

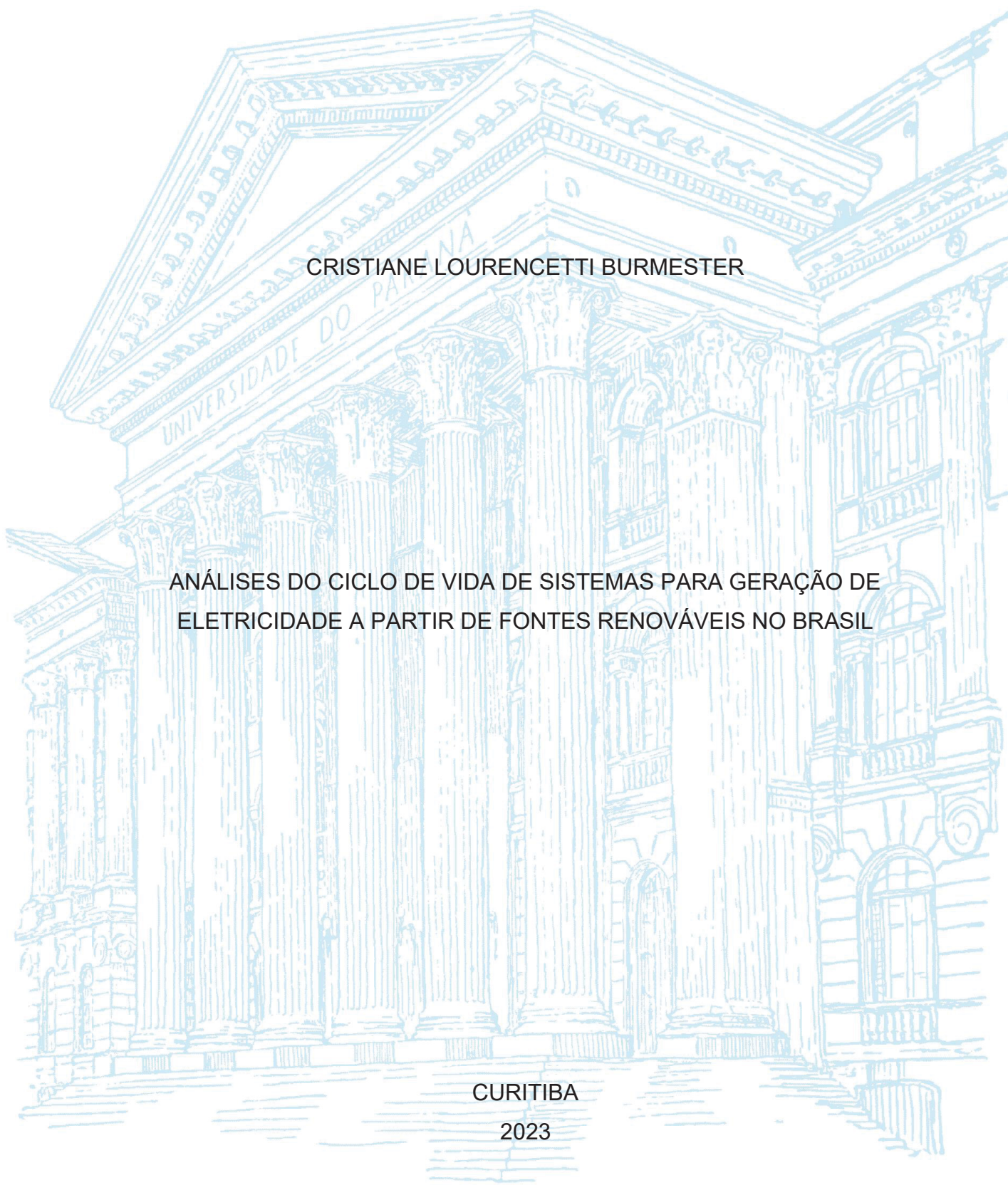
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CRISTIANE LOURENCETTI BURMESTER

ANÁLISES DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL

CURITIBA

2023



CRISTIANE LOURENCETTI BURMESTER

ANÁLISES DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Burmester, Cristiane Lourencetti

Análises do ciclo de vida de sistemas para geração de eletricidade a partir de fontes renováveis no Brasil / Cristiane Lourencetti Burmester. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares

1. Energia renovável - Brasil. 2. Sustentabilidade. 3. Energia elétrica - Produção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Tavares, Sérgio Fernando. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CRISTIANE LOURENCETTI BURMESTER** intitulada: **ANÁLISES DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. SÉRGIO FERNANDO TAVARES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 12 de Dezembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/12/2023 20:15:58.0

SÉRGIO FERNANDO TAVARES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

13/12/2023 10:04:06.0

FERNANDA CRISTINA BARBOSA PEREIRA QUEIROZ
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

14/12/2023 16:25:01.0

MARIA DO CARMO DUARTE FREITAS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

20/12/2023 08:38:34.0

ELOY FASSI CASAGRANDE JUNIOR
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Dedico esta tese de doutorado a todas as pessoas que me apoiaram durante esse processo. Aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar e seguir em frente.

Pai, meu maior exemplo de dedicação, queria muito que você estivesse hoje comigo. Às minhas irmãs, Luciane e Fabiane, e aos meus cunhados, Fabian e Luciano, sempre presentes. À minha tia, Ana Maria Burmester, que sempre acreditou que seria possível. À minha família, minha base em todas as fases da minha vida. Aos meus amigos, por nunca me abandonarem nessa jornada. Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Tavares, por todo o apoio nessa etapa. Essa titulação é para todos vocês, com muito amor e com a certeza de que estarão presentes em todas as minhas próximas conquistas!

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o suporte, o amor, a compreensão e o incentivo às minhas escolhas; obrigada por todos os conselhos e todo o apoio que me deram para tomadas de decisões difíceis e a consequente maturidade.

Aos amigos, obrigada pelo apoio, pelo companheirismo, por estarem juntos em todos os momentos. A caminhada foi trabalhosa, mas vocês a tornaram mais leve.

Muito obrigada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, aos docentes, aos discentes, por todo o suporte, em especial ao meu orientador, professor Sérgio Tavares.

Obrigada à professora Denise Thölken, coordenadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Tuiuti do Paraná (UTP), e aos professores do corpo docente que me acompanharam, incentivaram e fizeram a diferença.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como
nos acostumamos a ver o mundo.”

Albert Einstein

RESUMO

O crescimento populacional acarreta aumento do consumo de energia, fato que se relaciona com uma das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), objetivo 07, que é a garantia e o acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos. Com essa questão em mente e com informações da matriz energética brasileira, a geração de energia elétrica em sua maioria é realizada por usinas hidrelétricas, visto que há grande potencial hídrico e topografia favorável para a implantação delas. Outras fontes de geração de energias renováveis vêm ganhando espaço e aumentando suas participações na matriz energética brasileira, como energias eólicas, fotovoltaicas e de biomassa. Para analisar essas fontes com relação à avaliação e à quantificação de impactos ambientais, foi usada a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para que ela seja eficiente, é importante que sua base de dados seja organizada com informações regionalizadas, contendo os principais insumos usados pela sociedade como matérias-primas e energia. Foram escolhidas quatro fontes de geração de energia renovável hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e biomassa. Para a análise da ACV foi usado o software OpenLCA e as categorias de impacto ambiental que abrangem o método Recipe Midpoint e Endpoint. As usinas escolhidas possuíam informações de inventário, como as condições do inventário possuíam algumas divergências as análises dos impactos foram feitas de forma individual, para entender o comportamento de cada usina e uma comparação entre eles também foi analisada. Pelos impactos analisados a usina eólica estudada acabou apresentando os menores impactos ambientais.

Palavras-chave: sustentabilidade; energia renovável; ACV; matriz energética.

ABSTRACT

Population growth leads to an increase in energy consumption, a fact that is related to one of the goals of the Sustainable Development Goals (SDGs), which is to guarantee and access to cheap, reliable, sustainable and renewable energy for all. With this issue in mind and with information from the Brazilian energy matrix, the majority of electricity generation is carried out by hydroelectric plants, as there is great water potential and favorable topography for their implementation. Other sources of renewable energy generation have been gaining ground and increasing their participation in the Brazilian energy matrix, such as wind, photovoltaic and biomass energy. To analyze these sources in relation to the assessment and quantification of environmental impacts, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology was used. For it to be efficient, it is important that its database is organized with regionalized information, containing the main inputs used by society such as raw materials and energy. Four sources of renewable energy generation were chosen: hydroelectric, wind, photovoltaic and biomass. For the LCA analysis, the OpenLCA software was used and the environmental impact categories that cover the Recipe Midpoint and Endpoint method. The chosen plants had inventory information, as the inventory conditions had some divergences, impact analyzes were carried out individually, to understand the behavior of each plant and a comparison between them was also analyzed. Based on the impacts analyzed, the wind farm studied ended up presenting the lowest environmental impacts.

