por sua vez, é determinada através de um parâmetro denominado *razão de consistência (RC)*, conforme a Equação 2.2:

$$RC = \frac{IC}{CA} \quad 2.2$$

onde IC corresponde ao *índice de consistência* e CA , ao *índice de consistência aleatória*. Nesse cálculo, o IC é determinado segundo a Equação 2.3:

$$IC = \frac{(\lambda_{m\acute{a}x} - n)}{n - 1} \quad 2.3$$

onde $\lambda_{m\acute{a}x}$ é o autovalor máximo da matriz de comparação *par a par* A e n , a sua dimensão. O CA é obtido por meio da Tabela 2.6. Quando a matriz de comparação *par a par* A apresentar um RC menor que 0,1, sua inconsistência será tolerável. Caso contrário, as comparações referentes a essa matriz deverão ser revistas (Saaty, 1984).

Tabela 2.6 – Valores de CA para matrizes de comparação
Fonte: Saaty (1990)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

De posse das matrizes de comparação *par a par* com RC menor que 0,1, o decisor passa para a etapa de priorização dos elementos do sistema. Nela, ele obtém os vetores de prioridade relativa (ou prioridades locais) que fornecem o grau de importância dos elementos em cada nó de julgamento da estrutura hierárquica⁴³. Já na etapa sintetização de prioridades, é definida a prioridade global das alternativas, ou seja, a prioridade associada a cada alternativa com relação ao objetivo global. Para isso, é necessário calcular o somatório dos produtos das prioridades locais de cada alternativa com as prioridades locais do critério correspondente (Bhushan & Rai, 2007).

2.4.1.3. A AHP e a avaliação da sustentabilidade do setor energético

Nas seções anteriores, foi visto que situações complexas que envolvem múltiplos atores e informações muitas vezes intangíveis podem ser tratadas através do método AHP.

⁴³ Segundo Saaty (1990), há várias maneiras de se obter os vetores de prioridade para uma matriz de comparações par a par, são elas: (i) somatório dos julgamentos de cada linha da matriz de comparação e posterior normalização dos resultados; (ii) somatório dos julgamentos de cada coluna da matriz de comparação e normalização dos resultados após a obtenção dos recíprocos das somas; (iii) divisão de cada julgamento de cada coluna da matriz de comparação pelo somatório da coluna em questão, após esta divisão é calculada a média aritmética de cada linha resultante; (iv) produtório dos julgamentos de cada linha da matriz de comparação, seguido pelo cálculo da n -ésima raiz e; (v) por fim, a normalização dos resultados obtidos.

No que diz respeito mais especificamente a consideração de aspectos socioambientais no planejamento energético, objeto de estudo da presente tese, o método AHP é o método de AMD mais amplamente empregado por estudiosos do tema (Huang *et al.*, 2011; Pohekar & Ramachandran, 2004; Wang *et al.*, 2009). Com relação à gestão ambiental em geral, Huang *et al.* (2011) apontam que cerca de 48% da literatura que faz uso de métodos de AMD opta pelo método AHP. Já no apoio ao planejamento energético sustentável, Pohekar & Ramachandran (2004) indicam que o método AHP responde por aproximadamente 38% dos trabalhos, o que representa a maior parcela da literatura examinada pelos autores. Dentro desse contexto, essa ferramenta desenvolvida pelo professor Saaty apoia geralmente análises e formulações de políticas energéticas, seleção de tecnologias de geração de energia, locação de usinas de energia, avaliação de projetos, alocação de recursos energéticos, controle de emissões de GEE, entre outros (Amer & Daim, 2011; Emrouznejad & Ho, 2017; Wang *et al.*, 2009).

Como pontuam diferentes trabalhos, esse cenário de predominância do método AHP se dá em função da variedade de informações frequentemente conflitantes que são inerentes à tomada de decisão no âmbito de um setor energético sustentável. Ahmad & Tahar (2014) argumentam que como “nenhum recurso energético pode simultaneamente satisfazer critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais (...), decidir por um recurso específico é uma tarefa complexa e multifacetada”. Amer & Daim (2011) defendem que esse tipo de decisão requer uma abordagem que dê conta de suas múltiplas perspectivas. Sob o mesmo ponto de vista, Karger & Hennings (2009) justificam o emprego do método AHP em razão da multidimensionalidade da sustentabilidade, a qual requer um “método capaz de refletir essa multidimensionalidade”. Já Demirtas (2013) menciona a ocorrência de fatores não só quantitativos, mas também qualitativos de difícil mensuração.

A seguir serão analisados alguns trabalhos que empregam o método AHP e se mostram relevantes para a presente tese. A ideia é destacar como o método AHP é usado para lidar com a complexidade de decisões que envolvem múltiplos critérios, buscando trazer à luz sua utilidade em apoiar a condução de análises de sustentabilidade baseadas na abordagem de ciclo de vida no âmbito do setor energético.

O estudo conduzido por Magrini (1992) foi pioneiro no emprego de métodos de AMD para subsidiar a gestão ambiental do setor elétrico no Brasil. Com o intuito de avaliar os impactos ambientais de usinas hidrelétricas, a autora oferece uma interpretação e conjugação metodológica para o método AHP, denominada Sistema de Análise Multicritério Aplicado como Método Base à Avaliação de Impacto Ambiental

(SAMAMBAIA). Tal técnica pode ser aplicada a qualquer tipo de plano ou projeto, a partir dos quais são identificadas as ações mais impactantes através da opinião de especialistas e partes interessadas. O SAMAMBAIA consegue lidar com critérios quantitativos e qualitativos, permite a comparação entre um número finito de alternativas e fornece um grau global de impacto para cada uma delas. Em linhas gerais, seus objetivos são organizados em uma estrutura hierárquica e articulados a partir de um objetivo principal que é decomposto em subobjetivos. Na sua operacionalização, são definidas ações de caráter temporal e espacial (Magrini, 1992).

Em Chatzimouratidis & Pilavachi (2007), os autores partem do argumento que os impactos associados à operação de diferentes tipos de usinas de energia elétrica vêm sendo subestimados ou, até mesmo, ignorados para, então, se debruçarem sobre um estudo no qual avaliam as consequências de suas emissões não-radioativas através do uso do método AHP. Para tal avaliação, eles constroem uma estrutura hierárquica de três níveis. O primeiro nível diz respeito ao objetivo da avaliação; o segundo nível, aos dois critérios principais denominados avaliação subjetiva e avaliação objetiva; e o terceiro nível, aos subcritérios nos quais a avaliação subjetiva se desdobra, são eles: danos à saúde humana e danos ao meio ambiente. Enquanto a avaliação objetiva se baseia no preço que deveria ser pago por cada quilograma (kg) de substância emitido na atmosfera; a avaliação subjetiva se dá a partir das opiniões dos autores. Além disso, tanto para os subcritérios quanto para os critérios principais, são considerados os mesmos pesos para o alcance do objetivo do nível imediatamente superior.

Em seguida, Chatzimouratidis & Pilavachi (2007) avaliam os impactos de emissões não-radioativas desde a construção até o descomissionamento de 10 tipos principais de usinas de energia elétrica. Assim, os autores desenvolvem uma segunda estrutura hierárquica de três níveis. De modo semelhante à primeira parte, o primeiro nível corresponde ao objetivo da avaliação; o segundo nível, às cinco principais substâncias não-radioativas emitidas na atmosfera; e, por fim, o terceiro nível, aos 10 tipos de usinas de energia elétrica consideradas, são elas: termelétricas à carvão, óleo combustível, gás natural em ciclo simples e gás natural em ciclo combinado, nuclear, hidrelétrica, eólica, solar fotovoltaica, biomassa e geotérmica. Os resultados obtidos na primeira parte desse estudo, relativos à avaliação dos cinco tipos de emissões atmosféricas, são empregados sob a forma de pesos dos critérios do segundo nível. Os dados de emissões dos 10 tipos de usinas – obtidos junto à literatura especializada disponível – são normalizados, ponderados e agrupados visando ranqueá-las.

Chatzimouratidis & Pilavachi (2008) ampliam o estudo anterior na medida em que aplicam a mesma metodologia para avaliar os mesmos 10 tipos de usinas de energia elétrica com relação aos seus impactos sobre o padrão de vida das comunidades locais. Assim, consideram dois critérios principais, são eles: qualidade de vida e aspectos socioeconômicos. Enquanto a qualidade de vida se divide em quatro subcritérios, os aspectos socioeconômicos são compostos por três subcritérios. Os autores constroem uma estrutura hierárquica de cinco níveis. O primeiro nível se refere ao objetivo da avaliação, qual seja, maximizar o aumento do padrão de vida devido à operação das usinas; o segundo nível, aos critérios principais; o terceiro nível, aos subcritérios; o quarto nível, às cinco substâncias não-radioativas emitidas na atmosfera; e o quinto nível, aos 10 tipos de usinas de energia elétrica consideradas. Os dados utilizados como entrada na avaliação dessas usinas com relação aos critérios são baseados em médias universalmente aceitas devido à dificuldade de se coletar a grande quantidade de informações que tal análise exige. A obtenção dos *scores* para o ranqueamento das usinas se dá de modo análogo ao procedimento seguido em Chatzimouratidis & Pilavachi (2007).

Demirtas (2013) se empenha em facilitar a tomada de decisão na escolha da tecnologia de energia renovável mais adequada a um planejamento energético orientado pela sustentabilidade através do método AHP. Assim, avalia as opções geotérmica, solar, eólica, hidrelétrica e biomassa com relação a quatro indicadores, são eles: técnico, econômico, ambiental e social. O autor desenvolve uma estrutura hierárquica em quatro níveis. O primeiro nível diz respeito ao objetivo do estudo; o segundo nível corresponde ao que o autor denomina como indicadores; o terceiro é relativo aos critérios; e o quarto nível se refere às opções de tecnologias de energia renovável. Tanto a atribuição de pesos aos indicadores e critérios quanto a avaliação das alternativas com relação a esses critérios são baseadas em um painel composto por 10 especialistas do setor energético.

Em Ahmad & Tahar (2014), os autores fornecem uma metodologia de avaliação da geração de energia elétrica a partir de diferentes fontes renováveis para a Malásia. Nesse trabalho, são consideradas quatro possibilidades, a saber, energia hidrelétrica, solar fotovoltaica, eólica e biomassa. São definidos 4 critérios (técnico, econômico, social e ambiental) aos quais são atribuídos cada um dos 12 subcritérios considerados. Tendo em vista as perspectivas de evolução da demanda por energia elétrica na Malásia, os autores investigam qual seria a melhor energia renovável para garantir o atendimento desta demanda. Nesse sentido, constroem uma estrutura hierárquica em quatro níveis e aplicam o método AHP para obtenção dos pesos dos subcritérios e critérios.

Tendo como base o conceito de desenvolvimento sustentável, Karger & Hennings (2009) investigam as vantagens e desvantagens da geração descentralizada de eletricidade na Alemanha. Para isso, consideram quatro cenários futuros de fornecimento de eletricidade que são avaliados segundo um conjunto hierarquicamente estruturado de critérios de sustentabilidade, o qual, por sua vez, é dividido em quatro níveis. No primeiro nível se encontra o objetivo geral de se alcançar a sustentabilidade. O segundo nível é composto pelos critérios, que correspondem a cinco áreas: proteção ambiental, saúde, segurança do suprimento, aspectos econômicos e aspectos sociais. No terceiro nível, são atribuídos os critérios para cada área. E no quarto nível, o objetivo de sustentabilidade é representado por um total de 86 critérios. Com base na abordagem do método AHP, os autores realizam a avaliação dos quatro cenários segundo a análise de 11 especialistas.

Ao explorarem algumas opções de energia renovável para geração de eletricidade, Amer & Daim (2011) utilizam pela primeira vez o método AHP no setor energético do Paquistão. Na ocasião, avaliam as energias eólica, solar fotovoltaica, solar térmica e proveniente da biomassa sob uma ótica de sustentabilidade. Assim, definem uma estrutura hierárquica de 4 níveis, onde organizam 20 subcritérios que são enquadrados em 5 critérios principais, são eles: econômico, técnico, social, ambiental e político. Em seguida, as comparações *par a par*, previstas no método AHP, são conduzidas por estudiosos e profissionais do setor energético a partir de uma abordagem alternativa à escala de julgamento sugerida por Saaty (1984). Nela os especialistas alocam 100 pontos entre cada par. levam em consideração 20 subcritérios, os quais são enquadrados em 5 critérios principais, são eles: econômico, técnico, social, ambiental e político.

No que diz respeito mais especificamente ao emprego do método AHP em estudos baseados na abordagem de ciclo de vida, observa-se que os autores buscam geralmente apoio na consideração de questões socioambientais intangíveis e no cálculo dos elementos facultativos de ponderação e agrupamento da etapa de AICV. É dentro desse contexto que Sonetti & Lombardi (2020) integram a metodologia de ACV com o método AHP para avaliar o desempenho em termos de sustentabilidade de três tipos de telhados de edificações. Os autores avaliam duas opções de telhado verde, sendo elas, telhado impermeabilizado e invertido, sob cinco critérios. Enquanto a ACV fornece o desempenho térmico e os potenciais impactos ambientais, o método AHP viabiliza tanto a avaliação dos desempenhos sociais e estéticos dos tipos de telhados quanto a atribuição de pesos aos critérios através da realização de entrevistas com projetores. Para os autores, essa abordagem proporciona uma nova perspectiva para a ACV na medida em que

permite a consideração de elementos qualitativos, participativos e prospectivos. Em outras palavras, oferece uma complementação que vai além das corriqueiras categorias de impacto ambiental. De um modo mais geral, pode ajudar os tomadores de decisão a encontrar alternativas sustentáveis entre as opções disponíveis.

Ghazvinei *et al.* (2017) propõem um método que integra a metodologia de ACV com o método AHP para a seleção do sistema de gestão de resíduos sólidos mais adequado para um campus universitário. Para isso, a ACV é empregada na avaliação dos potenciais impactos ambientais das diferentes opções de gestão de resíduos sólidos (reciclagem, incineração e aterro sanitário), levando em consideração critérios ambientais e econômicos. Paralelamente, o método AHP foi empregado para complementar essa avaliação segundo dados ambientais e econômicos baseados na opinião de especialistas. A combinação dos resultados obtidos tanto na ACV quanto na AHP é conduzida por meio de uma análise de *cluster*, possibilitando a obtenção do cenário de gestão de resíduos sólidos mais apropriado. Para os autores, o método AHP permite resolver o problema de maneira sistemática e lógica, o que ajuda a lidar com a complexidade.

Lançando foco sobre a literatura que emprega o método AHP em benefício da sustentabilidade no setor energético, dou destaque ao estudo conduzido Corona & San Miguel (2019). Ao avaliarem a sustentabilidade da tecnologia heliotérmica HYSOL, os autores sugerem a aplicação do método AHP para apoiar a etapa de interpretação da ASCV. Eles argumentam que a comparação de produtos ou cenários alternativos podem ser subsidiados pela ponderação e agregação dos resultados da ACV, ACV-S e CCV utilizando métodos de AMD, tal como o método AHP. Nesse caso, as preferências das partes interessadas com relação aos critérios considerados são convertidas em valores numéricos, permitindo a obtenção de uma pontuação final para cada alternativa.

2.4.2. Lógica Nebulosa

2.4.2.1. O que é a Lógica Nebulosa

A Lógica Nebulosa está fundamentada na Teoria dos Conjuntos Nebulosos⁴⁴ que foi introduzida por Lotfi Asker Zadeh em 1965 com a publicação do artigo *Fuzzy Sets* (Zadeh, 1965) no *Journal of Information and Control*. Essa teoria consiste em uma extensão da teoria clássica dos conjuntos – que admite apenas valores booleanos, ou seja,

⁴⁴ Também referenciados como Lógica Difusa (ou *Fuzzy*) e Teoria dos Conjuntos Difusos (ou *Fuzzy*).

verdadeiro ou falso⁴⁵. Ao observar que existem ambiguidades nas inúmeras regras presentes no cotidiano humano, Zadeh (1965) inicia seu artigo argumentando que

[...] “More often than not, the classes of objects encountered in the real physical world do not have precisely defined criteria of membership; for example, the class of animals clearly includes dogs, horses, birds etc. as its members, and clearly excludes such objects as rocks, fluids, plants etc. However, such objects as starfish, bacteria etc. have an ambiguous status with respect to the class of animals.”⁴⁶

Tendo consciência dessa complexidade, Zadeh (1965) parte do conceito de *verdade não absoluta* (ou *verdade parcial*)⁴⁷ – isto é, com valores de verdade entre o *completamente verdadeiro* e o *completamente falso* – para flexibilizar a pertinência de elementos aos conjuntos (Figura 2.17). Desse modo, um elemento poderia pertencer parcialmente a um determinado conjunto (Gomes & Gomes, 2019; Ortega, 2001).

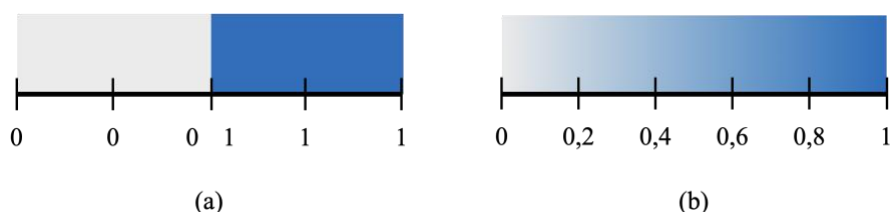


Figura 2.17 – Ilustração do conceito de *verdade absoluta* (lógica booleana) (a) e de *verdade parcial* (b)
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Mukaidono (2001)

Dentro da teoria clássica dos conjuntos, existem inúmeras situações em que a relação de pertinência de um elemento a um dado conjunto não é bem definida. Um exemplo claro disso pode ser observado por meio do conceito de “meia-idade” fornecido por Mukaidono (2001). Sendo assim, suponha-se que o período de meia-idade comece aos 35 anos e termine aos 55 anos. Empregando a teoria clássica dos conjuntos, uma pessoa com 34 anos não pertenceria a esse grupo, sendo incluída somente após completar o seu 35º aniversário. De modo análogo, uma pessoa de 36 anos também não faria parte desse grupo. O que causa estranheza nessa definição de meia-idade? As suas fronteiras muito definidas parecem muito antinaturais uma vez que as transições de um grupo de

⁴⁵ Cabe aqui ressaltar que no decurso da ciência, outros pesquisadores demonstraram seu desconforto com relação à lógica binária, relatando sua fragilidade para lidar com situações mais realistas (Ortega, 2001).

⁴⁶ “Frequentemente, as classes de objetos encontrados no mundo físico real não possuem critérios precisamente definidos de associação; por exemplo, a classe de animais inclui claramente cachorros, cavalos, aves etc. como seus membros e exclui claramente objetos como rochas, fluidos, plantas etc. No entanto, objetos como estrelas-do-mar, bactérias etc. têm um *status* ambíguo com relação à classe dos animais” (tradução livre) (Zadeh, 1965).

⁴⁷ Em outras palavras, valores de verdade que se encontram entre o *completamente verdadeiro* e o *completamente falso* da lógica booleana.

idade para outro se dão, na realidade, de forma mais suave (Mukaidono, 2001). A Figura 2.18 (a) ilustra de modo claro como são bem definidas as fronteiras dessa definição de meia-idade segundo a teoria clássica dos conjuntos.

Uma alternativa a essa abordagem consiste em tornar menos rígida a ideia de pertinência, definindo limites menos abruptos através do emprego de “graus” de meia-idade. Assim, não há etapas extremas para meia-idade, na qual uma pessoa pode, por exemplo, envelhecer com o acréscimo de apenas um ano em sua idade. Na Figura 2.18 (b), pode-se perceber que o grau de pertinência de uma pessoa de 25 anos ao grupo de meia-idade é muito menor que aquele de uma pessoa de 45 anos (Mukaidono, 2001). Logo, é possível depreender que a Teoria dos Conjuntos Nebulosos modela a má definição da fronteira de uma classe de um determinado conjunto (Gomes, 2007).

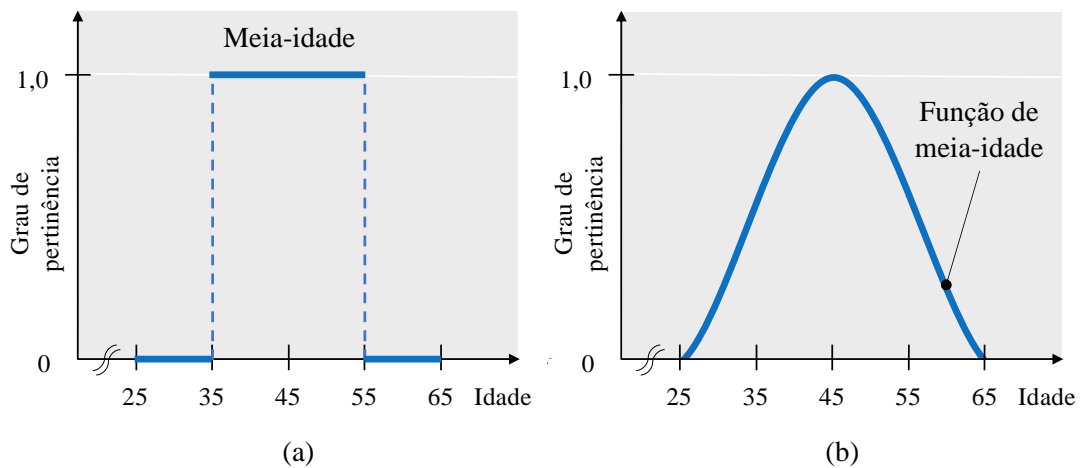


Figura 2.18 – Gráfico da função de meia-idade segundo a teoria clássica dos conjuntos (a) e a Teoria dos Conjuntos Nebulosos (b)

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Mukaidono (2001)

A Lógica Nebulosa lança mão dessa teoria para desenvolver inúmeras formas de raciocínio aproximado. Assim, essa extensão da lógica clássica (booleana) pode ser definida como uma linguagem formalizada que está preocupada com as regras pelas quais se constroem afirmações complexas a partir de informações simples. Nesse sentido, lida com declarações expressas em linguagem natural e que contém, portanto, termos linguísticos imprecisos (Klir, 2001). Isso porque a linguagem empregada no mundo real faz uso de palavras para medição que não são capazes de definir claramente a magnitude a qual o locutor está efetivamente se referindo.

Para nós é comum declarações como “a cidade A é *longe* da cidade B”, “o imóvel é *grande*”, “o tempo de espera é *longo*”. Apesar dos conceitos de *longe*, *grande* e *longo*

serem um consenso, a magnitude que cada um de nós atribui a esses termos é distinta. Além disso, o que se entende por *grande*, por exemplo, varia com o contexto uma vez que um “imóvel *grande*” é medido em uma escala absoluta diferente daquela para medir uma “refeição *grande*”. Assim sendo, essas variáveis linguísticas subjetivas capturam o conceito de quantidade relativa, ao invés de exata. Em decorrência disso, as tomadas de decisão estão sujeitas a serem baseadas por informações imprecisas, vagas e confusas (Klir, 2001; Mukaidono, 2001; Shepard, 2005).

É diante desse contexto que a Lógica Nebulosa se apresenta como uma das abordagens mais adequadas para o tratamento das imprecisões inerentes às informações expressas pela linguagem natural. Graças a sua capacidade de obter conclusões a partir de informações não exatas, a Lógica Nebulosa tem sido empregada em aplicações práticas dentro de diferentes áreas (Klir, 2001).

2.4.2.2. A teoria dos conjuntos nebulosos

Na matemática clássica, um subconjunto A de um conjunto universo U pode ser definido como uma aplicação dos elementos de U aos elementos do conjunto $[0,1]$ (Equação 2.4) (Gomes & Gomes, 2019).

$$A: U \rightarrow [0,1] \quad 2.4$$

Com a intenção de flexibilizar a ideia de pertinência, Zadeh (1965) introduziu a noção de *grau de pertinência* (μ_A) de cada *elemento* (x) com relação a um determinado conjunto. Desse modo, a *função de pertinência* ($\mu_A(x)$) é o fator caracterizador do conjunto nebuloso, associando a um *elemento* do *universo de discurso* (U) um número real do intervalo $[0,1]$. Por meio dessa função, a Teoria dos Conjuntos Nebulosos busca um valor escalar entre 0 (zero) e 1 (um) e indica com que grau cada elemento pertence ao conjunto. Sendo o valor 0 equivalente a *total não pertinência*; o valor 1, a *total pertinência*; e os valores entre 0 e 1, aos *graus de pertinência* intermediários. Em outras palavras, essa teoria transforma o conceito de falso e verdadeiro em números reais, do intervalo 0 a 1, em que 0 é falso e 1, verdadeiro (Gomes & Gomes, 2019).

Em suma, o U corresponde ao espaço onde estão definidos os elementos do conjunto enquanto a *função de pertinência* define o grau de pertinência de um desses elementos ao conjunto. Assim, a função $\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$ mapeia os elementos do *universo de discurso* e atribui a eles um *grau de pertinência* com relação ao conjunto

universo U (Gomes & Gomes, 2019; Ortega, 2001). Um conjunto nebuloso A pode, então, ser definido como um conjunto ordenado de pares de um elemento genérico x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) e seu grau de pertinência $\mu_A(x)$, conforme a Equação 2.5 (Munda, 1995):

$$A = \{x_i, \mu_A(x_i) | x_i \in U\} \quad 2.5$$

Cada função de pertinência deve ter uma largura denominada conjunto de suporte (S_A) (Equação 2.6), onde se encontram os elementos do universo do discurso que apresentam pertinência não nula ao conjunto nebuloso (Figura 2.19) (Shepard, 2005).

$$S_A = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad 2.6$$

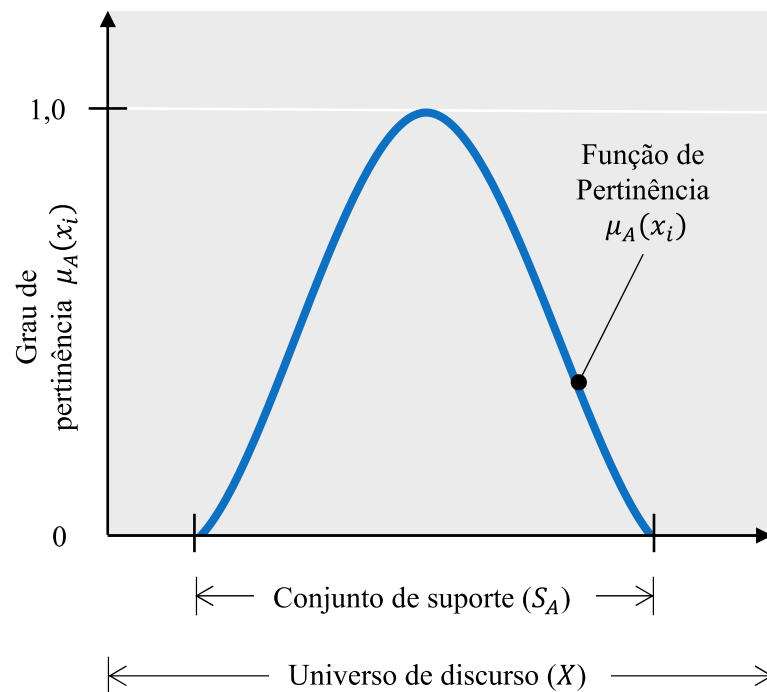


Figura 2.19 – Ilustração de um conjunto nebuloso genérico e seus componentes
 Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Shepard (2005)

Diante disso, a matemática nebulosa se revela como uma tentativa de aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão da linguagem empregada no mundo real. Em outras palavras, a Teoria dos Conjuntos Nebulosos consiste em uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, descritas geralmente em linguagem natural, e convertê-las, através de procedimentos lógicos e matemáticos, em um formato numérico, o qual é de fácil manipulação (Gomes & Gomes, 2019; Shepard, 2005).

2.4.2.3. A Lógica Nebulosa e a avaliação da sustentabilidade do setor energético

Conforme foi observado anteriormente, diversas situações que envolvem problemas subjetivos cujos conceitos são ambíguos podem ser tratadas pela Lógica Nebulosa. A sustentabilidade, por exemplo, se revela como um conceito subjetivo tendo em vista que uma mesma situação pode ser considerada sustentável por um economista, mas insustentável por um ambientalista (Hemdi *et al.*, 2013; Phillis & Andriantiatsaholiniaina, 2001). Essa contraposição de ideias denota que, além de informações ambíguas ou imprecisas associadas a dados e indicadores, esse conceito está muitas vezes sujeito ao julgamento de valor das diferentes partes interessadas (Doukas *et al.*, 2006; Kouloumpis & Azapagic, 2018; Munda, 1995; Phillis & Andriantiatsaholiniaina, 2001).

Com o amadurecimento dos seus fundamentos teóricos ao longo dos anos, a Lógica Nebulosa vem alcançando novas fronteiras. No que diz respeito mais especificamente à dimensão ambiental, Shepard (2005), ao se debruçar sobre o emprego da Teoria dos Conjuntos Nebulosos na avaliação de impacto ambiental, argumenta que as condições ambientais "são modeladas através de declarações imprecisas, as quais expressam o significado dos elementos observados". O autor explica como a Lógica Nebulosa tem sido aplicada com sucesso no campo ambiental. Em linhas gerais, cada elemento se caracteriza como uma variável linguística de preocupação ou interesse (ou categoria de impacto) representada por um conjunto de termos nebulosos (por exemplo, *baixo, médio, alto* impacto). Tais informações são determinadas com base em especialistas, agências reguladoras, consultores e moradores locais (Shepard, 2005).

Quando se volta o olhar para o campo da sustentabilidade, é notável o espaço que a Lógica Nebulosa vem ganhando dentro do quadro de ferramentas voltadas para a sua avaliação (Andriantiatsaholiniaina *et al.*, 2004; Phillis & Andriantiatsaholiniaina, 2001; Wang *et al.*, 2009). Munda (1995), ao se focar sobre métodos de AMD no âmbito da economia ecológica, chama a atenção não só para a complexidade dos problemas ambientais que são compostos por informações mistas de natureza qualitativa e quantitativa; mas também para a existência de interesses conflitantes provenientes tanto das múltiplas dimensões da sustentabilidade (ambiental, social, econômica etc.) quanto dos inúmeros grupos da sociedade. Outro aspecto fundamental é que certos fatores relevantes à avaliação da sustentabilidade e que não podem ser quantificados, tais como opiniões e valores, não são considerados em modelos matemáticos tradicionais

(Zimmermann, 1991). Baseados nesse contexto, Phillis & Andriantiatsaholiniaina (2001) argumentam que a problemática existente na fronteira entre a sustentabilidade e a insustentabilidade não reside necessariamente no seu delineamento excessivamente preciso, conforme a maior parte das situações indicada para o emprego da Lógica Nebulosa, mas sim na dificuldade inerente à sua definição.

Cenário semelhante pode ser observado no domínio energético onde a Lógica Nebulosa tem sido cada vez mais aplicada para tratar, sobretudo, critérios qualitativos, imprecisões inerentes às informações e conflitos de interesses (Wang *et al.*, 2009). Dentro desse contexto, ao se debruçarem sobre o emprego da Lógica Nebulosa em diferentes sistemas de energia renováveis, Suganthi *et al.* (2015) revelaram que modelos baseados nessa abordagem podem fornecer estimativas realistas.

A seguir serão apresentados alguns dos principais estudos disponíveis na literatura especializada que fazem uso da Lógica Nebulosa e ilustram diferentes caminhos para resolver parte da subjetividade, complexidade, variabilidade e possíveis conflitos de interesses presentes na avaliação da sustentabilidade de um modo geral, bem como de sistemas de energia e realizadas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida.

Phillis & Andriantiatsaholiniaina (2001) desenvolveram um modelo denominado *Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation* (SAFE) que fornece medidas de sustentabilidade em níveis local, regional e nacional. Tal modelo tem como entradas indicadores básicos de integridade ambiental e bem-estar social, os quais são tratados individualmente e combinados por meio da Lógica Nebulosa. Assim, a sustentabilidade de um determinado sistema é composta por duas dimensões principais, quais sejam, sustentabilidade ambiental e sustentabilidade humana. Para a operacionalização do modelo, os autores, ao invés de empregarem diretamente indicadores relativos ao conjunto de critérios, propõem que cada um deles seja normalizado em uma escala comum, permitindo sua combinação e a simplificação dos cálculos. Dessa forma, cada indicador deve ser normalizado dentro de uma escala que vai do 0 (menor nível de sustentabilidade) ao 1 (maior nível de sustentabilidade), considerando uma meta máxima ou mínima. Posteriormente, Andriantiatsaholiniaina *et al.* (2004) conduziram uma análise de sensibilidade do modelo SAFE visando identificar os fatores mais importantes para o desenvolvimento sustentável. A aplicabilidade do método foi verificada através de um estudo de caso sobre as economias da Grécia e dos EUA no qual os autores concluíram que não há um caminho único para se alcançar a sustentabilidade.

Em relação ao planejamento e a avaliação de sistemas de energia, é de amplo conhecimento o envolvimento de inúmeros julgamentos de valor em relação a questões técnicas, socioeconômicas e ambientais. Disso decorre a necessidade de se empregar métodos que permitam aos formuladores de políticas elaborar uma série de alternativas com base em vários pontos de vista, muitas vezes conflitantes, e, em seguida, escolher o mais satisfatório (Cavallaro & Ciraolo, 2005).

Nesse sentido, Doukas *et al.* (2006) avaliam diferentes tecnologias de geração de energia sob a ótica da sustentabilidade por meio de uma abordagem de AMD na qual são empregadas variáveis linguísticas. Desse modo, levam em conta dez potenciais futuras tecnologias do sistema energético da Grécia, sendo agrupadas em três principais categorias, a saber, combustíveis fósseis, hidrogênio e energias renováveis. Consideram oito variáveis linguísticas para avaliar os seus desempenhos, variando de “insignificante” até “perfeito”⁴⁸. Por fim, definem oito critérios de sustentabilidade que são distribuídos em quatro dimensões: econômica, ambiental, tecnológica e social.

Inúmeros autores também propõem empregar a Lógica Nebulosa juntamente com metodologias baseadas na abordagem de ciclo de vida. Seus estudos são, sobretudo, voltados para lidar com incertezas, simplificar os processos envolvidos na análise e tratar os resultados dos indicadores de impacto (resultantes da etapa de caracterização da AICV) a fim de salientar a significância de cada categoria de impacto. Além disso, cabe destacar que o sistema de inferência nebulosa é também frequentemente utilizado para obtenção de um índice de desempenho único (Afrinaldi & Zhang, 2014).

Dentro desse contexto, Afrinaldi & Zhang (2014) propõem uma metodologia alternativa para os elementos facultativos de normalização e agrupamento da etapa de AICV. Desse modo, as categorias de impacto são normalizadas com base nas metas de redução de emissões, sendo seus indicadores distribuídos em uma escala de 0 (pior) e 1 (melhor). No que diz respeito mais especificamente ao agrupamento, os autores fazem uso do sistema de inferência nebulosa visando à obtenção de um índice de desempenho ambiental a partir de subcategorias e categorias de impacto.

Ainda no que concerne ao aperfeiçoamento da etapa de AICV, Güereca *et al.* (2007) propõem uma abordagem que relaciona indicadores de impacto com um conjunto de informações de um inventário de emissões e de metas tanto políticas quanto de

⁴⁸ As oito variáveis linguísticas empregadas para avaliar as diferentes tecnologias são as seguintes: “insignificante”, “muito baixo”, “baixo”, “médio”, “alto”, “muito alto” e “perfeito” (Doukas *et al.*, 2006).

sustentabilidade relativas à região de interesse. Assim, indicadores parciais são transformados em uma descrição linguística nebulosa, a qual permite classificar em ordem de preferência as diferentes opções de sistemas analisados. Para isso, cabe destacar a necessidade de se normalizar esses indicadores dentro de um intervalo de valores compreendidos entre 0 e 1. Os autores aplicam esse método em um estudo de caso no qual avaliaram cinco cenários de gestão de resíduos urbanos biológicos em Barcelona.

Diante da necessidade de se dispor não só de conhecimento ambiental aprofundado, mas também de dados extremamente precisos, González *et al.* (2002) fornecem uma metodologia que integra a Lógica Nebulosa com a ACV. Os autores têm como argumento principal tornar a aplicação da ACV mais acessível em pequenas e médias empresas. Um dos procedimentos preliminares requeridos por essa metodologia consiste na normalização dos valores relativos aos indicadores de impacto, os quais devem ser escalonados entre 0 e 100. Como resultado, os autores apontam como principal vantagem dessa integração a facilidade em identificar os principais encargos ambientais durante as primeiras iterações da ACV. Por outro lado, destacam uma perda de precisão potencial dos resultados com relação aos métodos quantitativos tradicionais.

Sob o ponto de vista do *ecodesign*, Herva *et al.* (2012) propõem um método de integração baseado na Lógica Nebulosa que incorpora três metodologias de avaliação ambiental, a saber, ACV, Pegada Ambiental e Avaliação de Riscos Ambientais. O objetivo do estudo é obter um índice final para classificar diferentes opções de produtos sob uma perspectiva ambiental nomeado como *Fuzzy EcoDesign* (FEcoDI). Para isso, os autores consideram fatores de caracterização e normalização oriundos do *Dutch Institute of Environmental Sciences* (CML). O método é aplicado em um estudo de caso onde são comparados dois tipos de garrafas de água plásticas produzidas a partir de polietileno tereftalato (PET) e policloreto de vinila (PVC).

Com relação ao setor energético, Hemdi *et al.* (2013) fornecem um método baseado na Lógica Nebulosa para apoiar a tomada de decisão no setor elétrico orientada pela sustentabilidade. Para eles, tal abordagem se revela adequada para avaliação da sustentabilidade na medida em que a Lógica Nebulosa possibilita modelar sistemas complexos com dinâmicas e entradas que não estão bem definidas. Assim, apresentam um estudo de caso envolvendo a seleção da melhor opção de geração de energia elétrica dentre cinco possibilidades: três tipos de termelétricas à carvão, gás natural e biomassa. Em vista disso, fazem uso de dados qualitativos e quantitativos, que são convertidos em valores numéricos, e, em seguida, expressos sob a forma de indicadores e um *índice de*

sustentabilidade. Os 31 parâmetros de sustentabilidade selecionados pelos autores foram agrupados em 8 subcategorias de sustentabilidade, os quais, por sua vez, foram reduzidos a 3 elementos principais de sustentabilidade: ambiental, econômico e social. Por fim, todos os indicadores foram agregados em um valor final denominado índice de sustentabilidade. A partir dos resultados obtidos no estudo, os autores apontam que o emprego da Lógica Nebulosa na avaliação da sustentabilidade é capaz de reduzir a complexidade envolvida na tomada de decisões.

Com o intuito de auxiliar o tratamento de informações imprecisas nas avaliações de sustentabilidade, Kouloumpis & Azapagic (2018) apresentam um modelo intitulado *Fuzzy Evaluation for Life Cycle integrated Sustainability Assessment* (FELICITA), o qual integra a ACV, a ACV-S e o CCV com a inferência nebulosa. Os autores ilustram a aplicação do modelo por meio de um estudo de caso que avalia a sustentabilidade de 5 diferentes opções de geração de eletricidade, são eles, carvão, gás natural, nuclear, eólica *offshore* e solar fotovoltaica, com relação a 12 indicadores de sustentabilidade. Diferentemente de Hemdi *et al.* (2013), Kouloumpis & Azapagic (2018) empregam em sua metodologia uma etapa de preparação dos dados de entrada. Nela, os autores preveem uma normalização de interpolação linear entre os valores para cada indicador.

No que diz respeito mais especificamente às fontes renováveis de energia, vale revisitar o trabalho desenvolvido por Bitter *et al.* (2017) para dar enfoque aos seus aspectos metodológicos uma vez que são baseados na Lógica Nebulosa. Para avaliar um empreendimento eólico na Alemanha segundo 24 indicadores distribuídos em 7 dimensões de sustentabilidade, os autores empregam a Lógica Nebulosa visando a integração destes indicadores, obtendo, assim, tanto índices por dimensão quanto um índice geral de sustentabilidade, referido como GSI (do inglês *General Sustainability Index*). Com isso em mente, normalizam, em um primeiro momento, os indicadores considerados, viabilizando a sua comparabilidade e processamento, para então, darem início a aplicação da Lógica Nebulosa, a qual consiste nas etapas de *fuzzificação*, *inferência fuzzy* e *desfuzzificação*. Além disso, os autores se mostram preocupados em como representar os resultados na medida em que a abordagem proposta pelos mesmos pressupõe a organização dos indicadores segundo um recurso gráfico referido como *Integrative Sustainability Triangle*⁴⁹ (IST).

⁴⁹ O IST fornece uma visualização estruturada das três dimensões e suas interseções, facilitando a alocação de indicadores básicos de sustentabilidade dentro dos diferentes campos. Os resultados da avaliação da

CAPÍTULO 3

PROPOSTA METODOLÓGICA

A transição energética em curso, aliada ao crescente interesse pela sustentabilidade, instiga e desafia novas formas de se analisar os aspectos ambientais, sociais e econômicos das diferentes tecnologias de transformação de energia de origem renovável. Os últimos anos trouxeram muitas experiências nesse sentido, com práticas de avaliação de sustentabilidade que abarcam diferentes níveis e objetivos. Apesar da pluralidade de opções disponíveis, a adoção de abordagens mais holísticas, tal como oferecida pelo Pensamento do Ciclo de Vida, se mostra como o caminho mais adequado para lidar com essa situação. Dentro desse contexto, o presente capítulo descreve a proposta metodológica para a Avaliação da Sustentabilidade de Ciclo de Vida (ASCV) aplicada a tecnologias de transformação de energia de origem renovável, bem como os principais passos e premissas necessários ao seu desenho.

Como foi visto no capítulo anterior, existem atualmente duas linhas principais de pensamento para a condução de uma ASCV: (i) a abordagem de Kloepffer (2008) e (ii) a abordagem de Guinée *et al.* (2011). A primeira delas se baseia no conceito do *Triple Bottom Line* (TBL) e propõe basicamente a combinação das ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV). Já Guinée *et al.* (2011) aprofunda essa ideia de ASCV na medida em que propõe não só cobrir aspectos ambientais, sociais e econômicos, mas também ampliar as análises em nível de produto para o nível setorial ou da economia como um todo. Tendo em vista o nível da análise na qual se enquadra a presente tese, que está voltada para sistemas de geração de energia elétrica, bem como o fato de Kloepffer (2008) ser o

sustentabilidade são exibidos por meio de um código de cores que representa os níveis de sustentabilidade de cada um desses campos (Bitter *et al.*, 2017).

principal referencial para a literatura especializada em ASCV, a metodologia a ser proposta seguirá a trajetória aberta por esse autor.

De acordo com as diretrizes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC), fornecidas na publicação *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment* (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011), a aplicação de uma ASCV envolve quatro etapas, quais sejam: (i) *definição de objetivo e escopo*, (ii) *análise de inventário de ciclo de vida* (ICV), (iii) *avaliação de impactos de ciclo de vida* (AICV) e (iv) *interpretação dos resultados*. Ou seja, segundo esse grupo de trabalho, a estrutura metodológica definida pelas normas 14.040 (ISO, 2006a) e 14.044 (ISO, 2006b) para a ACV clássica pode também ser aplicada para a ACV-S e CCV em um estudo de ASCV.

Apesar de não ser seu foco, essa série de normas reconhece que sua abordagem de ciclo de vida e suas diretrizes podem ser utilizadas na análise de aspectos sociais e econômicos (ISO, 2006a). No entanto, é importante ressaltar que, ao se tratar de uma abordagem multidimensional, as etapas de análise de ICV e AICV da ASCV possuem algumas particularidades na medida em que envolvem diversos modelos e cálculos. Além disso, os resultados da ACV, ACV-S e CCV são obtidos de modo separado, o que requer a execução de procedimentos adicionais para seu tratamento e integração.

Tendo consciência dessa complexidade, pesquisadores do *Institute of Environmental Sciences of Leiden University* (CML), por meio do projeto *Co-ordination Action for Innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability* (CALCAS) (CALCAS, 2009), propuseram uma revisão da estrutura metodológica fornecida pela ISO 14.040 (ISO, 2006a) visando melhor favorecer a combinação das dimensões ambiental, social e econômica em um estudo baseado na abordagem de ciclo de vida. Assim, definem três etapas principais para a aplicação de uma ASCV: (i) *definição de objetivo e escopo*, (ii) *processo de modelagem* e (iii) *interpretação dos resultados*. Enquanto a primeira e a terceira etapas em pouco se diferem de suas equivalentes da estrutura normatizada para a ACV clássica, a segunda etapa reúne as atividades de ICV e AICV de uma ASCV.

Diante desse quadro, a construção da metodologia proposta se baseia na estrutura fornecida pelo projeto CALCAS (CALCAS, 2009), buscando sempre que possível atender os requisitos estabelecidos pela série de normas ISO 14.040 (ISO, 2006a, 2006b). A Figura 3.1 ilustra as etapas do processo de avaliação do desempenho ambiental, social e econômico proposto para tecnologias de transformação de energia de origem renovável sob uma perspectiva de ciclo de vida.

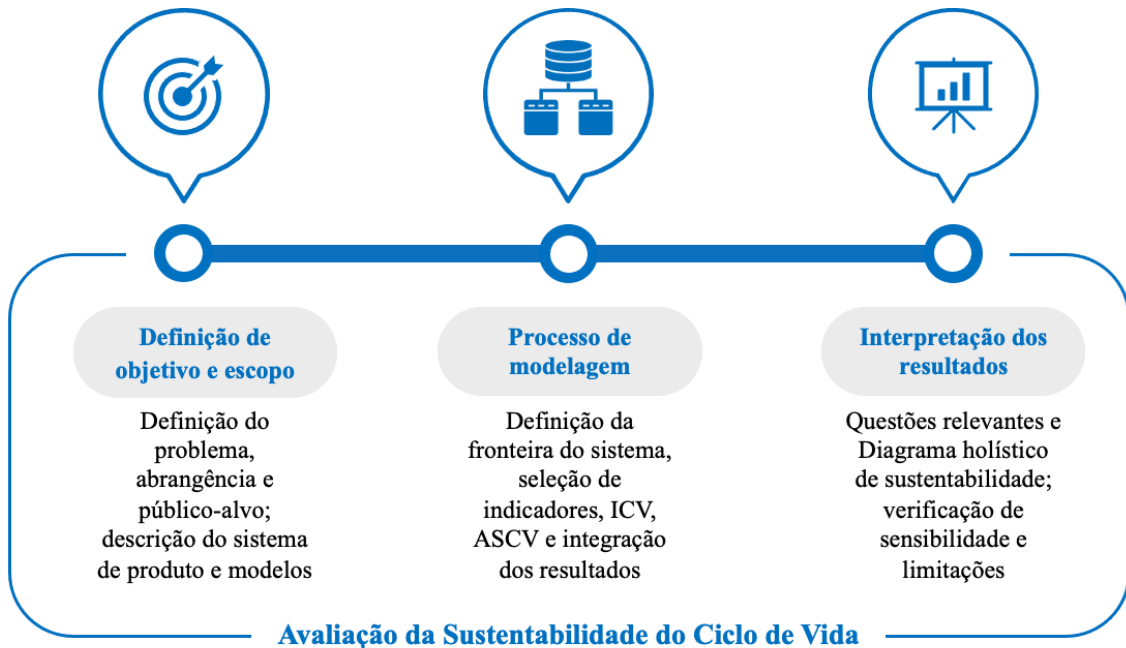


Figura 3.1 – Esquema da proposta metodológica para estudos de ASCV
 Fonte: Elaborado pelo autor

3.1. ETAPA 1: DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

A primeira etapa de definição de objetivo e escopo da presente proposta metodológica consiste em estabelecer a abrangência, profundidade e o público-alvo da análise; descrever o sistema em estudo; e relatar os métodos aplicados na obtenção dos seus resultados. Esses itens já podem começar a ser delineados neste momento e aprofundados posteriormente tanto nas outras etapas de desenvolvimento desta metodologia quanto na sua aplicação. Assim, como ponto de partida de qualquer análise, é possível aqui enquadrar de um modo geral o problema que se pretende abordar. Isso se dá pelo seguinte questionamento: *“Tendo em vista a transição energética em curso e o apelo global por um desenvolvimento sustentável, qual é a forma mais adequada de se avaliar a sustentabilidade de tecnologias de geração de energia de origem renovável?”*

Essa questão já foi bastante discutida nos capítulos anteriores e parcialmente tratada na introdução deste capítulo. Sua resposta indica a abordagem oferecida por Kloepffer (2008) como o referencial para aplicação de uma ASCV. Isso significa adotar o conceito do TBL como modelo de sustentabilidade e, assim, abordar as suas dimensões ambiental, social e econômica por meio das ferramentas ACV, ACV-S e CCV, respectivamente (Equação 3.1). Sob essa perspectiva, esta proposta se concentra em uma análise estática em nível de produto, cobrindo temas atinentes à sustentabilidade que

sejam relevantes tanto para cadeia completa da geração de energia de origem renovável quanto para o contexto brasileiro, se utilizando da integração dessas três técnicas baseadas na abordagem do ciclo de vida com o Processo Hierárquico Analítico (AHP).

$$ASCV = ACV + CCV + ACV-S \quad 3.1$$

Ao fazer a conexão de um problema real com um exercício subjetivo de modelagem, é natural que essa questão central se desdobre em outras questões secundárias mais específicas quando da aplicação da metodologia proposta. O mesmo ocorre na definição dos limites da análise e dos métodos de mensuração da sustentabilidade que deverá ser esquadrihada na execução da ASCV. Sendo assim, a etapa de definição de objetivo e escopo inclui os seguintes itens (CALCAS, 2009; ISO, 2006a, 2006b):

- 1) Definição do problema que se pretende resolver e suas questões derivadas;
- 2) Abrangência temática: os temas relativos à sustentabilidade que serão abordados;
- 3) Abrangência geográfica: a extensão geográfica que a metodologia atua e busca fornecer solução;
- 4) Abrangência temporal: o horizonte de tempo considerado pelo estudo;
- 5) Definição do público-alvo: aquele a quem se pretende comunicar os resultados;
- 6) Descrição do sistema de produto;
- 7) Seleção e descrição dos modelos adotados: as características-chave dos modelos de ACV, ACV-S e CCV.

Com relação à seleção e à descrição dos modelos adotados na aplicação desta metodologia de ASCV, a seguir serão vistas algumas características-chave das ferramentas de ACV, ACV-S e CCV para avaliar o desempenho de tecnologias de geração de energia de origem renovável nas dimensões ambiental, social e econômica, as quais serão aprofundadas ao longo do capítulo.

Com foco nos aspectos ambientais de um bem de consumo ou serviço, a ACV é construída sobre uma fronteira limitada do sistema de produto e estruturada em torno de uma unidade funcional. Para esta metodologia de ASCV, a ACV segue a *abordagem atribucional* e atua sobre a cadeia completa da geração de energia a partir de fontes renováveis, relacionando seus aspectos ambientais à geração de 1,0 quilowatt-hora (kWh). Como plano de ação preliminar para sua execução, priorizam-se a base de dados

Ecoinvent (Frischknecht *et al.*, 2005), como fonte de informações para a análise de ICV, e o *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017), como método de cálculo para AICV, os quais podem eventualmente ser complementados pela literatura disponível.

Na avaliação do desempenho social de tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis, a ACV-S se orienta pela perspectiva *interpretativista* (ou *Reference Scale Assessment*), seguida pela UNEP (UNEP, 2020), considerando seus impactos tanto negativos quanto positivos. Como será visto com mais detalhes, adota a unidade funcional de 1,0 kWh de energia gerada para avaliar os impactos negativos e a existência do sistema de produto objeto de análise para avaliar os impactos positivos. Sempre que possível, as fontes primárias de dados devem ser priorizadas, podendo ser substituídas por fontes secundárias que se resumem a literatura disponível e relatórios setoriais e de organizações internacionais.

Para a área econômica, o CCV segue a abordagem *convencional* descrita por Hunkeler *et al.* (2008), cobrindo receitas e custos internos associados a cadeia completa de geração de energia sob a perspectiva do *produtor*, os quais são agregados em um custo final único e correlacionados a unidade funcional de 1,0 kWh. Analogamente a dimensão social, os dados para a análise de ICV e AICV devem ser idealmente coletados junto a fontes primárias de dados. Caso contrário, podem ser obtidos na literatura disponível.

3.2. ETAPA 2: PROCESSO DE MODELAGEM

3.2.1. Fronteiras do sistema

A primeira atividade do processo de modelagem desta metodologia de ASCV consiste na definição mais detalhada da fronteira do sistema, indicando quais processos elementares serão incluídos no estudo (ISO, 2006a). Isso vai depender daquilo que foi estabelecido na etapa anterior de definição de objetivo e escopo e vai delimitar as interações entre o sistema de produto e as áreas ambiental, social e econômica.

Conforme destacado por Laurent *et al.* (2018), o ciclo de vida de sistemas de geração de energia elétrica pode ser entendido como a interseção de dois ciclos de vidas: (i) *o ciclo de vida da usina* e (ii) *o ciclo de vida dos combustíveis*. Com isso em mente, a fronteira do sistema proposta se estende *do berço ao túmulo (cradle-to-grave)*, circunscrevendo as etapas de extração e processamento de matérias-primas; produção de materiais e equipamentos; atividades de transporte; construção, instalação, operação,

manutenção e descomissionamento da usina geradora de energia; e a destinação dos resíduos. Para os combustíveis de origem renovável, inclui sua extração e processamento, distribuição, combustão e destinação de resíduos – conforme ilustrado no esquema de uma fronteira do sistema genérica da Figura 3.2. Note que este último ciclo de vida é irrelevante para as gerações solar fotovoltaica, eólica e hidrelétrica já que as suas fontes de energia se apresentam disponíveis sem processos adicionais aos já contemplados no ciclo de vida das suas instalações físicas (Laurent *et al.*, 2018). A fronteira do sistema deverá ser refinada posteriormente quando da aplicação da ASCV. É importante destacar que, como em todo e qualquer estudo baseado na abordagem de ciclo de vida, os critérios utilizados para a exclusão de etapas, processos, fluxos, entre outros, precisam ser claramente entendidos e descritos (ISO, 2006a).

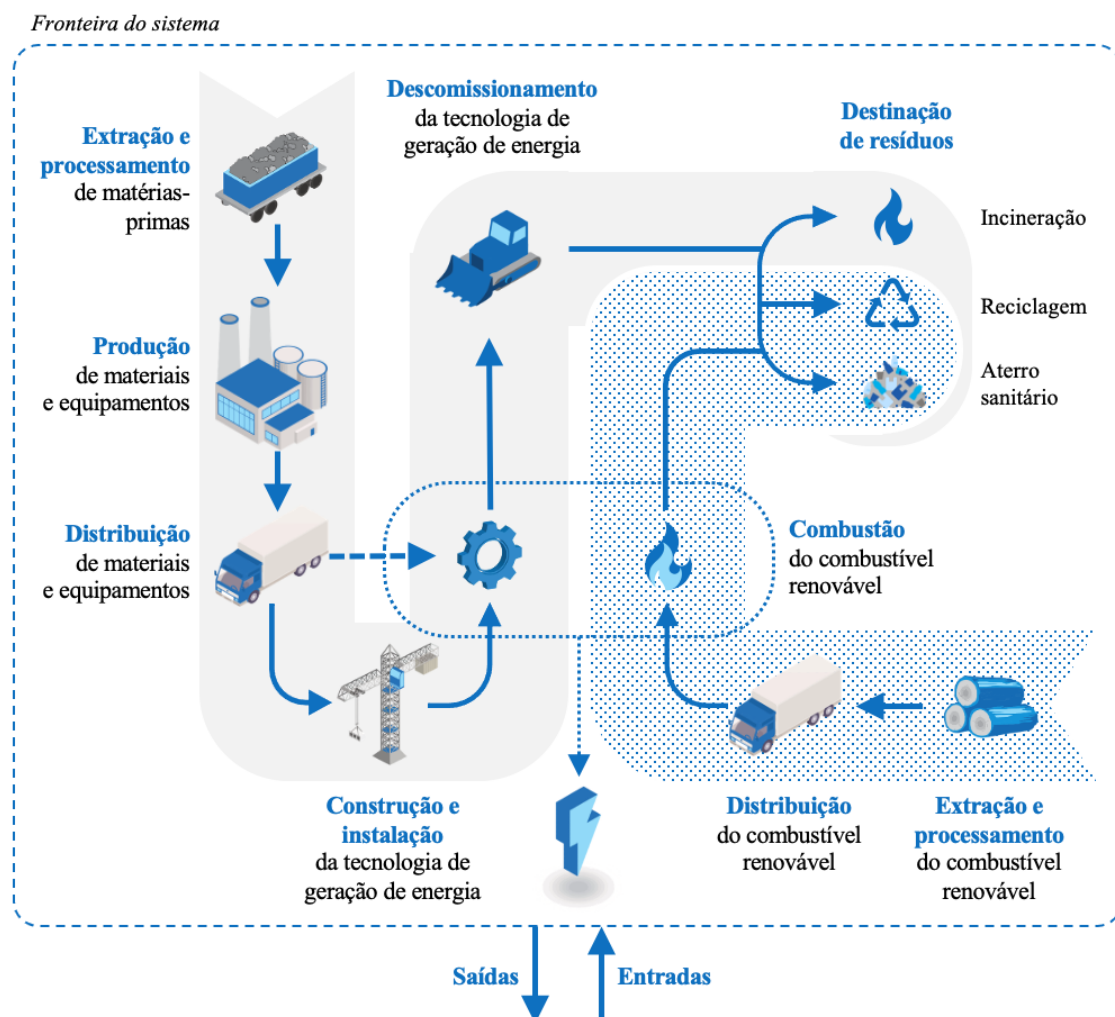


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo de uma fronteira do sistema *cradle-to-grave* para sistemas de geração de energia em estudos baseados na abordagem de ciclo de vida

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2. Seleção de indicadores de sustentabilidade

Tendo em mente que a coleta de dados para a etapa de ICV de uma ACV clássica já é amplamente reportada pela literatura como um processo trabalhoso e demorado, a condução de uma ASCV que aborde uma grande quantidade de indicadores pode se tornar uma tarefa excessivamente exaustiva e, conseqüentemente, desestimular o responsável por esse trabalho. Em razão dessa situação, buscou-se selecionar do conjunto dos 41 artigos científicos analisados no capítulo anterior (ver item 2.3.5), indicadores-chave segundo sua relevância para o contexto brasileiro e os cinco princípios propostos por Wang *et al.* (2009), são eles: (i) *princípio sistêmico*, (ii) *princípio de consistência*, (iii) *princípio de independência*, (iv) *princípio de mensurabilidade*, e (v) *princípio de comparabilidade*⁵⁰. Esses princípios são voltados para orientar a seleção dos principais indicadores durante o processo de tomada de decisão sustentável do setor energético. Por fim, o conjunto de indicadores resultante é avaliado e eventualmente complementado por outros indicadores relevantes que não foram contemplados pela amostra de artigos da revisão sistemática.

Vale lembrar que a revisão sistemática dividiu os artigos em dois subconjuntos de acordo com as fontes de energia analisadas: (i) *todos os tipos de fontes de energia* e (ii) *apenas fontes alternativas e renováveis de energia*. Além disso, não identificou artigos que apliquem a ASCV sobre a geração de energia elétrica no Brasil, o que denota a pertinência dessa possível complementação de indicadores. Nos itens a seguir, a presente tese irá avançar em uma análise mais aprofundada sobre cada um desses indicadores, segundo as dimensões ambiental, social e econômica, com intuito de atestar sua relevância para a geração de energia elétrica, considerando a cadeia completa desta geração e as especificidades de fontes alternativas e renováveis.

3.2.2.1. Dimensão ambiental

Com relação aos indicadores ambientais, o protagonismo do indicador *Aquecimento global* dentro do conjunto dos 41 artigos analisados é reflexo do papel central que as preocupações com as mudanças climáticas exercem no quadro restritivo à

⁵⁰ (i) *Princípio sistêmico*: o conjunto de indicadores deve refletir as características essenciais e o desempenho dos sistemas de energia; (ii) *Princípio de consistência*: o conjunto de indicadores deve ser consistente com o objetivo da tomada de decisão; (iii) *Princípio de independência*: os indicadores de um mesmo nível não podem ter relação de inclusão; (iv) *Princípio de mensurabilidade*: os indicadores devem ser preferencialmente medidos em termos quantitativos ou expressos qualitativamente; (v) *Princípio de comparabilidade*: os indicadores devem ser comparáveis (Wang *et al.*, 2009).

sustentabilidade do setor elétrico atualmente. Ao se constatar sua presença em todos os artigos específicos de fontes alternativas e renováveis de energia, nota-se o comprometimento dos autores com a extensão da cadeia de produção dessas fontes visto que as mesmas não emitem (ou emitem pouco, com relação às fontes não-renováveis) GEE na etapa de geração de energia elétrica.

Além das preocupações com as mudanças climáticas, a relevância do consumo de água para a sustentabilidade de um modo geral pode ser reconhecida pela sua presença constante entre os principais riscos ecológicos globais reportados por instituições, governos e organizações não-governamentais (ONGs) ao redor do mundo. Para além das fontes não-renováveis e convencionais de energia, o indicador *Consumo de água* desempenha também um papel importante para a sustentabilidade de fontes alternativas e renováveis. Nesses casos, o consumo de água está em sua maior parte associado à produção não apenas de biomassa, mas também de componentes e subcomponentes requeridos por algumas tecnologias, podendo ser significativo, até mesmo, em suas etapas de geração de energia elétrica (Laurent *et al.*, 2018). Usinas solares fotovoltaicas, por exemplo, requisitam insumos de água para a limpeza periódica de seus painéis solares. Vale ressaltar também que o consumo de água é particularmente relevante para regiões de climas áridos e com problemas de escassez hídrica, como a região nordeste brasileira que, por sua vez, concentra as maiores expansões de empreendimentos fotovoltaicos e eólicos projetados para o horizonte decenal (Brasil, 2019a; Evans *et al.*, 2009).

Um outro aspecto importante para a sustentabilidade da geração de energia elétrica corresponde aos seus efeitos sobre o uso e a mudança do uso do solo. Devido à natureza difusa de alguns recursos renováveis, os esforços de larga escala para desenvolver seu potencial energético exigem normalmente mais terras do que fontes não-renováveis de energia (Borba & Gaspar, 2007). O uso e a mudança do uso do solo não só têm reflexo direto em emissões de GEE e outros problemas ambientais, como têm ressonância em questões sociais e econômicas. Para os biocombustíveis, por exemplo, o uso e a mudança do uso do solo são questões centrais para o desenvolvimento sustentável na medida em que os processos *upstream* da sua cadeia estão intimamente conectados ao uso agrícola do solo (Hjuler & Hansen, 2018; Wiloso & Heijungs, 2013). Geralmente, esses impactos se revelam também como uma questão relevante para usinas solares e parques eólicos, uma vez que tais empreendimentos podem exigir vastas áreas territoriais. No Brasil, as questões fundiárias existentes podem potencializar ainda mais os efeitos desse processo (Chaves *et al.*, 2018; Gorayeb & Brannstrom, 2016).

De acordo com a revisão sistemática, os problemas ambientais de acidificação, eutrofização e ecotoxicidade se mostram igualmente relevantes para a sustentabilidade segundo os dois subconjuntos de artigos considerados. Para as fontes alternativas e renováveis de energia, a contaminação do solo e da água por substâncias tóxicas e os fenômenos de eutrofização e acidificação estão atrelados tanto ao aproveitamento de bioenergia – devido, sobretudo, ao ciclo de vida da biomassa e a operação da usina de biocombustível –; quanto à produção de componentes e subcomponentes de usinas solares fotovoltaicas e parques eólicos, tais como, painéis fotovoltaicos e aerogeradores. Esses processos estão também atrelados à emissões atmosféricas, tais como compostos orgânicos voláteis (VOCs) e monóxido de carbono (CO), que na presença de óxidos de nitrogênio (NO_x) e da radiação solar formam gás ozônio (O₃) e outros compostos reativos de oxigênio (Laurent *et al.*, 2018; Rosenbaum *et al.*, 2017).

Tendo em vista que essa contaminação do meio ambiente também afeta a qualidade de vida humana, os indicadores de *Toxicidade humana* reportam os efeitos da exposição humana a substâncias tóxicas sobre a saúde coletiva. Com relação à geração de energia em geral, se revelam como uma informação importante haja vista o número de óbitos prematuros associados à poluição causada pela geração de energia baseada em recursos fósseis (IEA, 2020). Para se ter uma ideia, esse número alcança a marca de 400 mil a cada ano no continente europeu (EC, 2020). Não por acaso, a revisão sistemática revela que o *subconjunto 1*, relativo aos artigos que incluem fontes não-renováveis de energia, é mais sensível a esse tema: 58% deles consideram os indicadores de *Toxicidade humana*, contra 20% dos artigos específicos a fontes alternativas e renováveis (*subconjunto 2*). Apesar disso, não se pode perder de vista que a exposição humana a substâncias tóxicas pode decorrer também tanto da poluição gerada na fabricação de componentes e no descarte de resíduos, sobretudo, metálicos de algumas tecnologias, tais como painéis fotovoltaicos e aerogeradores; quanto dos lançamentos tóxicos diretos e indiretos associados à produção de bioenergia, como por exemplo, as emissões relacionadas à produção e ao uso de agroquímicos (Laurent *et al.*, 2018).

A transição energética em curso exige também uma maior mineração e processamento de metais não convencionais. Conforme já citado, componentes e subcomponentes de algumas tecnologias de geração de energia elétrica de origem alternativa e renovável são produzidos a partir das *terras raras*. Esse é o caso dos ímãs permanentes de alguns geradores eólicos e materiais semicondutores de células fotovoltaicas, os quais requerem processos de extração e refino onerosos, sobretudo, dos

pontos de vistas econômico e ambiental (Bauer *et al.*, 2011; Laurent *et al.*, 2018). Apesar disso, a revisão sistemática deixa entrever que esse tema não parece ser regularmente monitorado pelo setor elétrico. Cerca de 34% dos artigos analisados levaram em consideração o indicador *Escassez de recursos minerais*, não havendo distinção significativa entre os dois diferentes subconjuntos de artigos.

Além de contribuírem para a depleção de recursos minerais, muitos desses processos industriais se mostram energo-intensivos. Ao se somarem com as atividades de transportes, os processos industriais evidenciam que a cadeia de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas e renováveis está inevitavelmente vinculada ao consumo de combustíveis fósseis (Laurent *et al.*, 2018; Wiloso & Heijungs, 2013). Embora seja menos importante que nos casos de fontes não-renováveis, esse consumo de energia de origem fóssil pode se intensificar nos casos de tecnologias que requerem a importação de componentes e subcomponentes, como por exemplo, o aproveitamento solar fotovoltaico e eólico no Brasil (Borba & Gaspar, 2007). Dessa realidade decorre que a sua sustentabilidade está também condicionada à consideração e avaliação do indicador *Escassez de recursos fósseis*.

Considerando o *princípio da independência*, os aspectos relativos à *Ruído* e *Reciclagem* – que foram mapeados pela revisão sistemática da literatura, mas não fazem parte da sua lista pré-definida de indicadores ambientais – não serão contemplados pela proposta metodológica. É de amplo conhecimento que a ocorrência de ruídos é um problema inerente à etapa de implantação de projetos energéticos em geral. No caso de parques eólicos, esse problema se estende pela etapa de geração de energia elétrica deixando de ser algo transitório e tornando-se permanente (Tolmasquim, 2016). Ao ser frequentemente reportado pela literatura como uma das principais razões que levam a oposição social à energia eólica, o ruído pode ser contabilizado em parte pelo indicador *Aceitação social* da dimensão social.

Já o tema da reciclagem é fundamental para contribuir na mitigação tanto de impactos ambientais associados aos processos *downstream* da cadeia de geração de energia elétrica quanto da depleção de recursos minerais, sobretudo, nos casos das tecnologias solar fotovoltaica e de aerogeradores. Contudo, quando não há uma demanda específica por um indicador relacionado à reciclagem, os indicadores ambientais cobertos pelo método de cálculo *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017) dão conta dessas questões.

Por fim, é importante destacar que a expansão de empreendimentos energéticos sobre áreas protegidas no país ameaça a sua proteção e o uso sustentável de seus recursos.

Para efeito de exemplificação, a instalação de parques eólicos dentro de áreas protegidas ou em seu entorno vem gerando impactos ambientais e conflitos com as comunidades locais na região Nordeste (Neri *et al.*, 2019). Não à toa, as áreas protegidas foram consideradas recentemente pelo PDE (Brasil, 2019a) como um dos temas socioambientais prioritários à expansão da geração de energia elétrica em território nacional. Desse modo, propõe-se o emprego do indicador *Áreas protegidas* para abordar os efeitos de empreendimentos energéticos sobre esses locais.

3.2.2.2. Dimensão social

No Brasil, a consideração da dimensão social da sustentabilidade é um tema sensível na medida em que altos riscos de ocorrência de desrespeito aos direitos fundamentais sociais, do trabalho e indígena se somam a retrocessos em matéria de igualdade racial e de gênero (Loturco & Del Caro, 2020). Em aplicações da ASCV dentro do setor energético, a revisão sistemática da literatura revela que os aspectos sociais se mostram mal representados pelo conjunto dos 41 artigos analisados. Como foi visto no item 2.3.4, mais da metade dos indicadores sociais não é considerada por nenhum artigo. Daqueles que foram considerados, quatro indicadores se destacam, enquanto o restante não está concentrado nem em 10% dos artigos analisados.

Um desses indicadores-destaque corresponde ao *Geração de empregos*. É justamente a partir da transição energética em curso que vem se projetando um caminho promissor para geração de empregos. Em 2019, o número de empregos dentro do setor de energia renovável alcançou a marca de 11,5 milhões em todo mundo e a tendência é de que esse número continue a crescer. Dentre as fontes alternativas e renováveis de energia, esses empregos se concentram, sobretudo, na evolução da fonte solar fotovoltaica e da bioenergia. Com relação à sua distribuição geográfica, o Brasil é um dos destaques ao lado da China e dos Estados Unidos (EUA) (IRENA, 2020). Assim, novos postos de trabalho significam *a priori* redução do desemprego e aumento da qualidade de vida locais (Liu, 2014). Portanto, devem ser mensurados em termos quantitativos através de uma métrica, tal como o indicador *Geração de empregos*.

Sob uma ótica da sustentabilidade, a análise dos aspectos qualitativos desses postos de trabalhos é tão fundamental quanto a criação dos mesmos. A atual transição energética não pode se apoiar em esforços de trabalhos excessivos, empregos mal pagos, condições insalubres de trabalho etc. Com o intuito de se atuar em, pelo menos, parte desses aspectos, o indicador *Saúde e segurança dos trabalhadores* é consideravelmente

utilizado pelos artigos analisados na revisão sistemática. Apesar de se apresentarem como menos prejudiciais à saúde dos trabalhadores quando comparadas com as fontes não-renováveis e convencionais de energia, as fontes alternativas e renováveis também estão associadas a lesões, doenças e fatalidades. No caso do aproveitamento bioenergético, os principais riscos são relativos ao contato com materiais perigosos na etapa agrícola e à incêndios, explosões e choques elétricos na etapa de produção do biocombustível. Para a energia solar fotovoltaica, decorrem, na maioria das vezes, da exposição a metais e outros compostos perigosos durante a produção de componentes e o tratamento de resíduos na etapa de fim de vida. Já no caso da energia eólica, estão principalmente relacionados às atividades de montagem e manutenção de aerogeradores que exigem trabalho em altura (Mulloy *et al.*, 2013).

Embora a lista de indicadores fornecida pelo grupo de trabalho UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2009) abarque outros aspectos qualitativos atinentes à força de trabalho, a revisão sistemática evidencia que eles são pouco empregados pelos artigos analisados. Como já mencionado anteriormente, isso se deve, sobretudo, à restrição do acesso a informações muitas vezes confidenciais de empresas e organizações.

Para além da lista da UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2009), a revisão sistemática traz o tema da aceitação social a empreendimentos energéticos. O fenômeno “*not in my backyard*” (NYMB) aliado à rápida expansão da tecnologia de geração eólica vem ocasionando conflitos entre parques eólicos e moradores locais ao redor do mundo, inclusive no Brasil (Chaves *et al.*, 2018; Gorayeb & Brannstrom, 2016; Pasqualetti *et al.*, 2002). Em última análise, a *Aceitação social* pode ser expressa por meio de um indicador que, de algum modo, seja capaz de captar a opinião pública local com relação a um tipo específico de tecnologia. Seja através da porcentagem de indivíduos a favor ou de uma classificação qualitativa (aceitação *baixa*, *média* ou *alta*, por exemplo).

Interessante notar que parte dessa objeção a alguns empreendimentos energéticos está relacionada justamente à interferência sobre a estética da paisagem que pode ser representada pelo indicador *Poluição visual*. Tal conjunção pode também se estabelecer junto a outras fontes alternativas e renováveis de energia, além da eólica. Por exemplo, Sovacool & Ratan (2012) relatam a ocorrência de um aumento na rejeição popular à energia solar fotovoltaica em uma região nos EUA por causa dos seus impactos sobre a paisagem local. Analogamente à poluição sonora – tratada no item anterior sobre a dimensão ambiental –, a poluição visual pode ser incorporada ao indicador *Aceitação social*, evitando, assim, a ocorrência de dupla contagem e sobreposições.

Ao se examinar o conjunto de indicadores sociais coletados dos artigos analisados na revisão sistemática, verifica-se que o mesmo carece de preocupações voltadas para comunidades tradicionais e locais. Isso porque a expansão da oferta de energia elétrica brasileira conta com a implantação de novos projetos em regiões sensíveis a esse tema. Como consequência, tal processo pode afetar práticas culturais, coesão comunitária, saúde pública, acesso de meio de subsistência com base em recursos naturais e outros direitos e oportunidades de comunidades quilombolas e indígenas do país (Brasil, 2019a; IHA, 2018). Para além das frequentes e conhecidas interferências de usinas hidrelétricas de médio e grandes portes sobre povos e comunidades tradicionais, a expansão de opções tecnológicas que aproveitam recursos alternativos e renováveis de energia vem também afetando áreas ocupadas por essas populações. A expansão da energia eólica na região nordeste do país é o exemplo mais notório e recente disso (Brasil, 2019b). O rápido crescimento do número de parques eólicos nessa região aliado a habitual invisibilidade dessas populações perante atores políticos e econômicos vem interferindo no acesso de recursos necessários à (re)produção econômica e sociocultural de comunidades quilombolas (Chaves *et al.*, 2018). Desse modo, para avaliar o risco potencial de expansão da geração de eletricidade para quilombolas e indígenas no Brasil, propõe-se o uso do indicador *Comunidades tradicionais*, o qual pode ser medido através da distância entre empreendimento energético e as comunidades tradicionais mais próximas (Brasil, 2019b), visitas e entrevistas *in loco* ou, em último caso, dados secundários mais abrangentes.

3.2.2.3. Dimensão econômica

No que diz respeito à dimensão econômica, sugere-se a consideração dos quatro indicadores econômicos fornecidos por Hunkeler *et al.* (2008) para a condução de um CCV convencional, os quais poderão ser ajustados segundo a definição da fronteira do sistema, são eles: (i) *Custos de pesquisa e desenvolvimento (P&D)*⁵¹, (ii) *Custos de investimento*, (iii) *Custos de operação e manutenção (O&M)* e (iv) *Custos de descomissionamento*. Tais indicadores são úteis para subsidiar análises de viabilidade

⁵¹ Ao recomendarem o indicador de *Custos de P&D*, Hunkeler *et al.* (2008) argumentam que o CCV pode começar mais cedo que uma ACV clássica. Isso porque há a possibilidade de se incluir uma etapa de *knowledge*, a qual está associada a fluxos financeiros. Ainda, segundo os autores, tal etapa não apresenta impactos ambientais significativos e, por essa razão, não é usualmente discriminada em estudos de ACV, sendo, portanto, seus impactos ambientais negligenciados ou incorporados a outras etapas do ciclo de vida de produtos ou serviços.

econômica que são fundamentais e determinantes para as fontes alternativas e renováveis de energia na medida em que as mesmas enfrentam ainda obstáculos de naturezas técnico-econômica (Collotta *et al.*, 2019; Evans, 2010). Além do próprio custo da tecnologia, algumas de suas particularidades podem onerar a geração de energia elétrica. Esse é o caso, por exemplo, da característica intermitente de algumas dessas fontes alternativas e renováveis que, além de influenciar diretamente sobre seus rendimentos financeiros, pode requisitar sistemas de armazenamento cujos custos devem ser incluídos nos cálculos de viabilidade econômica (Evans, 2010).

Ainda dentro desse contexto, outras métricas bastante simples têm sido utilizadas para sintetizar e comparar os aspectos econômicos de diferentes tecnologias de geração de energia de modo a subsidiar estudos sobre suas viabilidades econômicas. Uma delas é o *Levelized cost of electricity* (LCOE) (ou custo nivelado de energia), o qual mede o custo por unidade de eletricidade gerada a partir de uma tecnologia específica, considerando todos os custos ao longo de sua vida útil. A outra é o *Payback period* (ou período de retorno financeiro) que é frequentemente usado para se saber o período de geração de energia elétrica necessário para compensar os custos financeiros (IEA, 2020; Tolmasquim, 2016).

Embora o *LCOE* e o *Payback period* possam parecer redundantes e sobrepor os custos mencionados anteriormente, há um entendimento na literatura de que essas duas métricas podem se complementar e atuar juntas com o CCV (Li *et al.*, 2018; Ludin, 2019; Saraswat & Digalwar, 2020). Para Li *et al.* (2018), o *Payback period* é útil para a análise de viabilidade econômica e pode ser visto como uma medida integrante de uma análise econômica, tornando, por exemplo, o CCV mais robusto.

Cabe ressaltar que apesar do indicador *Custos de combustível* ser coerente para o aproveitamento bioenergético, uma vez que a biomassa é utilizada sob a forma de combustível, e de recursos energéticos de origem não renovável, os custos relativos aos combustíveis podem, no entanto, ser incorporados ao indicador econômico *Custos de O&M* de modo a evitar dupla contagem e sobreposições.

3.2.2.4. Síntese dos indicadores de sustentabilidade

A Tabela 3.1 relaciona o conjunto de questões relevantes às quais os resultados da análise do ICV da ASCV serão associados. São 28 indicadores distribuídos nas dimensões ambiental, social e econômica que se mostram consistentes com a transição energética em curso e adequados não só às características das tecnologias de transformação de

energia de origem renovável, como também às particularidades do país. Isso porque, conseguem ao mesmo tempo compreender a cadeia completa de geração de energia elétrica e abordar temas sensíveis ao contexto brasileiro, como o respeito aos direitos de comunidades tradicionais e a proteção da biodiversidade.

Tabela 3.1 – Conjunto de indicadores ambientais, sociais e econômicos da ASCV sobre a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis

Indicador	Código	Unidade
Dimensão ambiental		
Aquecimento global	ENV01	kg CO ₂ eq.
Depleção da camada de ozônio	ENV02	kg CFC11 eq.
Radiação ionizante	ENV03	kBq Co-60 eq.
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	kg NO _x eq.
Formação de material particulado fino	ENV05	kg PM _{2,5} eq.
Acidificação terrestre	ENV06	kg SO ₂ eq.
Eutrofização em água doce	ENV07	kg P eq.
Eutrofização marinha	ENV08	kg N eq.
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade marinha	ENV11	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	kg 1,4-DCB
Uso do solo	ENV14	m ² a crop eq.
Escassez de recursos minerais	ENV15	kg Cu eq.
Escassez de recursos fósseis	ENV16	kg oil eq.
Consumo de água	ENV17	m ³
Áreas protegidas	ENV18	adimensional
Dimensão social		
Geração de empregos	SOC01	empregos.ano
Aceitação social	SOC02	adimensional
Saúde e segurança	SOC03	acidentes.ano
Comunidades locais	SOC04	adimensional
Dimensão econômica		
Custos de P&D	ECO01	US\$
Custos de investimento	ECO02	US\$
Custos de O&M	ECO03	US\$
Custos de descomissionamento	ECO04	US\$
LCOE	ECO05	US\$/kWh
Payback period	ECO06	Anos

É importante ressaltar que o número de indicadores sociais selecionados é reflexo da sub-representação da dimensão social em estudos de ASCV sobre a geração de energia elétrica disponíveis na literatura. Como já se pode imaginar, tal quadro se deve principalmente à subjetividade das questões sociais e ao acesso restrito à maioria das informações necessárias à sua avaliação.

3.2.3. Inventário do Ciclo de Vida

A etapa de análise do ICV envolve a coleta de dados e a modelagem dos fluxos relativos ao sistema de produto estudado, levando em consideração aquilo que foi estabelecido na etapa de definição de objetivo e escopo (Bjørn *et al.*, 2018; ISO, 2006a). Tendo em vista que tais atividades exigem normalmente mais esforços e recursos tanto temporais quanto financeiros que as demais etapas de uma análise baseada na abordagem de ciclo de vida, recomenda-se a adoção de uma estrutura mais organizada para sua otimização. Nesse sentido, este item aponta os percursos que devem ser seguidos para obter a lista de fluxos elementares para cada processo incluído nas fronteiras do sistema (Figura 3.3), os quais, por sua vez, deverão servir como entradas para a etapa seguinte de AICV (Bjørn *et al.*, 2018).

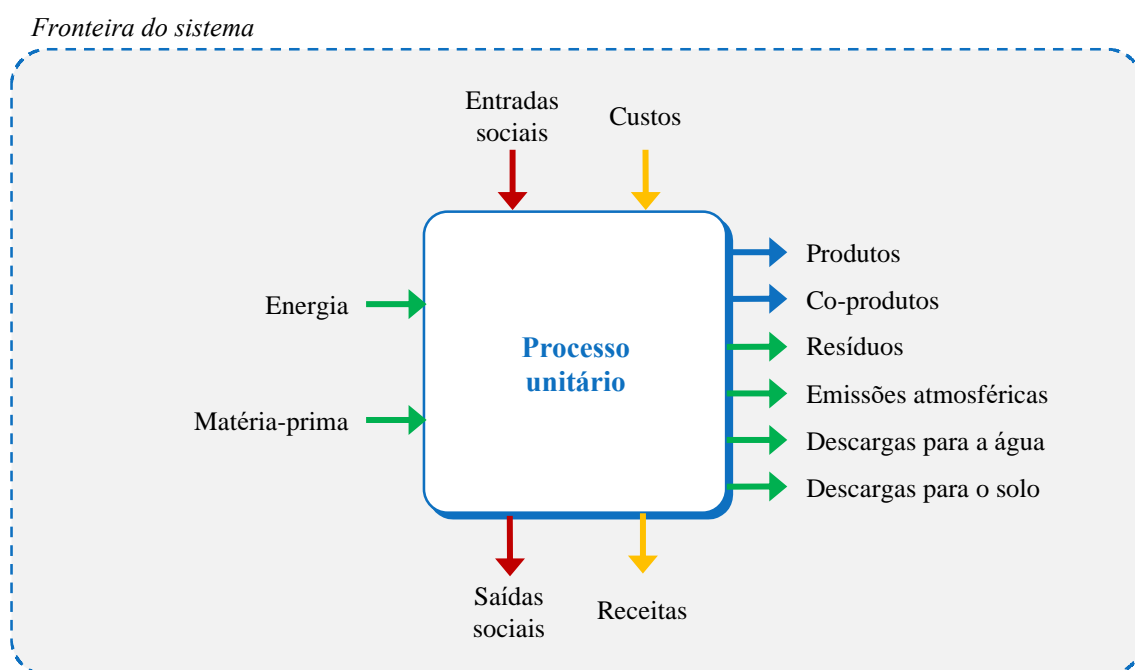


Figura 3.3 – Ilustração de fluxos de entrada e saída para um processo unitário compreendido pela fronteira do sistema

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em CALCAS (2009), Hunkeler *et al.* (2008), ISO (2006a) e UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2011)

3.2.3.1. Dimensão ambiental

Na ACV, a análise de ICV consiste na coleta de dados e em procedimentos de cálculos que visam quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto e pertinentes ao estudo. Tais fluxos podem ser classificados em entradas de energia, matéria-prima, entradas auxiliares e outras entradas físicas; produtos, co-produtos⁵² e resíduos; emissões atmosféricas e descargas para água e solo; e outros aspectos ambientais relevantes (ISO, 2006a). Com base nas normas ISO 14.040 (ISO, 2006a) e ISO 14.044 (ISO, 2006b), bem como no *General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance* (EC-JCR, 2010), as atividades principais da análise de ICV são as seguintes:

- 1) Identificação dos processos unitários;
- 2) Planejamento da coleta de dados;
- 3) Coleta de dados necessários para o alcance dos objetivos do estudo;
- 4) Validação dos dados coletados;
- 5) Correlação dos dados aos processos unitários;
- 6) Correlação dos dados aos fluxos de referência e à unidade funcional.

Considerando que um único processo pode ser composto por um sem número de fluxos elementares, dificultando a obtenção de dados primários, bases de dados de ICV ambiental são geralmente utilizadas para fornecer dados secundários ao sistema (Bjørn *et al.*, 2018). O *Ecoinvent* (Frischknecht *et al.*, 2005) é a principal delas já que é atualmente uma das maiores, mais abrangentes e mais empregadas bases de dados de ICV em todo o mundo (Goedkoop *et al.*, 2008). Suas informações são bem documentadas e regularmente revisadas e cobrem processos de milhares de produtos com o propósito de subsidiar tomadas de decisão mais ambientalmente responsáveis (Frischknecht *et al.*, 2005).

Essa base de dados suíça dispõe de três modelos de sistemas: (i) *Cut-off system model* e (ii) *APOS system model* – que aplicam os princípios da modelagem *atribucional* – e (iii) *Consequential system model* – que avalia as consequências de uma mudança em um sistema existente. No que diz respeito às suas abordagens atribucionais, o *Cut-off system model* se diferencia do *APOS system model* pela sua manipulação de materiais recicláveis, os quais são “cortados” antes de serem encaminhados para a reciclagem. Desse modo, não fornecem nenhum benefício ao seu usuário primário (Bjørn *et al.*, 2018).

⁵² Um co-produto diz respeito a qualquer um entre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo elementar ou sistema de produto (ISO, 2006a).

Um outro ponto a ser destacado acerca do *Ecoinvent* (Frischknecht *et al.*, 2005) é que suas informações refletem em geral a realidade de países europeus e norte-americanos. Diante disso, muitos dos seus usuários fazem modificações nos seus dados com o intuito de adaptá-los ao contexto no qual o estudo está inserido. Existem outras bases de dados de ICV ambiental, tais como o *GaBi* (Baitz *et al.*, 2014) e o *ELCD* (Wolf *et al.*, 2008), mas, percebe-se que os problemas relacionados à representação de regiões fora do eixo América do Norte-Europa persistem.

Dada a impossibilidade de identificar e contabilizar todas as entradas e saídas de um sistema de produto, é natural que modelos de ACVs não considerem alguns fluxos elementares. Ou seja, apresentem “cortes” (ou *cut-offs*). Tal situação pode decorrer tanto da indisponibilidade de informações durante a etapa de coleta de dados quanto da abrangência, até certo ponto, limitada das bases de dados de ICV ambiental⁵³. Apesar de normalmente fornecer poucas informações sobre aspectos ambientais, o uso de dados de sistemas de insumo-produto pode ser útil para cobrir esses fluxos ausentes, conferindo uma maior abrangência da fronteira do sistema e qualidade dos dados (Mattila, 2018).

3.2.3.2. Dimensão social

A análise de ICV social compreende essencialmente a coleta de dados relativos às partes interessadas relevantes para o estudo; dados complementares necessários para a avaliação de impactos sociais; dados primários e secundários referentes a processos unitários; e dados para atribuição de pontuações e pesos (UNEP, 2020). Quando comparada com a sua equivalente ambiental, a complexidade envolvida na análise de ICV social é maior já que essa tarefa compreende informações de natureza qualitativa e muitas vezes confidenciais às organizações (Corona, 2016; UNEP, 2020). Para a sua execução, pode-se basear nas mesmas atividades da análise de ICV ambiental, com enfoque na coleta de dados sociais atinentes às partes interessadas relevantes, relacionando-os aos processos unitários e, quando aplicável, à unidade funcional (UNEP, 2020).

Ainda que a coleta de dados seja uma tarefa demasiadamente demorada, existem algumas estratégias que podem ser adotadas para otimizar a sua realização. Nesse sentido, a UNEP (2020) recomenda a priorização de dados sociais que se mostrem relevantes para a ACV-S, os quais podem ser mapeados através de uma (i) *revisão da literatura*, (ii)

⁵³ Mattila (2018) classifica os “cortes” decorrentes da indisponibilidade de informações como *cortes identificados* e aqueles, da cobertura limitada de bases de dados de ICV como *cortes não identificados*.

*identificação das atividades mais intensivas e (iii) identificação de hotspots*⁵⁴ *sociais*. Paralelamente, a coleta de dados sociais pode ser estruturada segundo dois níveis geográficos principais: (i) *setores e países* (dados secundários) e (ii) *organizações e regiões* (dados primários). No primeiro nível, lança-se mão de informações genéricas sobre problemas sociais que podem ser obtidas consultando relatórios setoriais e institucionais, base de dados internacionais de ICV social e informações de sistemas insumo-produto (Corona, 2016; Mattila, 2018). O documento *The Methodological Sheets for Sub-Categories in Social Life Cycle Assessment* (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013) traz alguns exemplos de fontes que podem ser utilizadas para coleta de informações relacionadas às subcategorias sociais nesse nível.

Atualmente, o *Social Hotspots Database* (SHDB) (Benoit-Norris *et al.*, 2012) e *Product Social Impact Life Cycle Assessment* (PSILCA) (Ciroth & Eisfeldt, 2016) são as principais bases de dados de ICV social disponíveis. Ambas estão voltadas à avaliação de *hotspots* sociais e a condução de ACV-S, além de terem sido idealizadas segundo as diretrizes da UNEP (2020). O SHDB dispõe de informações para 26 subcategorias de impacto social, usando mais de 160 indicadores qualitativos, quantitativos e semi-quantitativos sobre riscos, oportunidades e impactos positivos na esfera social. Além disso, cobre cerca de 13.000 setores industriais de 244 países e inclui um método de avaliação de impactos. Já o PSILCA contém dados para 19 subcategorias e utiliza 65 indicadores que abarcam cerca de 15.000 setores de 189 países (UNEP, 2020).

Ainda no que se refere ao emprego de dados secundários, os sistemas de insumo-produto podem ser fontes valiosas de informações sociais para a ACV-S. Diferentemente do que se vê com relação ao meio ambiente, esse conjunto de dados macroeconômicos geralmente inclui muitas informações sociais, tais como número de empregos, distribuição do mercado de trabalho por gênero, nível salarial etc. Assim, favorece uma maior cobertura de ICVs sociais, cujas entradas e saídas são mais frequentemente omitidas se comparadas com aquelas dos ICVs ambiental e econômico (Mattila, 2018).

Por outro lado, a coleta de dados primários deve ser realizada junto à fonte da informação, sendo, portanto, específicos para cada análise. Em decorrência disso, a alocação de recursos financeiros e, principalmente, temporais, que já era bastante expressiva na obtenção de dados secundários, se torna determinante nesse nível,

⁵⁴ Neste caso, *hotspots* correspondem a processos unitários em que ocorre uma situação que pode ser considerada um problema, risco ou oportunidade em relação a uma questão social relevante e, por esse motivo, a coleta de dados deve ser priorizada (UNEP, 2020).

umentando a complexidade da aplicação da ACV-S (Corona, 2016). O grupo de trabalho UNEP/SETAC indica que a obtenção de dados primários pode se dar através de entrevistas com representantes comunitários, do governo e de organizações, bem como por meio de visitas e auditorias específicas (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013).