Key words: Sustainability; Renewable Energy; LCA; Energy Matrix.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Procedimentos metodológicos	24
FIGURA 2 – Parâmetros da ACV	28
FIGURA 3 – Interface Umberto_LCA	30
FIGURA 4 – Interface GaBi	30
FIGURA 5 – Interface GaBi	31
FIGURA 6 – Matriz energética	47
FIGURA 7 – Matriz elétrica.....	49
FIGURA 8 – Mapa do sistema elétrico	50
FIGURA 9– Planta PCH Anta.....	53
FIGURA 10– Unidades geradoras das usinas eólicas	57
FIGURA 11– Localização das usinas eólicas no Brasil.....	58
FIGURA 12– Lista de empresas de energia solar	62
FIGURA 13– Localização das usinas de cana no brasil.....	66
FIGURA 14– Estrutura da ACV	67
FIGURA 15 – Limites do sistema	74
FIGURA 16– Procedimentos metodológicos.....	83
FIGURA 17 – Top 5 Contributions.....	120
FIGURA 18 – Top 5 contributions	127
FIGURA 19 – Top 5 Controbutions Usina Eólica.....	133
FIGURA 20– Top 5 Contributions Biomassa	141
FIGURA 21– Dióxido de carbono (fatores de impacto)	149

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 -	Resultados: usina hidrelétrica	122
GRÁFICO 2 -	Resultados percentuais dos impactos na usina hidrelétrica.....	123
GRÁFICO 3 -	Resultados: usina solar.....	129
GRÁFICO 4 -	Resultados percentuais dos impactos na usina solar	129
GRÁFICO 5 -	Resultados: usina solar.....	130
GRÁFICO 6 -	Resultados: usina eólica	134
GRÁFICO 7 -	Resultados percentuais dos impactos na usina eólica.....	135
GRÁFICO 8 -	Resultados: usina de biomassa	142
GRÁFICO 9 -	Resultados percentuais dos impactos na usina de biomassa	143
GRÁFICO 10 -	Resultados percentuais dos impactos na usina de biomassa	144
GRÁFICO 11 -	Impactos das fontes de energia avaliadas	147
GRÁFICO 12 -	Impactos encontrados na categoria ReCIPE Endpoint	152

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Referencial teórico.....	25
QUADRO 2 - Resumo Parâmetros para inventário	112
QUADRO 3 – Informações gerais	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Geração de eletricidade e emissões de CO ₂ da usina local (2009-2015)	73
TABELA 2 – Impacto dos resultados	75
TABELA 3 – Consolidação das estimativas do ciclo de vida de Itaipu	84
TABELA 4 – Consolidação dos ICVS insumos do ciclo de vida de Itaipu	86
TABELA 5 – ICV consolidado	93
TABELA 6 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – entradas	97
TABELA 7 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – saídas/emissões	97
TABELA 8 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício eletrônico (e-Si) – entradas	98
TABELA 9 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício solar	99
TABELA 10 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de m-Si e p-Si	99
TABELA 11 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m ² de bolacha de silício: m-Si e p-Si	100
TABELA 12 – Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1 kWh	102
TABELA 13 – Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1MWh	103
TABELA 14 – Etapa industrial da produção de eletricidade de 1 KWh – unidade funcional	104
TABELA 15 – Etapa da agricultura	105
TABELA 16 – Emissão dos veículos pesados para 25 km	106
TABELA 17 – Produção de 15 l de <i>diesel</i>	107
TABELA 18 – Etapa industrial da produção de eletricidade de 1MWh – unidade funcional	108
TABELA 19 – Etapa da agricultura	108
TABELA 20 – Emissão dos veículos pesados para 25 km	110
TABELA 21 – Produção de 15 l de <i>diesel</i>	111
TABELA 22– Dados de entrada/saída inventario de usina hidrelétrica de ribeiro (2003)	116
TABELA 23 – Resultados da Análise do Ciclo de Vida da usina hidrelétrica - Dados de Ribeiro (2003)	121

TABELA 24– Dados de entrada/saída Fotovoltaica	125
TABELA 25 – Resultados: usina fotovoltaica	128
TABELA 26 – Dados de entrada/Saída Usina Eólica	131
TABELA 27 – Resultados: usina eólica.....	133
TABELA 28 – Dados de entrada e saída biomassa	136
TABELA 29 – Resultados: usina de biomassa	141
TABELA 30 – Resultados geral da análise do ciclo de vida das fontes renováveis brasileiras.....	145
TABELA 31 – Resultados: geral.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AD	<i>Anaerobic Digestion</i> (Digestão Anaeróbica)
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CdTe	<i>Cadmium Telluride</i>
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CE-EÓLICA	Centro de Energia Eólica
CExD	<i>Cumulative Exergy Demand</i>
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CLP	China Light and Power Company
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CRP	<i>Conservation Reserve Program</i> (Programa de Reserva de Conservação)
EPBT	<i>Energy Payback Time</i> (Tempo de Retorno de Energia)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWEC	Global Wind Energy Council
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Potencial de Aquecimento Global)
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ILUC	<i>Indirect Land Use Change</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JCR	<i>Journal Citation Reports</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i> (Avaliação do Ciclo de Vida)
LFL	Leito Fluidizado
LFX	Leito Fixo
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PUCRS	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PV	Painéis Fotovoltaicos
RO	Osmose Reversa
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
GJ	Gigajoule
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
ha	Hectare
kg	Quilograma
kL	Quilolitro
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
m/s	Metros por segundo
m ²	Metros cuadrados
mm	Milímetro
MW	Megawatt
NO _x	Número de oxidação
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO _x	Óxido de enxofre
TWh	Terawatt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 CARACTERIZAÇÃO DA TESE	23
2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	24
2.1 ETAPA 1.....	24
2.2 ETAPA 2.....	27
2.2.1 Unidade funcional.....	28
2.2.2 Procedimentos de alocação	29
2.2.3 Análise e escolhas de metodologias e softwares ACV	29
2.2.4 Análise de inventário	32
2.2.5 Suposições e limitações do estudo	32
2.2.6 Interpretação	32
2.3 ETAPA 3.....	33
3 REVISÃO DE LITERATURA	34
3.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	35
3.1.1 Tomada de Decisões a partir do Inventário de Análise de Ciclo de Vida	35
3.1.2 Impactos ambientais das Energias Renováveis	38
3.1.3 Metodologia de Análise de Ciclo de Vida das Fontes Renováveis	42
3.2 MATRIZ ENERGÉTICA.....	47
3.3 USINAS E FONTES DE ENERGIA DO BRASIL	51
3.3.1 Usinas hidrelétricas	51
3.3.2 Usinas eólicas	54
3.3.3 Usinas fotovoltaicas	60
3.3.4 Usinas de biomassa	62
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	66
3.4.1 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas hidrelétricas	71
3.4.2 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas fotovoltaicas.....	72
3.4.3 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas eólicas	75
3.4.4 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas de biomassa	77

3.5 SÍNTESE CONCLUSIVA.....	79
4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DAS ENERGIAS RENOVAVEIS.....	80
4.1 ANÁLISE DE INVENTÁRIO USINA HIDRELÉTRICA	81
4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA FOTOVOLTAICA	96
4.3 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA EÓLICA.....	101
4.4 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA DE BIOMASSA	104
4.5 SÍNTESE DOS DADOS COLETADOS.....	112
5 ANÁLISES DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE.....	114
5.1 USINA HIDRELÉTRICA	115
5.2 USINA FOTOVOLTAICA.....	123
5.3 USINA EÓLICA	130
5.4 USINA DE BIOMASSA.....	135
5.5 FONTES RENOVÁVEIS.....	144
5.6 SÍNTESE DA TESE.....	154
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
6.1 LIMITAÇÕES.....	156
6.2 TRABALHOS FUTUROS	156
REFERÊNCIAS.....	158
APÊNDICE A: INPUTS/OUTPUTS DO PROGRAMA	172
APÊNDICE B: DADOS DE ENTRADA.....	176

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, a energia é fundamental para a população. Na Antiguidade é possível afirmar que a principal fonte de energia era a própria força muscular. Com o passar do tempo, os avanços foram sendo alcançados, como a descoberta do fogo e, avançando na linha do tempo, o uso da tração animal, da força dos ventos, até a Revolução Industrial, período em que o carvão, por ser barato, passou a ser usado como fonte de energia. Percebem-se evoluções e mudanças na maneira de gerar a energia, e isso se reflete até o presente, analisando a matriz energética e suas transformações. Fato que justifica esta investigação por gerar inquietude sobre como garantir a geração de energia com fontes não renováveis. Com isso, começa a preocupação com a geração a partir de fontes mais limpas e, como o próprio nome diz, renováveis.

O mundo possui uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás natural. A matriz energética do Brasil se difere da mundial, uma vez que, a análise dos dados apresentados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), percebe-se maior uso de energias renováveis em comparação com o resto do mundo. Se somar lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras fontes renováveis, chega-se a 46,2%, quase metade da nossa matriz energética (EPE, 2021). O uso de energia renovável é importante quando se considera os aspectos econômicos, ambientais e sociais. Por ser mais limpa, ela favorece o meio ambiente. Do ponto de vista econômico e social, o ideal seria atender a um maior número de pessoas com energia e com custo de implantação mais barato.

No Brasil, merece destaque as questões relativas a manutenção pelo alto percentual de energia renovável que sempre caracterizou a matriz energética brasileira. Cabe lembrar que, em 1970, essa participação era superior a 58%, em razão da predominância da lenha. No horizonte de estudo, 2005-2030, observa-se uma quebra de tendência, na qual há um aumento da participação de energia renovável, que alcançará 46,5% em 2030. Muito desse movimento deve-se à introdução da biomassa, do biodiesel e do processo H-bio no conjunto de opções para o desenvolvimento energético nacional – os dois últimos a partir de 2010. Com essa dinâmica de fontes alternativas, a matriz energética brasileira continuará em 2030 com presença de fontes renováveis, representando 46,6%, índice superior ao de 2005.

Assim, o Brasil continua em situação bem confortável em termos de emissões de partículas pela queima de combustíveis, quando sua matriz energética é comparada à dos países ricos (com apenas 6% de participação de fontes renováveis) e à do mundo (com 16% de participação de fontes renováveis) (BRASIL, 2007a).

Paralelamente, existem outras fontes de energia, como as chamadas não renováveis, que geram significativos impactos ambientais e cujas matérias-primas têm custos altos e variáveis, refletindo nas tarifas de eletricidade. Entre elas, destacam-se o gás natural, os derivados do petróleo e o carvão mineral. Já as energias renováveis estão ultimamente em destaque mundial, proporcionando energia elétrica limpa à população, por meio de novos desenvolvimentos tecnológicos. Exemplo disso são as energias providas pelo Sol e pelo vento (EPE, 2021).

Em busca de assertividade na escolha a respeito do meio de geração de energia renovável mais sustentável, esta investigação foca na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) – em inglês, *Life Cycle Analysis* (LCA) – de fontes de usinas renováveis: hidrelétricas, de biomassa, eólicas e fotovoltaicas. Para tanto, adotará como parâmetro para a análise a geração de 1 MWh. Em função dessa problemática envolvendo a geração de energia, coloca-se a seguinte questão: ANÁLISES DO CICLO DE VIDA DE SISTEMAS PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL: desenvolver a ACV para fontes de energia elétrica renovável – hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e de biomassa –, incluídas na matriz energética brasileira.