Quando se trata do emprego de dados qualitativos, a análise de ICV social pode ser finalizada logo após a identificação dos processos unitários, sendo, assim, dispensável vinculá-los a fluxos elementares e sociais em termos quantitativos (UNEP, 2020).

3.2.3.3. Dimensão econômica

Para a dimensão econômica, os dados acerca dos fluxos materiais e de energia da ACV clássica dão lugar às informações sobre fluxos de caixa necessárias à avaliação dos custos e receitas associados ao ciclo de vida do sistema objeto de estudo. Diferentemente das dimensões ambiental e social, não é indicado o uso de bases de dados estáticas. Isso porque as informações financeiras são muito mais voláteis que os dados dos ICVs ambiental e social. Desse modo, os fluxos financeiros são geralmente obtidos pelo produto entre os fluxos materiais e de energia e os preços de mercado. Apenas os custos relacionados a P&D não podem ser calculados dessa maneira, exigindo que os mesmos sejam determinados separadamente (Hunkeler *et al.*, 2008). Dentro desse contexto, Hunkeler *et al.* (2008) fornecem um passo a passo resumido para a identificação, coleta, quantificação e agregação dos dados financeiros em um CCV:

- 1) Identificação dos processos unitários que podem resultar em custos e receitas;
- 2) Atribuição de custos, receitas ou preços aos processos unitários;
- 3) Atribuição de custos, receitas ou preços aos fluxos de referência;
- 4) Identificação de dados financeiros adicionais entre as alternativas estudadas;
- 5) Atribuição dos dados financeiros adicionais aos processos e fluxos;
- 6) Agregação dos custos, receitas e preços dos processos ao longo do ciclo de vida;
- 7) Correlação dos custos, receitas e preços agregados à unidade funcional.

De modo similar à dimensão social, vale mencionar que as informações contidas em Matrizes de Insumo-Produto (MIP) regionais ou nacionais podem também ser utilizadas para subsidiar o CCV, principalmente no que se refere à complementação de seus ICVs com dados de segundo plano (ou *background dataset*) (Mattila, 2018).

3.2.4. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida

Após a análise de ICV, a ASCV avança na compreensão e avaliação da magnitude e significância dos impactos positivos e negativos associados ao ciclo de vida de um produto ou serviço. Nesse sentido, sua execução deve partir de uma estrutura comum às suas três ferramentas componentes, ACV, ACV-S e CCV, e conferir à etapa de interpretação as informações necessárias à tomada de decisão (ISO, 2006a; UNEP, 2020).

Segundo a norma ISO 14.040 (ISO, 2006a), a AICV de uma ACV consiste em elementos obrigatórios e facultativos. Assim, essa fase deve incluir: (i) *seleção* (ou validação) *das categorias de impacto, seus indicadores e modelos de caracterização*; (ii) *correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto* (classificação); e (iii) *cálculo dos resultados dos indicadores de categoria* (caracterização). Com relação aos seus elementos facultativos, a AICV pode incluir procedimentos de (i) *normalização*, (ii) *agrupamento* e (iii) *ponderação* (ISO, 2006a, 2006b).

No caso de uma ASCV, o grupo de trabalho UNEP/SETAC (2011) salienta que a ACV-S e o CCV não possuem necessariamente uma etapa de AICV equivalente àquela da ACV clássica. Isso porque essas ferramentas de avaliação social e econômica fornecem muitas vezes como resultados medidas diretas de impacto, não havendo, portanto, modelos de caracterização disponíveis para todas as suas categorias de impacto.

Outro aspecto muito particular da ASCV se refere à sua frequente combinação com métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD). Além de auxiliar na integração dos resultados obtidos através das ferramentas de ACV, ACV-S e CCV, esse artifício fornece recursos para a execução de procedimentos de ponderação e agregação de indicadores, bem como o ranqueamento das alternativas disponíveis (Kalbar & Das, 2020). Sobre essa questão, é importante saber que a série de normas ISO 14.040 (ISO, 2006a, 2006b) permite que os elementos facultativos da AICV utilizem informações externas à sua estrutura, sendo necessário apenas explicá-las devidamente.

A metodologia de ASCV proposta nesta tese integra as ferramentas de ACV, ACV-S e CCV com o método AHP. A escolha desse método de AMD se deu, sobretudo, pela sua ampla utilização na literatura dedicada à sustentabilidade do setor energético, sua teoria compreensível e sua simplicidade de aplicação. Tendo em vista que a transparência é um fator crítico a esta etapa (ISO, 2006a), as premissas e os pressupostos adotados para as três dimensões da sustentabilidade são descritos nos itens a seguir.

3.2.4.1. Dimensão ambiental

Para a dimensão ambiental, a AICV se concentra sobre os impactos ambientais potenciais com base nos resultados obtidos na análise de ICV. Assim, essa etapa que se subdivide em elementos obrigatórios e facultativos, conforme visto anteriormente, geralmente envolve a associação dos dados do ICV com categorias de impactos ambientais específicos, bem como com os seus indicadores (ISO, 2006a).

Hoje, existem inúmeros métodos de AICV à disposição da comunidade científica e profissional especializada em ACV. Com a função de converter os resultados da etapa de análise de ICV em fatores quantitativos relacionados à problemas ambientais, esses modelos de cálculo podem contemplar diversas categorias de impacto por meio de diferentes mecanismos ambientais⁵⁵ e indicadores (ISO, 2006a, 2006b).

De um modo geral, eles podem ser classificados segundo duas abordagens principais: (i) *métodos de ponto médio (midpoint)* e (ii) *métodos de ponto final (endpoint)*. Enquanto os métodos pertencentes ao primeiro grupo descrevem um problema ambiental, aqueles do segundo grupo avaliam o dano causado sobre áreas de proteção, as quais são representadas pelo meio ambiente, saúde humana e recursos. Por exemplo, *CML* (CML, 2015) e *IPCC* (IPCC, 2014) são *métodos de ponto médio* e *Eco-Indicator 99* (Goedkoop & Spriensma, 2000) e *EPS* (Steen, 2007) são *métodos de ponto final*. Além desses, existem métodos de AICV que combinam as duas abordagens. Esse é o caso do *IMPACT 2002+* (Jolliet *et al.*, 2003) e *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017). O *ReCiPe 2016* é baseado nos métodos *CML 2002* e *Eco-Indicator 99*, corresponde ao mais atual e consistente método de AICV disponível e, por esse motivo, é adotado nesta proposta metodológica. Como foi visto no item 2.2.1 do capítulo anterior, o *ReCiPe 2016* compreende 18 categorias de impacto no nível *midpoint* e três áreas de proteção no nível *endpoint* (Huijbregts *et al.*, 2017).

3.2.4.2. Dimensão social

Na ACV-S, a etapa de AICV tem o propósito de relacionar dados do ICV social a categorias e subcategorias de modo a permitir a avaliação de impactos sociais, podendo fazer uso de informações complementares para auxiliar em um melhor entendimento dos

⁵⁵ De acordo com a norma ISO 14.040 (ISO, 2006a), o termo “mecanismo ambiental” se refere ao “sistema de processos físicos, químicos e biológicos para uma dada categoria de impacto, vinculando os resultados da análise do inventário do ciclo de vida aos indicadores de categoria e aos pontos finais da categoria”.

seus resultados (Toniolo *et al.*, 2020; UNEP, 2020). Nesse sentido, conforme mencionado no item 2.2.2, existem dois caminhos que podem ser seguidos: (i) abordagem *Reference Scale Assessment*, quando se está interessado no desempenho social (UNEP, 2020), ou (ii) abordagem *Impact Pathway Assessment*, quando se deseja compreender os riscos sociais (Macombe *et al.*, 2013). Ambas as abordagens são bastante incipientes, tal como a própria ACV-S, e nenhuma delas pode ser considerada como a melhor opção. No entanto, é importante salientar que a abordagem *Reference Scale Assessment* apresenta um maior número de aplicações na literatura (UNEP, 2020).

Considerando tais colocações, a avaliação dos impactos sociais através da ACV-S na presente proposta metodológica segue a abordagem *Reference Scale Assessment*, e no seu desenho, buscou-se seguir as orientações da UNEP (2020) e as recomendações da comunidade científica, tendo em vista, é claro, o estágio atual de desenvolvimento da ACV-S. Sob essa perspectiva, a ACV-S proposta está orientada a análises de impactos mais imediatas, sem a propagação adicional de seus efeitos, não estabelecendo, portanto, ligação entre atividades e impactos a longo prazo (UNEP, 2020).

Embora existam métodos de AICV disponíveis para a ACV-S, tal como oferecido pelo *SHDB* (Benoit-Norris *et al.*, 2012), vale ressaltar que eles são em menor número e menos utilizados se comparados com os métodos de AICV ambiental (Juchen, 2019). Em decorrência disso, sugere-se que a AICV social priorize o uso de dados primários ou secundários obtidos junto à literatura e documentos públicos de organizações.

Um outro ponto a evidenciar se refere ao fato de que, diferentemente da ACV clássica, que aborda, na maioria das vezes, somente impactos negativos e quantitativos, a ACV-S lida também com impactos positivos e qualitativos. A necessidade de se ampliar o escopo dessa análise para além da proteção das condições sociais no sentido de abranger também sua melhoria coloca desafios atrelados, sobretudo, à sua identificação, avaliação, agregação e interpretação. Por impacto social positivo, entende-se uma contribuição favorável ao bem-estar humano, ou seja, um impacto social benéfico, não sendo, assim, uma mera ausência de impactos negativos (UNEP, 2020). Com isso em mente, a UNEP (2020) distingue três tipos de impactos sociais positivos no âmbito da ACV-S, os quais podem ser empregados separadamente ou de modo combinado (Tabela 3.2).

No *tipo A*, os impactos sociais positivos são resultantes de mudanças no negócio. Já o *tipo B* assume que os ciclos de vida de produtos também geram impactos sociais positivos por meio da sua presença. Por fim, no *tipo C*, os impactos sociais positivos derivam das características intrínsecas à utilidade do produto e, por isso, são relacionados

à sua unidade funcional. Entretanto, essa última abordagem é alvo de debates na literatura sobre se é relevante, confiável e justo contabilizar os impactos sociais positivos com relação à utilidade do produto⁵⁶ (UNEP, 2020).

Tabela 3.2 – Tipos de impactos sociais positivos na ACV-S
Fonte: UNEP (2020)

Tipo	Descrição
A	Desempenho social positivo que vai além do <i>business as usual</i>
B	Impacto social positivo pela presença do produto no mercado ou pela existência da empresa
C	Impacto social positivo pela utilidade do produto

3.2.4.3. Dimensão econômica

No que diz respeito à dimensão econômica, a AICV segue a abordagem do CCV convencional, conforme apresentado por Hunkeler *et al.* (2008). Assim, utiliza-se um modelo de estado estacionário a ser executado no estágio de planejamento do ciclo de vida de um produto e que leva em conta somente receitas e custos internos sob a perspectiva do seu *produtor* (ou empreendedor). Nessa abordagem, tais informações são agregadas com o intuito de se obter o custo do sistema analisado considerando toda a sua cadeia de valor, o qual é usualmente usado para avaliar e comparar diferentes alternativas em termos econômico-financeiros (Hunkeler *et al.*, 2008).

3.2.5. Integração dos resultados

Após a realização da AICV, esta metodologia de ASCV propõe o tratamento e a integração de seus resultados a fim de fornecer uma visão mais sintética dos desempenhos das tecnologias de geração de energia analisadas, segundo os diversos indicadores de

⁵⁶ Para se ter uma ideia da problemática envolvida na abordagem do *tipo C* para a avaliação de impactos sociais positivos, pode-se tomar como exemplo ilustrativo a comparação de duas tecnologias de transformação de energia bastante semelhantes. Nesse exercício, assume-se que ambas as tecnologias possuem a mesma capacidade instalada e criam o mesmo número de postos de trabalho ao longo de um ano. Mas a *opção A* apresenta uma eficiência de conversão de energia duas vezes maior que a *opção B*. Ao se avaliar os impactos sociais dessas tecnologias em função da unidade funcional de 1,0 kWh de energia gerado, verifica-se que a *opção B* apresenta o dobro de postos de trabalhos criados por kWh gerado da *opção A*. Assim, a *opção B* demonstraria um desempenho social melhor, considerando a geração de empregos, não por criar mais postos de trabalho ou possuir uma conversão energética mais eficiente quando comparada com a *opção A*, mas, justamente, pelo inverso: produzir menos energia no período de um ano.

sustentabilidade considerados. Apesar de ser um recurso que vem sendo bastante utilizado pela literatura dedicada à ASCV, a combinação dos resultados obtidos na ACV, ACV-S e CCV não é algo trivial e dispõe de inúmeras possibilidades de execução. Aqui, lança-se mão dos elementos facultativos de normalização e ponderação – definidos pela série de normas ISO 14.040 (ISO, 2006a, 2006b) para a etapa de AICV da ACV –, visando obter um desempenho global de sustentabilidade para as alternativas. As premissas e os procedimentos matemáticos envolvidos nesse processo, bem como o emprego do método AHP, são descritos a seguir.

3.2.5.1. Normalização

A etapa de normalização em estudos baseados na abordagem de ciclo de vida consiste em calcular a magnitude dos seus resultados com relação a alguma informação de referência. Assim, fornece uma melhor compreensão da significância relativa dos impactos, se mostrando, portanto, útil na identificação de inconsistências; na preparação para procedimentos adicionais; e na comunicação dos resultados (ISO, 2006b).

Ao se debruçar sobre os métodos de normalização empregados na literatura dedicada à ACV, Norris (2001) identificou duas abordagens principais: (i) *normalização interna* e (ii) *normalização externa*. A primeira delas tem como objetivo central eliminar as unidades dos indicadores de impacto, os quais são normalizados a partir de referências vinculadas às alternativas consideradas no estudo. Desse modo, a *normalização interna* é restrita a análises comparativas. Já a *normalização externa* permite entender a significância dos resultados considerando todas as categorias de impacto. Isso só é possível porque o seu referencial não está inserido na análise, sendo independente do seu objeto de estudo, tal como dados de impactos ambientais em níveis regional, nacional e global⁵⁷ (Laurent & Hauschild, 2015; Norris, 2001; Pizzol *et al.*, 2017).

Tendo em vista o caráter comparativo desta proposta metodológica, bem como a complexidade da sua aplicação devido, sobretudo, à extensa lista de temas ambientais, sociais e econômicos envolvidos, a *normalização interna* foi selecionada para tratar os seus resultados⁵⁸. A Tabela 3.3 relaciona os principais métodos de *normalização interna*

⁵⁷ Esse é o caso das normalizações disponíveis nos principais métodos de AICV para a ACV clássica, tais como o *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017), *CML* (CML, 2015) e *EDIP* (Wenzel *et al.*, 1999), os quais tomam os dados de extração e emissões do sistema econômico global como referência (Zanghelini, 2018).

⁵⁸ Isso significa que os resultados obtidos pela aplicação da metodologia de ASCV proposta, conforme apresentada, ficam restritos às alternativas por ela analisadas (*case-specific*), não podendo, portanto, ser colocados em uma perspectiva mais abrangente que abarque também outras alternativas externas ao estudo.

empregados em estudos baseados na abordagem de ciclo de vida (Norris, 2001), são eles: (i) *Divisão por uma linha de base*, (ii) *Divisão pelo máximo* e (iii) *Divisão pela soma*. Para esta proposta, adotou-se o método de *Divisão pela soma*, no qual os resultados são divididos pela soma das pontuações obtidas por todas as alternativas (Pizzol *et al.*, 2017).

Tabela 3.3 – Principais métodos de normalização interna empregados em estudos de ACV
Fonte: Norris (2001) e Pizzol *et al.* (2017)

Métodos	Definição
Divisão por uma linha de base	Os resultados obtidos são divididos pela pontuação obtida por uma alternativa tomada como linha de base
Divisão pelo máximo	Os resultados obtidos são divididos pelas pontuações mais altas em cada categoria de impacto
Divisão pela soma	Os resultados são divididos pela soma das pontuações obtidas por todas as alternativas

Assim, a Equação 3.2 pode ser empregada para obter os indicadores normalizados, segundo a sua correlação com a sustentabilidade (Norris, 2001; Pizzol *et al.*, 2017).

$$n_{ij} = \begin{cases} \text{correlação direta, } \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}} \\ \text{correlação indireta, } \frac{1/r_{ij}}{\sum_{j=1}^m 1/r_{ij}} \end{cases} \quad 3.2$$

Onde,

n_{ij} corresponde ao indicador normalizado i da alternativa j ;

r_{ij} corresponde ao indicador não normalizado r da alternativa j ;

m corresponde ao número total de alternativas.

3.2.5.2. Ponderação, agregação e ranqueamento

As etapas de ponderação, agregação e ranqueamento são procedimentos complementares à normalização a favorecer a interpretação dos resultados e, consequentemente, apoiar a tomada de decisão a partir de análises baseadas na abordagem de ciclo de vida. Ao atribuir pesos distintos aos indicadores de impacto, a ponderação permite que seja levado em conta a importância relativa dos impactos segundo escolhas de valores específicas, as quais, refletem as preferências de, por exemplo, indivíduos, especialistas ou organizações (ISO, 2006b; Pizzol *et al.*, 2017; Zanghelini, 2018).

Após atribuir pesos aos indicadores de impacto, os resultados convertidos são geralmente agregados em um índice único – ou *pontuação única (single score)*, como é mais conhecido na área de ACV –, e, eventualmente, em outros índices de sustentabilidade. A adoção de medidas capazes de sintetizar o desempenho com relação a longa lista de indicadores definidos no item 3.2.2 facilita a condução de análises comparativas e a comunicação dos seus resultados. A partir dessas medidas, é possível ranquear alternativas segundo suas pontuações no que diz respeito à sustentabilidade, ou seja, classificar uma opção com relação às demais (Zanghelini, 2018).

No capítulo anterior, foi visto que o método AHP, além de ser o método de AMD mais utilizado em um planejamento energético preocupado com a sustentabilidade, oferece aos tomadores de decisão uma estrutura que permite justamente atribuir pesos aos critérios de avaliação, agregar indicadores e ranquear as alternativas disponíveis com base em um painel de especialistas. O item 2.4.1 descreve seu processo de aplicação, o qual é composto por quatro etapas principais, são elas: (i) *estruturação hierárquica*, (ii) *comparação paritária*, (iii) *princípio de priorização* e (iv) *sintetização de prioridades*. A primeira delas é considerada como uma das mais importantes e consiste em decompor um problema de modo a organizá-lo sob a forma de uma estrutura hierárquica. A Figura 3.4 ilustra a problemática sobre a qual a presente tese se insere: *como selecionar a tecnologia de transformação de energia de origem renovável mais sustentável?*

Assim, o primeiro nível da árvore hierárquica compreende o objetivo geral do problema de decisão que se refere à seleção da alternativa mais sustentável. A partir dele derivam os critérios situados no segundo nível, sendo eles representados pelas dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade, as quais, por sua vez, se ramificam em subcritérios correspondentes aos indicadores listados na Tabela 3.1.

Com o problema organizado sob a forma de uma estrutura hierárquica, a aplicação do método AHP segue para a etapa de comparações paritárias entre os elementos de um mesmo nível – baseadas em um painel de especialistas –, e, por fim, as etapas de determinação das prioridades locais e globais.

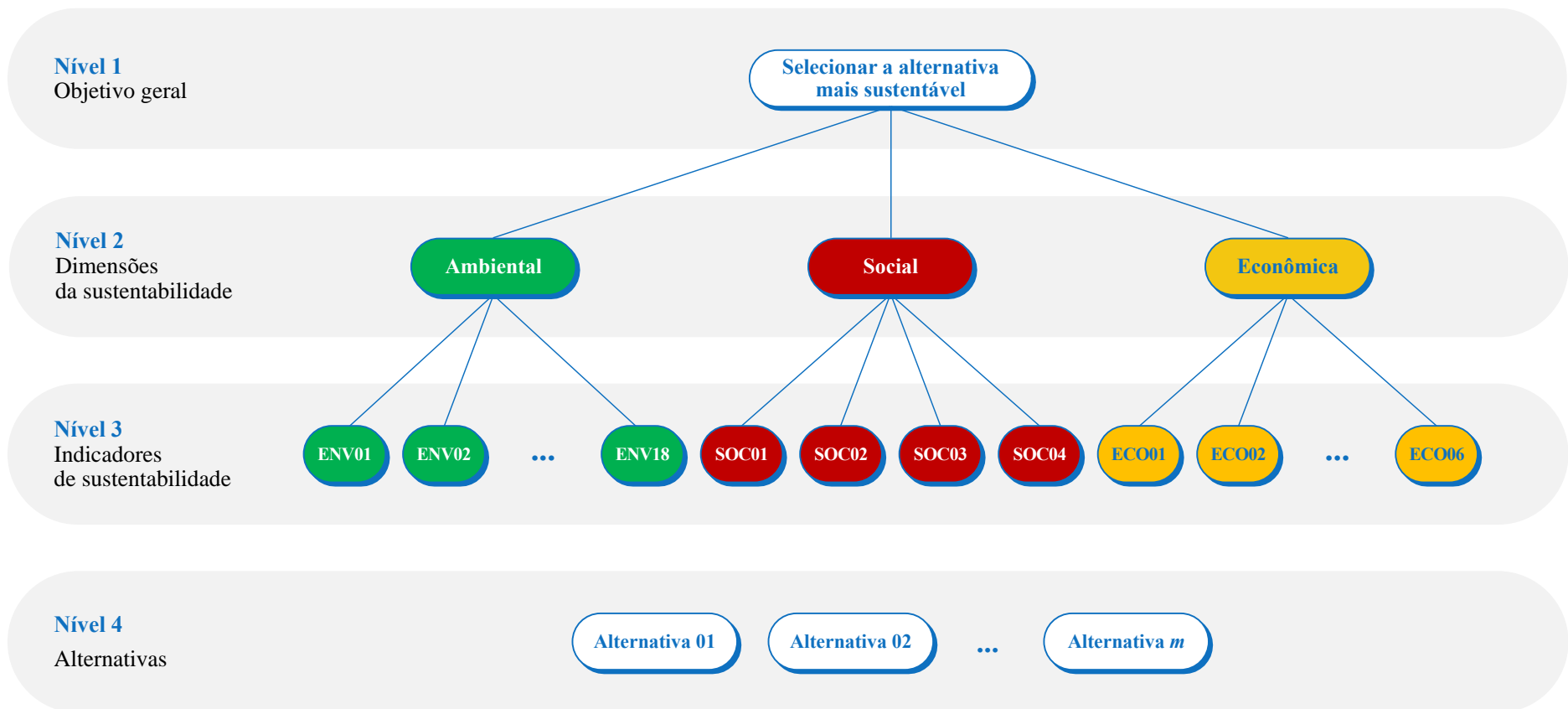


Figura 3.4 – Esquema da estrutura hierárquica do método AHP aplicada sobre o problema da presente tese
 Fonte: Elaborado pelo autor

3.3. ETAPA 3: INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A interpretação dos resultados corresponde à etapa final de uma análise baseada na abordagem de ciclo de vida. Nela, os resultados da etapa de AICV são avaliados em relação ao objetivo e escopo da análise de modo a se chegar a conclusões, relatar limitações, apontar recomendações e apoiar a tomada de decisão (ISO, 2006a, 2006b). No que diz respeito mais especificamente a ASCV, a sua etapa de interpretação se diferencia daquela da ACV clássica na medida em que amplia sua cobertura restrita à dimensão ambiental para as três dimensões da sustentabilidade, segundo o modelo do TBL. Assim sendo, não lida somente com impactos ambientais negativos, mas também com processos que trazem malefícios e benefícios à esfera da sustentabilidade.

Segundo as normas ISO 14.040 (ISO, 2006a) e ISO 14.044 (ISO, 2006b), é nesta etapa em que se deve identificar questões relevantes e verificar a sensibilidade dos resultados obtidos. A primeira dessas tarefas consiste em fornecer uma visão geral dos resultados através de uma organização estruturada das informações à luz do objetivo e escopo da análise, como por exemplo, diferenciando os diferentes estágios de ciclo de vida. Já a verificação de sensibilidade corresponde a procedimentos que visam estimar os efeitos das premissas adotadas com relação aos métodos e dados de um estudo sobre os seus resultados (ISO, 2006a, 2006b). Essa segunda tarefa pode ser aplicada sobre itens do ICV, fatores da AICV e escolhas relativas ao modelo empregado (EC-JCR, 2010).

Ainda segundo a série de normas ISO 14.040 (ISO, 2006a, 2006b), convém que sejam realizadas análises suplementares de modo a quantificar as incertezas introduzidas nos resultados do estudo de ASCV pelos efeitos cumulativos da incerteza das entradas e da variabilidade de dados do ICV, bem como a imprecisão dos modelos de AICV (PRÉ Consultants, 2014; Rosenbaum *et al.*, 2018). Uma forma de gerenciar essas incertezas é caracterizá-las nos resultados por faixas e/ou distribuições de probabilidade (ISO, 2006b), permitindo quantificar e melhorar a precisão do estudo, além de tornar suas conclusões mais robustas⁵⁹ (Rosenbaum *et al.*, 2018).

Um outro aspecto a ser levado em conta nesta etapa corresponde à comunicação dos resultados da ASCV. Embora a adoção de uma *pontuação única (single score)*

⁵⁹ Em se tratando de estudos baseados na abordagem de ciclo de vida, as incertezas são normalmente estimadas segundo informações já contidas nas bases de dados de ICV, como o *Ecoinvent* (Wernet *et al.*, 2016), e alguns métodos de AICV, além de modelos estatísticos disponíveis nos softwares, tal como a técnica de Monte Carlo (PRÉ Consultants, 2014; Rosenbaum *et al.*, 2018).

ofereça mais praticidade uma vez que otimiza a análise de múltiplos critérios, tal recurso é alvo de debates na comunidade científica dedicada ao Pensamento do Ciclo de Vida. Isso porque uma medida de mérito global não é capaz de comunicar de forma clara e completa a gama de informações relevantes à sustentabilidade às partes interessadas. De fato, ao requerer a agregação de indicadores, a *pontuação única* oculta os resultados neles obtidos separadamente e permite a ocorrência de *trade-offs*. Isso significa que se uma medida de mérito global for encarada como único parâmetro para avaliar as diferentes alternativas disponíveis, tomadas de decisão intermediárias poderão ser impossibilitadas e ações não balanceadas favorecidas.

Sobre esse aspecto, vale destacar que a norma ISO 14.044 (ISO, 2006b) preconiza que os resultados obtidos antes dos procedimentos de ponderação devem ser disponibilizados juntamente com os resultados ponderados a fim de permitir que os tomadores de decisão e outras partes interessadas apreciem a extensão total e as implicações dos resultados.

Estando cientes dessa situação, alguns autores da literatura especializada em ASCV propõem formas de apresentar os resultados que buscam unir a abrangência da análise com uma comunicação mais transparente e completa. Esse é o caso de Traverso *et al.* (2012) que fornecem o *Life Cycle Sustainability Dashboard* (LCSD), sobre o qual os resultados são simultaneamente plotados em níveis de indicador de impacto, dimensão da sustentabilidade e *pontuação única* por meio do uso de cores. Bitter *et al.* (2017) lançam mão do mesmo recurso para sistematizar os resultados obtidos nas três dimensões da sustentabilidade através do *Integrative Sustainability Triangle* (IST). Já Corona & San Miguel (2019) fazem uso de diagramas que exibem os resultados de uma alternativa em cada indicador de sustentabilidade, atribuindo diferentes cores que sinalizam o seu nível de gravidade com relação às demais alternativas consideradas.

Diante desse quadro, propõe-se que os resultados obtidos através da aplicação desta metodologia de ASCV sejam organizados sob a forma de um gráfico radar denominado *Diagrama holístico de sustentabilidade*. Através dele, é possível visualizar tanto os desempenhos globais (*pontuação única*) das alternativas quanto métricas intermediárias, tais como indicadores relativos às categorias de impacto e as dimensões de sustentabilidade, conforme ilustrado na Figura 3.5. Tal recurso se mostra particularmente interessante quando tomadas de decisão são baseadas em agregação de indicadores.

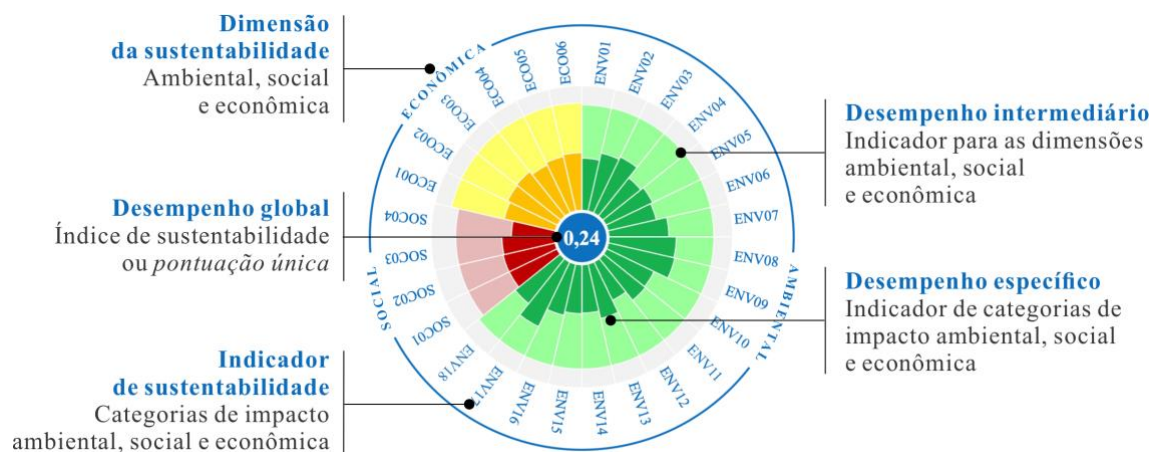


Figura 3.5 – Diagrama holístico de sustentabilidade
 Fonte: Elaborado pelo autor

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

Para testar e validar a metodologia de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) proposta e descrita no capítulo anterior, o presente capítulo trata da sua aplicação em um estudo de caso referente a fonte solar fotovoltaica, elucidando na prática a execução de seus procedimentos e etapas. Com a colaboração do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente (DEA) e do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), a Usina Solar Fotovoltaica de Alto do Rodrigues (UFV-AR), localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), foi o objeto de estudo selecionado para esta análise.

A UFV-AR entrou em operação comercial no segundo semestre de 2014 e integra o projeto “Estudos da Geração Fotovoltaica Centralizada e seu Impacto no Sistema Elétrico” liderado pela Petrobras, em atendimento a chamada do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Estratégico no. 013/2011 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), intitulado “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” (ANEEL, 2013; Fontenele, 2018).

Ao discorrer sobre o estudo de caso, o presente capítulo está estruturado em uma sequência lógica, tendo como pontos de partida uma apresentação da UFV-AR e uma breve caracterização ambiental e socioeconômica da região em que ela está localizada. Em seguida, segue as etapas definidas para a metodologia da ASCV proposta, quais sejam (i) *definição de objetivo e escopo*, (ii) *processo de modelagem* e (iii) *interpretação dos resultados*.

4.1. A USINA SOLAR FOTOVOLTAICA DE ALTO DO RODRIGUES

A UFV-AR é composta por quatro sistemas solares fotovoltaicos que se distribuem sobre uma superfície de cerca de 30.000 m² de um terreno adjacente à Usina Termelétrica Jesus Soares Pereira (UTE-JSP), também pertencente a Petrobras, a qual tem como principal via de acesso a estrada RN-118 (Figura 4.1).

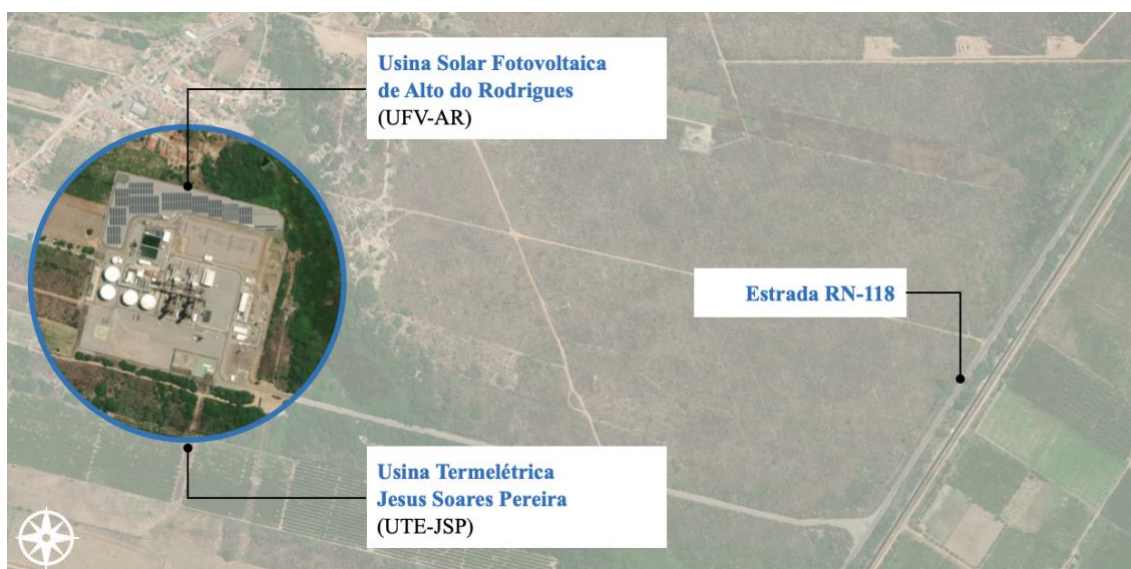


Figura 4.1 – Localização da UTE-JSP e da UFV-AR (sem escala)
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Google Maps

O *sistema 1* (S1) da UFV-AR é composto por módulos de silício policristalino (multi-Si) montados em estruturas com rastreadores solares de um eixo horizontal norte-sul e com potência instalada de cerca de 1,0 MWp. O *sistema 2* (S2) é também composto por módulos multi-Si, mas montados em estruturas fixas com potência instalada de 52,20 kWp. Já o *sistema 3* (S3) corresponde a um conjunto de módulos de silício amorfo (a-Si) montados em estruturas fixas com potência instalada de 26,27 kWp. Finalmente, o *sistema 4* (S4) é constituído por módulos de filme fino de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) montados em estruturas fixas com potência instalada de 25,29 kWp (Figura 4.2) (Fontenele, 2018).

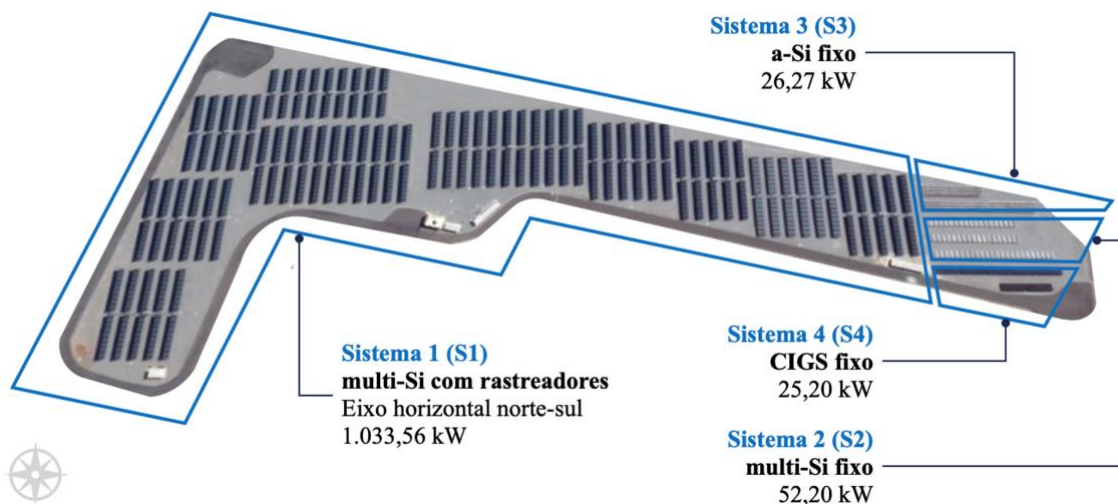


Figura 4.2 – Vista superior da UFV-AR e seus sistemas
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Google Maps e Fontenele (2018)

A UFV-AR é ainda composta por seis inversores (dois de 519 kW e quatro de 25 kW), dois transformadores (um de 1.000 kVA e outro de 100 kVA), duas subestações e um centro de seccionamento, além de instalações e outros equipamentos elétricos, conforme ilustrado no esquema da Figura 4.3 (Fontenele, 2018).

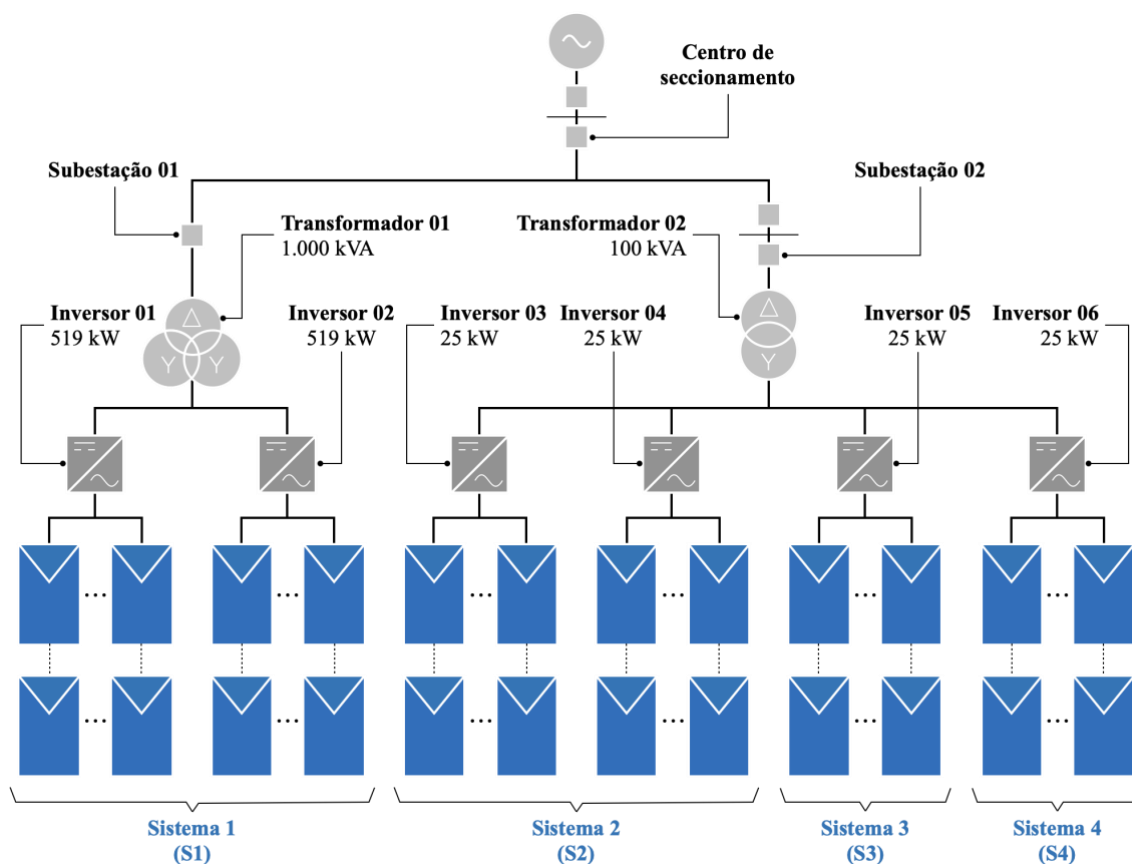


Figura 4.3 – Diagrama unifilar simplificado da UFV-AR
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Fontenele (2018)

4.2. CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICA DO MUNICÍPIO DE ALTO DO RODRIGUES

O município de Alto do Rodrigues está localizado no Vale do Açu e se estende por 191.334 km², sendo delimitado pelos municípios de Açu, Afonso Bezerra, Carnaubais e Pendências. Sua sede possui como coordenadas geográficas 05°17'16,8'' de latitude sul e 36°45'43,2'' de longitude oeste, fazendo com o que ele se distancie cerca de 240 km da cidade de Natal, capital do estado do RN. Em 2021, contava com uma população estimada de 14.923 habitantes e, conseqüentemente, uma densidade demográfica equivalente a 78 habitantes/km² (CPRM, 2005; IBGE, 2021).

A região apresenta um clima predominantemente muito quente e semiárido, com uma temperatura anual média de 25 °C e umidade relativa anual média de 69%. O município está inserido na bacia hidrográfica Piranhas-Açu e é banhado pelo Rio Piranhas, o qual possui como principais afluentes os riachos da Gangorra e da Oiticica. Seu principal bioma é a caatinga hiperxerófila e, em alguns pontos, é possível encontrar outras formações vegetais, tais como, carnaubais e vegetação halófila⁶⁰ (CPRM, 2005).

Do ponto de vista socioeconômico, Alto do Rodrigues apresentou em 2010 um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,672, posicionando-se abaixo da média nacional que correspondia a 0,727 no mesmo ano (IBGE, 2021). As principais atividades econômicas desenvolvidas no município consistem na extração de petróleo e gás – graças, sobretudo, a instalação da UTE-JSP -, agropecuária, comércio e extrativismo (CPRM, 2005; Martins & Freitas, 2015).

É preciso considerar também que a Unidade de Conservação (UC) Médio Açu contempla o município de Alto do Rodrigues (Moraes & Moura, 2022). Além disso, dentro dos limites do município, não há ocorrência de nenhuma localidade indígena ou quilombola. No entanto, é importante mencionar que seus municípios vizinhos apresentam aglomerados permanentes de habitantes declarados indígenas ou quilombolas (IBGE, 2019). Em última análise, existem comunidades de moradores muito próximas ao terreno da UTE-JSP, onde está instalada a UFV-AR (Martins & Freitas, 2015).

⁶⁰ Em linhas gerais, a caatinga hiperxerófila se caracteriza por uma formação vegetal predominantemente mais seca e de baixa a média estatura; os carnaubais consistem em uma vegetação cuja espécie dominante é a Carnaúba; e vegetação halófila é composta por plantas que possuem como principal característica a tolerância à salinidade (CPRM, 2005).

4.3. APLICAÇÃO DA PROPOSTA METODOLÓGICA

4.3.1. Etapa 1: Definição de objetivo e escopo

Para a etapa de definição de objetivo e escopo da metodologia proposta, é bom lembrar que alguns de seus itens já foram bastante discutidos no capítulo anterior, enquanto que outros se mostram mais pertinentes de serem abordados neste momento. Assim, o presente estudo de caso pretende lançar luz sobre as questões relacionadas à sustentabilidade da tecnologia solar fotovoltaica, que por ser uma fonte renovável de energia, é normalmente vista como uma alternativa aos combustíveis fósseis isenta de impactos socioambientais. Nesse sentido, tem por objetivo analisar a sustentabilidade dos quatro sistemas da UFV-AR através da metodologia de ASCV proposta, a qual integra as ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV) para avaliar os seus desempenhos ambiental, social e econômico.

Sua abrangência geográfica está concentrada no território brasileiro, mas também inclui os países de origem dos principais componentes dos sistemas da UFV-AR, já que a maior parte deles é de origem estrangeira. No que se refere a sua amplitude temporal, a análise se estende em função da disponibilidade dos dados, sobretudo, primários da UFV-AR, bem como da sua vida útil, abarcando os processos existentes desde a extração das matérias-primas até o seu descomissionamento e a destinação dos resíduos. A avaliação dos desempenhos ambiental, social e econômico dessas atividades tem como unidade funcional a geração de 1,0 quilowatt-hora (kWh) de energia elétrica.

Além disso, como será visto no decorrer deste capítulo, a modelagem da ASCV considerou dados secundários provenientes da base de dados *Ecoinvent 3.5* (Wernet *et al.*, 2016), literatura disponível e relatórios setoriais e de instituições nacionais e internacionais. No que diz respeito, mais especificamente, à dimensão ambiental, a maioria de seus impactos potenciais foi estimada empregando o método de cálculo *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017) por intermédio do software *SimaPro 9.0*. A completar isso tudo, o método AHP foi utilizado tanto para ponderação quanto para agregação dos indicadores obtidos pelo sistema de produto a fim de facilitar a interpretação dos resultados da ASCV.

Este estudo de caso está voltado para acadêmicos, pesquisadores, profissionais e outras partes interessadas do setor energético nacional a fim de tornar o seu processo

decisório mais sustentável através de uma descrição da sustentabilidade de sistemas energéticos. A seguir, a tese se aprofundará sobre as tecnologias fotovoltaicas e estruturas de suporte de sistemas solares de modo a ter uma visão geral desses dispositivos que compõem a UFV-AR, facilitando a definição do sistema de produto a ser analisado.

4.3.1.1. Sistema de produto

a) *Tecnologias solares fotovoltaicas*

Em linhas gerais, a tecnologia solar fotovoltaica converte a energia da radiação solar em energia elétrica através de dispositivos denominados células solares que são compostas por materiais semicondutores. Atualmente, existem diversos tipos de células solares disponíveis no mercado e novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas (Pavlovic *et al.*, 2020). Elas podem ser categorizadas em três grupos principais⁶¹: células de silício cristalino, filme fino e células solares recentes (Figura 4.4) (Richhariya *et al.*, 2020).

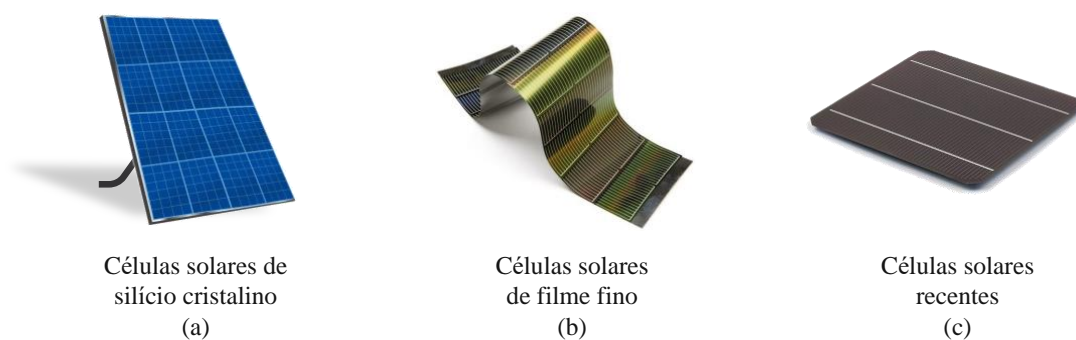


Figura 4.4 – Ilustração dos três grupos principais de tecnologias solares fotovoltaicas (a) células solares de silício cristalino (multi-Si); (b) células solares de filme fino (a-Si); e (c) células solares recentes (células de perovskita)

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Pavlovic *et al.* (2020) e Oxford (2019).

i) *Células solares de silício cristalino*

As células de silício cristalino correspondem atualmente ao tipo mais utilizado no mundo em razão, sobretudo, da sua melhor eficiência na conversão da luz solar em energia elétrica. Dentro desse grupo, as células de silício monocristalino (mono-Si) e multi-Si (Figura 4.4-a) são as mais populares (Richhariya *et al.*, 2020; Tiwari *et al.*, 2016).

⁶¹ Existem outras classificações para as tecnologias solares fotovoltaicas, como por exemplo, a classificação baseada em diferentes gerações de células fotovoltaicas. Dentro dessa lógica, a primeira geração compreende as tecnologias que fazem uso de silício cristalino. Já a segunda geração diz respeito às tecnologias de filme fino. Por fim, a terceira geração de células fotovoltaicas corresponde aos mais recentes avanços no âmbito da tecnologia de filme fino (Tiwari *et al.*, 2016).

A principal diferença entre elas reside no fato que as células de mono-Si apresentam uma estrutura de cristal homogênea; enquanto que as células de multi-Si são compostas por vários cristais de silício dispostos em diferentes orientações. Como consequência, as células de mono-Si estão associadas a processos industriais mais custosos em termos financeiros do que aqueles necessários para a produção de células de multi-Si (Ramos *et al.*, 2018; Richhariya *et al.*, 2020). Por outro lado, possuem uma maior eficiência de conversão de energia, cerca de 17% contra aproximadamente 15% das células de multi-Si (Pavlovic *et al.*, 2020). Vale lembrar que a célula de multi-Si é uma das tecnologias que compõem a UFV-AR, mais especificamente os seus sistemas *S1* e *S2*, e, portanto, será avaliada no estudo de caso.

ii) Células solares de filme fino

As células fotovoltaicas de filme fino são formadas por uma ou mais camadas extremamente finas de materiais semicondutores depositadas sobre substratos rígidos ou flexíveis, como vidro, plástico ou metais. Isso permite que essa tecnologia apresente uma estrutura flexível, conferindo-lhe uma maior diversidade de aplicação quando comparada com células de silício cristalino (Jungbluth & Stucki, 2012; Ramos *et al.*, 2018). Além disso, tem potencial para redução de custos graças à menor quantidade de material semicondutor empregado e ao fato de ser produzida como células individuais – o que reduz os custos associados à mão-de-obra. Em contrapartida, as células de filme fino são geralmente menos eficientes e duráveis, apresentando uma taxa de degradação maior (Pavlovic *et al.*, 2020). Do ponto de vista da sustentabilidade, estão associadas a desafios relacionados à toxicidade e à disponibilidade de alguns de seus materiais componentes (Tolmasquim, 2016). Alguns dos principais exemplos dessa tecnologia são os filmes finos de a-Si (Figura 4.4-b), telureto de cádmio (CdTe), CIGS e células orgânicas (Richhariya *et al.*, 2020). Dentre eles, as células solares produzidas a partir de CdTe e CIGS são as mais utilizadas e seus módulos comerciais apresentam em média uma eficiência de cerca de 16% e 17,5%, respectivamente. Com relação às tecnologias de a-Si e células orgânicas, esse valor pode alcançar, nesta ordem, 7% e 11% (Pavlovic *et al.*, 2020).

iii) Células solares recentes

Considerando o progresso contínuo em P&D no âmbito da energia solar, é natural que novas tecnologias de células solares fotovoltaicas sejam desenvolvidas, como é o caso das células de arseneto de gálio (GaAs), sensibilizadas por corante (DSSC) e células

solar de perovskita (Figura 4.4-c) (Richhariya *et al.*, 2020). A primeira delas engloba células solares de GaAs tanto monocristalino quanto policristalino e corresponde a uma tecnologia de alto custo financeiro e com eficiência de conversão de energia que pode chegar a 28% (Pavlovic *et al.*, 2020). Já a tecnologia de DSSC consiste basicamente no emprego de um corante líquido orgânico como material absorvente de luz, o qual é combinado com dióxido de titânio (TiO_2) poroso e eletrólitos sólidos ou líquidos (Tiwari *et al.*, 2016). Finalmente, as células solares de perovskita correspondem a uma das tecnologias solares fotovoltaicas mais promissoras na medida em que sua eficiência avançou expressivamente em poucos anos, estando atualmente no patamar de 20% (Pavlovic *et al.*, 2020; Tolmasquim, 2016). Essas células usam haletos orgânico-inorgânico nas suas camadas ativas de coleta de luz (Richhariya *et al.*, 2020).

b) Estruturas de suporte para sistemas solares fotovoltaicos

Na instalação de uma usina solar fotovoltaica, seus módulos solares podem ser montados em estruturas fixas ou móveis, utilizando sistemas de rastreadores solares (ou *solar trackers*) (Figura 4.5). Esses sistemas permitem que as inclinações dos arranjos solares fotovoltaicos se modifiquem de modo a acompanhar a posição do sol e aumentar a sua geração de energia elétrica ao longo do dia. Eles podem ser divididos em dois tipos principais, de acordo com o número de eixos de rotação, são eles: rastreadores solares de um eixo (ou mono-axiais) e rastreadores solares de dois eixos (ou biaxiais) (AL-Rousan *et al.*, 2018; Pavlovic *et al.*, 2020).

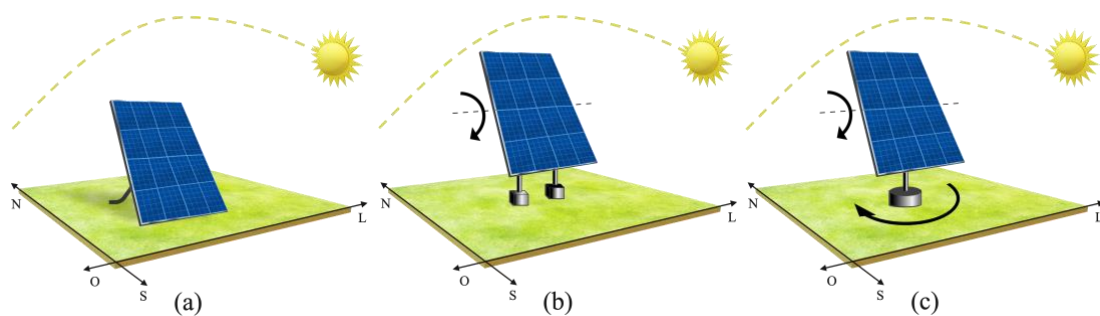


Figura 4.5 – Ilustração dos tipos de estrutura de suporte para sistemas solares fotovoltaicos
Fonte: Elaborado pelo autor

i) Estruturas fixas

Quando os módulos solares fotovoltaicos são instalados em estruturas fixas, eles são posicionados sob um ângulo de inclinação ideal com relação à superfície horizontal, não podendo alterar a sua disposição ao longo do dia (Figura 4.5-a). Para essas estruturas, há a possibilidade de mudar a sua posição nas diferentes épocas do ano como uma saída para aumentar a geração de energia (Bazyari *et al.*, 2014). Os módulos solares fotovoltaicos dos sistemas *S2*, *S3* e *S4* da UFV-AR estão instalados em estruturas fixas.

ii) Estruturas com rastreadores solares de um eixo

Para aumentar a incidência de radiação solar, os módulos solares fotovoltaicos podem ser instalados em estruturas móveis. No caso de estruturas de suporte com rastreadores solares de um eixo, os módulos conseguem acompanhar o movimento do sol ao redor do eixo horizontal (Figura 4.5-b) ou vertical (Pavlovic *et al.*, 2020), buscando ficar perpendicular aos raios solares (Bazyari *et al.*, 2014). Esse é o tipo de estruturas móveis mais comum e apresenta, por um lado, um melhor rendimento; e, por outro, maiores custos de instalação e manutenção quando comparado com estruturas fixas (AL-Rousan *et al.*, 2018; Antonanzas *et al.*, 2019; Pavlovic *et al.*, 2020). Note que rastreadores solares de um eixo horizontal norte-sul são empregados no *sistema S1* da UFV-AR.

iii) Estruturas com rastreadores solares de dois eixos

Sabendo que nem sempre os rastreadores solares de um único eixo obtêm êxito em posicionar os módulos solares fotovoltaicos perpendiculares aos raios solares, é ainda possível lançar mão de rastreadores de dois eixos. Com esses dispositivos, os módulos são capazes de rastrear a posição do sol ao redor tanto do eixo horizontal quanto do eixo vertical (Figura 4.5-c). Embora permita um maior rendimento em termos de geração de energia, esse tipo de estrutura demanda áreas mais extensas, para evitar a ocorrência de sombreamento mútuo, e possui custos de instalação, operação e manutenção (O&M) superiores aos daqueles com rastreadores de um eixo (AL-Rousan *et al.*, 2018; Pavlovic *et al.*, 2020).

4.3.2. Etapa 2: Processo de modelagem

4.3.2.1. Fronteira do sistema

Ao detalhar a fronteira do sistema de modo a indicar os processos incluídos na ASCV, o seu sistema de produto foi dividido nas seguintes etapas de ciclo de vida: (i) *Produção de materiais e equipamentos*, (ii) *Distribuição de materiais e equipamentos*, (iii) *Construção e instalação (C&I) da UFV-AR*, (iv) *O&M da UFV-AR* e (v) *Descomissionamento da UFV-AR e destinação de resíduos*, conforme Figura 4.6.

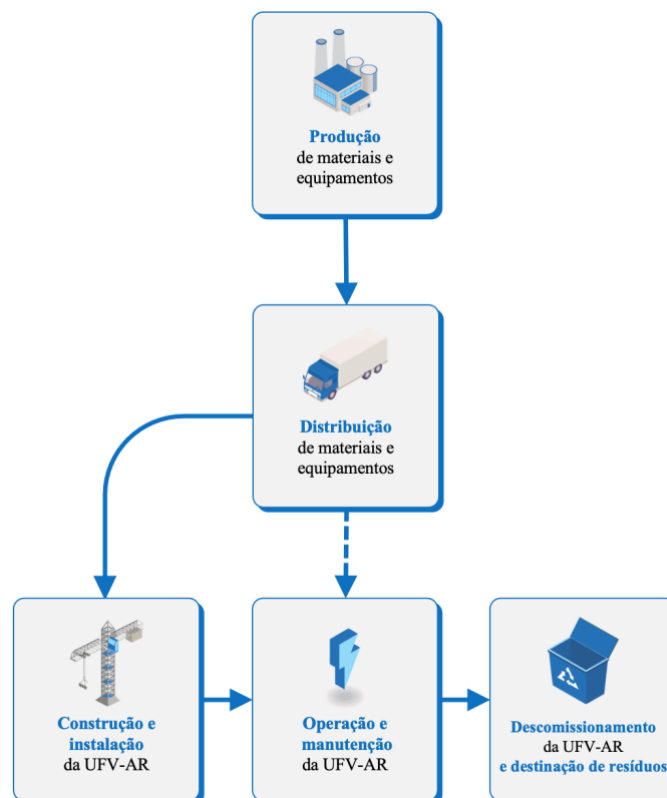


Figura 4.6 – Esquema da fronteira do sistema definido para a ASCV da UFV-AR
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2.2. Seleção de indicadores de sustentabilidade

Os indicadores de sustentabilidade considerados nesta ASCV correspondem aos 28 indicadores relacionados no item 3.2.2 do capítulo anterior desta tese, os quais estão organizados segundo as dimensões ambiental, social e econômica, conforme relacionado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Indicadores ambientais, sociais e econômicos considerados na ASCV

Indicador	Código	Unidade
Dimensão ambiental		
Aquecimento global	ENV01	kg CO ₂ eq.
Depleção da camada de ozônio	ENV02	kg CFC11 eq.
Radiação ionizante	ENV03	kBq Co-60 eq.
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	kg NO _x eq.
Formação de material particulado fino	ENV05	kg PM _{2.5} eq.
Acidificação terrestre	ENV06	kg SO ₂ eq.
Eutrofização em água doce	ENV07	kg P eq.
Eutrofização marinha	ENV08	kg N eq.
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	kg 1,4-DCB
Ecotoxicidade marinha	ENV11	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	kg 1,4-DCB
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	kg 1,4-DCB
Uso do solo	ENV14	m ² a crop eq.
Escassez de recursos minerais	ENV15	kg Cu eq.
Escassez de recursos fósseis	ENV16	kg oil eq.
Consumo de água	ENV17	m ³
Áreas protegidas	ENV18	adimensional
Dimensão social		
Geração de empregos	SOC01	empregos.ano
Aceitação social	SOC02	adimensional
Saúde e segurança	SOC03	acidentes.ano
Comunidades locais	SOC04	adimensional
Dimensão econômica		
Custos de P&D	ECO01	US\$
Custos de investimento	ECO02	US\$
Custos de O&M	ECO03	US\$
Custos de descomissionamento	ECO04	US\$
LCOE	ECO05	US\$/kWh
Payback period	ECO06	Anos

4.3.2.3. Inventário do Ciclo de Vida

Conforme mencionado anteriormente, o levantamento dos dados utilizados nesta ASCV se deu por intermédio de diversas fontes. No que diz respeito às fontes primárias, as informações relativas às características técnicas dos sistemas solares fotovoltaicos da

UFV-AR, bem como os dados de geração de energia e a quantidade da maioria dos insumos necessários à sua construção e instalação, foram coletadas de Fontenele (2018).

Sabendo que essas informações são insuficientes para a execução de uma ASCV, não só foram adotadas algumas premissas, como também foram utilizados dados secundários relativos, sobretudo, ao tipo e a quantidade de material de construção civil empregado nas obras de engenharia e os fluxos de entrada e saída ambiental, social e econômica associados ao ciclo de vida da UFV-AR. Embora estes últimos sejam detalhados no decorrer do presente item segundo a sua dimensão da sustentabilidade, vale adiantar que essas informações foram obtidas junto a fontes secundárias, dentre as quais se destacam a base de dados *Ecoinvent 3.5* (Wernet *et al.*, 2016), a literatura disponível e relatórios setoriais e de organizações nacionais e internacionais.

Desse modo, as fontes primárias de dados especificam que o *sistema S1* da UFV-AR possui 3.564 módulos de multi-Si que conseguem seguir a posição do sol por meio de 10 motores elétricos de 3 cv. Conforme ilustrado na Figura 4.3, esse sistema está associado a dois inversores de 519 kW e um transformador de 1.000 kVA. Já o *sistema S2* é constituído por 180 módulos de multi-Si, está associado a dois inversores de 25 kW e compartilha com os sistemas *S3* e *S4* um transformador de 100 kVA. O *sistema S3* é composto por 185 módulos de a-Si e está vinculado a um inversor de 25 kW. Por fim, o *sistema S4* possui 210 módulos CIGS e um inversor de 25 kW. O fator de capacidade considerado para cada um dos quatro sistemas da UFV-AR corresponde a medição realizada por Fontenele (2018) ao longo do ano de 2016, obtendo os valores de 21,54%, 19,11%, 19,28% e 15,98%, respectivamente. A Tabela 4.2 reúne esses dados coletados a partir de fontes primárias, os quais foram utilizados na construção do ICV da UFV-AR.

Além dessas informações, foi ainda necessário adotar algumas premissas para viabilizar a avaliação ambiental, social e econômica da geração de energia elétrica a partir dos quatro sistemas da UFV-AR. A primeira delas corresponde à vida útil da usina, que foi estabelecida em 25 anos. Sobre esse período, assumiu-se que cada uma das suas tecnologias fotovoltaicas está sujeita a uma determinada degradação que afeta a sua geração de energia, são elas: 0,59% de redução na geração de energia/ano para os módulos de multi-Si; 0,95%/ano para os módulos de a-Si; e 0,02%/ano para os módulos de CIGS (Jordan & Kurtz, 2013). Outro aspecto fundamental a ser levado em conta na ASCV diz respeito aos países de origem das tecnologias fotovoltaicas de modo a permitir a contabilização e discriminação dos potenciais impactos que neles ocorrem, como

também daqueles associados aos transportes de insumos materiais até o Brasil. Essas informações estão relacionadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Características dos sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR
Fonte: Fontenele (2018)

Característica	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Tecnologia	multi-Si	multi-Si	a-Si	CIGS
Nº de módulos	3.564 un.	180 un.	185 un.	210 un.
Capacidade instalada	1.033,56 kW	52,20 kW	26,27 kW	25,20 kW
Fator de capacidade	21,54%	19,11%	19,28%	15,98%
Estrutura de suporte	Com rastreador	Estrutura fixa	Estrutura fixa	Estrutura fixa
Motor elétrico	10 un. (3 cv)	–	–	–
Inversor	2 un. (519 kW)	2 un. (25 kW)	1 un. (25 kW)	1 un. (25 kW)
Transformador	1.000 kVA	100 kVA	100 kVA	100 kVA

Tabela 4.3 – Principais parâmetros adotados para os sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR
Fonte: Jordan & Kurtz (2013)

Parâmetro	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Tecnologia	multi-Si	multi-Si	a-Si	CIGS
Vida útil	25 anos	25 anos	25 anos	25 anos
Taxa de degradação	0,59%/ano	0,59%/ano	0,95%/ano	0,02%/ano
País de origem	Malásia	Malásia	China	Alemanha

De posse desses dados, foi possível estimar a geração de energia elétrica dos sistemas da UFV-AR ao longo da sua vida útil, bem como determinar a participação de cada um deles na geração de energia elétrica da usina como todo (Tabela 4.4, Figura 4.7 e Figura 4.8).

Tabela 4.4 – Informações sobre a geração de energia elétrica dos sistemas da UFV-AR

Nível	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Sistema	$4,55 \times 10^{-7}$ kWh	$2,04 \times 10^{-6}$ kWh	$9,92 \times 10^{-5}$ kWh	$8,80 \times 10^{-5}$ kWh
Usina (Participação)	92,1%	4,1%	2,0%	1,8%

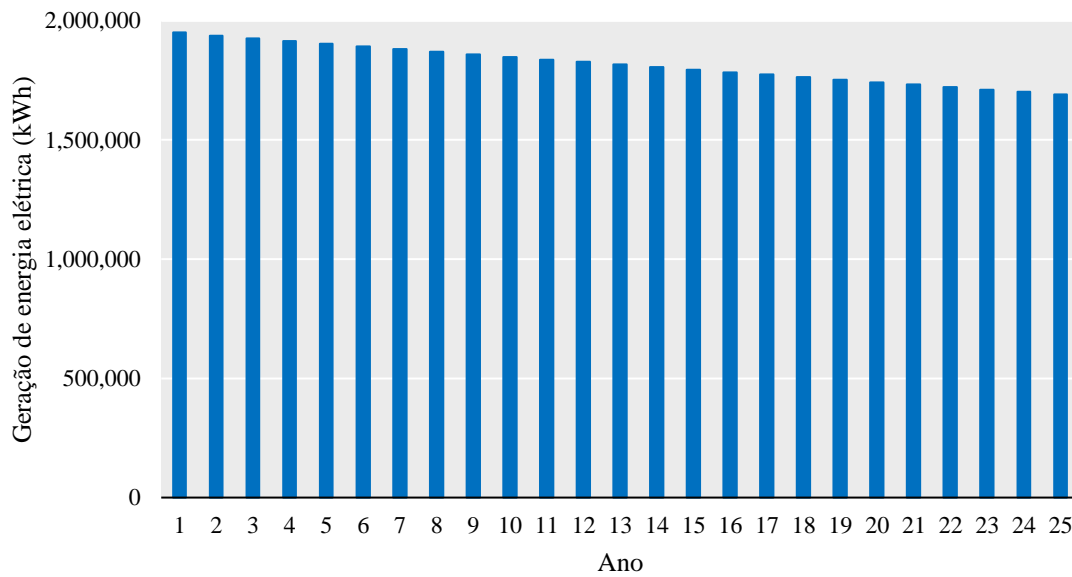


Figura 4.7 – Geração de energia elétrica a partir do *sistema S1* da UFV-AR ao longo da sua vida útil

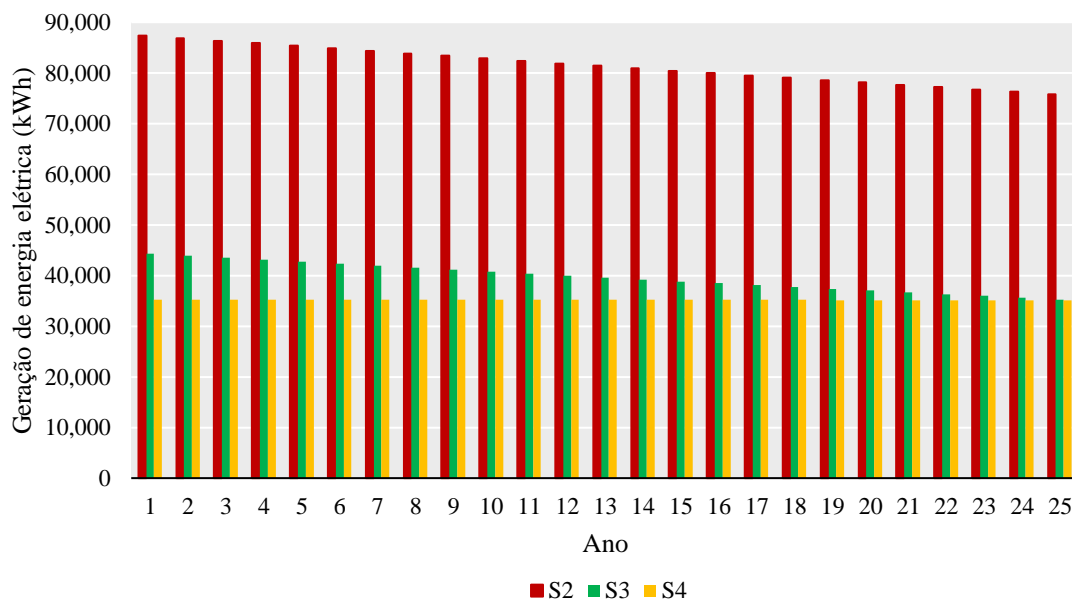


Figura 4.8 – Geração de energia elétrica a partir dos sistemas *S2*, *S3* e *S4* da UFV-AR ao longo da sua vida útil

É preciso considerar também algumas características físicas dos módulos solares fotovoltaicos dos sistemas da UFV-AR. A Tabela 4.5 fornece a área e o peso dos diferentes módulos utilizados, assim como a área total ocupada por cada um dos sistemas. Tais informações foram estimadas com base no projeto da UFV-AR (Fontenele, 2018), assim como manuais de instalação e catálogos de fabricantes de módulos fotovoltaicos (Avancis, 2014; DuPont, 2012; MEMC, 2012).

Tabela 4.5 – Estimativas adotadas para os módulos dos sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR
 Fonte: Avancis (2014), DuPont (2012) e MEMC (2012)

Característica	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Área do módulo	1,96 m ²	1,96 m ²	1,56 m ²	1,09 m ²
Área ocupada total	6.972,04	352,12	289,34	229,78
Peso do módulo	22,00 kg	22,00 kg	30,00 kg	19,60 kg

Com relação às informações dos outros equipamentos componentes da UFV-AR, a Tabela 4.6 traz as premissas adotadas com relação aos seus pesos e países de origem que são fundamentais para a consideração das atividades de transportes relacionadas à distribuição desses equipamentos. De acordo com o relatório produzido pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), sobre a cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil, existem empresas fabricantes de inversores, transformadores e comutadores no país, as quais estão concentradas no estado de São Paulo (para mais informações, ver Tabela B. 8 do Anexo B).

Tabela 4.6 – Premissas adotadas para outros equipamentos dos sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR
 Fonte: ABB (2017, 2009), Ingeteam (2015, 2011)

Característica	Equipamento				
	Inversor		Transformador		Comutador
	500 kW _p	25 kW _p	1.000 kVA	100 kVA	<17,5 kV
Peso	1.900,00 kg	323,50 kg	2.600,00 kg	986,67 kg	130,80 kg
País de origem	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil	Brasil

As quantidades de insumos para as obras de engenharia das subestações e do centro de seccionamento foram estimadas segundo as informações contidas na 13ª edição das Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) (TCPO, 2012). Esse documento se caracteriza como a principal referência para preparação de orçamento no setor de construção civil nacional. Com base no levantamento das áreas de cada um desses centros de transformação, foram calculadas as quantidades de materiais utilizadas nas suas estruturas de concreto armado, portas de acesso, grelhas de ventilação, grades de proteção e exaustores, para os quais foram relacionados inventários existentes na base de dados *Ecoinvent 3.5* (Wernet *et al.*, 2016) (Tabela 4.7) (para mais informações, ver Tabela B. 2 e Tabela B. 3 do Anexo B).

Tabela 4.7 – Estimativas para as quantidades de insumos empregados nos centros de transformação da UFV-AR

Fonte: Fontenele (2018) e TCPO (2012)

Parâmetro técnico	Centro de transformação		
	Subestação 01	Subestação 02	Centro de Secc.
Área	20,00 m ²	12,87 m ²	25,50 m ²
Concreto	10,39 m ³	7,11 m ³	12,44 m ³
Aço	75,60 kg	46,65 kg	96,39 kg
Aço galvanizado (portas)	174,73 kg	174,73 kg	174,73 kg
Aço galvanizado (grelhas de ventilação)	36,37 kg	24,24 kg	48,49 kg
Aço galvanizado (grades de proteção)	2,37 kg	2,39 kg	–
Exaustor	3 unidades	2 unidades	4 unidades

Considerando que os módulos solares fotovoltaicos da UFV-AR são de origem estrangeira, a distribuição deles é realizada por meio do transporte oceânico. Desse modo, o traslado envolvido na exportação desses insumos, a partir de seus países de origem até o Brasil, e no deslocamento terrestre dentro do país até a UFV-AR foram as atividades de transporte contabilizadas pela presente análise. As distâncias adotadas em cada um desses deslocamentos foram baseadas em estimativas, cujas premissas estão disponíveis na Tabela B. 7 do Anexo B.

Finalmente, a etapa de fim de vida da UFV-AR abarca as atividades relacionadas ao seu descomissionamento e a destinação dos resíduos. É importante mencionar que foram considerados tanto os fluxos elementares necessários ao seu descomissionamento quanto as rotas de tratamento e disposição dos resíduos adotados pela base de dados *Ecoinvent 3.5* (Wernet *et al.*, 2016) para os ICVs que dela foram utilizados. A Figura 4.9 ilustra a fronteira do sistema definido para a ASCV da UFV-AR, destacando as hipóteses adotadas com relação à origem dos seus principais materiais e equipamentos.

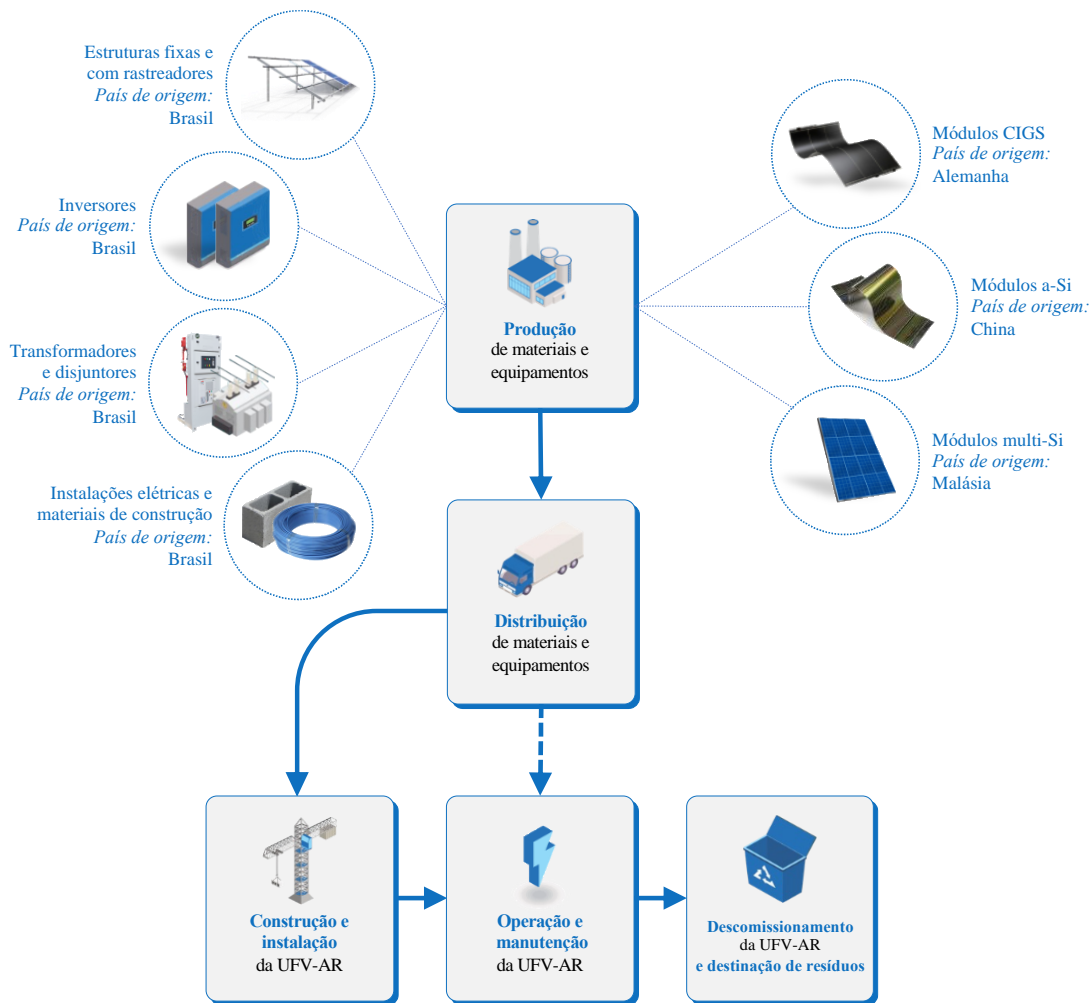


Figura 4.9 – Esquema da fronteira do sistema definido para a ASCV da UFV-AR com seus principais materiais e equipamentos
 Fonte: Elaborado pelo autor

a) *Dimensão ambiental*

No que diz respeito à dimensão ambiental, o esquema da Figura 4.10 ilustra a relação dos processos compreendidos pela fronteira do sistema com o meio ambiente. Nela, é possível perceber que as cinco etapas do ciclo de vida são analisadas individualmente segundo as categorias de impacto do método *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017). Para o indicador *Áreas protegidas* (ENV18), a etapa de *Produção de materiais e equipamentos* é avaliada individualmente, enquanto que as etapas de *C&I da UFV-AR*, *O&M da UFV-AR* e *Descomissionamento da UFV-AR e destinação de resíduos* são avaliadas de modo agregado.

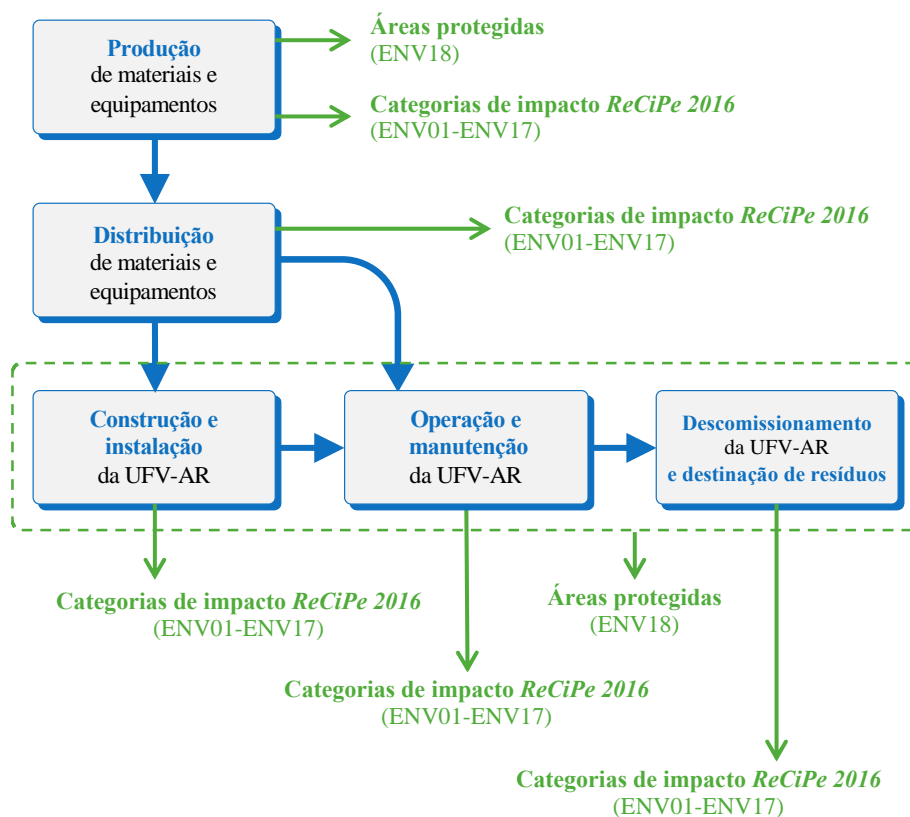


Figura 4.10 – Esquema simplificado da relação dos processos compreendidos pela fronteira do sistema com a dimensão ambiental
 Fonte: Elaborado pelo autor

As informações referentes aos fluxos de entrada e de saída dos processos necessários para a avaliação das 17 categorias de impacto do método de cálculo *ReCiPe 2016* (Huijbregts *et al.*, 2017) correspondem a dados secundários provenientes do *Ecoinvent 3.5* (Wernet *et al.*, 2016). A Tabela 4.8 lista os principais ICVs dessa base de dados que foram ajustados de modo a melhor representar as características da UFV-AR⁶² e, em seguida, utilizados no presente estudo de caso.

Com relação à categoria de impacto de *Áreas protegidas* (ENV18), para a qual não há uma correspondência no *ReCiPe 2016*, esta ASCV se baseou na medida denominada *Protected Area Management Effectiveness*⁶³ (PAME), desenvolvida pelo Centro de Monitoramento da Conservação Mundial (WCMC) da UNEP (UNEP-WCMC, 2022). Esse parâmetro avalia quão as áreas protegidas de um país estão sendo administradas tendo em vista a conservação do seu valor e o alcance de metas e objetivos sustentáveis (UNEP-WCMC, 2022).

⁶² Para mais informações sobre as adaptações realizadas junto aos ICVs do *Ecoinvent 3.5*, ver da Tabela B. 10 até a Tabela B. 33 do Anexo B.

⁶³ Eficiência da Gestão de Áreas Protegidas (tradução livre).

Tabela 4.8 – Principais ICVs da base de dados do *Ecoinvent* adaptados para a avaliação da UFV-AR com relação a dimensão ambiental
 Fonte: Frischknecht *et al.* (2007)

Produto ou processo	ICV adaptado
Geração de energia elétrica	<i>Electricity, low voltage {RoW} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si APOS, U</i>
Usina solar fotovoltaica	<i>Photovoltaic plant, 570kWp, multi-Si, on open ground {GLO} construction APOS, U</i>
Inversor 25 kW	<i>Inverter, 0.5kW {RoW} production APOS, U</i>
Inversor 519 kW	<i>Inverter, 500kW {RoW} production APOS, U</i>
Estrutura de suporte	<i>Photovoltaic mounting system, for 570kWp open ground module {GLO} production APOS, U</i>
Módulos solares a-Si	<i>Photovoltaic panel, a-Si {US} production APOS, U</i>
Módulos solares CIGS	<i>Photovoltaic panel, CIS {DE} production APOS, U</i>
Módulos solares multi-Si	<i>Photovoltaic panel, multi-Si wafer {RoW} production APOS, U</i>
Transformadores	<i>Transformer, high voltage use {GLO} production APOS, U</i>

Sabendo que a UFV-AR não afeta diretamente nenhuma área protegida durante a sua construção e operação e que não há informações disponíveis sobre esse aspecto nas outras etapas da sua cadeia produtiva, o indicador *PAME* se mostra como um recurso útil para levar em consideração suas eventuais influências sobre essas áreas. Além disso, é particularmente interessante para análises comparativas que envolvem opções provenientes de diferentes países, tal como é o caso desta análise. Desse modo, foram considerados os desempenhos nesse indicador obtidos pelos países de origem das tecnologias fotovoltaicas na etapa de produção e o desempenho do Brasil nas demais etapas (Tabela B. 9 do Anexo B).

b) Dimensão social

A Figura 4.11 ilustra a relação das etapas do ciclo de vida da UFV-AR com a dimensão social. Os indicadores *Geração de empregos* (SOC01) e *Saúde e segurança* (SOC03) contabilizam os desempenhos das etapas de *Produção de materiais e equipamentos* e *Distribuição de materiais e equipamentos* em conjunto; e os desempenhos das demais etapas separadamente. Os efeitos sobre as *Comunidades locais* (SOC04) são avaliados considerando a etapa de *Produção de materiais*; e de modo

conjunto as etapas de *C&I da UFV-AR*, *O&M da UFV-AR* e *Descomissionamento da UFV-AR e destinação de resíduos*. Já o indicador *Aceitação social* (SOC02) está associado à etapa de *O&M da UFV-AR* uma vez que expressa a opinião pública local com relação à tecnologia solar fotovoltaica.

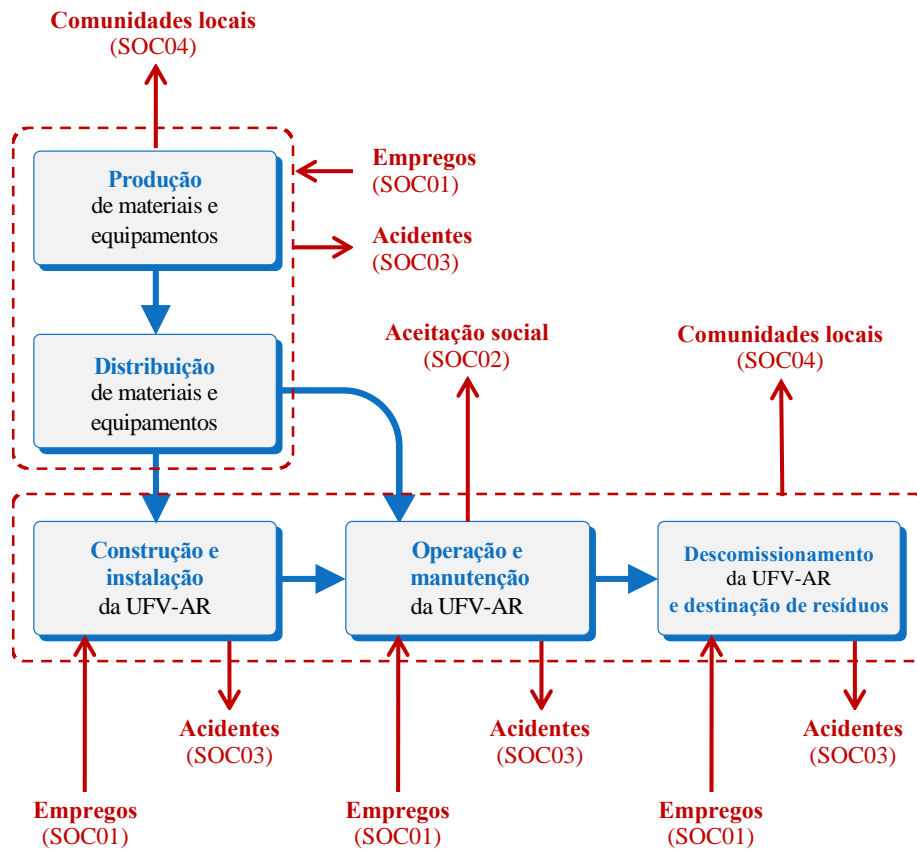


Figura 4.11 – Esquema simplificado da relação dos processos compreendidos pela fronteira do sistema com a dimensão social
 Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados do ICV social são provenientes de fontes secundárias, sendo representadas, sobretudo, pela literatura disponível e por relatórios setoriais e de organizações internacionais. Ao considerar o indicador *Geração de empregos*, a ACV-S desta ASCV se baseou nos resultados de um estudo conduzido por Ram *et al.* (2020), o qual trata da criação de novos postos de trabalho associados à transição energética atualmente em curso. A partir desse referencial, foi levada em consideração a geração de empregos temporários, durante as etapas tanto de *Construção e instalação* quanto de *Descomissionamento e destinação de resíduos*; bem como empregos permanentes, nas demais etapas de ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR. É importante salientar que os postos de trabalho criados durante a etapa de produção das tecnologias fotovoltaicas

ocorrem em seus países de origem, enquanto que aqueles gerados nas outras etapas, no Brasil (ver Tabela B. 34 e Tabela B. 35 do Anexo B). Na Tabela 4.9, é possível verificar o número de postos de trabalhos gerados por megawatt (MW).

Tabela 4.9 – Número de postos de trabalho criados em cada etapa do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR (empregos.ano/MW)
Fonte: Ram *et al.* (2020)

Etapa do ciclo de vida	Tipo de emprego	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Produção de materiais e equipamentos	Permanente	16,88 (Malásia)	16,88 (Malásia)	14,87 (China)	7,04 (Alemanha)
Construção e Instalação	Temporário	40,82 (Brasil)	40,82 (Brasil)	40,82 (Brasil)	40,82 (Brasil)
O&M	Permanente	2,20 (Brasil)	2,20 (Brasil)	2,20 (Brasil)	2,20 (Brasil)
Descomissionamento e destinação de resíduos	Temporário	2,51 (Brasil)	2,51 (Brasil)	2,51 (Brasil)	2,51 (Brasil)
Total		62,41	62,41	60,40	52,57

Com relação ao indicador social *Saúde e segurança dos trabalhadores*, as informações para a construção do ICV foram obtidas junto a um estudo realizado por Hämäläinen *et al.* (2009). Na ocasião, os autores se debruçaram sobre a tendência global de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho em níveis regional e nacional. Analogamente ao indicador *Geração de empregos*, foi levado em consideração o desempenho dos países de origem das tecnologias fotovoltaicas na etapa de *Produção de materiais e equipamentos*, e o desempenho do Brasil nas demais etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR (ver Tabela B. 36 do Anexo B). A Tabela 4.10 fornece o número de acidentes associado a geração de 1,0 kWh.

Para o indicador *Aceitação social*, a pesquisa conduzida por Sena *et al.* (2016) fornece uma compreensão acerca dos impactos e da aceitação social de energias renováveis no estado do Rio Grande do Norte. Nela, os autores apontam que a população potiguar é claramente favorável à tecnologia solar fotovoltaica. Note que, não havendo uma distinção da percepção da sociedade com relação às diferentes tecnologias fotovoltaicas existentes, tampouco estudos que alcancem esse nível de detalhe, foi considerado o mesmo nível *alto* de aceitação para os diferentes sistemas componentes da UFV-AR.

Tabela 4.10 – Número de acidentes em cada uma das etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR (acidentes.ano/kWh)
 Fonte: Hämäläinen *et al.* (2009)

Etapa do ciclo de vida	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Produção de materiais e equipamentos	$1,07 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$	$1,18 \times 10^{-7}$
Construção e Instalação	$3,28 \times 10^{-6}$	$3,70 \times 10^{-6}$	$3,67 \times 10^{-6}$	$4,42 \times 10^{-6}$
O&M	$1,77 \times 10^{-7}$	$1,99 \times 10^{-7}$	$1,97 \times 10^{-7}$	$2,38 \times 10^{-7}$
Descomissionamento e destinação de resíduos	$2,02 \times 10^{-7}$	$2,28 \times 10^{-7}$	$2,26 \times 10^{-7}$	$2,72 \times 10^{-7}$
Total	$4,73 \times 10^{-6}$	$5,33 \times 10^{-6}$	$5,18 \times 10^{-6}$	$5,05 \times 10^{-6}$

Finalmente, os dados utilizados para o indicador *Comunidades locais* correspondem às avaliações das liberdades civis extraídas dos relatórios produzidos pela Freedom House (Freedom House, 2020). Dentro desse contexto, tal organização sem fins lucrativos que promove, sobretudo, o respeito aos direitos humanos, leva em conta os direitos associativos e organizacionais, o estado de direito e a autonomia pessoal e os direitos individuais em nível nacional. Desse modo, a ACV-S dos sistemas da UFV-AR considerou os desempenhos tanto dos países de origem das suas tecnologias fotovoltaicas quanto do Brasil (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 – Avaliação das liberdades civis dos países de origem das tecnologias fotovoltaicas da UFV-AR e do Brasil
 Fonte: Freedom House (2020)

Liberdades civis	País			
	Alemanha	Brasil	China	Malásia
Liberdade de expressão e crença	14	14	1	9
Direitos associativos e organizacionais	12	9	2	6
Estado de direito	14	8	2	7
Autonomia pessoal e direitos individuais	15	13	6	9
Total	55	44	11	31

c) Dimensão econômica

Para o CCV, os processos *upstream* da cadeia de valor da UFV-AR fornecem dados econômico-financeiros para os indicadores *Custos de P&D* (ECO01) e *Custos de investimento* (ECO02). A etapa de *O&M da UFV-AR* está associada aos *Custos de O&M* (ECO03) e receitas do complexo solar; enquanto que a etapa de *Descomissionamento da UFV-AR e destinação de resíduos*, aos custos de fim de vida (ECO04) (Figura 4.12).