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a geração de energia elétrica, em sua maioria, é realizada por usinas hidrelétricas, visto que o país possui potencial hídrico e topografia favorável para a implantação delas. Pelo fato de todo o reservatório formado para a geração de energia acarretar perda de área agricultável, é importante a ACV, a fim de verificar se a implantação das usinas não provoca agressão ao meio ambiente. Além disso outros impactos também acontecem como perdas de florestas, inundações de cidades e deslocamentos da população, perda da biodiversidade, mudanças em trajetos de rios e impactos para vida aquática.

Ribeiro (2003) afirma que as estimativas indicam que os processos que mais contribuem para os aspectos ambientais de hidrelétricas são: enchimento do reservatório; ciclo de vida do cimento e do aço; e operação das máquinas de construção.

No caso dos parques eólicos e solares também podem impactar a agricultura.

Daí vem a importância de estudos mais detalhados para o levantamento da ACV das usinas hidrelétricas e de outras fontes de energias renováveis. Como cada usina possui características construtivas e layouts exclusivos, é muito difícil realizar um levantamento de ACV para todas. Portanto, a ideia é utilizar estudos de caso de usinas existentes.

Como afirma Januzzi (2001, n.p.):

Os desafios para continuar a expandir as necessidades energéticas da sociedade com menores efeitos ambientais são enormes. É praticamente impossível eliminar os impactos ambientais de sistemas energéticos. O trabalho dos cientistas e analistas de energia é, na verdade, oferecer alternativas de escolhas para a sociedade e facilitar seu acesso a esse tipo de informação. No entanto, o problema energético não se reduz a uma escolha entre tecnologias para atender à crescente demanda de energia. Essa é uma matéria de grande complexidade, que envolve não só a discussão de aspectos técnicos, mas também de preferências, padrões de conforto desejados pela sociedade e custos de energia. Existe urgentemente a necessidade de questionar os principais condicionantes da crescente demanda de energia: nosso sistema de urbanização, as atividades econômicas e estilos de vida. Somente mudanças nessas áreas possibilitarão maior utilização de tecnologias mais limpas e eficientes, fontes renováveis e descentralizadas.

A ACV, nesta pesquisa, é considerada uma das melhores ferramentas de gestão ambiental, sendo muito utilizada para a identificação e o gerenciamento das fontes de impacto dentro de uma cadeia produtiva (IBICT, 2022). Para que uma ACV seja eficiente, é importante que sua base de dados seja organizada com informações regionalizadas, que contenham os principais insumos usados pela sociedade como matérias-primas e fonte de energia.

A metodologia da ACV é regulamentada pelas normas NBR ISO 14040 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2011) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). Já a avaliação dos impactos sociais e dos custos do ciclo de vida (*Life Cycle Costing*) está relacionada aos conceitos e princípios do Guia do Programa das

Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e da Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC), respectivamente.

O entendimento do conceito pelos governantes requer a definição de metas desafiadoras para aumentar a produção de energia e combustível para transporte a partir de fontes sustentáveis. A ênfase está cada vez mais em fontes renováveis, incluindo eólica, solar, geotérmica, de biomassa ou fotovoltaica, além da recuperação de energia a partir de resíduos. Para tanto, surgem questionamentos tais como: Quais são as consequências ambientais da adoção dessas outras fontes? Como essas várias fontes se comparam entre si? A ACV de fontes de energia renovável tenta responder a essas perguntas com base no método universalmente adotado de ACV.

1.2 OBJETIVOS

Na sequência, são apresentados os propósitos do estudo que nortearam o desenvolvimento do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é desenvolver a ACV para fontes de energia elétrica renovável – hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e de biomassa –, incluídas na matriz energética brasileira.

1.2.2 Objetivos específicos

Com base no objetivo geral, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar na literatura a existência de dados de inventários de ACV das usinas hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e biomassa.
- b) organizar os dados dos inventários para a ACV das usinas hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e de biomassa;
- c) comparar os softwares escolhidos para a análise de ACV e justificar a escolha.

- d) determinar o ciclo de vida de usinas específicas, considerando a geração de 1 MWh de energia.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DA TESE

A proposta tem caráter de ineditismo no Brasil, apesar de ser aplicada há algum tempo em outros países. Assim, a etapa de revisão bibliográfica foi fundamental, por levantar os casos já desenvolvidos internacionalmente e agregar algumas avaliações esporádicas nacionais, como a aplicada à Usina Hidrelétrica de Itaipu.

A proposta busca um diferencial temático quanto à exploração dos processos de geração típicos do Brasil, por exemplo, o da biomassa da cana-de-açúcar, além de outras iniciativas de aproveitamento de resíduos de madeira e biodigestão de dejetos animais.

Outro ponto relevante deste estudo é o fato de contemplar um lado pouco estudado a respeito de fontes renováveis de energia, representado exatamente por seus aspectos não renováveis, em termos de uso de materiais, geração de resíduos ou outros impactos a serem levantados pela pesquisa.

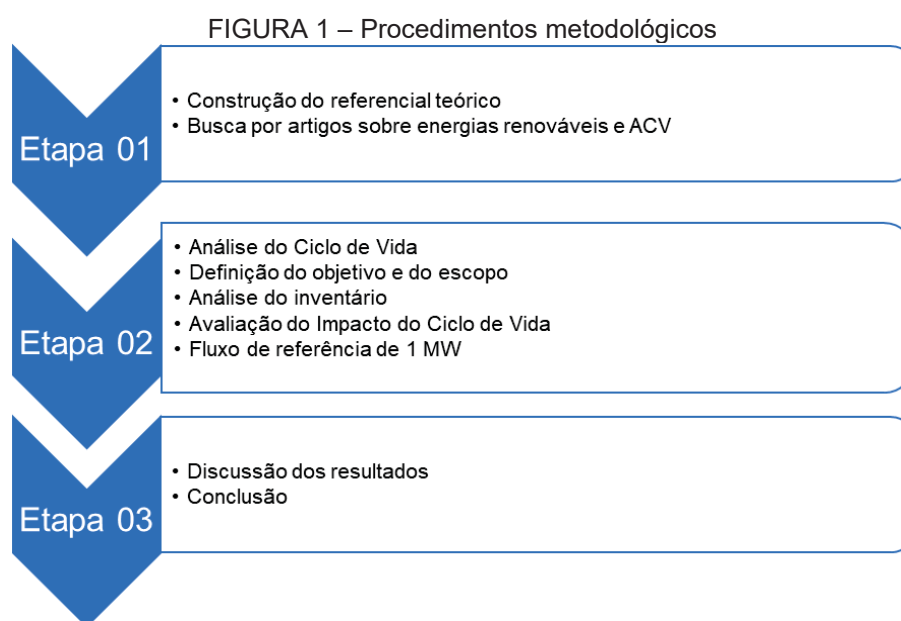
2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

As aplicações de ACV constituem-se metodologicamente como estudos de caso. Nesta pesquisa em específico, além da condução de estudos de casos múltiplos.

Para atingir os objetivos específicos e geral desta pesquisa, primeiramente foi utilizado um inventário de energia e insumos para as fontes de energia citadas. De posse dos dados do inventário foram inseridos no programa OpenLCA os dados de entradas e emissões identificadas, bem como uma posterior análise dos resultados.

Para a ACV foi considerado o processo definido nos estudos já inventariados. A fim de balizar os resultados consideram a mesma unidade de geração de energia.

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos relacionados aos objetivos deste trabalho. A FIGURA 1 representa de forma resumida esses procedimentos.



FONTE: A autora (2022).

2.1 ETAPA 1

Apresentada no próximo capítulo e que serviu para embasar esta pesquisa. Para a escolha das referências alguns critérios foram utilizados como: língua inglesa

ou portuguesa, palavras chaves como ACV, energia renovável, usinas hidrelétricas, eólicas, biomassa e fotovoltaica, e acesso gratuito as publicações.

Para facilitar a busca, o QUADRO 1 apresenta os trabalhos abordados.

QUADRO 1 – Referencial teórico

REFERÊNCIA	ANO	TIPO	TÍTULO
Lenzen e Munksgaard	2002	Artigo	<i>Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines: review and applications</i>
Ribeiro	2003	Dissertação	<i>Inventário de Ciclo de Vida de Geração Hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu</i>
Góralczyk	2003	Artigo	<i>Life-cycle assessment in the renewable energy sector</i>
Heller <i>et al.</i>	2004	Artigo	<i>Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass</i>
Chohfi, Dupas e Lora	2004	Artigo	<i>Análise de emissão e sequestro de CO₂ na geração da eletricidade excedente no setor sucroalcooleiro</i>
Fthenakis e Kim	2005	Artigo	<i>Energy use and greenhouse gas emissions in the Life Cycle of CdTe photovoltaics</i>
Pehnt	2006	Artigo	<i>Dynamic Life Cycle Assessment (LCA) of renewable energy technologies</i>
Lund e Biswas	2008	Artigo	<i>A review of the application of Lifecycle Analysis to renewable energy systems</i>
Varun, Bhat e Prakash	2009	Artigo	<i>LCA of renewable energy for electricity generation systems – a review</i>
Fukurozaki	2011	Tese	<i>Avaliação do Ciclo de Vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa de energia e de energia solar fotovoltaica</i>
Lima	2012	Dissertação	<i>Geração distribuída aplicada a edificações: edifícios de energia zero e o caso do Laboratório de Ensino da FEC/Unicamp</i>
Inatomi e Udaeta	2012	Artigo	<i>Análise dos impactos ambientais na produção de energia</i>
Miranda	2012	Dissertação	<i>Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida</i>
Arvesen e Hertwich	2012	Artigo	<i>Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: a review of present knowledge and research needs</i>
Nguyen e Hermansen	2012	Artigo	<i>System expansion for handling co-products in LCA of sugar cane bio-energy systems: GHG consequences of using molasses for ethanol production</i>
Rubio-Rodríguez <i>et al.</i>	2013	Artigo	<i>Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study</i>
Singh, Pant e Olsen	2013	Livro	<i>Importance of Life Cycle Assessment of renewable energy sources</i>
Brehm	2014	Dissertação	<i>Geração de energia elétrica fotovoltaica distribuída por pequenos consumidores domésticos no Paraná:</i>