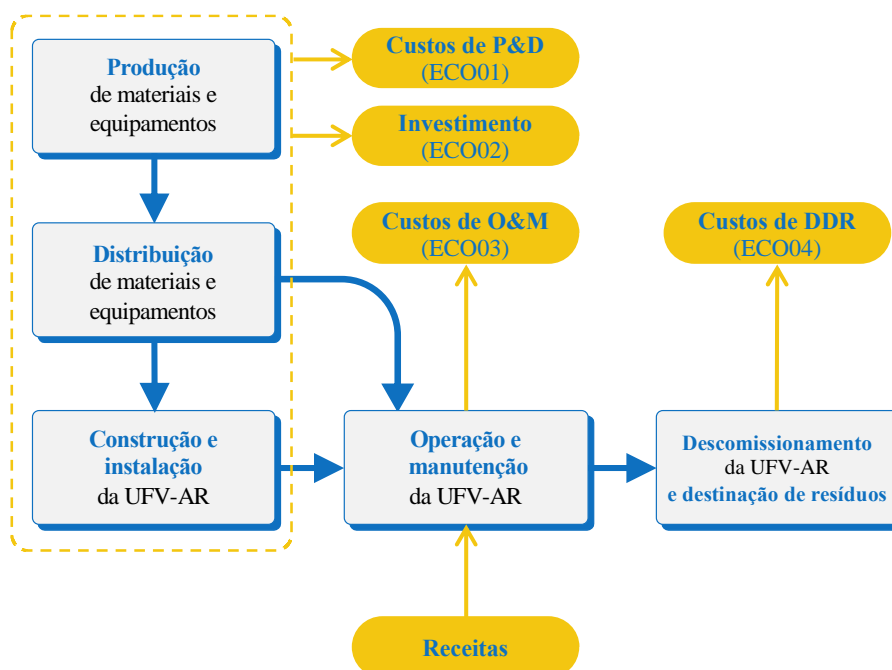


Figura 4.12 – Esquema simplificado da relação dos processos compreendidos pela fronteira do sistema com a dimensão econômica
Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados referentes ao ICV econômico são igualmente oriundos em sua maior parte de fontes secundárias, sendo elas a literatura disponível, dados setoriais e relatórios de organizações internacionais. Para os custos relacionados às atividades tanto de P&D quanto de investimento, foram consideradas informações contidas no documento *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Solar Photovoltaics* (IRENA, 2012) da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), o qual trata dos custos envolvidos na geração solar fotovoltaica⁶⁴ (ver Tabela B. 37 do Anexo B).

No que diz respeito aos *custos de O&M*, esta ASCV se baseou em dados disponíveis no relatório *Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic*

⁶⁴ Note que, por não haver uma equivalência direta desses custos com as etapas definidas para o ciclo de vida do sistema de produto estudado, ambos os custos foram relacionados às etapas de *Produção de materiais e equipamentos*, *Distribuição de materiais e equipamentos* e *Construção e instalação da UFV-AR*.

and Energy Storage Systems (NREL, 2018), produzido pelo Laboratório de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL). Esse documento aborda as melhores práticas para reduzir os custos associados à etapa de *O&M* de sistemas solares fotovoltaicos de grande escala sem rastreadores solares. Para o sistema *S1*, o qual possui estruturas com rastreadores solares, os custos de *O&M* foram obtidos junto à um estudo comparativo dos aspectos técnicos e econômicos de sistemas solares fotovoltaicos, conduzido por Figueiredo & Martins (2017) (ver Tabela B. 38 e Tabela B. 39 do Anexo B).

Quanto aos custos associados à etapa de *Descomissionamento e a destinação de resíduos*, o guia intitulado *Decommissioning Solar Panel Systems* (NYSERDA, 2016), produzido pela Agência de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia do Estado de Nova York (NYSERDA), forneceu informações sobre os custos financeiros incorridos quando do descomissionamento de sistemas solares fotovoltaicos de geração centralizada (ver Tabela B. 40 do Anexo B). A Tabela 4.12 reúne os custos envolvidos nos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR em dólares por kWh gerado (US\$/kWh).

Tabela 4.12 – Custos envolvidos nos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR (US\$/kWh)
Fonte: Figueiredo & Martins (2017), IRENA (2012), NREL (2018) e NYSERDA (2016)

Custo	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
P&D	$9,10 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$
Investimento	$5,49 \times 10^{-2}$	$7,46 \times 10^{-2}$	$6,12 \times 10^{-2}$	$6,90 \times 10^{-2}$
O&M	$4,15 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-3}$
Descomissionamento e destinação de resíduos	$6,85 \times 10^{-4}$	$7,72 \times 10^{-4}$	$7,98 \times 10^{-4}$	$8,62 \times 10^{-4}$
Total	$6,88 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-2}$	$7,58 \times 10^{-2}$	$8,48 \times 10^{-2}$

4.3.2.4. Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida

a) Dimensão ambiental

A Tabela 4.13 traz os resultados obtidos pela avaliação dos sistemas *S1*, *S2*, *S3* e *S4* da UFV-AR em cada um dos indicadores considerados para dimensão ambiental da sustentabilidade. Tais resultados estão também ilustrados na Figura 4.13 e na Figura 4.14 que comparam os desempenhos dos sistemas dentro de cada indicador ambiental.

Tabela 4.13 – Resultados da AICV ambiental dos sistemas da UFV-AR
 Fonte: Frischknecht *et al.* (2007), Huijbregts *et al.* (2017) e UNEP-WCMC (2022)

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Aquecimento global	ENV01	kg CO ₂ eq.	4,46×10 ⁻²	5,51×10 ⁻²	5,66×10 ⁻²	5,93×10 ⁻²
Depleção da camada de ozônio	ENV02	kg CFC11eq.	2,20×10 ⁻⁸	2,67×10 ⁻⁸	2,16×10 ⁻⁸	2,79×10 ⁻⁸
Radiação ionizante	ENV03	kBq Co-60 eq.	4,08×10 ⁻³	4,85×10 ⁻³	3,73×10 ⁻³	5,95×10 ⁻³
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	kg NO _x eq.	1,20×10 ⁻⁴	1,53×10 ⁻⁴	1,78×10 ⁻⁴	1,66×10 ⁻⁴
Formação de material particulado fino	ENV05	kg PM2.5 eq.	9,81×10 ⁻⁵	1,26×10 ⁻⁴	1,27×10 ⁻⁴	1,34×10 ⁻⁴
Acidificação terrestre	ENV06	kg SO ₂ eq.	2,01×10 ⁻⁴	2,60×10 ⁻⁴	2,89×10 ⁻⁴	2,93×10 ⁻⁴
Eutrofização em água doce	ENV07	kg P eq.	2,99×10 ⁻⁵	3,91×10 ⁻⁵	3,16×10 ⁻⁵	5,71×10 ⁻⁵
Eutrofização marinha	ENV08	kg N eq.	3,31×10 ⁻⁶	4,06×10 ⁻⁶	2,35×10 ⁻⁶	3,56×10 ⁻⁶
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	kg 1,4-DCB	1,09	1,32	5,47×10 ⁻¹	5,47×10 ⁻¹
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	kg 1,4-DCB	5,51×10 ⁻³	7,44×10 ⁻³	7,39×10 ⁻³	1,01×10 ⁻²
Ecotoxicidade marinha	ENV11	kg 1,4-DCB	7,75×10 ⁻³	1,04×10 ⁻²	9,85×10 ⁻³	1,36×10 ⁻²
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	kg 1,4-DCB	5,03×10 ⁻³	7,63×10 ⁻³	1,05×10 ⁻²	9,08×10 ⁻³
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	kg 1,4-DCB	1,13×10 ⁻¹	1,52×10 ⁻¹	1,36×10 ⁻¹	2,24×10 ⁻¹
Uso do solo	ENV14	m ² a crop eq.	1,71×10 ⁻³	2,05×10 ⁻³	2,39×10 ⁻³	2,32×10 ⁻³
Escassez de recursos minerais	ENV15	kg Cu eq.	5,40×10 ⁻⁴	6,45×10 ⁻⁴	7,84×10 ⁻⁴	1,15×10 ⁻³
Escassez de recursos fósseis	ENV16	kg oil eq.	1,16×10 ⁻²	1,42×10 ⁻²	1,37×10 ⁻²	1,50×10 ⁻²
Consumo de água	ENV17	m ³	1,64×10 ⁻³	1,79×10 ⁻³	5,62×10 ⁻⁴	5,54×10 ⁻⁴
Áreas protegidas	ENV18	adimensional	0,190	0,190	0,194	0,351

A Figura 4.13 ilustra os resultados da avaliação comparativa dos impactos negativos dos sistemas da UFV-AR sobre o meio ambiente. Pressupondo que todos os indicadores ambientais possuem a mesma importância, é possível inferir que os sistemas *S1* e *S3* se mostram, nesta ordem, como aqueles de melhor desempenho ambiental. No caso do sistema *S1*, seus piores desempenhos ocorrem nos indicadores *Eutrofização marinha* (ENV08), *Ecotoxicidade terrestre* (ENV09) e *Consumo de água* (ENV17). Já no caso do sistema *S3*, nos indicadores *Formação fotoquímica de ozônio* (ENV04), *Toxicidade humana cancerígena* (ENV12) e *Uso do solo* (ENV14). Por outro lado, o sistema *S4* pode ser classificado como o mais impactante na medida em que apresenta os piores desempenhos em 11 dos 17 indicadores de impacto negativo considerados para a dimensão ambiental.

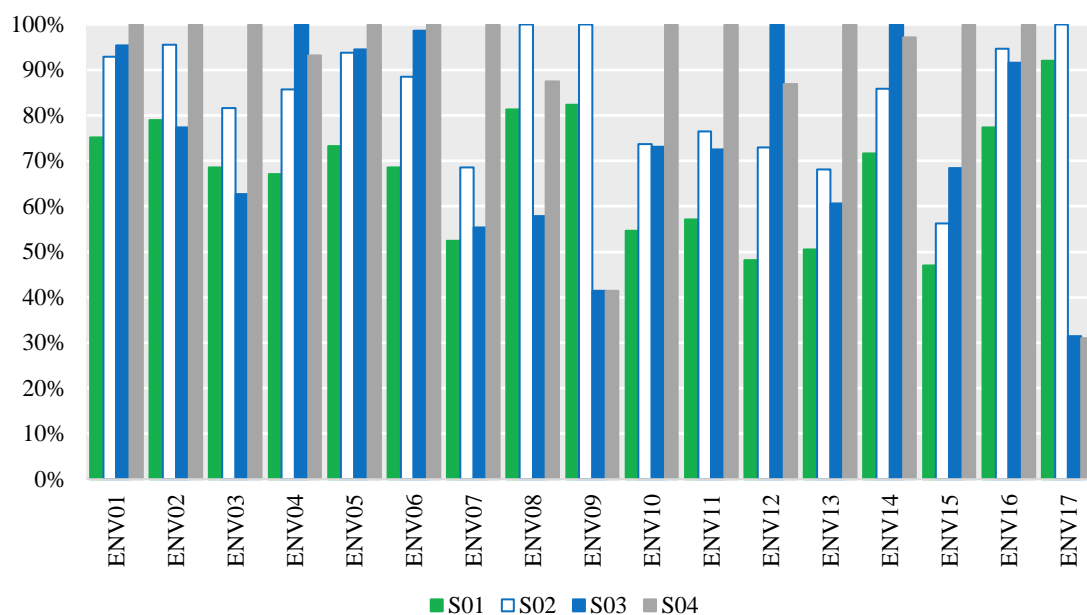


Figura 4.13 – Resultados da avaliação comparativa dos impactos negativos sobre a dimensão ambiental associados à geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR

No indicador *Áreas protegidas*⁶⁵ (ENV18), o *sistema S4* ostenta o melhor desempenho em termos de conservação de áreas de valor ambiental relevante. Os demais sistemas da UFV-AR apresentam um desempenho relativamente inferior, com ligeira vantagem para o *sistema S3*, conforme indica o gráfico da Figura 4.14.

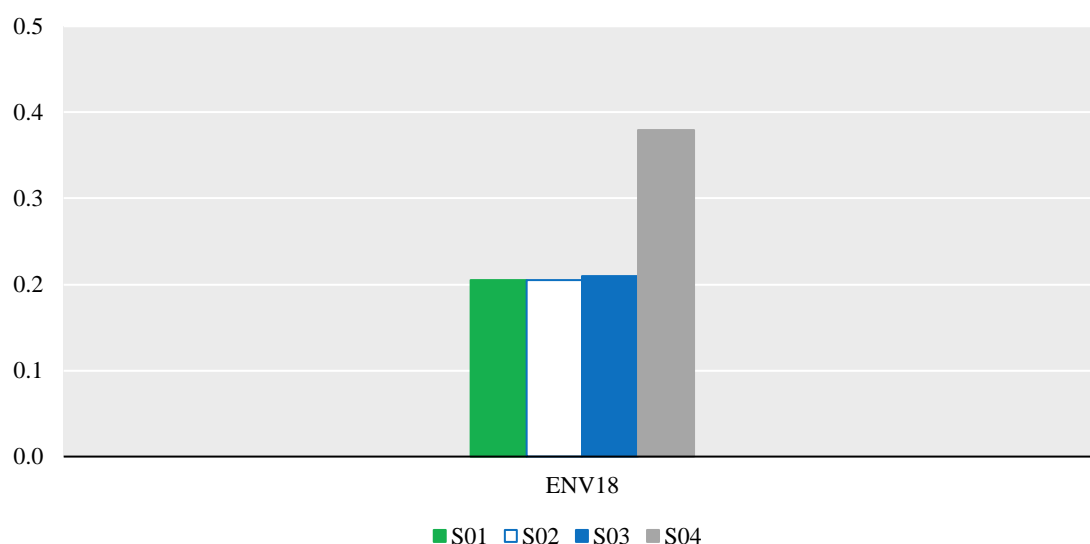


Figura 4.14 – Resultados da avaliação comparativa dos impactos positivos sobre a dimensão ambiental dos sistemas da UFV-AR

⁶⁵ Uma vez que *Áreas protegidas* (ENV18) se trata de um indicador relativo a um impacto ambiental positivo, os desempenhos dos sistemas da UFV-AR são ilustrados em um gráfico à parte a fim de oferecer uma melhor compreensão dos seus resultados.

b) *Dimensão social*

Tendo em vista que a AICV social desta ASCV não contempla modelos de caracterização para os indicadores sociais considerados, seus resultados correspondem àqueles obtidos na análise de ICV acerca da geração de empregos, aceitação social, saúde e segurança dos trabalhadores e direitos de comunidades locais, os quais estão relacionados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados da AICV social dos sistemas da UFV-AR
 Fonte: Ram *et al.* (2020), Sena *et al.* (2016), Hämäläinen *et al.* (2009) e Freedom House (2020)

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Geração de empregos	SOC01	empregos.ano/MW	62,41	62,41	60,40	52,57
Aceitação social	SOC02	adimensional	Alto	Alto	Alto	Alto
Saúde e segurança	SOC03	acidentes.ano/kWh	$4,73 \times 10^{-6}$	$5,33 \times 10^{-6}$	$5,18 \times 10^{-6}$	$5,05 \times 10^{-6}$
Comunidades locais	SOC04	adimensional	0,375	0,375	0,275	0,495

A Figura 4.15 ilustra os resultados referente aos impactos sociais negativos associados à geração de 1,0 kWh de energia a partir de dos sistemas da UFV-AR. Nela, verifica-se que o *sistema S1* apresenta o melhor desempenho no indicador social *Saúde e segurança dos trabalhadores* (SOC03), enquanto que o *sistema S2*, o pior.

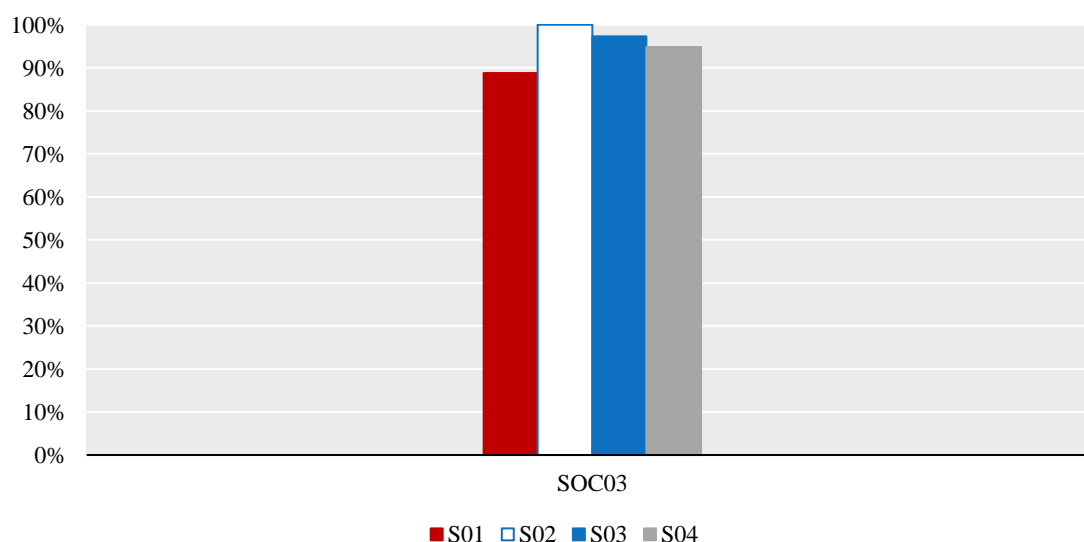


Figura 4.15 – Resultados da avaliação comparativa dos impactos negativos sobre a dimensão social associados à geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR

Paralelamente, a Figura 4.16 apresenta os resultados comparativos dos impactos sociais positivos gerados por esses mesmos quatro sistemas. No que diz respeito ao indicador *Geração de empregos* (SOC01), os sistemas *S1* e *S2* se destacam como aqueles

relacionados a um maior número de novos postos de trabalhos criados. No indicador *Aceitação social* (SOC02), observa-se que todos os sistemas da UFV-AR apresentam a mesma aprovação pública local. Já com relação ao indicador *Comunidades locais* (SOC04), o *sistema S4* está associado a um maior respeito aos direitos humanos.

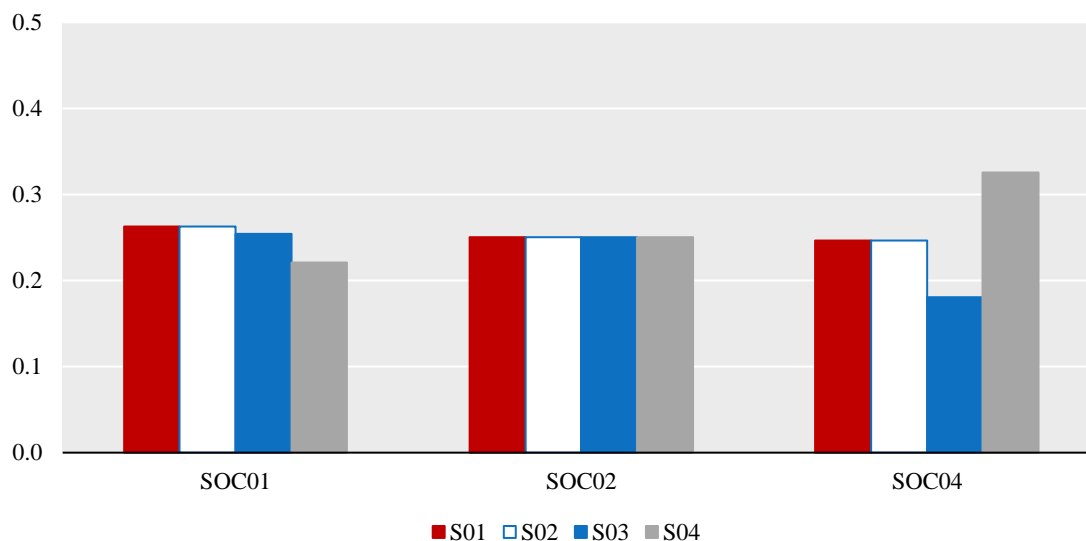


Figura 4.16 – Resultados da avaliação comparativa dos impactos positivos sobre a dimensão social dos sistemas da UFV-AR

c) Dimensão econômica

Analogamente à dimensão social, a maioria dos indicadores econômicos considerados nesta etapa equivale-se das medidas obtidas na etapa anterior de análise de ICV, com exceção do *LCOE* (ECO05) e do *Payback period* (ECO06). O cálculo dessas duas métricas fundamentais para análises econômicas se deu com base nas taxas de degradação das tecnologias solares fotovoltaicas (Tabela 4.3), em uma tarifa de energia elétrica estática igual a R\$ 0,75/kWh (0,22 US\$/kWh)⁶⁶ e em uma taxa de desconto de 10%. A Tabela 4.15 reúne os custos ao longo do ciclo de vida e os desempenhos nos indicadores *LCOE* (ECO05) e *Payback period* (ECO06) dos sistemas da UFV-AR.

A Figura 4.17 ilustra esses resultados e revela que o *sistema S1* possui o melhor desempenho em todos os indicadores econômicos considerados, exceto no *Custos de O&M* (ECO03). Por outro lado, o *sistema S4* se mostra como aquele menos atrativo em termos econômico-financeiros, apresentando o pior desempenho em três dos seis indicadores considerados para o CCV dos sistemas da UFV-AR.

⁶⁶ A taxa de câmbio considerada foi de R\$ 3,45/US\$, média do ano de 2016, período no qual foram realizadas as medições de geração de energia elétrica dos sistemas da UFV-AR por Fontenele (2018).

Tabela 4.15 – Resultados da AICV econômico dos sistemas da UFV-AR
 Fonte: Jordan & Kurtz (2013) e Fontenele (2018)

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Custo do ciclo de vida	-	US\$/kWh	$6,88 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-2}$	$7,58 \times 10^{-2}$	$8,48 \times 10^{-2}$
P&D	ECO01	US\$/kWh	$9,10 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$
Investimento	ECO02	US\$/kWh	$5,49 \times 10^{-2}$	$7,46 \times 10^{-2}$	$6,12 \times 10^{-2}$	$6,90 \times 10^{-2}$
O&M	ECO03	US\$/kWh	$4,15 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-3}$
Descomissionamento e destinação de resíduos	ECO04	US\$/kWh	$6,85 \times 10^{-4}$	$7,72 \times 10^{-4}$	$7,98 \times 10^{-4}$	$8,62 \times 10^{-4}$
LCOE	ECO05	US\$/kWh	$6,88 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-2}$	$7,58 \times 10^{-2}$	$8,48 \times 10^{-2}$
Payback period	ECO06	Anos	6,36	8,71	6,93	8,68

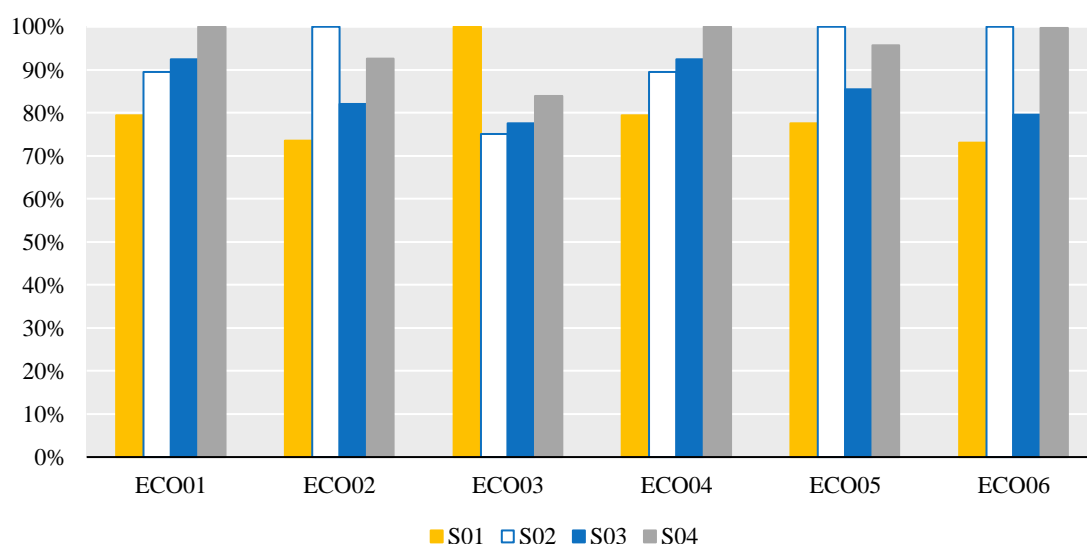


Figura 4.17 – Resultados da avaliação comparativa dos custos associados à geração de 1 kWh a partir dos sistemas da UFV-AR

4.3.2.5. Integração dos resultados

a) Normalização

De posse dos resultados absolutos da AICV, a metodologia de ASCV proposta segue para a integração dos resultados, cujo primeiro passo consiste em normalizar internamente os resultados obtidos pelos sistemas fotovoltaicos em cada um dos indicadores de sustentabilidade considerados. Para isso, aplicou-se a Equação 3.2 e os resultados relativos obtidos por meio dessa operação estão relacionados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Resultados da AICV dos sistemas da UFV-AR normalizados internamente

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental					
Aquecimento global	ENV01	0,299	0,242	0,235	0,224
Depleção da camada de ozônio	ENV02	0,275	0,227	0,281	0,217
Radiação ionizante	ENV03	0,276	0,232	0,302	0,189
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	0,315	0,247	0,211	0,227
Formação de material particulado fino	ENV05	0,304	0,237	0,236	0,223
Acidificação terrestre	ENV06	0,317	0,245	0,220	0,217
Eutrofização em água doce	ENV07	0,309	0,236	0,293	0,162
Eutrofização marinha	ENV08	0,241	0,196	0,339	0,224
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	0,172	0,142	0,343	0,343
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	0,330	0,244	0,246	0,180
Ecotoxicidade marinha	ENV11	0,322	0,240	0,254	0,184
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	0,371	0,245	0,179	0,206
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	0,325	0,241	0,271	0,164
Uso do solo	ENV14	0,304	0,254	0,218	0,224
Escassez de recursos minerais	ENV15	0,334	0,279	0,230	0,157
Escassez de recursos fósseis	ENV16	0,291	0,238	0,246	0,225
Consumo de água	ENV17	0,128	0,118	0,374	0,380
Áreas protegidas	ENV18	0,205	0,205	0,210	0,379
Dimensão social					
Geração de empregos	SOC01	0,262	0,262	0,254	0,221
Aceitação social	SOC02	0,250	0,250	0,250	0,250
Saúde e segurança	SOC03	0,268	0,238	0,244	0,251
Comunidades locais	SOC04	0,247	0,247	0,181	0,326
Dimensão econômica					
Custos de P&D	ECO01	0,283	0,251	0,242	0,224
Custos de investimento	ECO02	0,292	0,215	0,262	0,232
Custos de O&M	ECO03	0,208	0,277	0,268	0,248
Custos de descomissionamento	ECO04	0,283	0,251	0,242	0,224
LCOE	ECO05	0,286	0,222	0,260	0,232
<i>Payback period</i>	ECO06	0,296	0,216	0,271	0,217

b) Ponderação, agregação e ranqueamento

Após a normalização interna dos resultados obtidos pelos sistemas fotovoltaicos, três especialistas ligados ao setor energético nacional foram consultados para realizarem as comparações *par a par* previstas pelo método AHP. A partir disso, foi possível definir

os pesos de cada um dos indicadores, bem como das dimensões de sustentabilidade, conforme mencionado nos capítulos anteriores, os quais estão relacionados na Tabela 4.17 e Tabela 4.18⁶⁷.

Tabela 4.17 – Pesos atribuídos aos indicadores de sustentabilidade através de procedimentos de ponderação

Indicador	Código	Peso
Dimensão ambiental		
Aquecimento global	ENV01	0,253
Depleção da camada de ozônio	ENV02	0,042
Radiação ionizante	ENV03	0,013
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	0,036
Formação de material particulado fino	ENV05	0,031
Acidificação terrestre	ENV06	0,016
Eutrofização em água doce	ENV07	0,014
Eutrofização marinha	ENV08	0,012
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	0,022
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	0,019
Ecotoxicidade marinha	ENV11	0,018
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	0,079
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	0,067
Uso do solo	ENV14	0,094
Escassez de recursos minerais	ENV15	0,059
Escassez de recursos fósseis	ENV16	0,059
Consumo de água	ENV17	0,123
Áreas protegidas	ENV18	0,043
Dimensão social		
Geração de empregos	SOC01	0,524
Aceitação social	SOC02	0,262
Saúde e segurança	SOC03	0,099
Comunidades locais	SOC04	0,115
Dimensão econômica		
Custos de P&D	ECO01	0,049
Custos de investimento	ECO02	0,379
Custos de O&M	ECO03	0,087
Custos de descomissionamento	ECO04	0,027
LCOE	ECO05	0,179
<i>Payback period</i>	ECO06	0,278

⁶⁷ É importante mencionar que todos os parâmetros de *razão de consistência* (RC) das comparações *par a par* ficaram abaixo de 0,096, ou seja, inferior a 0,10, sendo, portanto, a sua inconsistência tolerável.

Tabela 4.18 – Pesos atribuídos às dimensões de sustentabilidade através de procedimentos de ponderação

Dimensão	Código	Peso
Ambiental	ENV	0,571
Social	SOC	0,286
Econômica	ECO	0,143

Assim, os resultados normalizados obtidos pelos sistemas da UFV-AR em cada um dos indicadores de sustentabilidade foram ponderados, segundo os pesos listados na Tabela 4.17, e somados dentro de cada dimensão da sustentabilidade, resultando nos indicadores de desempenho por dimensão apresentados na Tabela 4.19. Nela, é possível verificar, por exemplo, que o *sistema S1* da UFV-AR obteve os valores de 0,281, 0,258 e 0,284 para as dimensões ambiental, social e econômica, respectivamente.

Por fim, esses indicadores obtidos pelos sistemas da UFV-AR em cada uma das dimensões da sustentabilidade foram também ponderados, utilizando os pesos relacionados na Tabela 4.18, e somados de modo a se determinar os seus índices globais de sustentabilidade. Como resultado, seus valores corresponderam a 0,275, 0,233, 0,253 e 0,239 para os sistemas *S1*, *S2*, *S3* e *S4* da UFV-AR, nesta ordem, conforme pode ser observado na Tabela 4.19.

Com base nesses resultados, pode-se inferir que o *sistema S1* da UFV-AR apresenta *a priori* um melhor desempenho nas dimensões ambiental, social e econômica e, conseqüentemente, em termos de sustentabilidade. Na dimensão ambiental o *sistema S1* é seguido pelos sistemas *S3*, *S4* e *S2*. Com relação aos desempenhos sociais, o *sistema S2* vem na sequência do *S1* e os sistemas *S3* e *S4* fecham a lista. Já na dimensão econômica, o *sistema S3* se destaca com o segundo melhor desempenho, sendo acompanhado pelos sistemas *S4* e *S2*. Considerando a sustentabilidade como um todo, a ASCV classifica o *sistema S3* em segundo lugar, o *sistema S4* em terceiro e o *sistema S2* em quarto.

Tabela 4.19 – Resultados da ASCV dos sistemas da UFV-AR

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental	ENV	0,281	0,225	0,254	0,240
Aquecimento global	ENV01	0,299	0,242	0,235	0,224
Depleção da camada de ozônio	ENV02	0,275	0,227	0,281	0,217
Radiação ionizante	ENV03	0,276	0,232	0,302	0,189
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	0,315	0,247	0,211	0,227
Formação de material particulado fino	ENV05	0,304	0,237	0,236	0,223
Acidificação terrestre	ENV06	0,317	0,245	0,220	0,217
Eutrofização em água doce	ENV07	0,309	0,236	0,293	0,162
Eutrofização marinha	ENV08	0,241	0,196	0,339	0,224
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	0,172	0,142	0,343	0,343
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	0,330	0,244	0,246	0,180
Ecotoxicidade marinha	ENV11	0,322	0,240	0,254	0,184
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	0,371	0,245	0,179	0,206
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	0,325	0,241	0,271	0,164
Uso do solo	ENV14	0,304	0,254	0,218	0,224
Escassez de recursos minerais	ENV15	0,334	0,279	0,230	0,157
Escassez de recursos fósseis	ENV16	0,291	0,238	0,246	0,225
Consumo de água	ENV17	0,128	0,118	0,374	0,380
Áreas protegidas	ENV18	0,205	0,205	0,210	0,379
Dimensão social	SOC	0,258	0,255	0,244	0,244
Geração de empregos	SOC01	0,262	0,262	0,254	0,221
Aceitação social	SOC02	0,250	0,250	0,250	0,250
Saúde e segurança	SOC03	0,268	0,238	0,244	0,251
Comunidades locais	SOC04	0,247	0,247	0,181	0,326
Dimensão econômica	ECO	0,284	0,225	0,263	0,229
Custos de P&D	ECO01	0,283	0,251	0,242	0,224
Custos de investimento	ECO02	0,292	0,215	0,262	0,232
Custos de O&M	ECO03	0,208	0,277	0,268	0,248
Custos de descomissionamento	ECO04	0,283	0,251	0,242	0,224
LCOE	ECO05	0,286	0,222	0,260	0,232
Payback period	ECO06	0,296	0,216	0,271	0,217
Sustentabilidade	SUS	0,275	0,233	0,253	0,239

4.3.3. Etapa 3: Interpretação dos resultados

4.3.3.1. Identificação de questões relevantes

Nesse primeiro momento, serão analisados mais detalhadamente os achados da fase anterior de AICV com o intuito de melhor compreendê-los e favorecer a identificação de pontos críticos e oportunidades ao longo dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR. Nesse sentido, buscou-se discriminar a contribuição de cada uma das etapas definidas para os seus ciclos de vida nos seus desempenhos em termos de sustentabilidade. Vale ressaltar que o uso desse recurso nem sempre foi possível devido à utilização de dados agregados em alguns dos indicadores considerados na ASCV, conforme já mencionado anteriormente.

Sendo assim, na dimensão ambiental, os gráficos da Figura 4.18 revelam que os processos *upstream* das cadeias de valor dos quatro sistemas da UFV-AR são os maiores responsáveis pelos seus impactos negativos, correspondendo em média a 90% dos impactos totais. Tal quadro fornece algumas pistas para entender melhor os seus desempenhos ao longo dos indicadores ambientais considerados. Por exemplo, isso explica os resultados ruins obtidos pelos sistemas *S1* e *S2* nos indicadores de *Eutrofização marinha* (ENV08), *Ecotoxicidade terrestre* (ENV09) e *Consumo de água* (ENV17).

Mas só a partir de uma análise mais profunda dos resultados obtidos por ambos os sistemas na etapa de *Produção de materiais e equipamentos* junto ao software *SimaPro* que é possível ter uma visão mais clara das suas causas. Alguns processos específicos da produção dos módulos fotovoltaicos multi-Si aparecem como os principais agentes dos impactos gerados juntos a esses indicadores, são eles: emissão de águas residuais durante a produção de células solares de silício cristalino, produção das suas lâminas (ou *wafers*) e processos de beneficiamento do silício, respectivamente.

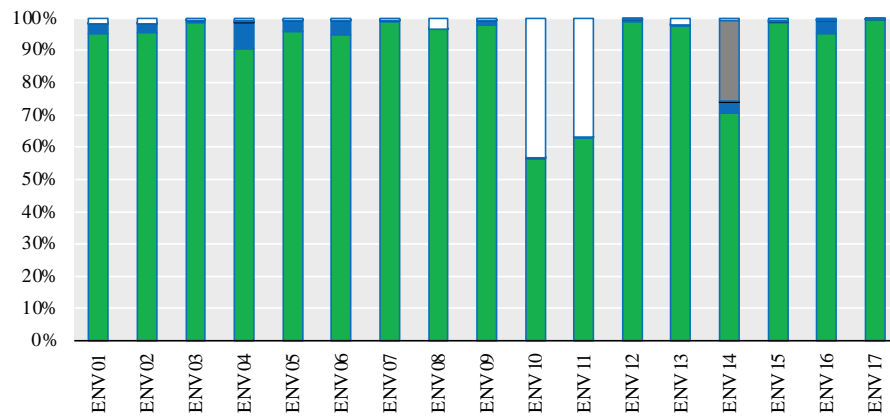
Após a etapa de *Produção de materiais e equipamentos*, a etapa de distribuição é aquela que mais se sobressai nos indicadores ambientais provenientes do *ReCiPe 2016*. Em média, essa etapa é responsável por aproximadamente 3% dos impactos negativos causados pelo ciclo de vida da UFV-AR sobre o meio ambiente. Outros pontos que ainda merecem atenção correspondem à participação tanto da etapa de *O&M* no indicador *Uso do solo* (ENV14), quanto da etapa de *Descomissionamento e destinação dos resíduos* nos indicadores *Ecotoxicidade em água doce* (ENV10) e *Ecotoxicidade marinha* (ENV11).

Esse cenário se justifica, por um lado, pelo fato da etapa de *O&M* ter sido associada ao uso e a ocupação do solo dos sistemas da UFV-AR. Por outro lado, os impactos relacionados à ecotoxicidade em água doce e marinha verificados na etapa de *Descomissionamento e destinação dos resíduos* são, sobretudo, devido à incineração de resíduos plásticos e metálicos. Ao olhar mais de perto o indicador *Aquecimento global* (ENV01) – tema que se encontra atualmente no topo das preocupações ambientais da agenda internacional –, verifica-se que o uso de energia proveniente de recursos fósseis em processos industriais e a mineração e preparação do carvão para suprimento energético da cadeia de valor dos componentes da UFV-AR são os principais responsáveis pelos seus impactos.

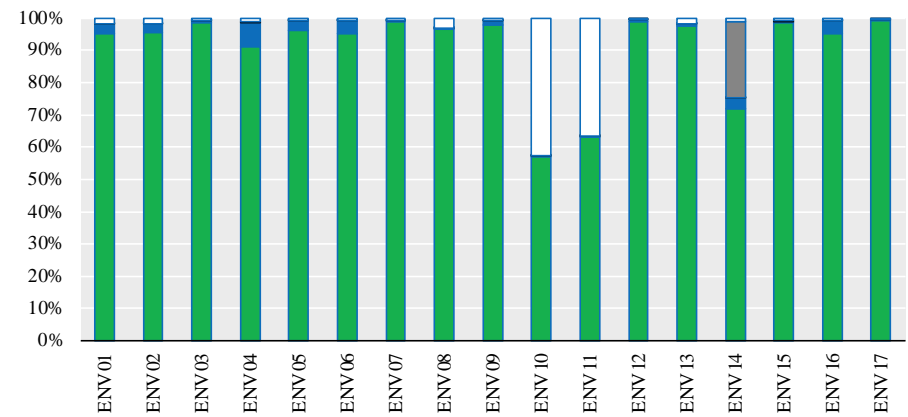
No que diz respeito ao indicador *Áreas Protegidas* (ENV18), os processos *midstream* e *downstream* se destacam nas cadeias de valor dos sistemas *S1*, *S2* e *S3*; enquanto que os processos *upstream* dominam os impactos associados ao sistema *S4* (Figura 4.19). O primeiro caso justifica-se pelo fato do Brasil – onde ocorrem os processos *midstream* – possuir um indicador *PAME* superior àqueles apresentados por China e Malásia – países nos quais se dão os processos *upstream*. A mesma lógica é válida para o segundo caso, em que o melhor indicador *PAME* está associado à Alemanha – onde ocorrem os processos *upstream*.

Ao analisar a contribuição das etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR para os indicadores sociais, a Figura 4.20 revela que a etapa de *Construção e Instalação* é responsável pela maior parte da geração de novos postos de trabalhos (SOC01)⁶⁸ e também de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho (SOC03). É importante destacar que os resultados apresentados com relação a este último indicador levam em consideração não só o desempenho dos países de origens das tecnologias fotovoltaicas, mas também a própria geração de emprego ao longo dos seus ciclos de vida. Desse modo, como a etapa de *Construção e Instalação* está associada a um maior número de novos postos de trabalho gerados, ela está também associada a um maior risco de acidentes.

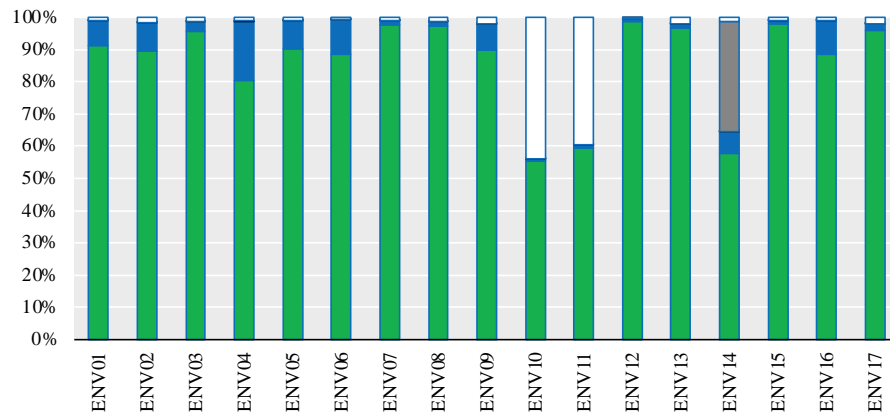
⁶⁸ Dado que os empregos *permanentes* e *temporários* gerados ao longo do ciclo de vida da UFV-AR possuem durações distintas, eles não são equivalentes no mundo real. Por exemplo, a quantidade de postos de trabalhos gerados na etapa de *Produção de materiais e equipamentos* não é equivalente àquela de postos de trabalhos gerados durante a etapa de *Construção e Instalação* devido, sobretudo, ao período de duração relativamente mais curto desta última. Apesar disso, a presente tese adotou pesos iguais para ambos os tipos de empregos gerados em função da complexidade envolvida na contabilização de suas diferentes durações. Vale mencionar que essa premissa não compromete os resultados finais de ranqueamento das alternativas analisadas no estudo de caso pelo fato da quantidade de empregos gerados na etapa de *Construção e Instalação* ser considerada como igual para todos os quatros sistemas da UFV-AR.



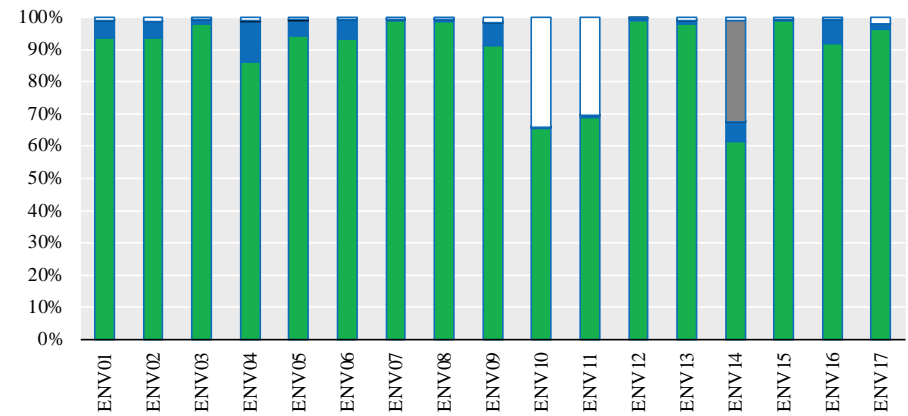
(a) S1



(b) S2



(c) S3



(d) S4

■ Etapa de Produção de materiais e equipamentos
 ■ Etapa de Distribuição de materiais e equipamentos
 ■ Etapa de Construção e Instalação
■ Etapa de Operação e Manutenção
 □ Etapa de Descomissionamento e destinação de resíduos

Figura 4.18 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para os indicadores ENV01-ENV17

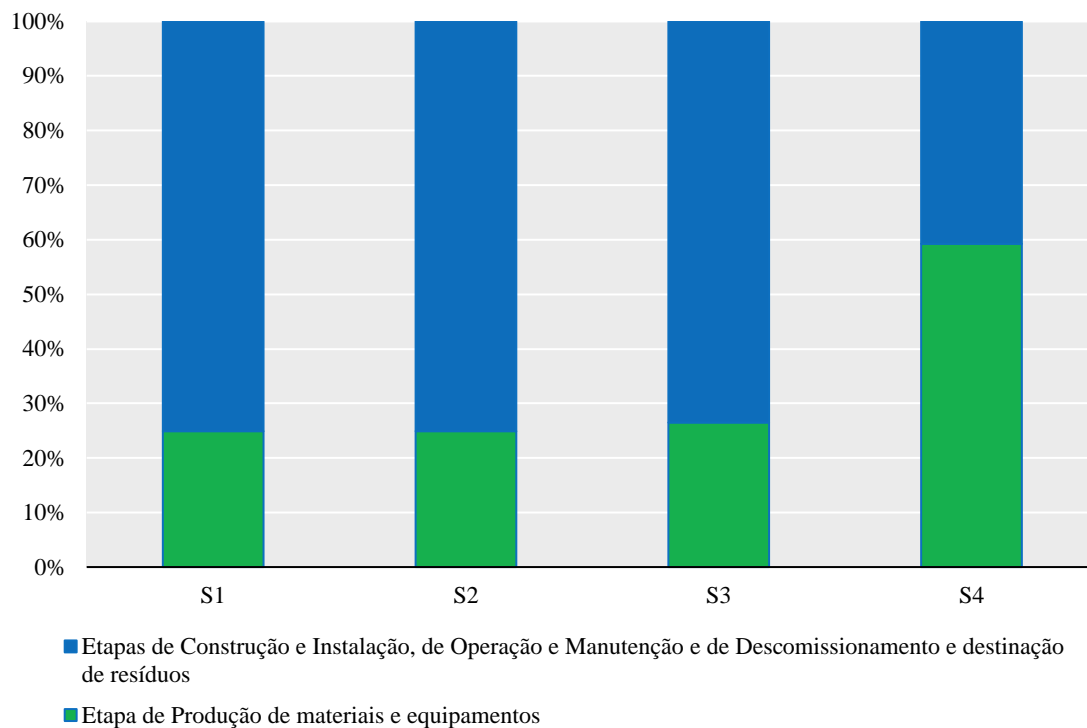


Figura 4.19 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para o indicador ambiental *ENV18*

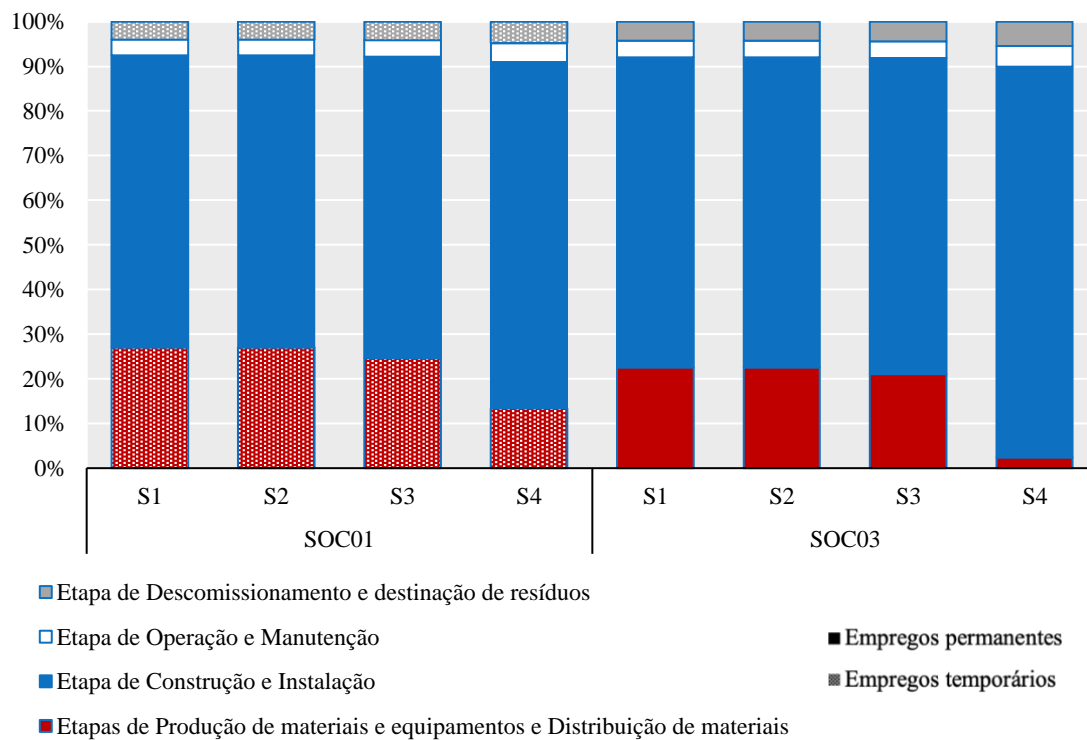


Figura 4.20 – Contribuição das etapas do ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR para os indicadores sociais *SOC01* e *SOC03*

No que diz respeito à dimensão econômica, a Figura 4.21 mostra a contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para o CCV. Nela, é possível observar que os processos *upstream* das suas cadeias respondem por mais de 90% dos custos totais. Em seguida, aparece a etapa de *O&M* e, por fim, a etapa de *Descomissionamento e destinação de resíduos*. Além disso, pode-se constatar que os *Custos de O&M* (ECO03) do sistema S1 têm uma maior participação nos custos totais quando comparados com aqueles dos demais sistemas. Isso vai ao encontro do que é relatado pela literatura especializada e está também consistente com os dados econômicos considerados na ASCV.