REFERÊNCIA	ANO	TIPO	TÍTULO
Stamford e Azapagic	2014	Artigo	<i>potencialidades e aspectos socioambientais</i> <i>Life cycle sustainability assessment of UK electricity</i>
Garcia, Marques e Freire	2014	Artigo	<i>scenarios to 2070</i> <i>Life-cycle assessment of electricity in Portugal</i>
Turconi et al.	2014	Artigo	<i>Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: detailed life cycle assessment of a Danish case study</i>
Rentizelas e Georgakellos	2014	Artigo	<i>Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix</i>
Vázquez-Rowe et al.	2015	Artigo	<i>Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes?</i>
Asdrubali et al.	2015	Artigo	<i>Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: review and results harmonization</i>
Treyer e Bauer	2016	Artigo	<i>Life cycle inventories of electricity generation and power supply inversion 3 of the ecoinvent database – part I: electricity generation</i>
Şengüla et al.	2016	Artigo	<i>A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data</i>
Atilgan e Azapagic	2016b	Artigo	<i>Renewable electricity in Turkey: life cycle environmental impacts</i>
Raugei e Leccisi	2016	Artigo	<i>A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom</i>
Berrill et al.	2016	Artigo	<i>Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe</i>
Atilgan e Azapagic	2016a	Artigo	<i>Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a life cycle basis</i>
Dzikuć e Piwowar	2016	Artigo	<i>Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: the case of Poland</i>
Lelek et al.	2016	Artigo	<i>Life cycle assessment of energy generation in Poland</i>
Geller	2016	Tese	<i>Análise do Ciclo de Vida da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una (Baixo Amazonas, Brasil)</i>
Barros	2017	TCC	<i>Avaliação do Ciclo de Vida de geração de energia elétrica no Brasil: histórico e perspectivas futuras em termos de aquecimento global</i>
Barros, Piekarski e Salvador	2017	Artigo	<i>Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de geração de energia elétrica mais limpa: uma análise de produção científica</i>
Cordeiro, Kasper e Crus	2017	Artigo	<i>Avaliação do Ciclo de Vida da Hidrelétrica Pari-Cachoeira</i>
Lou et al.	2017	Artigo	<i>Life-cycle analysis of photovoltaic systems in Hong Kong</i>
Luo, Yang e Hanafiah	2018	Artigo	<i>Construction of renewable energy supply chain model based on LCA</i>
Bolea, Bolea e Serra	2018	Artigo	<i>Comparison of environmental impacts of renewable and non-renewable energy</i>
Gomes, Moris e Nunes	2018	Artigo	<i>Avaliação de Ciclo de Vida da energia eólica offshore: uma revisão da literatura</i>
Carrascal, Magrini e La Rovere	2018	Artigo	<i>Análise das ACV aplicadas na avaliação dos sistemas de geração de eletricidade em um contexto internacional e suas novas perspectivas</i>
Goga, Friedrich	2019	Artigo	<i>Environmental life cycle assessment for potable water</i>

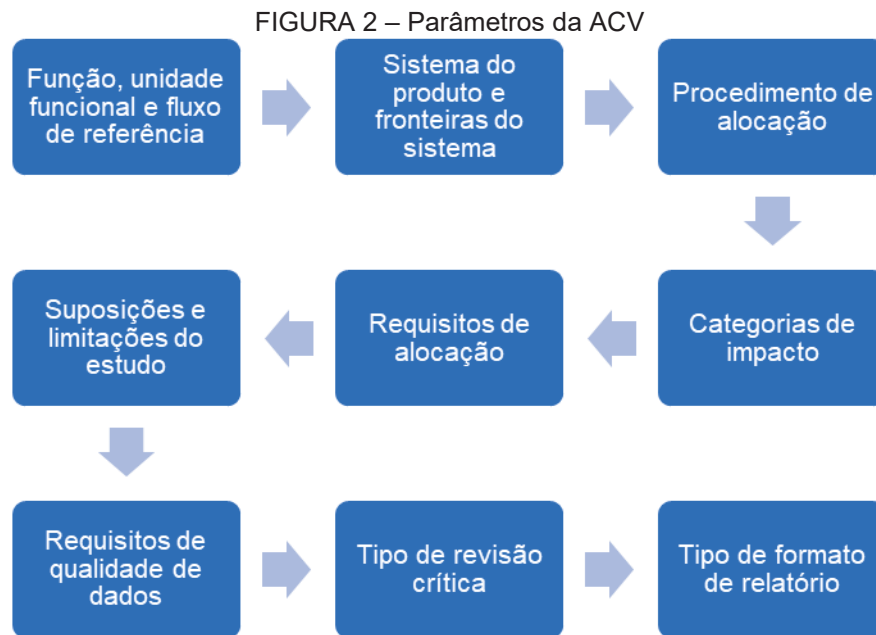
REFERÊNCIA	ANO	TIPO	TÍTULO
e Buckley			<i>production: a case study of seawater desalination and mine-water reclamation in South Africa</i>
Mohammadi <i>et al.</i>	2019	Artigo	<i>Life Cycle Assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry</i>
Leandro	2019	Dissertação	<i>Análise do ciclo de vida de quatro diferentes tecnologias de aproveitamento de energia solar para produção de energia elétrica para poços de Caldas-MG</i>
Souza	2021	Tese	<i>Análise do ciclo de vida consequencial da maximização das fontes renováveis em cenários futuros da matriz elétrica no Brasil</i>
Kouloumpis, Soboloewski e Yan	2020	Artigo	<i>Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine</i>
Clemons <i>et al.</i>	2021	Artigo	<i>Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand</i>

FONTE: A autora (2022).

Os trabalhos apresentados serviram de apoio e aprendizagem para a elaboração dessa tese. Alguns explanaram sobre estudos já realizados sobre ACV, outros trataram apenas do inventário utilizado. O diferencial desse trabalho está na análise dos impactos das fontes apresentado os resultados do impacto ambiental, quantificado para comparação delas.

2.2 ETAPA 2

Para a ACV a FIGURA 2 apresenta os parâmetros que serão adotados e que adaptados da ACV Brasil (2020).



FONTE: Adaptado de ACV Brasil (2020).

Na sequência cada etapa será mais detalhada para um melhor entendimento.

2.2.1 Unidade funcional

A unidade funcional adotada para todas as usinas estudadas foi de 1 MWh. A escolha se justifica pelos dados disponibilizados nos inventários adotados como base nesta pesquisa como Ribeiro (2003) e Leandro (2019).

2.2.2 Sistema do produto e fronteiras do sistema

Nessa etapa são determinadas as fronteiras que serão utilizadas, tanto temporal e geográfica, são definidos o objetivo e escopo.

Para a definição do objetivo e do escopo da ACV, foram seguidos os princípios definidos na norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2011). A abordagem da ACV visa a determinar o impacto ambiental de quatro usinas de geração de energia de fontes renováveis: usina hidrelétrica, usina fotovoltaica, usina de biomassa e usina solar.

O escopo definido para cada empreendimento está explicitado no item 4.5.

2.2.2 Procedimentos de alocação

Na etapa de alocação é a onde se avalia e identifica os efeitos ambientais para que possam ser resolvidos.

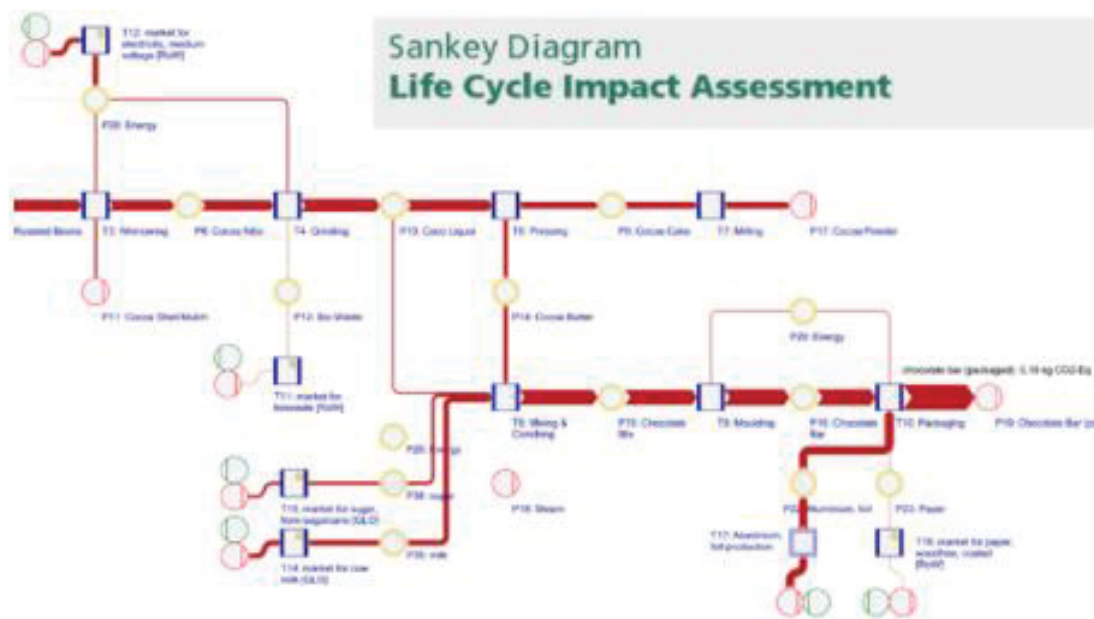
2.2.3 Análise e escolhas de metodologias e softwares ACV

Para realizar a análise de ciclo de vida das usinas fez-se uma pesquisa dos softwares disponíveis no mercado. Buscou-se aqueles que se apresentassem mais versatilidade com vista a ser usado para Análise de Fluxo de Materiais e de Energia (AFM), Contabilidade de Custos, Planejamento e Otimização de sistemas de processos e Pegada de Carbono de Produto.

A escolha da metodologia de cálculo e *softwares* de ACV baseou-se em pesquisas e análises dos trabalhos ACV; definiu-se, então, o uso do *software* OpenLCA.,

Alguns softwares foram pesquisados como o Umberto LCA+, da ifu Hamburg GmbH, é um software para quem procura uma interface mais gráfica.

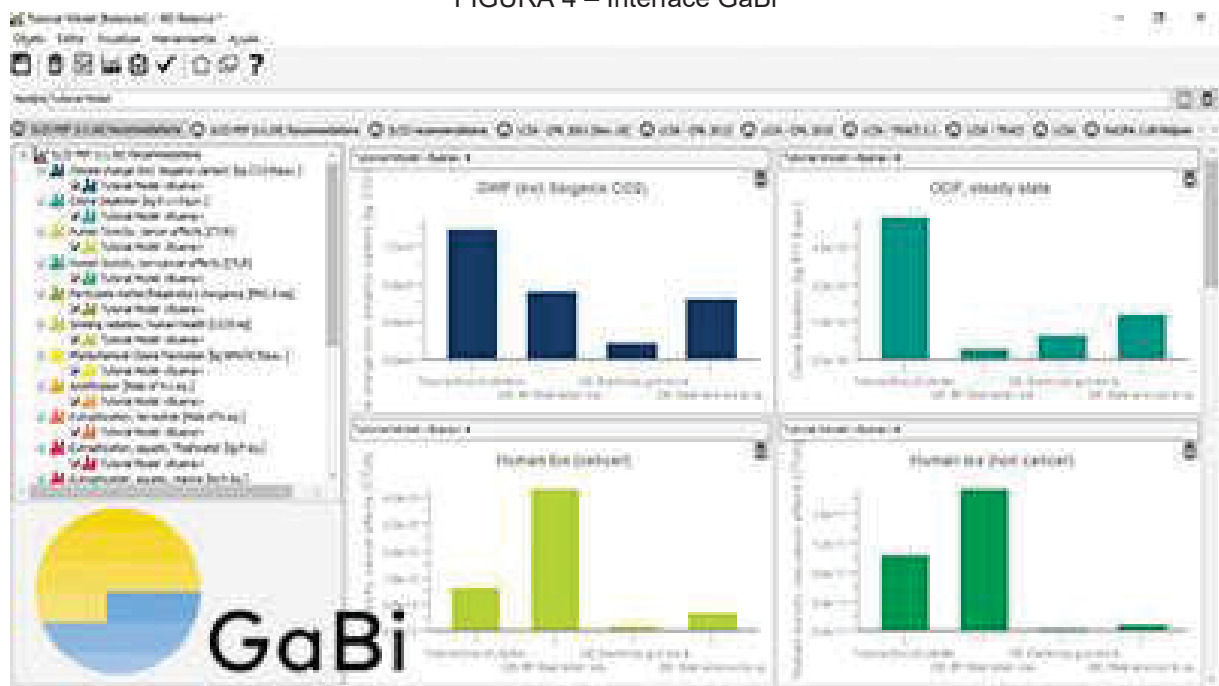
FIGURA 3 – Interface Umberto_LCA



FONTE: <https://acvbrasil.com.br/software/umberto-lca>

O GaBi 4 é um software que foi desenvolvido pelo PE Europe GmbH e IKP University of Stuttgart, usado para realizar avaliações de ciclo de vida o qual possui um banco de dado doecoinvent.

FIGURA 4 – Interface GaBi



FONTE: https://www.ismedioambiente.com/?s=gabi&post_type=cursos

- Custo do ciclo de vida e avaliação social integrados de forma harmoniosa no modelo de ciclo de vida;
- Usabilidade otimizada, com interface do usuário em vários idiomas;
- Avançado e eficiente recurso de repositório e colaboração (atualmente desenvolvido);
- Melhoria contínua e implementação de novas funcionalidades.

Em função das características e por ser um software gratuito foi o OpenLCA foi escolhido para a sequência dos estudos.

O método de avaliação do impacto escolhido foi o ReCIPE o qual é um método de AICV desenvolvido por: RIVM, a Radboud University Nijmegen, o centro de pesquisa CML da Universidade de Leiden e a empresa PRé Consults. O detalhamento será explicado no item 4.

2.2.4 Análise de inventário

Neste estudo, os principais dados de inventário de ACV utilizados para as fontes renováveis foram provenientes da literatura, como segue: usina hidrelétrica - Ribeiro (2003), usina fotovoltaica - Leandro (2019), usina eólica e biomassa – estudos de Souza (2021).

2.2.5 Suposições e limitações do estudo

Como limitador do estudo os dados considerados foram de inventários já existentes.

2.2.6 Interpretação

Como resultado foram analisadas as consistências dos resultados sugestões para trabalhos futuros.

2.3 ETAPA 3

Esta etapa consiste na análise dos resultados e discussões e será abordada no capítulo 4 intitulado “Resultados e Discussões”.

Os trabalhos selecionados foram obtidos em função de busca com as seguintes palavras ACV, energia renovável, hidrelétricas, biomassa, eólica e solar, tanto em inglês quanto em português.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção traz o conceito e revisa as ACVs existentes de sistemas de energia renovável para determinar o entendimento vigente de seus impactos de ciclo de vida completo. Em seguida, eles são comparados entre si e com os sistemas convencionais de geração de energia. Os sistemas de energia renovável revisados são: eólico, solar fotovoltaico, solar térmico (para eletricidade), hidroelétrico, de biomassa sólida, de ondas, geotérmico, de biogás e de marés. A seção também destaca as áreas em que é necessário realizar mais ACV conforme análise dos autores (LUND; BISWAS, 2008).

Um aspecto a destacar deste estudo é que antes de tecnologias novas entrarem no mercado, os gestores devem observar sua superioridade ambiental sobre as opções concorrentes afirmada com base em uma abordagem de ciclo de vida. No entanto, ao aplicar a abordagem prevalecente de ACV de *status quo* a futuros sistemas de energia renovável Pehnt (2006) em seu artigo menciona que não se distinguem os impactos que são “importados” para o sistema, devido ao “sistema de fundo” (por exemplo, devido ao fornecimento de materiais ou energia final para a produção do sistema de energia), e qual é o potencial de melhoria dessas tecnologias em comparação com as concorrentes (por exemplo, devido a inovações de processo e sistema ou efeitos de difusão).

Pehnt (2016) investigou uma abordagem dinâmica para a ACV das tecnologias de energia renovável e prova que, segundo o autor para as cadeias de energia renovável, as entradas de recursos energéticos finitos e as emissões de GEE são extremamente baixas em comparação com o sistema convencional. No que diz respeito aos outros impactos ambientais, os resultados não revelaram qualquer veredicto claro a favor ou contra as energias renováveis.

O desenvolvimento futuro permitirá redução adicional dos impactos ambientais dos sistemas de energia renovável, como o progresso em relação aos parâmetros técnicos dos conversores de energia; os avanços no processo de produção de conversores de energia e combustíveis; e os avanços no que diz respeito a serviços “externos” originados de sistemas convencionais de energia e transporte (PEHNT, 2016).

A aplicação de fontes de energia renováveis pode modificar não apenas o sistema de fundo, mas também outros aspectos posteriores, como o comportamento

do consumidor. Esse efeito é, no entanto, fortemente dependente do contexto e da tecnologia (PEHNT, 2006).

A revisão bibliográfica englobará os assuntos relacionados a ACV, matriz energética, usinas hidrelétricas, usinas fotovoltaicas, usinas eólicas, usinas de biomassa e aplicação da ACV.

3.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

O conceito de ciclo de vida é uma abordagem “do berço ao túmulo” para pensar sobre produtos, processos e serviços, reconhecendo que todos os estágios têm impactos ambientais e econômicos. Qualquer comparação rigorosa e significativa de opções de fornecimento de energia deve ser feita usando uma abordagem de ACV. Essa abordagem tem sido aplicada a um número crescente de sistemas convencionais e renováveis de geração de energia e em uma gama cada vez maior de países. Há uma quantidade de pesquisas relatando os aspectos ambientais e econômicos do ciclo de vida dos sistemas de geração de energia (IBCT, 2018).

As definições dos conceitos fundamentais da ACV, sua metodologia e aplicação são descritas na série de normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2011) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). Essas normas já foram introduzidas em alguns países, embora na Polônia ainda esteja em fase de tradução para o polonês. No entanto, as empresas nesse país tentam avaliar como os seus produtos influenciam o ambiente e quais são as possibilidades de melhoria da tecnologia no processo de produção existente para reduzir o seu impacto ambiental (GÓRALCZYK, 2003).

3.1.1 Tomada de Decisões a partir do Inventário de Análise de Ciclo de Vida

Lenzen e Munksgaard (2002), no estudo sobre as turbinas eólicas, apontam que, apesar de a estrutura e a tecnologia da maioria das turbinas eólicas modernas diferirem um pouco em uma ampla gama de classificações de potência, os resultados das avaliações existentes do ciclo de vida de sua energia e intensidade de CO₂ mostram variações consideráveis. Embora a gama de intensidades de energia reflita em economias de escala, sua dispersão se deve a discrepâncias no conteúdo de energia dos materiais e na metodologia e no escopo das análises. Além disso, as intensidades de energia dependem crucialmente do país de fabricação, da

reciclagem ou da revisão da turbina após a vida útil e da escolha do material da torre. Ademais, as intensidades de CO₂ variam de acordo com as misturas de combustíveis nacionais.

Medidas de energia do ciclo de vida ou de emissões de CO₂ podem ser empregadas em políticas e planejamentos, especialmente para avaliações comparativas de risco e sustentabilidade e para mudanças de fonte e cenários de crescimento de capacidade. Se essas medidas são feitas para auxiliar a tomada de decisão, as incertezas nas ACVs devem ser minimizadas pela conformidade com uma metodologia padronizada e pelo uso de técnicas híbridas baseadas em insumo-produto (Lenzen e Munksgaard, 2002).

No cenário internacional, Góralczyk (2003) constatou que a indústria de energia polonesa enfrenta desafios em matéria de segurança energética, competitividade, melhoria das empresas nacionais e proteção ambiental. As diretrizes ecológicas dizem respeito à eliminação de soluções prejudiciais e ao gerenciamento eficaz da energia, que formarão a base para o desenvolvimento sustentável. Essa indústria é obrigada a aumentar sistematicamente a parcela de energia obtida de fontes renováveis no total de energia vendida aos clientes.

Além das questões econômicas, é dada particular importância aos fatores ambientais associados à escolha da fonte de energia. É aí que a ACV é importante. O principal objetivo da ACV é identificar os impactos ambientais de bens e serviços durante todo o ciclo de vida do produto ou do serviço. Portanto, a ACV pode ser aplicada para avaliar o impacto da geração de eletricidade no meio ambiente; assim, permitirá que os produtores tomem melhores decisões relativas à proteção ambiental (GÓRALCZYK, 2003).