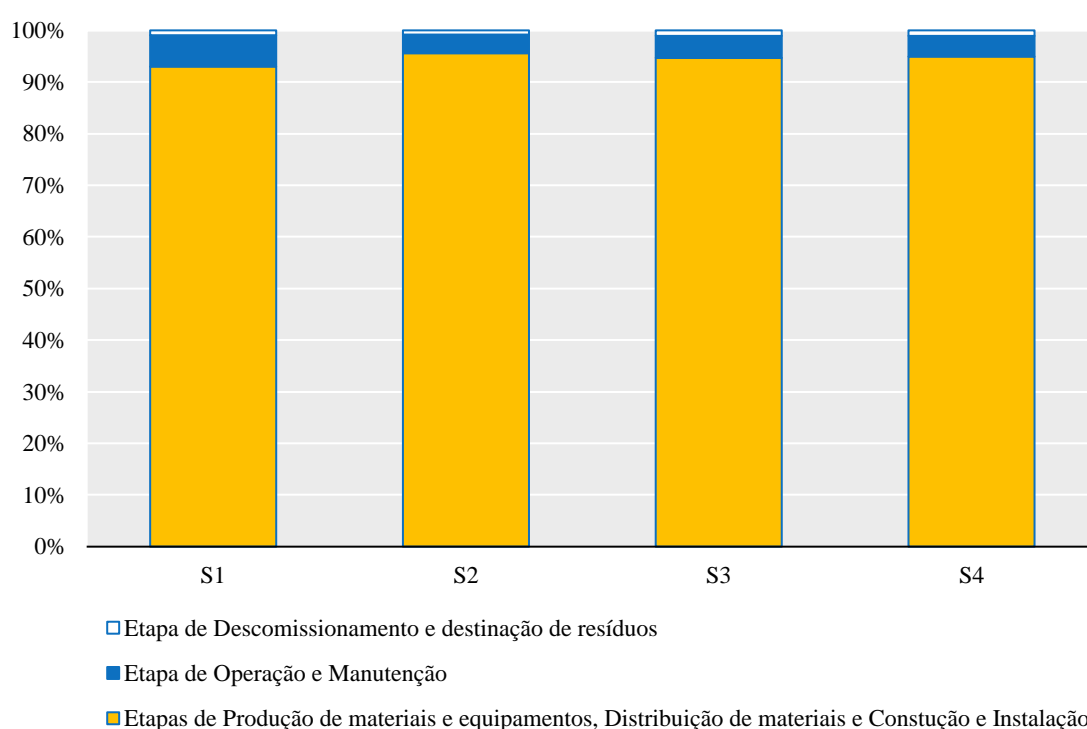
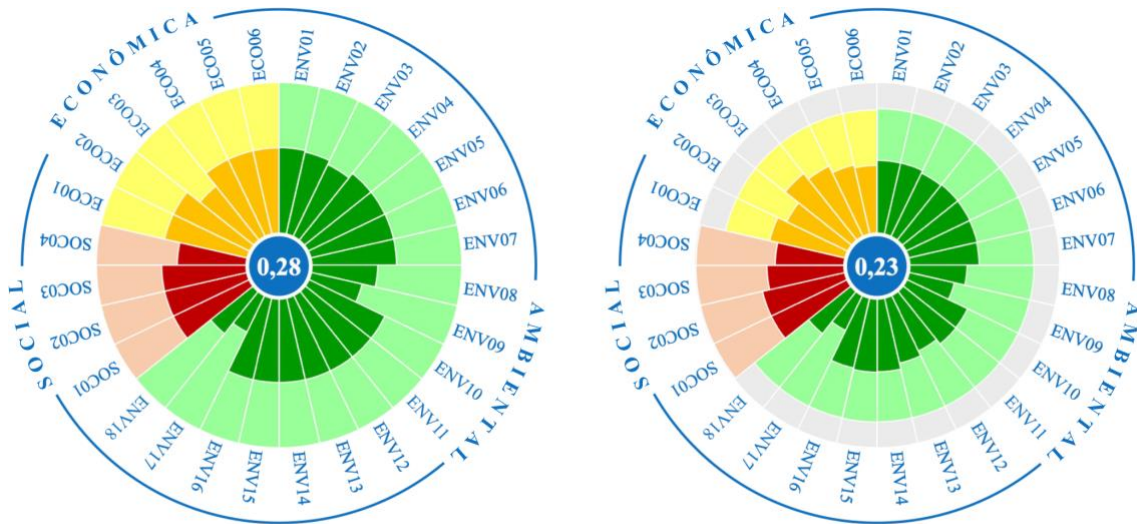


Figura 4.21 – Contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR para o CCV

4.3.3.2. Diagrama holístico de sustentabilidade

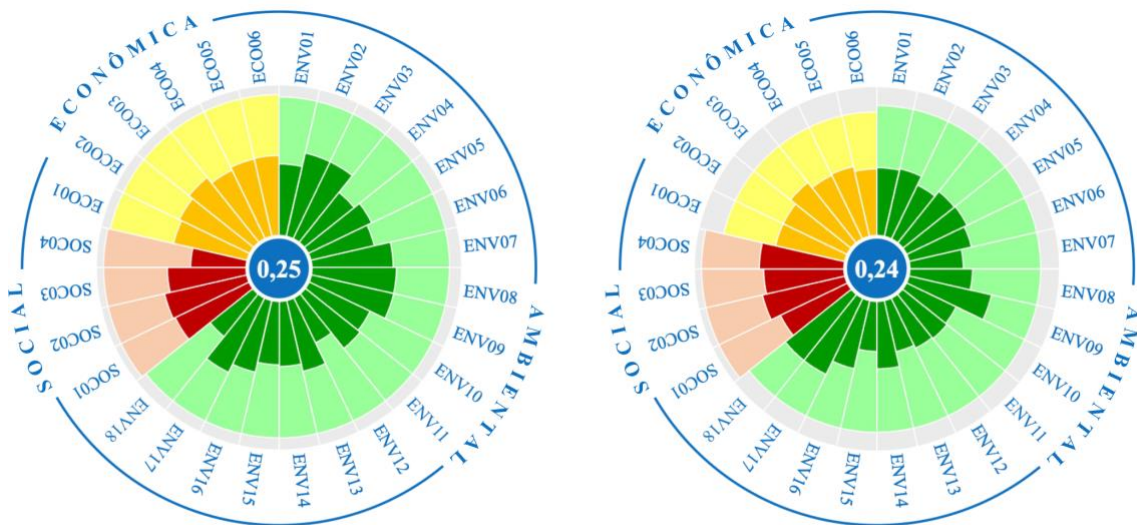
No capítulo anterior foi visto que a adoção de uma medida de mérito global como único parâmetro para avaliar os quatro sistemas da UFV-AR pode levar a soluções desequilibradas e impedir decisões intermediárias. Soma-se ainda a isso o fato da grande quantidade de resultados obtidos nesta ASCV estar disposta em longas tabelas, podendo comprometer a sua interpretação e, conseqüentemente, a tomada de decisão. Diante dessa situação, este item aborda os resultados obtidos na seção anterior de modo a explorá-los através de uma representação gráfica denominada *Diagrama holístico de*

sustentabilidade. Nele é possível conhecer os desempenhos dos sistemas tanto em termos de sustentabilidade quanto nas dimensões ambiental, social e econômica e também nos indicadores de sustentabilidade, conforme apresentado na Figura 4.22.



(a) S1: multi-Si com rastreador solar

(b) S2: multi-Si com estrutura fixa



(c) S3: a-Si

(d) S4: CIGS

Figura 4.22 – Representação gráfica da ASCV comparativa dos sistemas da UFV-AR

Mais do que indicar o sistema mais sustentável, esses diagramas permitem uma análise mais holística que favorece a identificação de pontos críticos e de oportunidades associados ao ciclo de vida dos sistemas da UFV-AR eventualmente ocultados por uma *pontuação única*. Em outras palavras, têm o potencial de apoiar a tomada de decisão orientada pela sustentabilidade levando em consideração a interseção entre as características das alternativas envolvidas com eventuais restrições nas dimensões ambiental, social e econômica. Por exemplo, embora uma alternativa se apresente como

aquela de melhor desempenho em termos de sustentabilidade, se houverem (ou surgirem) preocupações relacionadas aos seus indicadores mais críticos, outras alternativas poderiam ser priorizadas. No caso da presente ASCV, isso poderia ocorrer se porventura surgissem algum tipo de restrição referente aos indicadores *Ecotoxicidade terrestre* (ENV09), *Consumo de água* (ENV17), *Comunidades locais* (SOC04) e/ou *Custos de O&M* (ECO03) – indicadores nos quais o *sistema S1*, até então aquele de melhor desempenho global, apresenta os desempenhos relativos mais extremamente negativos.

Note que recorrer a esse recurso gráfico ganha ainda mais relevância quando se precisa comparar os sistemas *S2* e *S4*. Apesar do *sistema S4* apresentar uma pontuação final maior, a diferença para o *sistema S2* é sutil, e esse resultado pode ser outro caso a análise dos seus desempenhos intermediários e específicos esteja subordinada a eventuais restrições ambientais, sociais e/ou econômicas.

4.3.3.3. Verificação de sensibilidade

Para este estudo de caso, foram realizadas duas verificações de sensibilidade. A primeira delas corresponde à análise dos efeitos da transferência da produção da tecnologia de multi-Si para o Brasil sobre os resultados obtidos pelos quatro sistemas da UFV-AR com relação aos indicadores e dimensões ambientais, sociais e econômicas, bem como o índice de sustentabilidade. Já a segunda análise de sensibilidade consiste na atribuição de diferentes pesos às dimensões da sustentabilidade durante o procedimento de ponderação de modo a posicionar a dimensão social no topo das prioridades da ASCV, vindo, em seguida, as dimensões econômica e ambiental, nesta ordem.

a) Cenário 1: Transferência da produção da tecnologia de multi-Si para o Brasil

Neste cenário, a metodologia de ASCV proposta foi aplicada sobre os sistemas da UFV-AR supondo a transferência da produção dos módulos fotovoltaicos de multi-Si da Malásia para o Brasil. Para isso, foram considerados a alteração da matriz elétrica que alimenta os processos industriais componentes da produção dos módulos multi-Si e a exclusão dos transportes marítimos anteriormente necessários para sua importação até o Brasil. Além disso, os indicadores sociais relativos à *Geração de emprego* (SOC01), *Saúde e segurança dos trabalhadores* (SOC03) e *Comunidades locais* (SOC04) também sofreram alterações de modo a representar essa mudança na cadeia produtiva dos sistemas com módulos multi-Si. Com relação à dimensão econômica, não foram realizadas

alterações no presente cenário. Note que essas mudanças afetam somente os sistemas *S1* e *S2* uma vez que são os únicos sistemas que possuem a tecnologia fotovoltaica multi-Si.

Como resultado, foi obtida uma AICV diferente daquela da ASCV original (ver Tabela C. 1 e Tabela C. 2 do Anexo C), o que levou, conseqüentemente, a outros indicadores derivados dos procedimentos de normalização e ponderação (Tabela C. 4 e Tabela C. 5 do Anexo C, respectivamente). Vale ressaltar que os pesos atribuídos aos indicadores e dimensões de sustentabilidade permaneceram os mesmos neste cenário. A Tabela 4.20 resume os desempenhos obtidos pelos quatro sistemas da UFV-AR segundo as dimensões ambiental, social e econômica e os seus índices globais de sustentabilidade. Nela, é possível observar que o *Cenário 1* ranqueia os sistemas solares fotovoltaicos em uma outra ordem. Mantém os *sistemas S1* e *S2* nas primeira e segunda posições, mas alterna as classificações entre os *sistemas S2* e *S4*. Desse modo, fornece *a priori* resultados coerentes com as hipóteses adotadas junto aos dados de entrada da ASCV na medida em que o *sistema S2* melhorou seu desempenho em termos de sustentabilidade com relação ao *sistema S4*.

Apesar disso, é interessante ainda notar que o *sistema S2* não superou o *sistema S4* na dimensão ambiental. Ao trazer da Malásia para o Brasil a produção de painéis multi-Si, o *Cenário 1* assume uma matriz elétrica menos intensiva em carbono, porém, mais dependente de recursos hídricos. Ao mesmo tempo em que isso implica em uma redução das emissões de GEE, atrela uma maior demanda de água aos processos *upstream* tanto do *sistema S1* quanto do *sistema S2*. Considerando o desempenho dos quatro sistemas nos demais indicadores ambientais, bem como a importância atribuída a eles, o balanço entre os benefícios e malefícios da nacionalização da produção dos painéis multi-Si não foi suficiente para que o *sistema S2* ultrapassasse o *sistema S4* na dimensão ambiental⁶⁹.

Tabela 4.20 – Resultados simplificados da ASCV dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental	ENV	0,284	0,228	0,252	0,236
Dimensão social	SOC	0,263	0,260	0,239	0,238
Dimensão econômica	ECO	0,284	0,225	0,263	0,229
Sustentabilidade	SUS	0,278	0,237	0,250	0,236

⁶⁹ Para mais informações sobre os resultados da AICV obtidos pelos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*, ver Anexo C.

Ademais, é bom lembrar que, embora o *sistema S1* tenha melhorado o seu desempenho global em comparação com os resultados originais, isso não significa que os dois resultados são comparáveis. Conforme mencionado no capítulo anterior, não está previsto que os resultados obtidos através da metodologia proposta para estudos de ASCV sejam colocados em um contexto mais amplo que inclua outras possibilidades externas à análise. Uma prova disso é o fato de o *sistema S3* não ter tido seus dados alterados, mas mesmo assim apresentar resultados diferentes na análise principal e nesta verificação de sensibilidade.

b) Cenário 2: Priorização das dimensões social e econômica

No *Cenário 2*, assumiu-se uma priorização das dimensões social e econômica com relação à dimensão ambiental uma vez que esta última foi a prioridade nas análises originais. Nesse processo, os resultados da AICV permaneceram os mesmos, bem como aqueles obtidos após os procedimentos de normalização e ponderação dos indicadores de sustentabilidade. A Tabela 4.21 reúne os pesos adotados para cada uma das dimensões da sustentabilidade no procedimento de ponderação.

Tabela 4.21 – Pesos atribuídos às dimensões de sustentabilidade através de procedimentos de ponderação no *Cenário 2*

Dimensão	Código	Peso
Ambiental	ENV	0,143
Social	SOC	0,571
Econômica	ECO	0,286

Como resultado, os sistemas *S1* e *S3* se mantiveram no topo da classificação derivada do método AHP. No entanto, o *sistema S2* superou novamente o *sistema S4*, assumindo, assim, a terceira posição em termos de sustentabilidade (Tabela 4.22). Analogamente ao que foi observado no *Cenário 1*, os resultados obtidos no *Cenário 2* se mostram consistentes com as novas prioridades conferidas às dimensões de sustentabilidade. Isso porque, ao possuir um desempenho social superior ao *sistema S4*, o *sistema S2* foi capaz de assumir a sua posição graças ao maior peso que foi atribuído à dimensão social.

Tabela 4.22 – Resultados simplificados da ASCV dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 2*

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental	ENV	0,281	0,225	0,254	0,240
Dimensão social	SOC	0,258	0,255	0,244	0,244
Dimensão econômica	ECO	0,284	0,225	0,263	0,229
Sustentabilidade	SUS	0,269	0,242	0,251	0,239

4.3.3.4. Limitações da ASCV

As limitações da presente ASCV se concentram no uso de dados que não são capazes de refletir em toda a sua completude os aspectos, sobretudo, sociais e econômicos dos sistemas da UFV-AR quando colocados dentro do contexto brasileiro. No que tange a dimensão social, essa situação é mais evidente devido à subjetividade e confidencialidade dos dados. Mesmo considerando os indicadores sociais mais empregados por estudos práticos de ASCV na literatura disponível, as informações à disposição possuem conceitos e finalidades bastante amplas. Além disso, é bom destacar que não se teve acesso a dados primários relativos aos aspectos sociais da UFV-AR. Como resultado, a ACV-S realizada no âmbito deste estudo de caso se configura como uma análise de caráter mais macro do que micro (ou *case-specific*).

Limitações semelhantes atinentes à dimensão econômica também merecem atenção. A ausência de dados econômico-financeiros primários, relativos aos custos reais envolvidos na geração de energia elétrica a partir dos sistemas da UFV-AR, bem como dados secundários nacionais, corresponde ao principal obstáculo enfrentado na condução do CCV. Essa situação teve impacto direto na análise do *Cenário 1*, que não contou com mudanças na parte econômica com a transferência da produção dos módulos fotovoltaicos multi-Si da Malásia para o Brasil. Somado a isso, os dados econômicos considerados foram disponibilizados de modo agregado, impossibilitando, assim, uma análise mais profunda acerca da contribuição das etapas dos ciclos de vida dos sistemas da UFV-AR nos seus custos totais. É importante mencionar que essa condição não se restringiu à dimensão econômica. Alguns indicadores sociais e o indicador ambiental *Áreas protegidas* (ENV18) fizeram uso de dados agregados, o que implicou em uma análise mais simplificada dos seus impactos.

Outro fator relevante diz respeito às informações utilizadas para a avaliação das etapas de *Distribuição de materiais e equipamentos* e *Descomissionamento e destinação de resíduos*. Por um lado, não foram considerados dados sociais e econômicos específicos para os transportes compreendidos pela etapa de *Distribuição de materiais e equipamentos* dos sistemas da UFV-AR em razão da dificuldade prática em obtê-los, ainda que a partir de fontes secundárias. Por outro lado, foram assumidos para os componentes da UFV-AR os cenários de fim de vida estabelecidos pela base de dados *Ecoinvent 3.5* e outras fontes secundárias devido a complexidade e as incertezas envolvidas na definição de cenários de fim de vida mais representativos para o Brasil.

Por fim, esta ASCV não contou com uma análise de incerteza conforme previsto no capítulo anterior. Isso porque, embora os dados do seu ICV ambiental disponham de informações de incerteza junto à base de dados *Ecoinvent 3.5*, os dados dos ICVs social e econômico não possuíam informações dessa natureza quando foram coletados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em uma conjuntura em que as fontes renováveis de energia se apresentam como a principal resposta à dependência de combustíveis fósseis e sua repercussão no sistema climático global, a presente tese buscou chamar a atenção para a necessidade de analisá-las à luz dos princípios do desenvolvimento sustentável. Celebradas como neutras em carbono, as fontes renováveis não são conhecidas em sua verdadeira essência, especialmente quando se trata das cadeias de produção de suas tecnologias. Essa ideia foi central para esta pesquisa e mobilizou a abordagem de ciclo de vida como a estratégia preferencial para uma avaliação mais abrangente dessas fontes.

De fato, ao se reconhecer que a maior parte dos impactos socioambientais das tecnologias de transformação de energia de origem renovável não está concentrada na etapa de geração de energia, mas sim distribuída ao longo de suas cadeias produtivas, o uso de ferramentas baseadas no ciclo de vida se mostra particularmente interessante para avaliá-las segundo critérios de sustentabilidade. Tal abordagem fornece uma visão privilegiada para observar mais atentamente a cadeia de produção completa dessas tecnologias. Ou seja, o conjunto de etapas consecutivas que estão envolvidas na sua geração de energia, desde a extração de matérias-primas até o descomissionamento de seus empreendimentos e a destinação de seus resíduos.

Apesar de estar avançando na agenda energética internacional, esse tipo de preocupação não tem angariado o devido espaço no Brasil. A presente pesquisa evidenciou as falhas que existem hoje no seu planejamento elétrico com relação à consideração das particularidades socioambientais das fontes alternativas e renováveis de energia que se encontram em plena expansão na matriz elétrica nacional. Além de revelar que pouco tem sido feito para incorporar a sustentabilidade dessas fontes no processo

decisório do setor, foi visto que essa situação expõe a necessidade de se reformular o modo pelo qual se pensa o futuro da energia no país.

Entretanto, há de se levar em conta que essa não é uma tarefa simples. A ausência de uma ferramenta amplamente aceita e voltada para avaliação da sustentabilidade da geração de energia a partir de fontes renováveis impõe barreiras ao avanço do setor energético nessa direção. Na realidade, esse cenário se revela ainda mais desafiador quando se constata que não se tem à disposição nem mesmo uma metodologia baseada na abordagem de ciclo de vida que seja amplamente aceita e dedicada à sustentabilidade de produtos e serviços em geral.

A partir desse diagnóstico, esta tese se debruçou em descortinar e, sobretudo, como avaliar os principais aspectos de sustentabilidade de tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis no Brasil. Nesse sentido, teve como objetivo central propor uma metodologia de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) partindo da noção de sustentabilidade proposta pelo modelo *Triple Bottom Line* (TBL) (Elkington, 1998) e do entendimento da ASCV como a integração da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S) e Custo do Ciclo de Vida (CCV) (Kloepffer, 2008).

Os primeiros passos na direção dessa nova forma de integrar energia e sustentabilidade esbarraram em obstáculos metodológicos e práticos relativos tanto à definição e uso de indicadores de sustentabilidade relevantes e viáveis quanto à integração dos resultados obtidos a partir da ACV, ACV-S e CCV. O primeiro dos desafios foi parcialmente superado por meio da realização de uma revisão sistemática da literatura, a partir da qual foi definido um conjunto de 28 indicadores de sustentabilidade, sendo 18 ambientais, quatro sociais e seis econômicos. Com relação à integração dos resultados, o Processo Hierárquico Analítico (AHP) foi incorporado à proposta metodológica como o intuito de favorecer a combinação dos desempenhos ambiental, social e econômico das alternativas tendo em vista o objetivo primordial de ranqueá-las segundo seus índices globais de sustentabilidade.

Como forma de não restringir a tomada de decisão a uma única medida de mérito global, foi ainda pensada uma organização estruturada dos resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de ASCV proposta, denominada *Diagrama Holístico de Sustentabilidade*. Ao mesmo tempo em que esse recurso oferece mais praticidade na interpretação dos resultados da ASCV, consegue refletir em toda a sua completude a gama

de questões relativas à sustentabilidade das alternativas analisadas e, conseqüentemente, trazer à luz eventuais *trade-offs* entre elas.

Conforme apresentado no Capítulo 3, a proposta metodológica foi testada através de um estudo de caso que comparou o desempenho em termos de sustentabilidade dos quatro sistemas fotovoltaicos componentes da Usina Solar Fotovoltaica de Alto do Rodrigues (UFV-AR). Os resultados dessa aplicação apontaram o *sistema S1* – composto por módulos de silício policristalino (multi-Si) instalados em estruturas com rastreadores solares mono-axiais –, como aquele mais sustentável. Por outro lado, o *sistema S2* – composto também por módulos multi-Si, mas montados em estruturas fixas –, apresentou o pior desempenho de sustentabilidade. Os sistemas *S3* – com módulos de silício amorfo (a-Si) – e *S4* – com módulos de filme fino de disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS) –, ambos montados em estruturas fixas, foram classificados nas posições intermediárias de segundo e terceiro lugares, respectivamente.

Em conjunto, esses achados sugerem que a eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica corresponde a uma variável bastante significativa na contabilização dos impactos das tecnologias solares fotovoltaicas com relação a geração de 1,0 kWh. Ao se analisar a classificação dos sistemas *S1* e *S2*, ficou evidente que os benefícios da energia elétrica gerada adicionalmente em função do emprego de rastreadores solares superaram os malefícios atrelados à cadeia de valor desses dispositivos. De modo análogo, é possível também estimar que a disparidade entre as eficiências das tecnologias a-Si e de filme fino de CIGS foi o fator predominante nos seus desempenhos finais.

No entanto, é bom ressaltar que o fato da eficiência de conversão de energia ser importante para o desempenho de sustentabilidade dos sistemas solares fotovoltaicos não faz dela o seu único fator de influência. Apesar do *sistema S2* apresentar uma eficiência superior ao do *sistema S4*, sua posição no *ranking* de sustentabilidade foi inferior à deste último. Tendo em vista que a dimensão ambiental foi aquela de maior peso na ASCV, o melhor desempenho ambiental do *sistema S4* foi determinante para o seu melhor resultado em termos de sustentabilidade. Como foi visto no Capítulo 4, os processos *upstream* da cadeia de valor da tecnologia de multi-Si do *sistema S2* estão associados a um maior consumo de água, cujo indicador ambiental é aquele de segundo maior peso.

Além desse, a maioria dos impactos ambientais dos sistemas solares fotovoltaicos analisados ficou, via de regra, concentrada na etapa de *Produção de materiais e equipamentos*. Em números, isso corresponde em média a 90% dos impactos ambientais

negativos dos seus ciclos de vida completos. Situação semelhante também foi observada nas dimensões social e econômica, onde as maiores contribuições dos seus indicadores decorreram dos processos *upstream* das cadeias de valor dos sistemas. Isso vai ao encontro daquilo que tem sido reportado pela literatura especializada e evidencia a relevância de se adotar a abordagem de ciclo de vida para avaliar a sustentabilidade de fontes renováveis, tal como a fonte solar fotovoltaica, na medida em que suas interações com as dimensões ambiental, social e econômica não estão centralizadas na etapa de geração de energia.

Mais do que isso, esse quadro indica que a melhoria dos desempenhos ambiental, social e econômico desses sistemas passa necessariamente por intervenções nos processos *upstream* das suas cadeias de valor. Por exemplo, o *Cenário 1*, considerado no âmbito das análises de sensibilidade do estudo de caso, explorou a possibilidade de transferir a produção de módulos multi-Si da Malásia para o Brasil. Ao mesmo tempo em que reduziria as pegadas de carbono dos sistemas *S1* e *S2*, essa mudança acarretaria um aumento de suas pegadas hídricas na medida em que a matriz elétrica nacional é menos intensiva em carbono, porém mais dependente de recursos hídricos.

É interessante notar como o *Cenário 1* ilustrou bem como algumas estratégias bem intencionadas sob determinado ponto de vista podem representar prejuízos não propositais em outras áreas. Ou, em outras palavras, uma transferência de impactos entre os diferentes aspectos de sustentabilidade que nesse caso ocorreu entre os indicadores de *Aquecimento global* e *Consumo de água*. Essa descoberta só foi possível graças à análise mais holística oferecida pela abordagem de ciclo de vida que possibilita identificar a ocorrência de *trade-offs* não só dentro do conjunto de indicadores de sustentabilidade, como também entre diferentes etapas e regiões geográficas atinentes à cadeia de valor de produtos e serviços.

Ainda no que concerne à melhoria do desempenho dos sistemas fotovoltaicos em termos de sustentabilidade, é notório que outras medidas podem ser adotadas em suas etapas de *Produção de materiais e equipamentos*. *Eficientizar* energeticamente os processos industriais, priorizar um consumo de energia baseada em recursos renováveis, tornar mais racional o uso de matérias-primas e favorecer o emprego de materiais reciclados e menos intensivo em carbono e energia são alguns exemplos. Além de repercutirem mais diretamente em seus aspectos ambientais e econômicos, tais medidas têm também potencial de ecoar nos aspectos sociais dos sistemas.

No que diz respeito mais especificamente à metodologia desenvolvida, sua aplicação por meio do estudo de caso demonstrou consistência com relação ao seu propósito central. Isso porque foi capaz de ranquear os diferentes sistemas solares fotovoltaicos a partir de seus aspectos ambientais, sociais e econômicos; como também gerou resultados coerentes com as hipóteses adotadas nas análises de sensibilidade do estudo de caso. Desse modo, entende-se que, apesar da metodologia ter sido aplicada a um empreendimento pontual relativo à fonte solar fotovoltaica, nada impede que possa ser utilizada para avaliar comparativamente outros tipos de empreendimentos relativos a outras fontes de energia.

Todos os pontos até aqui sintetizados conferem à metodologia proposta os requisitos necessários para a sua validação como ferramenta de apoio à sustentabilidade de tecnologias de transformação de energia de origem renovável, favorecendo a identificação de eventuais riscos e oportunidades ambientais, sociais e econômicas ao longo das suas cadeias de valor. Sendo assim, tal metodologia de ASCV mostrou potencial para orientar a tomada de decisão do setor elétrico segundo critérios de sustentabilidade.

No entanto, considerando que a presente pesquisa se desenvolveu sobre algumas hipóteses, a metodologia de ASCV por ela proposta apresenta certas limitações. A mais evidente corresponde a adoção de um conjunto reduzido de indicadores sociais. Ficou claro no decorrer desta tese que essa situação reflete a sub-representação da dimensão social em estudos de ASCV disponíveis na literatura dedicada à geração de energia, como também voltada para produtos e serviços de um modo geral. Como foi visto no Capítulo 2, o acesso restrito a dados sociais das organizações e a subjetividade da maior parte dos temas sociais são os principais obstáculos na avaliação dos impactos sociais no âmbito da ASCV. Mesmo aqueles que foram aqui considerados podem apresentar limitações, como é o caso dos indicadores sociais *Aceitação social* (SOC04) e *Geração de empregos* (SOC01). Isso porque a metodologia proposta, por um lado, inclui dentro da aceitação social outros problemas socioambientais que podem ser relevantes; e, por outro, se atém a quantificar novos postos de trabalhos sem levar em conta aqueles que foram indiretamente criados em outros setores da economia, nem prever uma diferenciação com relação aos seus horizontes temporais.

Note que essa defasagem temporal não se restringe à geração de empregos. A variabilidade temporal dos impactos, sobretudo, ambientais e sociais nem sempre são explicitados pelas escassas fontes secundárias de dados sociais, nem pelos mecanismos

ambientais de alguns métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) ambiental. Na realidade, a maioria desses impactos são tomados como instantâneos, podendo, portanto, ser assimilados como um “pacote” de potenciais impactos atribuível ao ciclo de vida de produtos e serviços. Em decorrência disso, quando se interpreta os resultados da ASCV, não é possível distinguir *o que* e *como* afetaria as gerações mais atuais e aquelas de um futuro mais distante. Entretanto, tal aspecto é particularmente importante para estudos de sistemas energéticos na medida em que análises prospectivas envolvidas neste processo demandam muitas vezes previsões de impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo do tempo para que, então, se possa traçar caminhos para a energia no futuro.

Ademais, é importante destacar que análises baseadas no ciclo de vida se configuram atualmente como um campo relativamente jovem e em constante aprimoramento. Essa situação é ainda mais evidente no Brasil – onde o Pensamento do Ciclo de Vida é pouco difundido e aplicado –, e quando se deseja ir além da dimensão ambiental, buscando abarcar também as dimensões social e econômica. Desse modo, espera-se que a referida metodologia seja aperfeiçoada conforme se avançam os estudos de A(S)CV no país, principalmente no que se refere ao seu setor energético.

Nesse sentido, sugere-se o aprofundamento de alguns tópicos como desdobramento deste primeiro ensaio metodológico. O primeiro deles consiste no emprego de outros métodos de AMD, como também outras ferramentas de apoio à tomada de decisão – tal como a Análise de Envoltória de Dados (AED) – de modo a conferir os recursos necessários para a integração dos indicadores da ACV, ACV-S e CCV e, sobretudo, para a interpretação dos resultados da ASCV.

Há ainda um espaço para se buscar uma melhor representação da dimensão social através de outros indicadores sociais e fontes de dados mais representativas ao escopo do estudo. Dentro desse contexto, investigações futuras podem dar um enfoque sobre os potenciais impactos sociais, os quais são geralmente pouco abordados por grande parte dos estudos de ASCV. Tendo em vista que a Agenda 2030 se caracteriza atualmente como a principal referência de sustentabilidade, seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) têm o potencial de subsidiar a seleção não só desses indicadores sociais complementares, mas também de outros indicadores ambientais e econômicos. Em um plano mais ambicioso, podem servir como um modelo de sustentabilidade a ser compatibilizado com a ASCV.

Ainda no que se refere, mais especificamente, ao aprimoramento da dimensão social, pode ser dada uma atenção especial à dissociação das questões relativas tanto ao ruído quanto à interferência na paisagem do indicador *Aceitação social* (SOC04), que reflete a opinião pública local com relação a um empreendimento energético. Somado a isso, estudiosos do tema podem avaliar os impactos da geração de empregos levando em conta as naturezas temporária e permanente dos postos de trabalhos criados. Com relação aos diferentes horizontes temporais dos demais impactos ambientais, sociais e econômicos, pode-se ainda avançar na sua compreensão e consideração em estudos de ASCV.

Conforme mencionado no Capítulo 4, recomenda-se ainda a condução de análises complementares sobre o estudo de caso visando a superação de suas limitações. O emprego de dados primários ou, ao menos, secundários nacionais se destaca como o principal avanço a ser perseguido de modo a melhor refletir mudanças em função dos sistemas fotovoltaicos analisados. Canalizar esforços para obter dados desagregados é igualmente fundamental uma vez que permite uma visualização categorizada das interações desses sistemas com as dimensões ambiental, social e econômica ao longo dos seus ciclos de vida. Para além da transferência da produção de módulos multi-Si para o Brasil, os efeitos de outras ações nos processos *upstream* de suas cadeias poderiam ser avaliados.

De um modo geral, a presente tese fomenta novas reflexões sobre um tema ainda pouco explorado: a sustentabilidade de fontes renováveis de energia. Assim, representa um passo inicial para contribuir no processo de uma tomada de decisão mais sustentável dentro do setor do setor energético nacional tendo em vista não só as projeções para o futuro da energia no país, mas também a guinada mundial no sentido do desenvolvimento sustentável, permitindo se antecipar aos desafios e explorar as oportunidades ambientais, sociais e econômicas das promissoras fontes alternativas e renováveis de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB, 2017. AC 800M Controller: Environmental Declaration.
- ABB, 2009. Environmental Product Declaration: UniSwitch Medium Voltage Equipment.
- ABDI, 2014. Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).
- Abraham, D., 2017. The elements of power: gadgets, guns, and the struggle for a sustainable future in the rare metal age, Yale University Press.
- Afgan, N.H., Carvalho, M.G., 2003. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants Afgan, N. H. and Carvalho, M. G. *Energy*, 2002, 27, (8), 739–755. *Fuel Energy Abstr.* 44.
- Afrinaldi, F., Zhang, H.C., 2014. A fuzzy logic based aggregation method for life cycle impact assessment. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.010>
- Ahmad, S., Tahar, R.M., 2014. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renew. Energy* 63, 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.001>
- Akber, M.Z., Thaheem, M.J., Arshad, H., 2017. Life cycle sustainability assessment of electricity generation in Pakistan: Policy regime for a sustainable energy mix. *Energy Policy* 111, 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.022>
- AL-Rousan, N., Isa, N.A.M., Desa, M.K.M., 2018. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 2548–2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>
- Amer, M., Daim, T.U., 2011. Selection of renewable energy technologies for a

- developing county: A case of Pakistan. *Energy Sustain. Dev.* 15, 420–435.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.001>
- Andriantiatsaholiniaina, L.A., Kouikoglou, V.S., Phillis, Y.A., 2004. Evaluating strategies for sustainable development: Fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis. *Ecol. Econ.* 48. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.08.009>
- ANEEL, 2013. Chamada No. 013/2011: Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira.
- Antonanzas, J., Arbeloa-Ibero, M., Quinn, J.C., 2019. Comparative life cycle assessment of fixed and single axis tracking systems for photovoltaics. *J. Clean. Prod.* 240, 118016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118016>
- AS/NZS, 1999. AS/NZS 4536: Life cycle costing - An application guide. Stand. Aust. New Zeal.
- Atilgan, B., Azapagic, A., 2017. Energy challenges for Turkey: Identifying sustainable options for future electricity generation up to 2050. *Sustain. Prod. Consum.* 12, 234–254. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.02.001>
- Atilgan, B., Azapagic, A., 2016. An integrated life cycle sustainability assessment of electricity generation in Turkey. *Energy Policy* 93, 168–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.055>
- Avancis, 2014. PowerMax Strong.
- Baasch, S.S., 1995. Um sistema de suporte multicritério aplicado na gestão dos resíduos sólidos nos municípios catarinenses. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Baitz, M., Makishi, C., Kupfer, T., In, J.F.-, Schuller, O., Kokborg, M., Köhler, A., Thylmann, D., Stoffregen, A., Schöll, S., Görke, J., Rudolf, M., Liedke, A., 2014. GaBi Database & Modelling Principles. PE Int.
- Barros, J.J., Coira, M., López, M.P., Gochi, A., 2015. Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy* 89, 473–489. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.110>
- Bauer, D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P., Wanner, B., 2011. Critical Materials Strategy.
- Bazyari, S., Keypour, R., Farhangi, S., Ghaedi, A., Bazyari, K., 2014. A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants. *J. Power Energy Eng.* 02, 718–728. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24096>
- Benoit-Norris, C., Cavan, D.A., Norris, G., 2012. Identifying social impacts in product supply chains: Overview and application of the social hotspot database.

- Sustainability 4. <https://doi.org/10.3390/su4091946>
- Bentsen, N.S., Jørgensen, J.R., Stupak, I., Jørgensen, U., Taghizadeh-Toosi, A., 2019. Dynamic sustainability assessment of heat and electricity production based on agricultural crop residues in Denmark. *J. Clean. Prod.* 213, 491–507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.194>
- Bhandari, R., Arce, B.E., Sessa, V., Adamou, R., 2021. Sustainability Assessment of Electricity Generation in Niger Using a Weighted Multi-Criteria Decision Approach. *Sustainability* 13, 385. <https://doi.org/10.3390/su13010385>
- Bhushan, N., Rai, K., 2007. *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. Interfaces (Providence). 35.
- Bitter, J., Printz, S., Lahl, K., Vossen, R., Jeschke, S., 2017. Fuzzy Logic Approach for Sustainability Assessment based on the Integrative Sustainability Triangle - An Application for a Wind Power Plant 3, 50–61. <https://doi.org/10.14621/ce.20170206>
- Bjørn, A., Moltesen, A., Laurent, A., Owsianiak, M., Corona, A., Birkved, M., Hauschild, M.Z., 2018. Life Cycle Inventory Analysis, in: *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 117–165. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_9
- Borba, M.C.V., Gaspar, N.F., 2007. *Lighting the way: Toward a sustainable energy future*, [São Paulo]: FAPESP; [Amsterdam]: InterAcademy Council; [Rio de Janeiro]: Academia Brasileira de Ciências.
- Borges, A.R., Antunes, C.H., 2003. A fuzzy multiple objective decision support model for energy-economy planning. *Eur. J. Oper. Res.* 145. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00536-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00536-2)
- Brasil, 2021a. *Balanco Energético Nacional 2020*. Rio de Janeiro.
- Brasil, 2021b. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Brasília.
- Brasil, 2020a. *Balanco Energético Nacional 2019*. Rio de Janeiro.
- Brasil, 2020b. *The Ten-Year Energy Expansion Plan 2030*. Brasília.
- Brasil, 2019a. *The Ten-Year Energy Expansion Plan 2029*. Brasília.
- Brasil, 2019b. *Socio-environmental analysis of the energy sources of the Ten-Year Energy Expansion Plan 2021*. Brasília.
- Brasil, 2018. *The Ten-Year Energy Expansion Plan 2027*. Brasília.
- Brasil, 2017. *The Ten-Year Energy Expansion Plan 2026*. Brasília.
- Brasil, 2015a. *Intended Nationally Determined Contribution towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change*.

- Brasil, 2015b. The Ten-Year Energy Expansion Plan 2024. Brasília.
- Brasil, 2014. The Ten-Year Energy Expansion Plan 2023. Brasília.
- Brasil, 2013. The Ten-Year Energy Expansion Plan 2022. Brasília.
- Brasil, 2012. The Ten-Year Energy Expansion Plan 2021. Brasília.
- Brasil, 2011. The Ten-Year Energy Expansion Plan 2020. Brasília.
- Brunelli, M., 2015. Introduction to the Analytic Hierarchy Process Introduction to the Analytic Hierarchy Process *, Springer Briefs in Operations Research.
- CALCAS, 2009. D20 Blue Paper on Life Cycle Sustainability Analysis, Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability.
- Cariello, R., 2013. A onça e a barragem: por que o mais conhecido líder indígena do país é contra uma hidrelétrica a centenas de quilômetros de sua aldeia. *Rev. Piauí*.
- Cavallaro, F., Ciruolo, L., 2005. A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy* 33. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00228-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00228-3)
- Chatzimouratidis, A.I., Pilavachi, P.A., 2008. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy* 36, 1074–1089. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.028>
- Chatzimouratidis, A.I., Pilavachi, P.A., 2007. Objective and subjective evaluation of power plants and their non-radioactive emissions using the analytic hierarchy process. *Energy Policy* 35. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.02.003>
- Chaves, L.O., Brannstrom, C., Silva, E.V. da, 2018. Wind power and the creation of conflicts: occupation of leisure spaces in a community in northeast of Brazil. *Soc. e Territ.* 29, 49–69. <https://doi.org/10.21680/2177-8396.2017v29n2id12881>
- Cinelli, M., Coles, S., Kirwan, K., 2014. Analysis of the potentials of multi-criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecol. Indic.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>
- Ciroth, A., Eisfeldt, F., 2016. PSILCA – A Product Social Impact Life Cycle Assessment database, Database version 1.0.
- CML, 2015. CML-IA Characterisation Factors [WWW Document]. Institute Environ. Sci.
- Collotta, M., Champagne, P., Tomasoni, G., Alberti, M., Busi, L., Mabee, W., 2019. Critical indicators of sustainability for biofuels: An analysis through a life cycle sustainability assessment perspective. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109358>

- Conde, M.R., 2013. Incorporação da dimensão ambiental no planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica por meio de técnicas multicritério de apoio a tomada de decisão. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Cooper, J., Stamford, L., Azapagic, A., 2018. Sustainability of UK shale gas in comparison with other electricity options: Current situation and future scenarios. *Sci. Total Environ.* 619–620, 804–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.140>
- Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A., Trovato, M., 2003. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renew. Sustain. Energy Rev.* [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(03\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00004-2)
- Corona, B., 2016. Análisis de sostenibilidad del ciclo de vida de una configuración innovadora de tecnología termosolar. Universidad Politécnica de Madrid.
- Corona, B., San Miguel, G., 2019. LCSA applied to an innovative configuration of concentrated solar power. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 1444–1460. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1568-z>
- CPRM, 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: Diagnóstico do município de Alto do Rodrigues. Recife.
- Demirtas, O., 2013. Evaluating the best renewable energy technology for sustainable energy planning. *Int. J. Energy Econ. Policy* 3, 23–33.
- Denyer, D., Tranfield, D., 2009. Producing a Systematic Review. *SAGE Handb. Organ. Res. Methods.* <https://doi.org/10.1080/03634528709378635>
- Dias, C.L. de A., 2017. Modelos de avaliação de desempenho de diferentes tecnologias de geração fotovoltaica: estudo de caso para a Região dos Lagos. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Dorini, G., Kapelan, Z., Azapagic, A., 2011. Managing uncertainty in multiple-criteria decision making related to sustainability assessment. *Clean Technol. Environ. Policy* 13, 133–139. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0291-7>
- Doukas, H., Patlitzianas, K., Psarras, J., 2006. Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM. *Resour. Policy.*
- DuPont, 2012. C Series Thin Film Modules.
- EC-JCR, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance, Constraints. <https://doi.org/10.2788/38479>
- EC, 2020. Marked improvement in Europe's air quality over past decade, fewer deaths linked to pollution. Brussels.