As fontes renováveis de energia analisadas por Góralczyk (2003) incluem a energia fotovoltaica, turbinas eólicas e hidrelétricas. O objetivo e o escopo da análise compreendem a avaliação dos impactos ambientais da produção de 1 GJ de energia a partir das fontes acima mencionadas. O estudo analisou a construção, a operação e a disposição de resíduos em cada usina. A análise atingiu as categorias de impacto, nas quais a influência ambiental foi mais significativa, ou seja, esgotamento de recursos, GWP, acidificação e eutrofização. Os resultados da ACV foram apresentados com base em pesquisas europeias e australianas.

Essa análise foi estendida com uma comparação entre os impactos ambientais da energia de fontes renováveis e convencionais. Esse relatório foi

concluído com uma análise das possibilidades de aplicação dos resultados da pesquisa e das regras de ACV na indústria de energia polonesa, com foco na futura adesão da Polônia à União Europeia (GÓRALCZYK, 2003).

Heller *et al.* (2004) realizou pesquisa em regiões temperadas apontando que salgueiros arbustivos estão sendo desenvolvidos como “culturas lenhosas de curta rotação” devido ao seu potencial para alta produção de biomassa em curtos períodos, à facilidade de propagação vegetativa, à ampla base genética e à capacidade de rebrotar após várias colheitas. Entendimento e trabalho com a biologia do salgueiro são importantes para a agricultura e o sucesso econômico do sistema. O desempenho energético, ambiental e econômico da produção de biomassa de salgueiro e da sua conversão em eletricidade é avaliado usando métodos de modelagem de ciclo de vida.

A relação de energia líquida (eletricidade de combustível fóssil gerada/ciclo de vida consumido) para salgueiro varia de 10 a 13 para processos de queima direta e gaseificação. São alcançadas reduções de 70% a 98% (em comparação com a eletricidade gerada pela rede dos EUA) nas emissões de GEE, bem como de NO_x, SO₂ e outras. Apesar do múltiplo desenvolvimento ambiental e rural do salgueiro, que gera benefícios, seu alto custo de produção tem implantação limitada. Custos serão reduzidos por melhorias significativas nos rendimentos e na eficiência de produção e pela valorização do sistema ambiental e rural (HELLER *et al.*, 2004).

Os autores constaram ainda que com políticas como o Programa de Reserva de Conservação – *Conservation Reserve Program* (CRP) –, créditos fiscais federais de biomassa e carteira renovável, os padrões tornarão o custo do salgueiro competitivo no curto prazo. A poluição do ar evitada com a substituição da eletricidade gerada por combustível fóssil convencional por aquela produzida a partir do salgueiro tem um custo de dano estimado de US\$ 0,02 a US\$ 0,06 kWh.

A intensidade da terra de cerca de $4,9 \times 10^{-5}$ ha-ano/kWh é maior do que a de outras fontes de energia renováveis. Essa pode ser considerada a limitação mais significativa do salgueiro, mas, ao contrário de outras culturas de biomassa, como milho, pode ser cultivada em milhões de hectares de terras agrícolas marginais, melhorando condições do local, qualidade do solo e diversidade da paisagem (HELLER *et al.*, 2004).

Uma vantagem clara da biomassa de salgueiro em comparação com outras energias renováveis é que ela é um recurso de estoque, enquanto o vento é

intermitente. Com apenas 6% do consumo atual de energia dos EUA atendidos por fontes renováveis, o desenvolvimento acelerado de biomassa de salgueiro e de outras fontes de energia renováveis é crítico para lidar com as questões de energia, segurança e impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis (HELLER *et al.*, 2004).

3.1.2 Impactos ambientais das Energias Renováveis

Góralczyk (2003) desenvolveu um estudo para avaliar o impacto ambiental da produção de 1 GJ de energia. O escopo da pesquisa considera a construção, a operação e a disposição dos resíduos nas usinas analisadas. De modo a permitir a comparação entre as diferentes formas de produção de energia, a atribuição de cada impacto reconhecido e considerou uma unidade funcional definida: 1 GJ de energia produzida.

Para a realização da ACV foi desenvolvido um ICV, o qual abrangeu todas as entradas e saídas reconhecidas para a unidade funcional. A fim de traduzir os resultados alcançados no inventário para a AICV, as categorias de impacto foram usadas. A análise cobriu as categorias de impacto em que a influência ambiental é a mais significativa, ou seja, GWP, acidificação e eutrofização. Os impactos dos elementos específicos do inventário em cada categoria de impacto são calculados pelos respectivos fatores (GÓRALCZYK, 2003).

Portanto, a emissão de CO₂ impacta o efeito estufa, mas a emissão de freons afeta tanto o efeito estufa quanto a destruição da camada de ozônio. As emissões de SO₂ e NO_x são qualificadas para acidificação. Com base nos dados coletados na fase de inventário, é examinado o impacto potencial no meio ambiente. Os resultados da ACV foram apresentados com base em pesquisas europeias e australianas e cobriram usinas hidrelétricas, fotovoltaicas e turbinas eólicas, bem como fontes convencionais de energia (GÓRALCZYK, 2003).

O autor prossegue concluindo que, ao comparar as diferentes fontes de energia, é evidente que a energia de uma usina hidrelétrica é uma tecnologia de geração de energia muito eficiente. Nesse caso, as emissões de GEE foram estimadas em, aproximadamente, 40% da geração convencional a carvão, enquanto outras emissões são insignificantes. A análise da aquisição de energia fotovoltaica é baseada em uma grande fazenda solar. As emissões geradas – principalmente GEE e resíduos – são as maiores entre as fontes renováveis, mas relativamente baixas

em comparação com as fontes convencionais. A eletricidade das turbinas eólicas é posicionada entre a energia hídrica e solar no que diz respeito às quantidades de emissões de NO_x, SO_x e GEE (GÓRALCZYK, 2003).

O desenvolvimento sustentável requer métodos e ferramentas para medir e comparar os impactos ambientais das atividades humanas para vários produtos (bens e serviços) (Varun, Bhat e Prakash, 2009). Fornecer bens e serviços à sociedade contribui para ampla gama de impactos ambientais, os quais incluem emissões para o meio ambiente e o consumo de recursos, bem como outras intervenções, como o uso da terra etc. A ACV é uma técnica para avaliar as cargas ambientais de um produto ou sistema. Varun, Bhat e Prakash (2009) revisaram as análises existentes de energia e ciclo de vida de CO₂ de sistemas de geração de eletricidade baseados em fontes renováveis.

Os autores apontaram que as emissões de carbono dos sistemas de energia renovável não são nulas, como geralmente é assumido ao avaliar os créditos de carbono. Além disso, a gama de emissões de carbono desses sistemas foi descoberta na literatura existente e comparada com a de sistemas baseados em combustíveis fósseis, de modo a auxiliar na escolha racional de sistemas de fornecimento de energia (VARUN; BHAT; PRAKASH, 2009).

Arvesen e Hertwich (2012) revisaram criticamente o conhecimento dos impactos ambientais do ciclo de vida da força do vento. Os autores fizeram uma análise sobre os impactos ambientais do ciclo de vida da energia eólica. Sua conclusão foi de que o conjunto de ACVs da energia eólica fornece uma compreensão geral boa. Segundo o levantamento dos resultados que aparecem na literatura, os valores de referência são de, por exemplo, 0,060 ($\pm 0,058$) kWh de energia utilizada e 19 (± 13) g CO₂e emitido por kWh de eletricidade, sugerindo um bom desempenho ambiental em termos da relação à energia baseada em combustíveis fósseis.

As emissões totais dos parques eólicos *onshore* e *offshore* são comparáveis. A maior parte das emissões ocorre geralmente na produção de componentes: em terra, a turbina eólica domina; enquanto, em mar aberto, a subestrutura torna-se relativamente mais importante. Fortes efeitos positivos de escala estão presentes na extremidade inferior do espectro de tamanho de turbina, mas não há evidências claras de tais efeitos para unidades de tamanho MW. Foram identificadas fraquezas e lacunas na análise realizada sugerindo que pesquisas futuras abordem o tema.

Como problemas de confusão e incertezas devido à variabilidade nos resultados, e incompreensibilidade em função das complexas redes de operações que são estudadas e muitas suposições que são feitas, precisam receber a devida atenção (ARVESEN e HERTWICH, 2012).

Isso inclui impactos mal compreendidos em categorias de toxicidade e esgotamento de recursos, falta de base empírica para suposições sobre a substituição de peças e aparente falta de considerações detalhadas de operações *offshore* para parques eólicos em águas oceânicas. Por fim, concluíram que a necessidade da pesquisa em ACV deve ir além das avaliações baseadas em unidades, mas também devem abordar aspectos temporais e a escala dos impactos (ARVESEN e HERTWICH, 2012).

As emissões totais de parques eólicos *onshore* e *offshore* são comparáveis entre si. Geralmente elas ocorrem na produção de componentes; em parques *onshore*, a turbulência do vento domina, enquanto nos *offshore*, a subestrutura torna-se relativamente mais importante. Os efeitos positivos da escala estão presentes na extremidade inferior do espectro de turbulência, mas não há evidências claras para os efeitos imediatos de unidades de tamanho. Incluem-se impactos mal compreendidos em categorias de toxicidade e redução de recursos, falta de base empírica para suposições sobre a substituição de peças e aparente falta de considerações detalhadas de operações *offshore* para fazendas de vento em águas oceânicas (ARVESEN e HERTWICH, 2012).

As aplicações do método para modelar os benefícios da reciclagem geralmente carecem de transparência e podem ser inconsistentes. Os valores do fator de capacidade são geralmente mais altos do que os valores médios vigentes. Há necessidade de ACV para ultrapassar as avaliações baseadas na unidade em relação aos aspectos de tempo e da escala de impactos (ARVESEN; HERTWICH, 2012).

Singh, Pant e Olsen (2013) apresenta o conceito e a importância da ACV no contexto das fontes de energia renováveis e discute as principais questões na condução de sua ACV. Isso é seguido por uma discussão aprofundada da ACV para algumas das fontes de bioenergia mais comuns, como sistemas de produção agrícola de biogás e bioetanol, biogás de grama, biodiesel de óleo de palma, biodiesel de óleo de cozinha usado e gordura animal, biodiesel de jatrofa, bioetanol lignocelulósico, etanol de mandioca e melaço de cana-de-açúcar, sistemas fotovoltaicos residenciais, energia eólica, biodiesel microalgal, bio-hidrogênio e biometano.

Por meio de exemplos reais, a versatilidade da ACV é bem enfatizada. Escrito por especialistas de todo o mundo, o livro é uma compilação de informações sobre ACV de sistemas de bioenergia e fornece uma plataforma para estimular novas ideias e pensamentos. A obra é direcionada a profissionais de ACV e se tornará uma ferramenta útil para pesquisadores que trabalham em diferentes aspectos da bioenergia (SINGH; PANT; OLSEN, 2013).

Barros, Piekarski e Salvador (2017) demonstraram que a energia eólica tem um dos menores índices de impacto ambiental em sua geração em relação a outras fontes, de acordo com os artigos abordados. Em alguns países, as fontes mais limpas são promissoras devido à sua capacidade de gerar eletricidade em locais com altas taxas de vento e alta captura de luz solar. Dessa forma, os resultados do artigo podem ser utilizados em políticas públicas, para desenvolver ações e incentivos de diferentes matrizes energéticas e contribuir com a produção científica sobre ACV e geração de energia elétrica (BARROS, PIEKARSKI e SALVADOR, 2017).

Na última década, o consumo de energia cresceu, o que, consequentemente, impulsionou a necessidade de aumentar a quantidade de energia gerada. Esse aumento na geração de energia resultou em alguns impactos ambientais como o potencial de diminuição abiótica, acidificação potencial, Eutrofização potencial, Eco-toxicidade aquática (doces e marinha), Toxicidade Humana potencial, potencial de depleção da camada de ozônio, Potencial de produção de ozônio fotoquímico, Eco-toxicidade Terrestre potencial (Carrascal, Magrini e La Rovere, 2018).

O objetivo da pesquisa de Carrascal, Magrini e La Rovere (2018) foi realizar uma revisão geral da ACV com ênfase na geração de energia, bem como em abordagens novas da ACV. Com base na revisão sistemática de trabalhos de pesquisa acadêmica de diferentes regiões do mundo, a análise foi feita sobre a ACV aplicada em usinas que utilizam recursos renováveis e não renováveis. Um contexto geral de ACV aplicado a esses tipos de sistemas foi estabelecido. Além disso, os parâmetros de ACV foram analisados para encontrar as principais questões sobre a aplicação de ACV e para identificar seus pontos fracos.

Conforme os autores com relação à avaliação de impacto ambiental, os procedimentos não são bem detalhados ou modelos adotados pelos softwares para gerar os resultados de impacto. O estudo também identificou os aspectos e impactos

ambientais mais relevantes do ciclo de vida da geração de eletricidade. Finalmente, essa pesquisa revisou abordagens metodológicas sobre o uso de ACV para avaliar a geração de energia (CARRASCAL, MAGRINI e LA ROVERE, 2018). Os principais aspectos ambientais analisados nas ACVs, segundo o artigo, dos sistemas de geração de energia elétrica estão relacionados com as emissões de GEE, os quais são relacionados com os impactos de Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP), e emissões de NOx e SO2 relacionadas com Potencial de Acidificação e Eutrofização. Também foram verificados outros aspectos que apareceram em alguns estudos como o consumo de energia e a ocupação da terra. Também foram avaliados impactos de Eco-toxicidade aquática (água doce e marinha) e o potencial de esgotamento de recursos abióticos (CARRASCAL; MAGRINI; LA ROVERE, 2018).

3.1.3 Metodologia de Análise de Ciclo de Vida das Fontes Renováveis

A ACV é uma metodologia que permite avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. Embora possa ser realizada com dados aproximados, para obter resultados precisos, é necessário realizar uma análise detalhada (Góralczyk, 2003). Cabe o destaque que é importante adaptar a metodologia às condições locais, por exemplo na Polônia, os resultados da pesquisa indicam as regiões que sofrem o maior perigo ambiental devido à aquisição de energia, o que destaca a necessidade de uma gestão ambiental eficaz.

Góralczyk (2003) concluiu que a minimização da poluição é um objetivo crucial para a indústria energética de seu estudo, pois afeta a imagem da empresa e sua competitividade no mercado global. Portanto, a ACV pode ser uma ferramenta valiosa para ajudar a indústria polonesa a alcançar esses objetivos e melhorar sua posição no mercado internacional.

Ribeiro (2003) para construir o ICV da Usina Hidrelétrica de Itaipu fez uma revisão bibliográfica sobre o uso da ACV em hidrelétricas, estabelecendo recomendações gerais. O pesquisador estudou a Itaipu quanto à sua obra civil e ao consumo de insumos na construção e na operação por cem anos, obtendo, ao final, um ICV com os aspectos ambientais mais significativos em termos de energia gerada (MWh).

Chohfi, Dupas e Lora (2004) estudaram o balanço de massa de sequestro de CO₂ no setor sucroalcooleiro. Foi utilizada a metodologia de ACV de geração de eletricidade excedente e foi calculado o balanço de CO₂. Os resultados obtidos mostraram que 145,3 toneladas de CO₂/hectare/ciclo são sequestradas no cultivo da cana-de-açúcar, e 111,5 toneladas de CO₂/hectare/ciclo são emitidas na cogeração de eletricidade excedente, resultando no saldo favorável de sequestro de CO₂ de 33,8 toneladas/hectare/ciclo de vida de eletricidade excedente, quantia fornecida às empresas de distribuição de energia.

Baseando-se na metodologia de ciclo de vida, os autores concluíram que o cultivo da cana-de-açúcar para a produção de eletricidade excedente renovável proporcionou um saldo positivo no sequestro de CO₂. Quando comparada com outras formas de geração de eletricidade, a energia produzida em usinas de álcool e açúcar apresenta os mais baixos valores de emissão de CO₂.(Chohfi, Dupas e Lora, 2004).

Fukurozaki (2011) estudou, com base na metodologia de ACV, o desempenho energético e ambiental de potenciais rotas de hidrogênio – gaseificação da biomassa via Leito Fixo (LFX) e Leito Fluidizado (LFL) – e de energia solar fotovoltaica. Após a revisão da literatura e a descrição dos procedimentos de análises, os resultados da ACV foram apresentados e discutidos em termos de demanda acumulada de energia, tempo de retorno de investimento em energia, danos relacionados à saúde humana e qualidade de ecossistema, recursos minerais e combustíveis fósseis.

Inatomi e Udaeta (2012) fizeram uma análise sobre a mitigação dos impactos ambientais em fontes de geração de energia. Eles descrevem como os impactos ambientais de quatro fontes de energia, renováveis e não renováveis – termelétrica, hidrelétrica, eólica e solar fotovoltaica – podem ser mitigados através da utilização de Planejamento Integrado de Recursos. Como conclusão, os autores alertam que cada forma de obtenção de energia, renovável ou não, possui pontos positivos e negativos. Entretanto, os pesos para cada ponto devem ser atribuídos corretamente para que o planejamento seja válido e realmente possa mitigar os impactos ambientais. Para isso, é importante conhecê-los e quantificá-los para o planejamento. Assim, a inserção de recursos renováveis no planejamento energético também contribui para mitigar os impactos ambientais provocados pela obtenção de

energia elétrica e alcançar as metas estabelecidas em consenso comum pelos países que assinaram o Protocolo de Kyoto.

Miranda (2012) calculou um fator de emissão de GEE característico para a matriz energética brasileira. Sua base foram os estudos de ACV já publicados e que se referem às tecnologias da matriz. Durante a revisão sistemática da literatura, a autora percebeu a quase inexistência de estudos de ACV relacionados especificamente a usinas brasileiras.

Carnevale, Lombardi e Zanchi (2014) comparam a ACV entre módulos fotovoltaicos de silício e película fina, bem como sistemas solares térmicos, que são tecnologias comumente instaladas para atender parcialmente à demanda energética doméstica. Embora outros estudos tenham analisado separadamente o desempenho energético e ambiental de coletores fotovoltaicos e solares térmicos, este estudo propõe uma comparação entre diferentes sistemas de aproveitamento da energia solar, gerando diferentes tipos de energia. A comparação foi realizada considerando 1 m² de superfície ocupada pelo equipamento, e os impactos ambientais foram avaliados com base nos indicadores propostos pelo método Eco-indicador 95. Os resultados indicaram que o sistema baseado em coletor solar térmico obteve a maioria dos indicadores favoráveis, com oito em cada dez no caso de não reciclagem de materiais após a fase de desmontagem, e seis em cada dez no caso de reciclagem de materiais após a fase de desmontagem. Além disso, os módulos de filme fino e o coletor térmico solar apresentaram os menores valores de EPBT e tempo de retorno de CO₂ equivalente. Em resumo, os resultados evidenciaram que tanto o coletor fotovoltaico quanto o solar térmico podem proporcionar benefícios ambientais e energéticos comparáveis em instalações de escala doméstica.

Brehm (2014) analisou o panorama da microgeração fotovoltaica distribuída por pequenos consumidores no estado do Paraná, para inferir se tal tecnologia seria viável como possível fonte geradora de energia. Para isso, realizou uma pesquisa bibliográfica sobre o tema e fez um levantamento dos pedidos de ligação desse tipo de sistema para a Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Como conclusão, o autor menciona que a tecnologia de microgeração fotovoltaica distribuída já se mostra viável em aspectos ambientais, técnicos e normativos, estando muito próxima de se viabilizar economicamente no Brasil.