- Elkington, J., 2020. *Green Swans: The Coming Boom in Regenerative Capitalism*, 1st Editio. ed. Fast Company Press, New York.
- Elkington, J., 1998. *Cannibals with forks: The triple bottom line of sustainability*. New Soc. Publ.
- Emrouznejad, A., Ho, W., 2017. Fuzzy analytic hierarchy process, *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*. <https://doi.org/10.1201/9781315369884>
- Evans, A., 2010. *Life Cycle Analysis of Electricity Generation to Determine Sustainability*. Macquarie University.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Figueiredo, M.B.S., Martins, T.M., 2017. *Comparing Solar Photovoltaic Power Plants: Power Plants with Tracker System or Fixed Structures*. University of Southern Santa Catarina.
- Filho, O.C., Junior, N.L.S., Luedmann, G., 2016. *A Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília.
- Fontenele, L.F.A., 2018. *Evaluation of photovoltaic system configurations in the Northeastern region of Brazil*. University of São Paulo.
- Freedom House, 2020. *Freedom in the World 2020*.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., Wernet, G., 2007. *Ecoinvent Centre. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Overview and Methodology*. Ecoinvent Rep. No. 1.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., 2005. The ecoinvent database: Overview and methodological framework. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>
- Galán-Martín, Á., Guillén-Gosálbez, G., Stamford, L., Azapagic, A., 2016. Enhanced data envelopment analysis for sustainability assessment: A novel methodology and application to electricity technologies. *Comput. Chem. Eng.* 90, 188–200. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.04.022>
- Georgescu-Roegen, N., 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*, *The Entropy Law and the Economic Process*. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674281653>

- Ghazvinei, P., Mir, M., Darvishi, H., Ariffin, J., 2017. Solid Waste – Management Models. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43228-1_3
- Ginaid, A., 2017. Incorporação de critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gloria, T., Guinée, J., Kua, H.W., Singh, B., Lifset, R., 2017. Charting the Future of Life Cycle Sustainability Assessment: A Special Issue. *J. Ind. Ecol.* <https://doi.org/10.1111/jiec.12711>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J., Zelm, R. Van, 2008. ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, *Ruimte en Milieu*. <https://doi.org/10.029/2003JD004283>
- Goedkoop, M., Spriensma, R., 2000. The Eco-Indicator 99 - A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment, Methodology Report, PRé Consultants.
- Goldemberg, J., 2012. *Energy: What Everyone Needs to Know*. Oxford University Press, Oxford.
- Golden, B.L., Wasil, E.A., Harker, P.T. (Eds.), 1989. *The Analytic Hierarchy Process*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-50244-6>
- Gomes, L.F.A.M., 2007. *Teoria da decisão - Coleção debates em Administração*, 1a Edição. ed. Cengage, São Paulo.
- Gomes, L.F.A.M., Gomes, C.F.S., 2019. *Princípios e métodos para tomada de decisão: Enfoque multicritério*, 6a Edição. ed. Atlas, São Paulo.
- Gonela, V., Salazar, D., Zhang, J., Osmani, A., Awudu, I., Altman, B., 2019. Designing a sustainable stochastic electricity generation network with hybrid production strategies. *Int. J. Prod. Res.* 57, 2304–2326. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1516900>
- González, B., Adenso-Díaz, B., González-Torre, P.L., 2002. A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA. *Resour. Conserv. Recycl.* 37. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00069-1)
- Gorayeb, A., Brannstrom, C., 2016. Toward participatory management of renewable energy resources (wind-farm) in northeastern Brazil. *Mercator* 15, 101–115. <https://doi.org/10.4215/rm2016.1501.0008>
- Güereca, L.P., Agell, N., Gassó, S., Baldasano, J.M., 2007. Fuzzy approach to life cycle

- impact assessment: An application for biowaste management systems. *Int. J. Life Cycle Assess.* 12. <https://doi.org/10.1065/lca2006.10.276>
- Guinée, J.B., 2016. Life cycle sustainability assessment: What is it and what are its challenges?, in: Clift, R., Druckman, A. (Eds.), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Springer, Cham, pp. 45–68. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7_3
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2011. Life cycle assessment: Past, present, and future. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hämäläinen, P., Leena Saarela, K., Takala, J., 2009. Global trend according to estimated number of occupational accidents and fatal work-related diseases at region and country level. *J. Safety Res.* 40, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.12.010>
- Hemdi, A.R., Saman, M.Z.M., Sharif, S., 2013. Sustainability evaluation using fuzzy inference methods. *Int. J. Sustain. Energy* 32, 169–185. <https://doi.org/10.1080/14786451.2011.605947>
- Herva, M., Franco-Uría, A., Carrasco, E.F., Roca, E., 2012. Application of fuzzy logic for the integration of environmental criteria in ecodesign. *Expert Syst. Appl.* 39, 4427–4431. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.148>
- Hill, J., 2020. Environmental, Social, and Governance (ESG) Investing: A Balanced Analysis of the Theory and Practice of a Sustainable Portfolio, *Environmental, Social, and Governance (ESG) Investing: A Balanced Analysis of the Theory and Practice of a Sustainable Portfolio*.
- Hirschberg, S., Burgherr, P., 2015. Sustainability Assessment for Energy Technologies, in: Yan, J. (Ed.), *Handbook of Clean Energy Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces070>
- Hjuler, S.V., Hansen, S.B., 2018. LCA of Biofuels and Biomaterials, in: Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S. (Eds.), *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 755–782. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_30
- Hobbs, B.F., Meier, P.M., 1994. Multicriteria methods for resource planning: An experimental comparison. *IEEE Trans. Power Syst.* 9. <https://doi.org/10.1109/59.331435>
- Hong, S., Bradshaw, C.J.A., Brook, B.W., 2013. Evaluating options for sustainable energy mixes in South Korea using scenario analysis. *Energy* 52, 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.010>
- Huang, I.B., Keisler, J., Linkov, I., 2011. Multi-criteria decision analysis in

- environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Sci. Total Environ.*
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised LCIA method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147.
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K., Rebitzer, G., 2008. *Environmental Life Cycle Costing, Environmental Life Cycle Costing.* CRC Press, Boca Raton.
<https://doi.org/10.1201/9781420054736>
- Huppes, G., Curran, M.A., 2012. *Environmental Life Cycle Assessment: Background and Perspective*, in: *Life Cycle Assessment Handbook.* Wiley, pp. 1–14.
<https://doi.org/10.1002/9781118528372.ch1>
- Hwang, C.-L., Yoon, K., 1981. *Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications.* *Mult. Attrib. Decis. Mak.*
- IAEA, 2005. *Energy indicators for sustainable development: guidelines and methodologies.* International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IBGE, 2021. *Sistema Cidades [WWW Document].*
- IBGE, 2019. *Base de Informações sobre os Povos Indígenas e Quilombolas [WWW Document].* Inst. Bras. Geogr. e Estatística. Censo Agropecuário.
- IEA, 2021a. *Key World Energy Statistics 2021.*
- IEA, 2021b. *World Energy Outlook 2021.*
- IEA, 2020. *World Energy Outlook 2020.*
- IEA, 2019. *World Energy Outlook 2019.*
- IEA, 2018. *World Energy Outlook 2018.*
- IEA, 2017. *World Energy Outlook 2017.*
- IEA, 2016. *World Energy Outlook Special Report: Energy and Air Pollution.*
- IEA, World Bank, 2013. *Global Tracking Framework, Sustainable Energy for All.*
- IEC, 2017. *IEC 60300-3-3: Dependability management - Part 3-3: Application guide - Life cycle costing.*
- IHA, 2018. *Hydropower Sustainability Assessment Protocol, International Hydropower Association.*
- Ingeteam, 2015. *PowerMax Master-Slave 275Vac.*
- Ingeteam, 2011. *Ingecon Sun Smart U: Installation and Operational Manual.*
- Iofrida, N., De Luca, A.I., Strano, A., Gulisano, G., 2018. *Can social research paradigms*

- justify the diversity of approaches to social life cycle assessment? *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 464–480. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1206-6>
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.* Geneva.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Ipcc.
- IRENA, 2020. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2020.* Abu Dhabi.
- IRENA, 2012. *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Solar Photovoltaics.* Bonn.
- ISO, 2017. *ISO 15686-5: Buildings and Constructed Assets - Service Life Planning - Part 5: Life-Cycle Costing.*
- ISO, 2014. *ISO 14046: Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines.* Environ. Manage.
- ISO, 2013. *ISO 14067:2013 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication.* Int. Organ. Stand.
- ISO, 2006a. *ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.* Int. Organ. Stand.
- ISO, 2006b. *ISO 14044: Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines.* Int. Organ. Stand.
- ISO, 2000. *ISO 15663-1: Petroleum and natural gas industries - Life cycle costing - Part 1: Methodology.*
- Jannuzzi, P. de M., 2012. *Indicadores sociais no Brasil: conceitos, fontes de dados e aplicações,* in: *Indicadores Sociais No Brasil: Conceitos, Fontes de Dados e Aplicações.*
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. *IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology.* *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 324. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>

- Jordan, D.C., Kurtz, S.R., 2013. Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 21, 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Juchen, R.T., 2019. Método de coleta de dados para inventário de ACV social. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Jungbluth, N., Stucki, M., 2012. Life cycle inventories of photovoltaics, ESU-services Ltd.
- Kabayo, J., Marques, P., Garcia, R., Freire, F., 2019. Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal. *Energy* 176, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.166>
- Kalbar, P., Das, D., 2020. Advancing life cycle sustainability assessment using multiple criteria decision making, in: *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818355-7.00010-5>
- Karger, C.R., Hennings, W., 2009. Sustainability evaluation of decentralized electricity generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.*
- Khan, I., 2020. Sustainability challenges for the south Asia growth quadrangle: A regional electricity generation sustainability assessment. *J. Clean. Prod.* 243, 118639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118639>
- Ki-moon, B., 2008. Kyoto Protocol Reference Manual. United Nations Framew. Conv. Clim. Chang. <https://doi.org/10.5213/jkcs.1998.2.2.62>
- Klein, S.J.W., Whalley, S., 2015. Comparing the sustainability of U.S. electricity options through multi-criteria decision analysis. *Energy Policy* 79, 127–149. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.007>
- Klir, G.J., 2001. Foundations of fuzzy set theory and fuzzy logic: A historical overview. *Int. J. Gen. Syst.* <https://doi.org/10.1080/03081070108960701>
- Kloepffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 89–95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- Kosciusko-Morizet, N., 2011. Nucleaire: La catastrophe qui change tout.
- Kouloumpis, V., Azapagic, A., 2018. Integrated life cycle sustainability assessment using fuzzy inference: A novel FELICITA model. *Sustain. Prod. Consum.* 15, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.03.002>
- Kraaijenbrink, J., 2022. What are Green Swans and why they matter. *Forbes*.
- Kühnen, M., Hahn, R., 2017. Indicators in Social Life Cycle Assessment: A Review of Frameworks, Theories, and Empirical Experience. *J. Ind. Ecol.* <https://doi.org/10.1111/jiec.12663>

- Lassio, J.G., Magrini, A., Castelo Branco, D., 2021. Life cycle-based sustainability indicators for electricity generation: A systematic review and a proposal for assessments in Brazil. *J. Clean. Prod.* 311, 127568. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127568>
- Laurent, A., Espinosa, N., Hauschild, M.Z., 2018. LCA of Energy Systems, in: Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S. (Eds.), *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 633–668. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_26
- Laurent, A., Hauschild, M.Z., 2015. Normalisation. pp. 271–300. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3_14
- Li, T., Roskilly, A.P., Wang, Y., 2018. Life cycle sustainability assessment of grid-connected photovoltaic power generation: A case study of Northeast England. *Appl. Energy* 227, 465–479. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.021>
- Lisboa, M., 2009. *Ética e cidadania planetária na era tecnológica: o caso da proibição da Basileia*, 1a Edição. ed. Civilização Brasileira, Rio de Janeiro.
- Lisboa, M.L.V., Marzano, L.G., Sabóia, C.H.M., Maceira, M.E.P., Melo, A.C.G., 2008. A mixed-integer programming model for long term generation expansion planning of the Brazilian system, in: *16th Power Systems Computation Conference, PSCC 2008*.
- Liu, G., 2014. Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.038>
- Løken, E., 2007. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.11.005>
- Loturco, R., Del Caro, L., 2020. Debate sobre eficácia de práticas ESG ganha força. *Valor Econômico*.
- Lucena, L. de F.L., 1999. *Uma análise sistêmica do serviço de transporte intermunicipal de passageiros*. Universidade Federal da Paraíba.
- Ludin, N.A., 2019. *Life Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region*.
- Luu, L.Q., Halog, A., 2016. Rice Husk Based Bioelectricity vs. Coal-fired Electricity: Life Cycle Sustainability Assessment Case Study in Vietnam. *Procedia CIRP* 40, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.058>
- Macombe, C., Leskinen, P., Feschet, P., Antikainen, R., 2013. Social life cycle assessment of biodiesel production at three levels: A literature review and

- development needs. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.026>
- Magrini, A., 1992. *Metodologia de Avaliação de Impacto Ambiental: O Caso das Usinas Hidrelétricas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Magrini, A., 1990. *A Avaliação de Impactos Ambientais*, in: Margulis, S. (Ed.), *Meio Ambiente: Aspectos Técnicos e Econômicos*. IPEA/PNUD, Brasília, p. 246.
- Magrini, A., Veiga, L., 2018. *Ecologia Industrial: Desafios na perspectiva da Economia Circular*, 1a Edição. ed. Synergia, Rio de Janeiro.
- Mancebo, F., Sachs, I., 2015. *Transitions to sustainability*, *Transitions to Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9532-6>
- Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., Dufour, J., 2017. A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *J. Clean. Prod.* 150, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.017>
- Martins, J.C. de V., Freitas, S.N.L., 2015. Aspectos socioambientais de uma usina termelétrica no Rio Grande do Norte, in: *Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade*. São Paulo, p. 13.
- Mattila, T.J., 2018. Use of Input–Output Analysis in LCA, in: *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 349–372. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_14
- Maxim, A., 2014. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy* 65, 284–297. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.059>
- Meadows, D., 2008. *Thinking in Systems: A Primer*, 1st Editio. ed. Earthscan, London.
- MEMC, 2012. *Installation Manual for MEMC Silvantis 72-cell Photovoltaic Modules*.
- Mirasgedis, S., Diakoulaki, D., 1997. Multicriteria analysis vs. externalities assessment for the comparative evaluation of electricity generation systems. *Eur. J. Oper. Res.* 102. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00115-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00115-X)
- MME, 2017. *Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável (PDRS) e a Implantação de Usinas Hidrelétricas Estruturantes – Relatório 01 (RT01) – Contextualização da Inserção Regional, Pesquisa da Legislação e Análise de Indicadores Sociais*.
- Moraes, J.E.P., Moura, J.P., 2022. Estudo do ecossistema e unidades de conservação da Bacia Potiguar e análise dos impactos ambientais das atividades petrolíferas na região costeira do Rio Grande do Norte. *Rev. Educ. Ambient. em Ação* XX.
- Moslehi, S., Arababadi, R., 2016. *Sustainability Assessment of Complex Energy Systems*

- Using Life Cycle Approach-Case Study: Arizona State University Tempe Campus. *Procedia Eng.* 145, 1096–1103. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.142>
- Mukaidono, M., 2001. *Fuzzy Logic for Beginners*, Fuzzy Logic for Beginners. <https://doi.org/10.1142/4622>
- Mulloy, K.B., Sumner, S.A., Rose, C., Conway, G.A., Reynolds, S.J., Davidson, M.E., Heidel, D.S., Layde, P.M., 2013. Renewable energy and occupational health and safety research directions: A white paper from the Energy Summit, Denver Colorado, April 11-13, 2011. *Am. J. Ind. Med.* 56, 1359–1370. <https://doi.org/10.1002/ajim.22184>
- Munda, G., 2005. “Measuring sustainability”: A multi-criterion framework. *Environ. Dev. Sustain.* <https://doi.org/10.1007/s10668-003-4713-0>
- Munda, G., 1995. *Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment Theory and Applications in Ecological Economics*. *Contrib. to Econ.* 34.
- Neri, M., Jameli, D., Bernard, E., Melo, F.P.L., 2019. Green versus green? Adverting potential conflicts between wind power generation and biodiversity conservation in Brazil. *Perspect. Ecol. Conserv.* 17, 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.08.004>
- Nijkamp, P., Volwahren, A., 1990. New directions in integrated regional energy planning. *Energy Policy* 18. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(90\)90029-4](https://doi.org/10.1016/0301-4215(90)90029-4)
- Noori, M., Kucukvar, M., Tatari, O., 2015. A macro-level decision analysis of wind power as a solution for sustainable energy in the USA. *Int. J. Sustain. Energy* 34, 629–644. <https://doi.org/10.1080/14786451.2013.854796>
- Norris, G.A., 2001. The requirement for congruence in normalization. *Int. J. Life Cycle Assess.* 6, 85. <https://doi.org/10.1007/BF02977843>
- Novick, D., 1959. *The Federal Budget as an Indicator of Government Intentions and the Implications of Intentions*. RAND Corporation, Santa Monica, CA.
- NREL, 2018. *Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems 3rd Edition*. Golden.
- NYSERDA, 2016. *Decommissioning Solar Panle Systems - Information for local governments and landowners on the decommissioning of large-scale panel systems*. New York.
- Ortega, N.R. de S., 2001. *Aplicação da teoria de conjuntos Fuzzy a problemas da biomedicina*. Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.43.2001.tde-04122013-133237>

- Oxford, 2019. The case for solar?
- Pappas, C., Karakosta, C., Marinakis, V., Psarras, J., 2012. A comparison of electricity production technologies in terms of sustainable development. *Energy Convers. Manag.* 64, 626–632. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.006>
- Pasqualetti, M.J., Gipe, P., Richter, R.W., 2002. A Landscape of Power, in: *Wind Power in View*. Elsevier, pp. 3–16. <https://doi.org/10.1016/B978-012546334-8/50001-2>
- Passet, R., 1996. *L'Économique et Le Vivant*, *L'Économique et Le Vivant*. <https://doi.org/10.3917/econo.passe.1996.01>
- Pavlovic, T., Tsankov, P.T., Cekić, N.D., Radonjić Mitić, I.S., 2020. Photovoltaic Solar Energy Conversion. pp. 45–193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22403-5_2
- Pereira, T.C.G., 2011. Energias renováveis: capitalismo, hegemonia e dominação. *Le Monde Dipl.*
- Perman, R., Ma, Y., McGilvray, J., Common, M., 2003. *Natural Resource and Environmental Economics*, Pearson Education.
- Pezzey, J., 1989. Economic analysis of sustainable growth and sustainable development (No. ENV 15), Environment Department working paper, Environment Department working paper. Washington, D.C.
- Phillipe, B., 2014. Mentiras contra a energia verde. *Le Monde Dipl.*
- Phillis, Y., Andriantiatsaholiniaina, L., 2001. Sustainability: An ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecol. Econ.* 37, 435–456. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00290-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00290-1)
- Pitron, G., 2018. *La guerre des métaux rares: La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Paris.
- Pizzol, M., Laurent, A., Sala, S., Weidema, B., Verones, F., Koffler, C., 2017. Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 853–866. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1199-1>
- Pohekar, S.D., Ramachandran, M., 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007>
- PRé Consultants, 2014. *SimaPro Database Manual - Methods Library*. Pré. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ram, M., Aghahosseini, A., Breyer, C., 2020. Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technol. Forecast. Soc. Change* 151, 119682. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008>

- Ramos, C., Ruiz, E.T.N.F., Bicalho, F.W., Barbosa, J.M., Barros, L.V., Rabassa, M.M.M., 2018. Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil, Sebrae.
- Rathore, D., Pant, D., Singh, A., 2013. A comparison of life cycle assessment studies of different biofuels, in: *Green Energy and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1_12
- Reinders, A., Verlinden, P., van Sark, W., Freundlich, A., 2017. *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications*, 1a Edição. ed. John Wiley & Sons, West Sussex.
- Ren, J., 2018. Multi-criteria decision making for the prioritization of energy systems under uncertainties after life cycle sustainability assessment. *Sustain. Prod. Consum.* 16, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.06.005>
- Richhariya, G., Kumar, A., Samsher, 2020. Solar cell technologies, in: *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Elsevier, pp. 27–50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00002-8>
- Righter, R.W., 1996. *Wind Energy in America: A History*. University of Oklahoma Press.
- Rödger, J.-M., Kjær, L.L., Pagoropoulos, A., 2018. Life Cycle Costing: An Introduction, in: Hauschild, H., Rosenbaum, R., Olsen, S. (Eds.), *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 373–399. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_15
- Roinioti, A., Koroneos, C., 2019. Integrated life cycle sustainability assessment of the Greek interconnected electricity system. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 32, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.01.003>
- Rosenbaum, R., Hauschild, M., Boulay, A., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., Vieira, M., 2017. Life cycle impact assessment, in: *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10
- Rosenbaum, R.K., Georgiadis, S., Fantke, P., 2018. Uncertainty Management and Sensitivity Analysis, in: *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham, pp. 271–321. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_11
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Eur. J. Oper. Res.* [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saaty, T.L., 1984. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments, in: *Quantitative Assessment in Arms Control*. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2805-6_12
- Saaty, T.L., Vargas, L., 2012. Models, methods, concepts & applications of the analytic

- hierarchy process, ... -Driven Demand and Operations Management Models. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Sachs, I., 2007. A revolução energética do século XXI. *Estud. Avancados*. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100004>
- Sachs, I., 2005. Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde. *Estud. Avancados* 19. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142005000300014>
- Sachs, I., 2000. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. Garamond, Rio de Janeiro.
- Santoyo-Castelazo, E., Azapagic, A., 2014. Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects. *J. Clean. Prod.* 80, 119–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.061>
- Saraswat, S.K., Digalwar, A.K., 2020. Evaluation of energy sources based on sustainability factors using integrated fuzzy MCDM approach. *Int. J. Energy Sect. Manag.* <https://doi.org/10.1108/IJESM-07-2020-0001>
- Sarker, P.C., Islam, M.R., Paul, A.K., Ghosh, S.K., 2018. Solar Photovoltaic Power Plants: Necessity and Techno-Economical Development. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7287-1_2
- Sena, L.A. de, Ferreira, P., Braga, A.C., 2016. Social acceptance of wind and solar power in the Brazilian electricity system. *Environ. Dev. Sustain.* 18, 1457–1476. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9772-0>
- Shaaban, M., Scheffran, J., Böhner, J., Elsobki, M.S., 2018. Sustainability assessment of electricity generation technologies in Egypt using multi-criteria decision analysis. *Energies* 11. <https://doi.org/10.3390/en11051117>
- Shakouri, H., Aliakbarisani, S., 2016. At what valuation of sustainability can we abandon fossil fuels? A comprehensive multistage decision support model for electricity planning. *Energy* 107, 60–77. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.124>
- Shepard, R.B. (Ed.), 2005. *Quantifying Environmental Impact Assessments Using Fuzzy Logic*, Springer Series On Environmental Management. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/0-387-28098-7>
- Sonetti, G., Lombardi, P., 2020. Multi-criteria decision analysis of a building element integrating energy use, environmental, economic and aesthetic parameters in its life cycle, in: *Green Energy and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23786-8_26
- Sorkin, A.R., 2020. BlackRock C.E.O. Larry Fink: Climate Crisis Will Reshape Finance.

- New York Times.
- Sovacool, B.K., Ratan, P.L., 2012. Conceptualizing the acceptance of wind and solar electricity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.048>
- Stamford, L., Azapagic, A., 2014. Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070. *Energy Sustain. Dev.* 23, 194–211. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.008>
- Steen, B., 2007. The EPS Default LCIA Method: A Method Based on External Costs. *J. Life Cycle Assessment, Japan* 3. <https://doi.org/10.3370/lca.3.17>
- Strantzali, E., Aravossis, K., Livanos, G.A., 2017. Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 775–787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.085>
- Streimikiene, D., Balezentis, T., Krisciukaitienė, I., Balezentis, A., 2012. Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3302–3311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.067>
- Suganthi, L., Iniyan, S., Samuel, A.A., 2015. Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 48, 585–607. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.037>
- Suomalainen, K., Sharp, B., 2016. Electricity sector transformation in New Zealand: A sustainability assessment approach. *J. Renew. Sustain. Energy* 8, 035902. <https://doi.org/10.1063/1.4950943>
- Talman, K., 2020. ESG falls down the investment agenda. *Financ. Times*.
- TCPO, 2012. *Tabela de Composição de Preços para Orçamentos*, 13th ed. Editora PINI, São Paulo.
- Tiwari, G.N., Tiwari, A., Shyam, 2016. *Handbook of Solar Energy, Energy Systems in Electrical Engineering*. Springer Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0807-8>
- Tolmasquim, M., 2016. *Renewable energy: hydro, biomass, wind, solar, ocean*. Rio de Janeiro.
- Toniolo, S., Tosato, R.C., Gambaro, F., Ren, J., 2020. Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment, in: *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*. Elsevier, pp. 39–56. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00003-8>
- Traverso, M., Asdrubali, F., Francia, A., Finkbeiner, M., 2012. Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *Int. J. Life*

- Cycle Assess. 17, 1068–1079. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0433-8>
- Troldborg, M., Heslop, S., Hough, R.L., 2014. Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 1173–1184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.160>
- UN, 2015. Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development United Nations United Nations Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1, United Nations.
- UN, 2000. Declaração do Milênio. New York.
- UN, 1973. Report of the United Nations Conference on the Human Environment. New York.
- UNEP-WCMC, 2022. Protected Area Profile for Brazil from the World Database of Protected Areas, January 2022 [WWW Document]. URL www.protectedplanet.net
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013. The Methodological Sheets for Sub-Categories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA), Pre publication-Version. The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8825-6>
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2011. Towards life cycle sustainability assessment: making informed choices on products.
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2009. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products, Management.
- UNEP, 2020. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020.
- UNEP, 2011. Recycling rates of metals - A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, United Nations Environment Programme. [https://doi.org/ISBN 978-92-807-3161-3](https://doi.org/ISBN%20978-92-807-3161-3)
- UNEP, 2009. Climate in Peril: a popular guide to the latest IPCC reports, Environmental Protection. Nairobi.
- Veiga, E.J., 2015. Para entender o desenvolvimento sustentável, 1a ed. Editora 34, São Paulo.
- Vincke, P., 1992. Multicriteria Decision-Aid. Wiley, New York.
- Voncken, J.H.L., 2016. The Rare Earth Elements—A Special Group of Metals. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5_1
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H., 2009. Review on multi-criteria

- decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- WCD, 2000. *Dams and development: a new framework for decision-making.*, Earthscan Publications. London.
- WCED, 1987. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report).*
- Weetman, C., 2019. *Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente sustentável e lucrativa, 1a Edição.* ed. Autêntica Business, São Paulo.
- Wenzel, H., Hauschild, M., Alting, L., Overcash, M., 1999. Environmental assessment of products volume 1: Methodology, tools, and case studies in product. *Int. J. Life Cycle Assess.* 4. <https://doi.org/10.1007/bf02979388>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wilkinson, R., Pickett, K., 2015. *O nível: Por que uma sociedade mais igualitária é melhor para todos: Por que uma sociedade mais igualitária é melhor para todos.* Civilização Brasileira, São Paulo.
- Wiloso, E.I., Heijungs, R., 2013. Key Issues in Conducting Life Cycle Assessment of Bio-Based Renewable Energy Sources, in: Singh, A., Pant, D., Olsen, S. (Eds.), *Green Energy and Technology.* Springer, London, pp. 13–36. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5364-1_2
- Wolf, M., Pennington, D., Pant, R., Chomkham Sri, K., Pretato, U., Commission, E., 2008. *European Reference Life Cycle Database (ELCD) European Reference Life Cycle Database (ELCD).* Database.
- Xiaohua, W., Zhenmin, F., 2003. Common factors and major characteristics of household energy consumption in comparatively well-off rural China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(03\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(03)00080-7)
- Yergin, D., 2014. *A busca: energia, segurança e reconstrução do mundo moderno,* *Journal of Chemical Information and Modeling.*
- Yilan, G., Kadirgan, M.A.N., Çiftçioğlu, G.A., 2020. Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renew. Energy* 146, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.164>
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Inf. Control.* [179](https://doi.org/10.1016/S0019-</p></div><div data-bbox=)

9958(65)90241-X

Zanghelini, G.M., 2018. Ponderação de categorias de impacto ambiental através de análise de decisão multicritério. Universidade Federal de Santa Catarina.

Zanni, S., Awere, E., Bonoli, A., 2020. Life cycle sustainability assessment: An ongoing journey, in: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818355-7.00004-x>

Zimmermann, H.-J., 1991. Fuzzy Set Theory — and Its Applications. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7949-0>

ANEXOS

A. ANEXO A

Tabela A. 1 – Relação de artigos científicos que empregam os indicadores de sustentabilidade considerados pela presente pesquisa

Indicadores de sustentabilidade	Artigos científicos	
	Subconjunto 1	Subconjunto 2
Dimensão ambiental		
Aquecimento global	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,31	32,33,34,35,36,37,38,39,40,41
Depleção da camada de ozônio	1,4,6,8,13,16,22,23,27,31	36,38,40
Radiação ionizante	19	36,40
Formação fotoquímica de ozônio	1,2,3,6,7,8,16,21,22,23,27	36
Formação de material particulado fino	7,15	36
Acidificação terrestre	1,2,3,4,5,6,7,8,13,16,17,21,22,23,27	36,38,40
Eutrofização em água doce	1,2,3,4,5,6,7,8,13,16,17,19,22,23,27	34,36,38,40
Eutrofização marinha	1,2,3,4,5,6,7,8,13,16,19,22,23,27	34,36,38,40
Ecotoxicidade terrestre	1,2,3,6,7,8,17,23	36,40
Ecotoxicidade em água doce	1,2,3,6,7,8,13,17,19,23,27	34,36,40
Ecotoxicidade marinha	1,2,3,6,7,8,17,23,27	34,36,40
Toxicidade humana cancerígena	1,2,3,5,6,7,8,10,11,13,17,18,19,21,23,24,27,29	36,40
Toxicidade humana não cancerígena	1,2,3,5,6,7,8,10,11,13,17,18,19,21,23,24,27,29	36,40
Uso do solo	5,7,8,11,12,14,15,17,18,19,21,24,26,27,31	32,33,34,35,36,39,40,41
Escassez de recursos minerais	1,2,3,6,7,8,11,13,19,23,27	35,36,40
Escassez de recursos fósseis	1,2,3,6,7,8,11,13,19,23,27	35,36,40
Consumo de água	5,13,14,15,19,25,26	34,35,36,39
Dimensão social		
Geração de empregos	1,2,3,4,5,6,8,9,11,13,15,16,17,18,21,22,24,25,26,28,29,30	32,33,34,35,36,38,39
Saúde e segurança	2,3,4,6,8,10,12,14,15,16,19,22,23,25,27,29,30,31	34,35,40
Aceitação social	6,10,18,20,23,24,25,28,31	32,33,35,37,41
Dimensão econômica		
Custos de P&D	-	33
Custos de investimento	1,2,3,4,5,6,8,10,16,19,20,21,22,23,24,25,26,27,29,30	32,33,37
Custos de O&M	1,4,5,8,10,16,19,21,24,25,26,27,29,30	33,37
Custos de descomissionamento	-	-
LCOE	2,3,5,6,12,13,14,15,18,22,23,24,27,28,31	38,41
Payback period	24	33,37,38

Subconjunto 1: 1:Akber *et al.* (2017); 2:Atilgan & Azapagic (2016); 3:Atilgan & Azapagic (2017); 4:Barros *et al.* (2015); 5:Bhandari *et al.* (2021); 6:Cooper *et al.* (2018); 7: Dorini *et al.* (2011); 8: Galán-Martín *et al.* (2016); 9: Gonela *et al.* (2019); 10:Hemdi *et al.* (2013); 11: Hirschberg & Burgherr (2015); 12:Hong *et al.* (2013); 13:Kabayo *et al.* (2019); 14:Khan (2020); 15:Klein & Whalley (2015); 16: Kouloumpis & Azapagic (2018); 17:Luu & Halog (2016); 18:Maxim (2014); 19:Moslehi & Arababadi (2016); 20:Pappas *et al.* (2012); 21:Ren (2018); 22:Roimioti & Koroneos (2019); 23:Santoyo-Castelazo & Azapagic (2014); 24: Saraswat & Digalwar (2020); 25:Shaaban *et al.* (2018); 26:Shakouri & Aliakbarisani (2016); 27:Stamford & Azapagic (2014); 28:Strantzali *et al.* (2017); 29:Streimikiene *et al.* (2012); 30: Suomalainen & Sharp (2016); 31:Yilan *et al.* (2020); *Subconjunto 2:* 32:Ahmad & Tahar (2014); 33:Amer & Daim (2011); 34: Bentsen *et al.* (2019); 35: Bitter *et al.* (2017); 36: Corona & San Miguel (2019); 37: Demirtas (2013); 38:Li *et al.* (2018); 39:Noori *et al.* (2015); 40:Traverso *et al.* (2012); 41:Trolborg *et al.* (2014)

B. ANEXO B

Inventário do Ciclo de Vida Ambiental

Tabela B. 1 – Características dos condutores elétricos utilizados na UFV-AR

Diâmetro dos condutores	Sistema			
	S1	S2	S3	S4
Ø 50 mm		190,00 m		
Ø 150 mm		440,00 m		
Total comprimento		1.130 m		
Total massa por sistema	2.423,20 kg	122,88 kg	61,59 kg	59,08 kg

Tabela B. 2 – Principais características construtivas dos centros de transformação da UFV-AR

Característica construtiva	Centros de transformação		
	Subestação 01	Subestação 02	Centro de Secc.
Área interna			
Comprimento interno ($l_{i,interno}$)	7,80 m	4,75 m	8,30 m
Comprimento externo ($l_{i,total}$)	8,00 m	4,95 m	8,50 m
Largura interna ($w_{i,interna}$)	2,30 m	2,40 m	2,80 m
Largura externa ($w_{i,total}$)	2,50 m	2,60 m	3,00 m
Altura pé-direito interno ($h_{i,interna}$)	2,91 m	2,91 m	2,91 m
Altura pé-direito externo ($h_{i,total}$)	3,13 m	3,13 m	3,13 m
Espessura parede (e_{parede})	0,10 m	0,10 m	0,10 m
Espessura contrapiso e laje ($e_{contrapiso/laje}$)	0,11 m	0,11 m	0,11 m
Área interna ($A_{i,interna}$)	17,94 m ²	11,40 m ²	23,24 m ²
Área externa ($A_{i,externa}$)	20,00 m ²	12,87 m ²	25,50 m ²
Volume parede (V_{parede})	5,99 m ³	4,28 m ³	6,58 m ³
Volume contrapiso e laje ($V_{contrapiso/laje}$)	4,40 m ³	2,83 m ³	5,87 m ³
Volume total (V_{total})	10,39 m ³	7,11 m ³	12,44 m ³
Área externa			
Comprimento (l_e)	5,06 m	5,06 m	-
Largura (w_e)	2,50 m	2,60 m	-
Área (A_e)	12,65 m ²	13,16 m ²	-
Altura (h_e)	3,13 m	3,13 m	-
Espessura contrapiso ($e_{contrapiso/laje}$)	0,11 m	0,11 m	-
Volume contrapiso ($V_{contrapiso}$)	1,39 m ³	1,48 m ³	-

Tabela B. 3 – Principais elementos construtivos dos centros de transformação da UFV-AR

Elemento construtivo	Centro de transformação		
	Subestação 01	Subestação 02	Centro de Secc.
Estrutura de concreto armado⁷⁰			
Concreto pré-moldado (25 Mpa)	10,39 m ³	7,11 m ³	12,44 m ³
Armadura de aço ⁷¹	75,60 kg	48,65 kg	96,39 kg
Portas laterais			
Largura	2,60 m	2,60 m	2,60 m
Altura	2,34 m	2,34 m	2,34 m
Área total	12,17 m ²	12,17 m ²	12,17 m ²
Aço galvanizado ⁷²	126,55 kg	126,55 kg	126,55 kg
Portas frontais			
Largura	0,99 m	0,99 m	0,99 m
Altura	2,34 m	2,34 m	2,34 m
Área total	4,63 m ²	4,63 m ²	4,63 m ²
Aço galvanizado	48,19 kg	48,19 kg	48,19 kg
Grelhas de ventilação⁷³			
Largura	649 mm	649 mm	649 mm
Altura	449 mm	449 mm	449 mm
Área	0,29 m ²	0,29 m ²	0,29 m ²
Quantidade	12 unidades	8 unidades	16 unidades
Aço galvanizado	36,37 kg	24,24 kg	48,49 kg
Proteção			
Comprimento	12,61 m	12,71 m	-
Altura	3,13 m	3,13	-
Área	39,48 m ²	39,79 m ²	-
Aço galvanizado	170,53 kg	171,89 kg	-

⁷⁰ Os centros de transformação da UFV-AR são em concreto armado.

⁷¹ 1,89 kg/m² (TCPO, 2012).

⁷² 5,2 kg/m²

⁷³ As dimensões das grelhas de ventilação foram estimadas de acordo com a área dos espaços fechados dos centros de transformação.

Tabela B. 4 – Principais elementos construtivos dos centros de transformação da UFV-AR

Equipamento	Centro de transformação		
	Subestação 01	Subestação 02	Centro de Secc.
Transformador			
Potência	1.000 kVA	100 kVA	-
Fases	3	3	-
Frequência (f)	60 Hz	60 Hz	-
Peso	2.600,00 kg	986,67 kg	-
Quantidade	1 unidade	1 unidade	-
Switchgear ABB			
U	17,5 kV	17,5 kV	-
f	60 Hz	60 Hz	-
Peso	130,8 kg	130,8 kg	-
Quantidade	1 unidade	1 unidade	-
Energy meter			
Peso	-	-	1,2 kg
Quantidade	-	-	1 unidade

Tabela B. 5 – Materiais constituintes do *switchgear* das subestações da UFV-AR

Componente	Material	Massa	Taxa de reciclagem
Cover parts	Aço	89,7 kg	100%
String device	Aço inoxidável	6,0 kg	100%
Bushbars	Cobre	7,6 kg	100%
Bearings	Latão	0,4 kg	100%
Window	Policarbonato	0,9 kg	100%
Field control cups	Borracha EPDM	0,7 kg	80%
Handle	Polipropileno	0,1 kg	100%
Adhesive labels	Poliéster	0,1 kg	100%
Window	Vidro	0,1 kg	98%
Switch-disconnector	Epóxi	22,6 kg	0%
Insulating gas	Gás SF ₆	0,2 kg	96%
Cover parts	Zinco	0,5 kg	100%
Cover parts	Alumínio	1,1 kg	100%
Paint	Poliéster em pó	0,8 kg	0%
Total		130,8 kg	

Tabela B. 6 – Materiais constituintes do *energy meter* do centro de seccionamento da UFV-AR

Material	Massa	Taxa de reciclagem
Aço	0,39240 kg	100%
Plástico	0,34560 kg	100%
Papelão	0,19200 kg	100%
Fibra de vidro	0,06840 kg	100%
Epóxi	0,05400 kg	0%
Cobre	0,05160 kg	100%
Silicone	0,03240 kg	100%
Bronze	0,01440 kg	100%
Estrutura cromada	0,01320 kg	100%
Estanho	0,02160 kg	100%
Alumínio	0,00960 kg	100%
Latão	0,00120 kg	100%
Níquel	0,00120 kg	100%
Cromo	0,00036 kg	100%
Prata	0,00012 kg	100%
Ouro	0,00012 kg	100%
Total	1,20000 kg	

Tabela B. 7 – Distâncias consideradas no deslocamento dos componentes importados da UFV-AR

Componente	País de origem	Deslocamento oceânico	Deslocamento terrestre ⁷⁴
Módulos multi-Si	Malásia	16.063,51 km	2.924,00 km
Módulos a-Si	China	19.945,79 km	2.924,00 km
Módulos CIGS	Alemanha	10.084,95 km	2.924,00 km

Tabela B. 8 – Distâncias consideradas no deslocamento dos componentes nacionais da UFV-AR

Componente	Cidade/Estado de origem	Deslocamento terrestre
Inversores	Campinas/SP	2.838,00 km
Transformadores	Sorocaba/SP	2.844,00 km
Disjuntores	Sorocaba/SP	2.844,00 km
Estruturas fixas	Palmas/TO	1.800,00 km
Estruturas com rastreadores	Palmas/TO	1.800,00 km
Materiais de construção	São Paulo/SP	2.844,00 km
Instalações elétricas	São Paulo/SP	2.844,00 km

⁷⁴ Foi considerado o Porto de Santos como sendo o destino dos deslocamentos oceânicos e o ponto de partida dos deslocamentos terrestres.

Tabela B. 9 – Indicadores PAME terrestre e marinho dos países de origem dos módulos solares fotovoltaicos da UFV-AR
 Fonte: UNEP-WCMC (2022)

País	PAME		Score médio
	Terrestre	Marinho	
Alemanha	37,45%	45,46%	41,46%
Brasil	30,30%	26,82%	28,56%
China	15,16%	5,48%	10,32%
Malásia	13,33%	5,56%	9,45%

Tabela B. 10 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à geração de 1 kWh a partir sistema S1 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electricity, low voltage {BR} electricity production, photovoltaic, 1.0MWp open ground ..., multi-Si APOS, U	1	kWh	75
Materiais/combustíveis			
Photovoltaic plant, 1.0MWp, multi-Si (tracking), on open ground {BR} construction APOS, U	$2,20 \times 10^{-8}$	p	76
Tap water {CH} market for APOS, U	$4,88 \times 10^{-5}$	kg	77
Emissões atmosféricas			
Water/m ³	$4,03 \times 10^{-9}$	m ³	-
Tratamento de resíduos			
Wastewater, from residence {RoW} market for wastewater, from residence APOS, U	$7,31 \times 10^{-9}$	m ³	-

Tabela B. 11 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à geração de 1 kWh a partir sistema S2 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electricity, low voltage {BR} electricity production, photovoltaic, 50kWp open ground ..., multi-Si APOS, U	1	kWh	75
Materiais/combustíveis			
Photovoltaic plant, 50kWp, multi-Si, on open ground {BR} construction APOS, U	$4,91 \times 10^{-7}$	p	76
Tap water {CH} market for APOS, U	$2,46 \times 10^{-6}$	kg	77
Emissões atmosféricas			
Water/m ³	$4,03 \times 10^{-9}$	m ³	-
Tratamento de resíduos			
Wastewater, from residence {RoW} market for wastewater, from residence APOS, U	$3,69 \times 10^{-10}$	m ³	-

⁷⁵ Adaptado a partir do ICV original *Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si*.

⁷⁶ Calculado com base na geração de energia do sistema ao longo da sua vida útil.

⁷⁷ Calculado com base na capacidade instalada do sistema.

Tabela B. 12 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à geração de 1 kWh a partir sistema S3 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electricity, low voltage {BR} electricity production, photovoltaic, 25kWp open ground ..., a-Si APOS, U	1	kWh	78
Materiais/combustíveis			
Photovoltaic plant, 25kWp, a-Si, on open ground {BR} construction APOS, U	$1,01 \times 10^{-6}$	p	79
Tap water {CH} market for APOS, U	$1,24 \times 10^{-6}$	kg	80
Emissões atmosféricas			
Water/m ³	$4,03 \times 10^{-9}$	m ³	-
Tratamento de resíduos			
Wastewater, from residence {RoW} market for wastewater, from residence APOS, U	$1,86 \times 10^{-10}$	m ³	-

Tabela B. 13 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à geração de 1 kWh a partir sistema S4 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electricity, low voltage {BR} electricity production, photovoltaic, 25kWp open ground ..., CIGS APOS, U	1	kWh	78
Materiais/combustíveis			
Photovoltaic plant, 25kWp, CIGS, on open ground {BR} construction APOS, U	$1,14 \times 10^{-6}$	p	79
Tap water {CH} market for APOS, U	$1,19 \times 10^{-6}$	kg	80
Emissões atmosféricas			
Water/m ³	$4,03 \times 10^{-9}$	m ³	-
Tratamento de resíduos			
Wastewater, from residence {RoW} market for wastewater, from residence APOS, U	$1,78 \times 10^{-10}$	m ³	-

⁷⁸ Adaptado a partir do ICV original *Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si*.

⁷⁹ Calculado com base na geração de energia do sistema ao longo da sua vida útil.

⁸⁰ Calculado com base na capacidade instalada do sistema.

Tabela B. 14 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à construção e instalação do sistema S1 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produtos			
Photovoltaic plant, 1.0MWp, multi-Si (tracking), on open ground {BR} construction APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	13913,17	MJ	$(7673 \div 570) \times 1033,56^{81}$
Electricity, low voltage {BR} market for APOS, U	65,34	kWh	$(36,033 \div 570) \times 1033,56^{81}$
Inverter, 500kW {BR} production APOS, U	4	p	-
Photovoltaic mounting system (SATS), open ground module {BR} production APOS, U	6972,04	m ²	-
Photovoltaic panel, multi-Si wafer {MY} production APOS, U	6972,04	m ²	-
Photovoltaic plant, electric installation for 1MWp open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Breaker center, photovoltaic plant, 1,1MWp, on open ground {BR} construction	0,92	p	$1 \times 0,921^{82}$
Electrical substation, photovoltaic plant, 1MWp, multi-Si, on open ground {BR} construction	1	p	-

⁸¹ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground GLO*.

⁸² Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas da UFV-AR na produção total energia da usina.

Tabela B. 15 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à construção e instalação do sistema S2 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produtos			
Photovoltaic plant, 50kWp, multi-Si, on open ground {BR} construction APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	702,69	MJ	$(7673 \div 570) \times 52,20^{83}$
Electricity, low voltage {BR} market for APOS, U	3,29	kWh	$(36,033 \div 570) \times 52,20^{83}$
Inverter, 25kW {BR} production APOS, U	4	p	-
Photovoltaic mounting system, open ground module {BR} production APOS, U	352,12	m ²	-
Photovoltaic panel, multi-Si wafer {MY} production APOS, U	352,12	m ²	-
Photovoltaic plant, electric installation for 50kWp open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Breaker center, photovoltaic plant, 1,1MWp, on open ground {BR} construction	0,04	p	$1 \times 0,041^{84}$
Electrical substation, photovoltaic plant, 100kWp, on open ground {BR} construction	0,52	p	$1 \times 0,521^{85}$

⁸³ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground GLO*.

⁸⁴ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas da UFV-AR na produção total energia da usina.

⁸⁵ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas S2, S3 e S4 da UFV-AR na sua produção de energia.

Tabela B. 16 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à construção e instalação do sistema S3 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produtos			
Photovoltaic plant, 25kWp, a-Si, on open ground {BR} construction APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	353,63	MJ	$(7673 \div 570) \times 26,27^{86}$
Electricity, low voltage {BR} market for APOS, U	1,66	kWh	$(36,033 \div 570) \times 26,27^{86}$
Inverter, 25kW {BR} production APOS, U	2	p	-
Photovoltaic mounting system, open ground module {BR} production APOS, U	289,34	m ²	-
Photovoltaic panel, a-Si {CN} production APOS, U	289,34	m ²	-
Photovoltaic plant, electric installation for 25kWp (a-Si) open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Breaker center, photovoltaic plant, 1,1MWp, on open ground {BR} construction	0,02	p	$1 \times 0,02^{87}$
Electrical substation, photovoltaic plant, 100kWp, on open ground {BR} construction	0,25	p	$1 \times 0,254^{88}$

⁸⁶ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground GLO*.

⁸⁷ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas da UFV-AR na produção total energia da usina.

⁸⁸ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas S2, S3 e S4 da UFV-AR na sua produção de energia.

Tabela B. 17 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à construção e instalação do sistema S4 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produtos			
Photovoltaic plant, 25kWp, CIGS, on open ground {BR} construction APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Diesel, burned in building machine {GLO} market for APOS, U	339,23	MJ	$(7673 \div 570) \times 25,20^{89}$
Electricity, low voltage {BR} market for APOS, U	1,59	kWh	$(36,033 \div 570) \times 25,20^{89}$
Inverter, 25kW {BR} production APOS, U	2	p	-
Photovoltaic mounting system, open ground module {BR} production APOS, U	229,78	m ²	-
Photovoltaic panel, CIS {DE} production APOS, U	229,78	m ²	-
Photovoltaic plant, electric installation for 25kWp (CIGS) open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Breaker center, photovoltaic plant, 1,1MWp, on open ground {BR} construction	0,02	p	$1 \times 0,018^{90}$
Electrical substation, photovoltaic plant, 100kWp, on open ground {BR} construction	0,23	p	$1 \times 0,225^{91}$

⁸⁹ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground GLO*.

⁹⁰ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas da UFV-AR na produção total energia da usina.

⁹¹ Calculado com base na estimativa de participação dos sistemas S2, S3 e S4 da UFV-AR na sua produção de energia.

Tabela B. 18 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à estrutura de montagem fixa da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic mounting system, open ground module {BR} production APOS, U	1	m ²	-
Recursos			
Occupation, industrial area	3,82	m ² a	-
Transformation, from pasture, man made	0,153	m ²	-
Transformation, to industrial area	0,153	m ²	-
Materiais/combustíveis			
Aluminium, wrought alloy {GLO} market for APOS, U	3,46	kg	-
Concrete, normal {BR} market for APOS, U	0,0005	m ³	-
Corrugated board box {BR} production APOS, U	0,08	kg	-
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	0,0008	kg	-
Polystyrene, high impact {BR} production APOS, U	0,004	kg	-
Reinforcing steel {BR} market for APOS, U	6,30	kg	-
Section bar extrusion, aluminium {BR} processing APOS, U	3,46	kg	-
Section bar rolling, steel {BR} processing APOS, U	5,35	kg	-
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {BR} production APOS, U	0,22	kg	-
Wire drawing, steel {BR} processing APOS, U	0,96	kg	-
Zinc coat, coils {BR} zinc coating, coils APOS, U	0,09	m ²	-
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	0,14	m ²	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	14,58	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap aluminium {RoW} market for scrap aluminium APOS, U	3,46	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	6,52	kg	-
Waste paperboard {BR} market for waste paperboard APOS, U	0,08	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,0008	kg	-
Waste polystyrene isolation, flame-retardant {RoW} market for ..., flame-retardant APOS, U	0,004	kg	-
Waste reinforced concrete {RoW} market for waste reinforced concrete APOS, U	7,43	kg	-

Tabela B. 19 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à estrutura de montagem com rastreadores da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic mounting system (SATS), open ground module {BR} production APOS, U	1	m ²	-
Recursos			
Occupation, industrial area	3,82	m ² a	-
Transformation, from pasture, man made	0,153	m ²	-
Transformation, to industrial area	0,153	m ²	-
Materiais/combustíveis			
Aluminium, wrought alloy {BR} market for APOS, U	3,46	kg	-
Concrete, normal {BR} market for APOS, U	0,0005	m ³	-
Corrugated board box {BR} production APOS, U	0,08	kg	-
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	0,0008	kg	-
Polystyrene, high impact {BR} production APOS, U	0,004	kg	-
Reinforcing steel {GLO} market for APOS, U	6,30	kg	-
Section bar extrusion, aluminium {BR} processing APOS, U	3,46	kg	-
Section bar rolling, steel {BR} processing APOS, U	5,35	kg	-
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {BR} production APOS, U	0,28	kg	-
Wire drawing, steel {BR} processing APOS, U	0,96	kg	-
Zinc coat, coils {BR} zinc coating, coils APOS, U	0,09	m ²	-
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	0,14	m ²	-
Electric motor, vehicle {BR} production APOS, U	0,03	kg	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	14,69	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap aluminium {RoW} market for scrap aluminium APOS, U	3,46	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	6,52	kg	-
Waste paperboard {BR} market for waste paperboard APOS, U	0,08	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,0008	kg	-
Waste polystyrene isolation, flame-retardant {RoW} market for ..., flame-retardant APOS, U	0,004	kg	-
Waste reinforced concrete {RoW} market for waste reinforced concrete APOS, U	7,43	kg	-

Tabela B. 20 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à produção dos painéis fotovoltaicos de multi-Si

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic panel, multi-Si wafer {MY} production APOS, U	1	m ²	
Materiais/combustíveis			
1-propanol {GLO} market for APOS, U	0,008	kg	
Acetone, liquid {RER} market for acetone, liquid APOS, U	0,01	kg	
Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for APOS, U	2,63	kg	
Brazing solder, cadmium free {GLO} market for APOS, U	0,009	kg	
Copper {GLO} market for APOS, U	0,11	kg	
Corrugated board box {RER} market for corrugated board box APOS, U	1,10	kg	
Electricity, medium voltage {MY} market for APOS, U	4,71	kWh	
Ethylvinylacetate, foil {GLO} market for APOS, U	1,00	kg	
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO} market for APOS, U	0,19	kg	
Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for APOS, U	4,87	MJ	
Lubricating oil {RER} market for lubricating oil APOS, U	0,002	kg	
Methanol {GLO} market for APOS, U	0,002	kg	
Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, U	0,0002	kg	
Photovoltaic cell, multi-Si wafer {GLO} market for APOS, U	0,932	m ²	
Photovoltaic panel factory {GLO} market for APOS, U	3,99×10 ⁻⁶	p	
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for APOS, U	0,37	kg	
Polyvinylfluoride, film {GLO} market for APOS, U	0,11	kg	
Silicone product {RER} market for silicone product APOS, U	0,12	kg	
Solar glass, low-iron {GLO} market for APOS, U	10,08	kg	
Tap water {RER} market group for APOS, U	21,29	kg	
Tempering, flat glass {RER} processing APOS, U	10,08	kg	
Vinyl acetate {GLO} market for APOS, U	0,002	kg	
Wire drawing, copper {RER} processing APOS, U	0,11	kg	
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U	180,65	tkm	
Transport, freight, lorry, unspecified {RoW} market for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	32,88	tkm	
Emissões atmosféricas			

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Water/m3	0,003	m ³	
Tratamento de resíduos			
Municipal solid waste {RER} market group for municipal solid waste APOS, U	0,03	kg	
Waste mineral oil {CH} market for waste mineral oil APOS, U	3,63×10 ⁻⁵	kg	
Waste mineral oil {Europe without Switzerland} market for waste mineral oil APOS, U	0,002	kg	
Waste plastic, mixture {RER} market group for waste plastic, mixture APOS, U	1,69	kg	
Waste polyvinylfluoride {CH} market for waste polyvinylfluoride APOS, U	0,11	kg	
Wastewater, from residence {RoW} market for wastewater, from residence APOS, U	0,02	m3	

Tabela B. 21 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à produção dos painéis fotovoltaicos de a-Si

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic panel, a-Si {CN} production APOS, U	1	m ²	
Materiais/combustíveis			
Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for APOS, U	3,34	kg	
Photovoltaic laminate, a-Si {CN} production APOS, U	1	m ²	
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for APOS, U	2,18	kg	
Transport, freight train {CN} market for APOS, U	0,54	tkm	
Transport, freight, lorry, unspecified {RoW} market for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	0,27	tkm	
Transport, freight, lorry, unspecified {RoW} market for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	56,09	tkm	
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U	382,59	tkm	

Tabela B. 22 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos à produção dos painéis fotovoltaicos de CIGS

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic panel, CIS {DE} production APOS, U	1	m ²	-
Materiais/combustíveis			
Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for APOS, U	1,57	kg	-
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO} market for APOS, U	0,04	kg	-
Heat, district or industrial, other than natural gas {Europe without Switzerland} ... other than natural gas APOS, U	10,26	MJ	-
Photovoltaic laminate, CIS {GLO} market for APOS, U	0,99	m ²	-
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U	180,65	tkm	-
Transport, freight, lorry, unspecified {RoW} market for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	52,38	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Waste plastic, mixture {DE} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,04	kg	-

Tabela B. 23 – ICV elaborado na base de dados *Ecoinvent 3.5* para os processos relativos à subestação 01 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electrical substation, photovoltaic plant, 1MWp, multi-Si, on open ground {BR} construction	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Concrete, normal {BR} market for APOS, U	10,39	m ³	Estrutura
Reinforcing steel {BR} market for APOS, U	75,6	kg	Estrutura
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	174,74	kg	Portas
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	16,8	m ²	Portas
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	16,8	m ²	Portas
Exhaust air roof hood, steel, DN 400 {BR} production APOS, U	3	p	Exaustores
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	36,37	kg	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	6,99	m ²	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	6,99	m ²	Grelhas de ventilação
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	170,53	kg	Grade de proteção
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	39,48	m ²	Grade de proteção
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	39,48	m ²	Grade de proteção
Powder coat, steel {BR} powder coating, steel APOS, U	39,48	m ²	Grade de proteção
Transformer, medium voltage use {BR} production APOS, U	2600	kg	Transformador
Steel, low-alloyed {BR} steel production, electric, low-alloyed APOS, U	95,7	kg	Switchgear: cover parts and string device
Copper {GLO} market for APOS, U	7,6	kg	Switchgear: bushbars
Brass {BR} production APOS, U	0,4	kg	Switchgear: bearings
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,9	kg	Switchgear: window
Synthetic rubber {GLO} market for APOS, U	0,7	kg	Switchgear: field control cups
Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	0,1	kg	Switchgear: handle
Flat glass, coated {GLO} market for APOS, U	0,1	kg	Switchgear: window

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Epoxy resin {GLO} market for epoxy resin APOS, U	22,6	kg	Switchgear: switch-disconnector
Sulfur hexafluoride, liquid {GLO} market for APOS, U	0,2	kg	Switchgear: insulating gas
Zinc {GLO} market for APOS, U	0,5	kg	Switchgear: cover parts
Aluminium, wrought alloy {BR} market for APOS, U	1,1	kg	Switchgear: cover parts
Polyester resin, unsaturated {BR} production APOS, U	0,8	kg	Switchgear: paint
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	496,94	tkm	Portas
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	103,46	tkm	Grelhas de ventilação
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	491,74	tkm	Grades de proteção
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	372	tkm	Switchgear
Tratamento de resíduos			
Waste reinforced concrete {RoW} market for waste reinforced concrete APOS, U	25011,6	kg	-
Waste electric and electronic equipment {GLO} market for APOS, U	2600	kg	-
Used exhaust air roof hood steel, DN 400 {RoW} market for used exhaust air roof hood steel, DN 400 APOS, U	3	p	-
Waste reinforcement steel {RoW} market for waste reinforcement steel APOS, U	345,27	kg	-
Waste paint on metal {RoW} market for waste paint on metal APOS, U	3,16	kg	-
Aluminium scrap, post-consumer {GLO} market for APOS, U	1,1	kg	-
Scrap copper {GLO} market for APOS, U	8	kg	-
Scrap steel {GLO} market for APOS, U	466,57	kg	-
Waste rubber, unspecified {GLO} market for APOS, U	0,7	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {GLO} market for APOS, U	23,5	kg	-
Waste glass {BR} market for waste glass APOS, U	0,1	kg	-
Waste plastic, mixture {BR} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,9	kg	-

Tabela B. 24 – ICV elaborado na base de dados *Ecoinvent 3.5* para os processos relativos à subestação 02 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Electrical substation, photovoltaic plant, 100kWp, on open ground {BR} construction	1	p	
Materiais/combustíveis			
Concrete, normal {BR} market for APOS, U	7,11	m ³	Estrutura
Reinforcing steel {BR} market for APOS, U	48,65	kg	Estrutura
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	174,74	kg	Portas
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	16,8	m ²	Portas
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	16,8	m ²	Portas
Exhaust air roof hood, steel, DN 400 {BR} production APOS, U	2	p	Exaustores
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	24,24	kg	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	4,66	m ²	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	4,66	m ²	Grelhas de ventilação
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	171,89	kg	Grade de proteção
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	39,79	m ²	Grade de proteção
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	39,79	m ²	Grade de proteção
Powder coat, steel {BR} powder coating, steel APOS, U	39,79	m ²	Grade de proteção
Transformer, medium voltage use {BR} production APOS, U	986,67	kg	Transformador
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	95,7	kg	Switchgear: cover parts and string device
Copper {GLO} market for APOS, U	7,6	kg	Switchgear: bushbars
Brass {BR} production APOS, U	0,4	kg	Switchgear: bearings
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,9	kg	Switchgear: window
Synthetic rubber {GLO} market for APOS, U	0,7	kg	Switchgear: field control cups
Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	0,1	kg	Switchgear: handle
Flat glass, coated {GLO} market for APOS, U	0,1	kg	Switchgear: window

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Epoxy resin {GLO} market for epoxy resin APOS, U	22,6	kg	Switchgear: switch-disconnector
Sulfur hexafluoride, liquid {GLO} market for APOS, U	0,2	kg	Switchgear: insulating gas
Zinc {GLO} market for APOS, U	0,5	kg	Switchgear: cover parts
Aluminium, wrought alloy {BR} market for APOS, U	1,1	kg	Switchgear: cover parts
Polyester resin, unsaturated {BR} production APOS, U	0,8	kg	Switchgear: paint
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	496,94	tkm	Portas
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	68,95	tkm	Grelhas de Ventilacao
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	495,63	tkm	Greade de protecao
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	372	tkm	Switchgear
Tratamento de resíduos			
Waste reinforced concrete {RoW} market for waste reinforced concrete APOS, U	17112,65	kg	-
Waste reinforcement steel {GLO} market for APOS, U	370,87	kg	-
Used exhaust air roof hood steel, DN 400 {CH} market for used exhaust air roof hood steel, DN 400 APOS, U	2	p	-
Waste electric and electronic equipment {GLO} market for APOS, U	986,67	kg	-
Waste paint on metal {RoW} market for waste paint on metal APOS, U	3,18	kg	-
Aluminium scrap, post-consumer {GLO} market for APOS, U	1,1	kg	-
Scrap copper {GLO} market for APOS, U	8	kg	-
Scrap steel {GLO} market for APOS, U	466,57	kg	-
Waste rubber, unspecified {GLO} market for APOS, U	0,7	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {GLO} market for APOS, U	23,5	kg	-
Waste glass {BR} market for waste glass APOS, U	0,1	kg	-
Waste plastic, mixture {BR} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,9	kg	-

Tabela B. 25 – ICV elaborado na base de dados *Ecoinvent 3.5* para os processos relativos ao centro de seccionamento da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Breaker center, photovoltaic plant, 1,1MWp, on open ground {BR} construction	1	p	
Materiais/combustíveis			
Concrete, normal {BR} market for APOS, U	12,4	m ³	Estrutura
Reinforcing steel {GLO} market for APOS, U	96,39	kg	Estrutura
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	174,74	kg	Portas
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	16,8	m ²	Portas
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	16,8	m ²	Portas
Exhaust air roof hood, steel, DN 400 {BR} production APOS, U	4	p	Exaustores
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	48,48	kg	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces {BR} zinc coating, pieces APOS, U	9,32	m ²	Grelhas de ventilação
Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {BR} zinc coating, pieces, adjustment per micro-m APOS, U	9,32	m ²	Grelhas de ventilação
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	0,39	kg	Energy meter
Polyethylene, high density, granulate {RoW} production APOS, U	0,35	kg	Energy meter
Corrugated board box {BR} production APOS, U	0,192	kg	Energy meter
Glass fibre {GLO} market for APOS, U	0,07	kg	Energy meter
Epoxy resin, liquid {RoW} market for epoxy resin, liquid APOS, U	0,05	kg	Energy meter
Copper {GLO} market for APOS, U	0,05	kg	Energy meter
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	0,03	kg	Energy meter
Bronze {GLO} market for APOS, U	0,01	kg	Energy meter
Bromine {GLO} market for APOS, U	0,01	kg	Energy meter
Tin {GLO} market for APOS, U	0,02	kg	Energy meter

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Aluminium, wrought alloy {BR} market for APOS, U	0,01	kg	Energy meter
Brass {BR} production APOS, U	0,001	kg	Energy meter
Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, U	0,001	kg	Energy meter
Chromium {GLO} market for APOS, U	0,0004	kg	Energy meter
Silver {GLO} market for APOS, U	0,0001	kg	Energy meter
Gold {GLO} market for APOS, U	0,0001	kg	Energy meter
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	496,94	tkm	Portas
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	137,9	tkm	Grelhas de ventilação
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	3,41	tkm	Energy meter
Tratamento de resíduos			
Waste reinforced concrete {RoW} market for waste reinforced concrete APOS, U	29856,39	kg	-
Used exhaust air roof hood steel, DN 400 {RoW} market for used exhaust air roof hood steel, DN 400 APOS, U	4	p	-
Waste reinforcement steel {GLO} market for APOS, U	223,22	kg	-
Scrap steel {GLO} market for APOS, U	0,39	kg	-
Waste polyethylene {BR} market for waste polyethylene APOS, U	0,35	kg	-
Waste packaging paper {BR} market for waste packaging paper APOS, U	0,19	kg	-
Waste glass {BR} market for waste glass APOS, U	0,034	kg	-
Waste plastic, mixture {BR} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,07	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {GLO} market for APOS, U	0,05	kg	-
Scrap copper {GLO} market for APOS, U	0,07	kg	-
Scrap tin sheet {GLO} market for APOS, U	0,02	kg	-
Scrap aluminium {GLO} market for APOS, U	0,01	kg	-
Nickel smelter slag {GLO} market for APOS, U	0,001	kg	-

Tabela B. 26 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos ao inversor de 25 kW

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Inverter, 25kW {BR} production APOS, U	1	p	92
Materiais/combustíveis			
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	6,86	kg	-
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height {GLO} market for APOS, U	0,14	kg	-
Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,19	kg	-
Capacitor, tantalum-, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,01	kg	-
Copper {GLO} market for APOS, U	17,70	kg	-
Corrugated board box {RoW} market for corrugated board box APOS, U	2,12	kg	-
Diode, glass-, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,03	kg	-
Electric connector, wire clamp {GLO} market for APOS, U	2,29	kg	-
Electricity, medium voltage {BR} market for APOS, U	220,37	kWh	-
Fleece, polyethylene {GLO} market for APOS, U	0,05	kg	-
Inductor, ring core choke type {GLO} market for APOS, U	0,19	kg	-
Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, U	0,02	kg	-
Metal working factory {RoW} construction APOS, U	6,63×10 ⁻⁸	p	-
Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U	1,06	kg	-
Polystyrene foam slab {GLO} market for APOS, U	0,25	kg	-
Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO} market for APOS, U	0,01	kg	-
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface {GLO} market for APOS, U	0,07	m ²	-

⁹² Adaptado a partir do ICV original *Inverter production, 0.5kW RER*.

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb free surface {GLO} market for APOS, U	0,07	m ²	-
Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,003	kg	-
Section bar extrusion, aluminium {BR} processing APOS, U	6,86	kg	-
Sheet rolling, steel {BR} processing APOS, U	70,09	kg	-
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for APOS, U	70,09	kg	-
Styrene-acrylonitrile copolymer {GLO} market for APOS, U	0,10	kg	-
Transformer, high voltage use {GLO} market for APOS, U	0,12	kg	-
Transistor, wired, small size, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,02	kg	-
Wire drawing, copper {RoW} processing APOS, U	17,05	kg	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	918,09	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Used printed wiring boards {GLO} market for APOS, U	3,23	kg	-
Waste paperboard, unsorted {GLO} market for waste paperboard, unsorted APOS, U	2,12	kg	-
Waste plastic, industrial electronics {RoW} market for waste plastic, industrial electronics APOS, U	11,14	kg	-
Waste polyethylene {Europe without Switzerland} market group for waste polyethylene APOS, U	0,110	kg	-
Waste polystyrene {Europe without Switzerland} market group for waste polystyrene APOS, U	0,26	kg	-

Tabela B. 27 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos ao inversor de 500 kW

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Inverter, 500kW {BR} production APOS, U	1	p	93
Materiais/combustíveis			
Alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state {RoW} market for alkyd paint, white, ..., APOS, U	21,38	kg	-
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	127,29	kg	-
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height {GLO} market for APOS, U	0,25	kg	-
Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,33	kg	-
Capacitor, tantalum-, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,02	kg	-
Copper {GLO} market for APOS, U	325,53	kg	-
Corrugated board box {RoW} market for corrugated board box APOS, U	13,22	kg	-
Diode, glass-, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,05	kg	-
Electric connector, wire clamp {GLO} market for APOS, U	46,06	kg	-
Electricity, medium voltage {BR} market for APOS, U	4448,39	kWh	-
Fleece, polyethylene {GLO} market for APOS, U	0,29	kg	-
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO} market for APOS, U	68,99	kg	-
Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up {GLO} market for APOS, U	42,76	kg	-
Inductor, ring core choke type {GLO} market for APOS, U	0,34	kg	-
Injection moulding {RoW} processing APOS, U	68,99	kg	-
Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, U	0,03	kg	-
Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil APOS, U	856,09	kg	-

⁹³ Adaptado a partir do ICV original *Inverter production, 0.5kW RER*.

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Metal working factory {RoW} construction APOS, U	1,32×10 ⁻⁶	p	-
Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for APOS, U	21,38	kg	-
Polystyrene foam slab {GLO} market for APOS, U	1,55	kg	-
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb containing surface {GLO} market for APOS, U	0,11	m ²	-
Printed wiring board, for through-hole mounting, Pb free surface {GLO} market for APOS, U	0,11	m ²	-
Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,005	kg	-
Section bar extrusion, aluminium {BR} processing APOS, U	127,30	kg	-
Sheet rolling, steel {BR} processing APOS, U	1397,35	kg	-
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for APOS, U	1397,35	kg	-
Transistor, wired, small size, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,04	kg	-
Wire drawing, copper {RoW} processing APOS, U	325,53	kg	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	5392,2	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Used printed wiring boards {GLO} market for APOS, U	47,48	kg	-
Waste mineral oil {RoW} market for waste mineral oil APOS, U	856,09	kg	-
Waste paperboard, unsorted {GLO} market for waste paperboard, unsorted APOS, U	13,22	kg	-
Waste plastic, industrial electronics {RoW} market for waste plastic, industrial electronics APOS, U	223,50	kg	-
Waste polyethylene {RER} market group for waste polyethylene APOS, U	1,55	kg	-
Waste polystyrene {RER} market group for waste polystyrene APOS, U	1,55	kg	-

Tabela B. 28 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos ao transformador de baixa tensão

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Transformer, low voltage use {BR} production APOS, U	1	kg	94
Materiais/combustíveis			
Copper {GLO} market for APOS, U	0,32	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,02	kg	-
Ferrite {GLO} market for APOS, U	0,63	kg	-
Injection moulding {GLO} market for APOS, U	0,17	kg	-
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,15	kg	-
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	0,32	kg	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	2,84	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Waste plastic, mixture {BR} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,02	kg	-

⁹⁴ Adaptado a partir do ICV original *Transformer production, low voltage use GLO*.

Tabela B. 29 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos ao transformador de média tensão

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Transformer, medium voltage use {BR} production APOS, U	1	kg	95
Materiais/combustíveis			
Copper {GLO} market for APOS, U	0,21	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,19	kg	-
Ferrite {GLO} market for APOS, U	0,56	kg	-
Injection moulding {GLO} market for APOS, U	0,34	kg	-
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,14	kg	-
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	0,005	kg	-
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	0,22	kg	-
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	2,84	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Waste plastic, mixture {BR} market for waste plastic, mixture APOS, U	0,03	kg	-

⁹⁵ Adaptado a partir dos ICVs originais *Transformer production, low voltage use GLO* e *Transformer production, high voltage use GLO*.

Tabela B. 30 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos às instalações elétricas do sistema S1 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic plant, electric installation for 1MWp open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Brass {BR} production APOS, U	2,0920	kg	$(0,006 \div 570) \times 52,2 + (1,15 \div 570) \times 1033$ ⁹⁶
Copper {GLO} market for APOS, U	2423,2	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,2101	kg	$(0,0958 + 0,0202) \div 570 \times 1033,56$ ⁹⁶
Nylon 6 {GLO} market for APOS, U	24,1720	kg	$(13,3307 \div 570) \times 1033,56$ ⁹⁶
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,2102	kg	$(0,115 \div 570) \times 1033,56$ ⁹⁶
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	2318,4494	kg	$(602,1716 \div 629,3785) \times 2423,2$ ⁹⁶
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, U	69,2499	kg	$(38,1908 \div 570) \times 1033,56$ ⁹⁶
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	81,4784	kg	$(44,9347 \div 570) \times 1033,56$ ⁹⁶
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	2423,2	kg	-
Zinc {BR} market for APOS, U	4,2038	kg	$(2,3184 \div 570) \times 1033,56$ ⁹⁶
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	20853,65	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap copper {RoW} market for scrap copper APOS, U	2,1019	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	85,6822	kg	-
Waste electric wiring {RoW} market for waste electric wiring APOS, U	2257,2965	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,4203	kg	-
Waste polyvinylchloride {BR} market for waste polyvinylchloride APOS, U	69,2499	kg	-

⁹⁶ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaics, electric installation for 570kWp module, open ground GLO*.

Tabela B. 31 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos às instalações elétricas do sistema S2 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic plant, electric installation for 50kWp open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Brass {BR} production APOS, U	0,1062	kg	$(0,006 \div 570) \times 52,2 + (1,2 \div 570) \times 52,2^{97}$
Copper {GLO} market for APOS, U	122,38	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,0106	kg	$((0,096 + 0,020) \div 570) \times 52,2^{97}$
Nylon 6 {GLO} market for APOS, U	1,2208	kg	$(13,331 \div 570) \times 52,2^{97}$
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,0106	kg	$(0,1159 \div 570) \times 52,2^{97}$
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	117,0897	kg	$(602,1716 \div 629,3785) \times 122,38^{97}$
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, U	3,4975	kg	$(38,1908 \div 570) \times 52,2^{97}$
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	4,1151	kg	$(44,9347 \div 570) \times 52,2^{97}$
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	122,38	kg	-
Zinc {BR} market for APOS, U	0,2123	kg	$(2,3183 \div 570) \times 52,2^{97}$
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	1052,73	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap copper {RoW} market for scrap copper APOS, U	0,1062	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	4,3274	kg	-
Waste electric wiring {RoW} market for waste electric wiring APOS, U	114,0049	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,0212	kg	-
Waste polyvinylchloride {BR} market for waste polyvinylchloride APOS, U	3,4975	kg	-

⁹⁷ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaics, electric installation for 570kWp module, open ground GLO*.

Tabela B. 32 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos às instalações elétricas do sistema S3 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic plant, electric installation for 25kWp (a-Si) open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Brass {BR} production APOS, U	0,0537	kg	$(0,006 \div 570) \times 52,2 + (1,2 \div 570) \times 26,27^{98}$
Copper {GLO} market for APOS, U	61,59	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,0053	kg	$((0,096) \div 570) \times 26,27^{98}$
Nylon 6 {GLO} market for APOS, U	0,6144	kg	$(13,3307 \div 570) \times 26,27^{98}$
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,0053	kg	$(0,1159 \div 570) \times 26,27^{98}$
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	58,9276	kg	$(602,1716 \div 629,3786) \times 61,59^{98}$
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, U	1,7601	kg	$(38,1908 \div 570) \times 26,27^{98}$
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	2,0709	kg	$(44,9347 \div 570) \times 26,27^{98}$
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	61,59	kg	-
Zinc {BR} market for APOS, U	0,1069	kg	$(2,3184 \div 570) \times 26,27^{98}$
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	529,84	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap copper {RoW} market for scrap copper APOS, U	0,0534	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	2,1778	kg	-
Waste electric wiring {RoW} market for waste electric wiring APOS, U	57,3737	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,0107	kg	-
Waste polyvinylchloride {BR} market for waste polyvinylchloride APOS, U	1,7601	kg	-

⁹⁸ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaics, electric installation for 570kWp module, open ground GLO*.

Tabela B. 33 – ICV da base de dados *Ecoinvent 3.5* adaptado para os processos relativos às instalações elétricas do sistema S4 da UFV-AR

Entrada/Saída	Quantidade	Unidade	Observação
Produto			
Photovoltaic plant, electric installation for 25kWp (CIGS) open ground module {BR} ... APOS, U	1	p	-
Materiais/combustíveis			
Brass {BR} production APOS, U	0,0515	kg	$(0,006 \div 570) * \times 2,2 + (1,2 \div 570) \times 25,2^{99}$
Copper {GLO} market for APOS, U	59,08	kg	-
Epoxy resin, liquid {BR} production APOS, U	0,0051	kg	$((0,096) \div 570) \times 25,2^{99}$
Nylon 6 {GLO} market for APOS, U	0,5894	kg	$(13,3307 \div 570) \times 25,2^{99}$
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	0,0051	kg	$(0,1159 \div 570) \times 25,2^{99}$
Polyethylene, high density, granulate {BR} production APOS, U	56,5261	kg	$(602,1716 \div 629,3786) \times 59,08^{99}$
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for APOS, U	1,6884	kg	$(38,1908 \div 570) \times 25,2^{99}$
Steel, low-alloyed, hot rolled {BR} production APOS, U	1,9866	kg	$(44,9347 \div 570) \times 25,2^{99}$
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	59,08	kg	-
Zinc {BR} market for APOS, U	0,1025	kg	$(2,3184 \div 570) \times 25,2^{99}$
Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market group for transport, freight, lorry, unspecified APOS, U	508,27	tkm	-
Tratamento de resíduos			
Scrap copper {RoW} market for scrap copper APOS, U	0,0512	kg	-
Scrap steel {RoW} market for scrap steel APOS, U	2,0891	kg	-
Waste electric wiring {RoW} market for waste electric wiring APOS, U	55,0368	kg	-
Waste polyethylene/polypropylene product {RoW} market for waste polyethylene/polypropylene product APOS, U	0,0102	kg	-
Waste polyvinylchloride {BR} market for waste polyvinylchloride APOS, U	1,6884	kg	-

⁹⁹ Adaptado a partir do ICV original *Photovoltaics, electric installation for 570kWp module, open ground GLO*.

Inventário do Ciclo de Vida Social

Tabela B. 34 – Postos de trabalhos criados nas diferentes etapas do ciclo de vida da tecnologia solar fotovoltaica

Fonte: Ram *et al.* (2020)

Etapa do ciclo de vida da tecnologia solar fotovoltaica	Empregos gerados (empregos.ano/MW)
Produção de materiais e equipamentos	6,7
Construção e Instalação	13,0
O&M	0,7
Descomissionamento e destinação de resíduos	0,8

Tabela B. 35 – Coeficientes regionais multiplicadores para a criação de postos de trabalhos associada a tecnologia solar fotovoltaica

Fonte: Ram *et al.* (2020)

Região	Coefficiente multiplicador
Europa	1,05
Eurásia	1,86
Nordeste asiático	2,22
Sudeste asiático	2,52
América do Norte	1,00
América do Sul	3,14

Tabela B. 36 – Taxa de incidência de acidentes de trabalho por país

Fonte: Hämäläinen *et al.* (2009)

País	Taxa de incidência de acidentes de trabalho
Alemanha	2,34%
Brasil	15,17%
China	12,40%
Malásia	11,91%

Inventário do Ciclo de Vida Econômico

Tabela B. 37 – Custos de P&D e investimento dos sistemas solares fotovoltaicos da UFV-AR
Fonte: Figueiredo & Martins (2017) e IRENA (2012)

Tipo de custo	Custo por sistema (US\$/kW)			
	S1	S2	S3	S4
P&D	0,40	0,40	0,40	0,40
Investimento	2,41	2,91	2,31	2,41
Módulos	1,40	1,40	0,80	0,90
Rastreadores solares	0,28	-	-	-
Estrutura de suporte	-	0,50	0,50	0,50
Inversores 500 kW	0,23	-	-	-
Inversores 25 kW	-	0,51	0,51	0,51
Instalações elétricas	0,10	0,10	0,10	0,10
Fiação e transformadores	0,15	0,15	0,15	0,15

Tabela B. 38 – Custos de O&M de sistemas solares fotovoltaicos sem rastreadores solares
Fonte: NREL (2018)

Atividade de O&M	Custo (US\$/kW.ano)
Manutenção local	0,20
Inspeção elétrica	1,40
Limpeza	0,80
Manutenção de inversores	3,00
Substituição de inversores	6,00
Reposição de peças	2,00
Total	13,40

Tabela B. 39 – Custos de O&M de rastreadores solares de sistemas fotovoltaicos
Fonte: Figueiredo & Martins (2017)

Componente	Custo (US\$/kW.ano)
Rastreador solar	6,72

Tabela B. 40 – Custos das atividades de descomissionamento de sistemas solares fotovoltaicos
 Fonte: NYSERDA (2016)

Atividade de descomissionamento e destinação de resíduos	Custo (US\$/kW)
Remoção das instalações elétricas das estruturas de suporte	$1,23 \times 10^{-3}$
Remoção dos painéis fotovoltaicos	$1,23 \times 10^{-3}$
Desmontagem das estruturas de suporte	$6,18 \times 10^{-3}$
Remoção dos equipamentos elétricos	$9,25 \times 10^{-4}$
Remoção das sapatas de concreto	$7,50 \times 10^{-4}$
Remoção das estruturas de suporte	$3,90 \times 10^{-3}$
Remoção dos cabos	$3,25 \times 10^{-3}$
Remoção dos parafusos de aterramento e postes de energia	$6,93 \times 10^{-3}$
Remoção de cercas	$2,48 \times 10^{-3}$
Subtotal de remoção	$2,69 \times 10^{-3}$
Classificação dos resíduos	$2,00 \times 10^{-3}$
Recuperação da vegetação das áreas afetadas	$1,25 \times 10^{-3}$
Caminhão para centro de reciclagem	$1,13 \times 10^{-3}$
Subtotal pós-remoção	$3,25 \times 10^{-3}$
Total	$3,01 \times 10^{-2}$

C. ANEXO C

Resultados da verificação de sensibilidade

Cenário 1

Tabela C. 1 – Resultados da AICV ambiental dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Aquecimento global	ENV01	kg CO ₂ eq.	4,39×10 ⁻²	5,43×10 ⁻²	5,66×10 ⁻²	5,93×10 ⁻²
Depleção da camada de ozônio	ENV02	kg CFC11eq.	2,22×10 ⁻⁸	2,69×10 ⁻⁸	2,16×10 ⁻⁸	2,79×10 ⁻⁸
Radiação ionizante	ENV03	kBq Co-60 eq.	4,08×10 ⁻³	4,85×10 ⁻³	3,73×10 ⁻³	5,95×10 ⁻³
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	kg NO _x eq.	1,15×10 ⁻⁴	1,47×10 ⁻⁴	1,78×10 ⁻⁴	1,66×10 ⁻⁴
Formação de material particulado fino	ENV05	kg PM2.5 eq.	9,54×10 ⁻⁵	1,23×10 ⁻⁴	1,27×10 ⁻⁴	1,34×10 ⁻⁴
Acidificação terrestre	ENV06	kg SO ₂ eq.	1,95×10 ⁻⁴	2,52×10 ⁻⁴	2,89×10 ⁻⁴	2,93×10 ⁻⁴
Eutrofização em água doce	ENV07	kg P eq.	2,97×10 ⁻⁵	3,89×10 ⁻⁵	3,16×10 ⁻⁵	5,71×10 ⁻⁵
Eutrofização marinha	ENV08	kg N eq.	3,29×10 ⁻⁶	4,05×10 ⁻⁶	2,35×10 ⁻⁶	3,56×10 ⁻⁶
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	kg 1,4-DCB	1,09	1,32	5,47×10 ⁻¹	5,47×10 ⁻¹
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	kg 1,4-DCB	5,50×10 ⁻³	7,43×10 ⁻³	7,39×10 ⁻³	1,01×10 ⁻²
Ecotoxicidade marinha	ENV11	kg 1,4-DCB	7,74×10 ⁻³	1,04×10 ⁻²	9,85×10 ⁻³	1,36×10 ⁻²
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	kg 1,4-DCB	5,01×10 ⁻³	7,60×10 ⁻³	1,05×10 ⁻²	9,08×10 ⁻³
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	kg 1,4-DCB	1,13×10 ⁻¹	1,52×10 ⁻¹	1,36×10 ⁻¹	2,24×10 ⁻¹
Uso do solo	ENV14	m ² a crop eq.	1,70×10 ⁻³	2,04×10 ⁻³	2,39×10 ⁻³	2,32×10 ⁻³
Escassez de recursos minerais	ENV15	kg Cu eq.	5,39×10 ⁻⁴	6,44×10 ⁻⁴	7,84×10 ⁻⁴	1,15×10 ⁻³
Escassez de recursos fósseis	ENV16	kg oil eq.	1,14×10 ⁻²	1,39×10 ⁻²	1,37×10 ⁻²	1,50×10 ⁻²
Consumo de água	ENV17	m ³	1,66×10 ⁻³	1,80×10 ⁻³	5,62×10 ⁻⁴	5,54×10 ⁻⁴
Áreas protegidas	ENV18	adimensional	2,86 ⁻¹	2,86 ⁻¹	0,194	0,351

Tabela C. 2 – Resultados da AICV social dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Geração de empregos	SOC01	empregos.ano/MW	66,57	66,57	60,40	52,57
Aceitação social	SOC02	adimensional	Alto	Alto	Alto	Alto
Saúde e segurança	SOC03	acidentes.ano/kWh	5,35×10 ⁻⁶	6,03×10 ⁻⁶	5,18×10 ⁻⁶	5,05×10 ⁻⁶
Comunidades locais	SOC04	adimensional	0,440	0,440	0,275	0,495

Tabela C. 3 – Resultados da AICV econômico dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*

Indicador	Código	Unidade	Sistema			
			S1	S2	S3	S4
Custo do ciclo de vida	-	US\$/kWh	$6,88 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-2}$	$7,58 \times 10^{-2}$	$8,48 \times 10^{-2}$
P&D	ECO01	US\$/kWh	$9,10 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$
Investimento	ECO02	US\$/kWh	$5,49 \times 10^{-2}$	$7,46 \times 10^{-2}$	$6,12 \times 10^{-2}$	$6,90 \times 10^{-2}$
O&M	ECO03	US\$/kWh	$4,15 \times 10^{-3}$	$3,12 \times 10^{-3}$	$3,22 \times 10^{-3}$	$3,48 \times 10^{-3}$
Descomissionamento e destinação de resíduos	ECO04	US\$/kWh	$6,85 \times 10^{-4}$	$7,72 \times 10^{-4}$	$7,98 \times 10^{-4}$	$8,62 \times 10^{-4}$
LCOE	ECO05	US\$/kWh	$6,88 \times 10^{-2}$	$8,87 \times 10^{-2}$	$7,58 \times 10^{-2}$	$8,48 \times 10^{-2}$
Payback period	ECO06	Anos	6,36	8,71	6,93	8,68

Tabela C. 4 – Resultados da AICV dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1* normalizados internamente

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental					
Aquecimento global	ENV01	0,301	0,243	0,233	0,223
Depleção da camada de ozônio	ENV02	0,274	0,227	0,282	0,218
Radiação ionizante	ENV03	0,276	0,232	0,302	0,189
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	0,320	0,250	0,207	0,222
Formação de material particulado fino	ENV05	0,308	0,240	0,232	0,219
Acidificação terrestre	ENV06	0,322	0,248	0,217	0,213
Eutrofização em água doce	ENV07	0,310	0,237	0,292	0,161
Eutrofização marinha	ENV08	0,242	0,197	0,338	0,224
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	0,172	0,142	0,343	0,343
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	0,330	0,244	0,246	0,180
Ecotoxicidade marinha	ENV11	0,322	0,241	0,253	0,184
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	0,372	0,245	0,178	0,205
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	0,325	0,241	0,270	0,164
Uso do solo	ENV14	0,305	0,254	0,217	0,224
Escassez de recursos minerais	ENV15	0,334	0,279	0,230	0,157
Escassez de recursos fósseis	ENV16	0,294	0,240	0,243	0,223
Consumo de água	ENV17	0,127	0,117	0,375	0,381
Áreas protegidas	ENV18	0,256	0,256	0,174	0,314
Dimensão social					
Geração de empregos	SOC01	0,270	0,270	0,245	0,214
Aceitação social	SOC02	0,250	0,250	0,250	0,250
Saúde e segurança	SOC03	0,251	0,223	0,260	0,266
Comunidades locais	SOC04	0,267	0,267	0,167	0,300
Dimensão econômica					
Custos de P&D	ECO01	0,283	0,251	0,242	0,224
Custos de investimento	ECO02	0,292	0,215	0,262	0,232
Custos de O&M	ECO03	0,208	0,277	0,268	0,248
Custos de descomissionamento	ECO04	0,283	0,251	0,242	0,224
LCOE	ECO05	0,286	0,222	0,260	0,232
Payback period	ECO06	0,296	0,216	0,271	0,217

Tabela C. 5 – Resultados da ASCV dos sistemas da UFV-AR no *Cenário 1*

Indicador	Código	Sistema			
		S1	S2	S3	S4
Dimensão ambiental	ENV	0,284	0,228	0,252	0,236
Aquecimento global	ENV01	0,301	0,243	0,233	0,223
Depleção da camada de ozônio	ENV02	0,274	0,227	0,282	0,218
Radiação ionizante	ENV03	0,276	0,232	0,302	0,189
Formação fotoquímica de ozônio	ENV04	0,320	0,250	0,207	0,222
Formação de material particulado fino	ENV05	0,308	0,240	0,232	0,219
Acidificação terrestre	ENV06	0,322	0,248	0,217	0,213
Eutrofização em água doce	ENV07	0,310	0,237	0,292	0,161
Eutrofização marinha	ENV08	0,242	0,197	0,338	0,224
Ecotoxicidade terrestre	ENV09	0,172	0,142	0,343	0,343
Ecotoxicidade em água doce	ENV10	0,330	0,244	0,246	0,180
Ecotoxicidade marinha	ENV11	0,322	0,241	0,253	0,184
Toxicidade humana cancerígena	ENV12	0,372	0,245	0,178	0,205
Toxicidade humana não cancerígena	ENV13	0,325	0,241	0,270	0,164
Uso do solo	ENV14	0,305	0,254	0,217	0,224
Escassez de recursos minerais	ENV15	0,334	0,279	0,230	0,157
Escassez de recursos fósseis	ENV16	0,294	0,240	0,243	0,223
Consumo de água	ENV17	0,127	0,117	0,375	0,381
Áreas protegidas	ENV18	0,256	0,256	0,174	0,314
Dimensão social	SOC	0,263	0,260	0,239	0,238
Geração de empregos	SOC01	0,270	0,270	0,245	0,214
Aceitação social	SOC02	0,250	0,250	0,250	0,250
Saúde e segurança	SOC03	0,251	0,223	0,260	0,266
Comunidades locais	SOC04	0,267	0,267	0,167	0,300
Dimensão econômica	ECO	0,284	0,225	0,263	0,229
Custos de P&D	ECO01	0,283	0,251	0,242	0,224
Custos de investimento	ECO02	0,292	0,215	0,262	0,232
Custos de O&M	ECO03	0,208	0,277	0,268	0,248
Custos de descomissionamento	ECO04	0,283	0,251	0,242	0,224
LCOE	ECO05	0,286	0,222	0,260	0,232
Payback period	ECO06	0,296	0,216	0,271	0,217
Sustentabilidade	SUS	0,278	0,237	0,250	0,236