Bolea, Bolea e Serra (2016) tiveram como objetivo principal a comparação dos impactos ambientais associados à geração de eletricidade a partir de duas

fontes diferentes: uma usina convencional de carvão – que inclui a captura de CO₂ por meio de tecnologia à base de amina pós-combustão – e uma usina de energia eólica, com uma saída de energia comparável à da usina convencional. A ACV foi aplicada para ambas as tecnologias, por meio do *software* SimaPro 8.0. Essa ferramenta utiliza procedimentos padronizados, como a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009). A metodologia aplicada foi o IMPACT 2002+, que quantificou os seguintes indicadores: i) danos humanos à saúde; ii) qualidade do ecossistema; iii) esgotamento de recursos; e iv) contribuição das mudanças climáticas. Os resultados da ACV mostraram uma grande redução na contribuição da mudança climática ao usar a captura de CO₂ em usinas de carvão. Além disso, também indicaram o esgotamento de recursos pela utilização de combustíveis fósseis para geração de energia. Por outro lado, o maior impacto da usina eólica foi no uso de materiais para fabricação.

Ramos, Durante e Callejas (2017) demonstraram a contribuição da metodologia de ACV na quantificação dos potenciais impactos ambientais no processo de produção de energia fotovoltaica e hidrelétrica. A metodologia consistiu em revisão sistemática de artigos, teses e dissertações em bancos de dados e portais de pesquisa científica. A sistematização foi estruturada em termos das categorias de impacto, métodos e *softwares* de quantificação e valores dos potenciais impactos das gerações hidrelétrica e fotovoltaica. Os resultados mostraram que as maiores emissões de dióxido de carbono estão concentradas na fase de construção das hidrelétricas e dos módulos fotovoltaicos, sendo que a operação responde por uma parcela menor de emissões. A diferença entre os impactos de ambas as fontes geradoras se revela através das linhas de transmissão e distribuição, que são desconsideradas para geração distribuída.

Barros (2017) avaliou o desempenho ambiental de geração de energia elétrica no Brasil de composições passadas e prospecções futuras em termos de aquecimento global. Para isso, foi utilizada a ferramenta de ACV, de modo a avaliar o desempenho ambiental da matriz energética no Brasil em termos de aquecimento global. Fez também uma busca de dados referentes às principais fontes energéticas brasileiras no MME e na ANEEL, compondo o estudo com a análise de cenários para o Brasil entre os anos de 2014 e 2024. Para procedimentos metodológicos, geração e análise dos resultados, foram utilizados o *software* Umberto NXT Universal, a NBR ISO 14040 (ABNT, 2011), a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009) e a

base de dados da Ecoinvent v 3.3. Os resultados indicam que os maiores impactos ambientais estão concentrados em fontes não renováveis, com destaque para o gás natural, o petróleo e o carvão. O dióxido de carbono é o principal contribuinte para as emissões atmosféricas em toda a matriz energética nacional ao longo do período analisado. O *IPCC 2013* foi utilizado na geração dos resultados para a categoria de GWP de cem anos. Segundo o autor, fontes renováveis, como a eólica, são vistas no país como promissoras, devido à fonte limpa e à capacidade de geração de energia elétrica em locais com altos índices de ventos. O autor também identificou uma lista de pesquisas publicadas sobre ACV nas áreas de matrizes de energia elétrica.

Barros, Piekarski e Salvador (2017) exploraram a análise de uma produção mais limpa de energia. Constataram que há demandas por investimentos, desenvolvimento de novas tecnologias e geração de conhecimento sobre os desempenhos ambientais de diferentes fontes de geração de eletricidade. Eles buscaram uma análise teórica sistematizada de pesquisas científicas sobre a ACV de sistemas de geração de energia elétrica. A análise teórica sistematizada foi construída por meio do método *Methodi Ordinatio*. Os critérios para as análises teóricas foram: palavras-chave (“LCA + Elétrica * Mix *”, “LCA + Elétrica * Energia + Avaliação do Ciclo de Vida + Produção de energia”), autor, ano, país, universidade, periódico, *Journal Citation Reports* (JCR), número de citações e *Methodi Ordinatio*. Após a aplicação do método, 26 artigos foram selecionados para discussão, cujos resultados mostraram que há maior incidência de artigos publicados em países europeus. Entre os principais métodos de avaliação utilizados, estão os ReCiPe, CML, Impact 2002+, CED.

Goga, Friedrich e Buckley (2019) avaliaram a questão da água, que está se tornando um recurso escasso em muitas partes da África do Sul, em que, vários planos estão sendo colocados em prática para satisfazer a crescente demanda urbana por esse recurso. Dois dos métodos atualmente considerados são a dessalinização da água do mar e a reutilização da água afetada pelas atividades em minas, com base no uso de membranas de Osmose Reversa (RO). Devido ao alto consumo de energia e aos impactos ambientais associados, esses métodos estão sob escrutínio e, portanto, uma ACV foi realizada para ambos os métodos. Para permitir a comparação entre os dois, foi especificada a unidade funcional de 1 kL de água potável.

Os dados do projeto de Goga, Friedrich e Buckley (2019) foram coletados para as fases de construção e operação das usinas, enquanto o SimaPro foi usado como o *software* da ACV, com a aplicação do método ReCiPe Midpoint. Os resultados indicaram que a fase de operação carregou uma carga ambiental maior do que a dos materiais necessários para a infraestrutura. Em particular, a produção e o consumo de eletricidade são responsáveis pela maioria dos impactos ambientais decorrentes das respectivas fábricas. O consumo total de energia da planta de dessalinização proposta é de 3,69 kWh/kL; para a planta de recuperação de água da mina, o consumo é de 2,16 kWh/kL. Isso resulta na emissão de 4,17 kg CO₂ eq kL para a planta de dessalinização e na de 2,44 kg CO₂ eq/kL para a planta de recuperação.

Uma análise posterior indicou que a substituição da eletricidade sul-africana pelas energias fotovoltaica (solar) e eólica tem potencial para trazer benefícios ambientais significativos (Goga, Friedrich e Buckley, 2019). A integração desses sistemas de energia renovável com dessalinização e tratamento, por membrana, de água afetada por minas tem demonstrado a redução dos encargos ambientais a níveis associados aos das tecnologias convencionais de água alimentadas pela mistura de eletricidade atual.

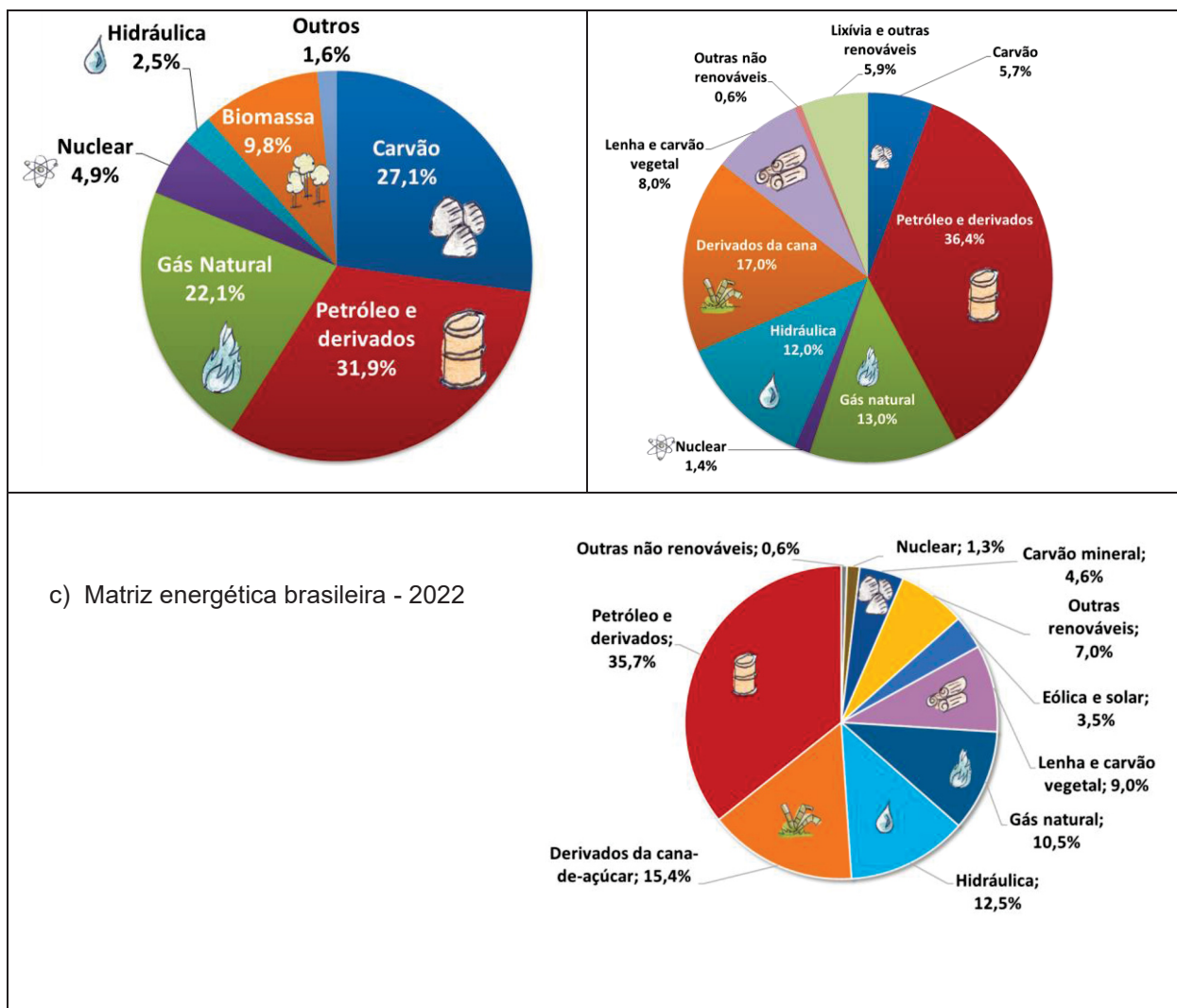
O resultado do conjunto de pesquisas sobre o estado d'arte reunidos conduz a investigação para a busca de entender como funciona a matriz energética do Brasil com suas múltiplas fontes de energia distribuída no país.

3.2 MATRIZ ENERGÉTICA

A matriz energética representa o conjunto de todas as fontes de energia disponíveis para uso na indústria, no transporte, nas edificações e na geração de energias secundárias. A matriz energética mundial é composta, em sua maioria, por fontes não renováveis de energia, como exposto na FIGURA 6.

FIGURA 6 – Matriz energética

a) Matriz energética mundial - 2017	b) Matriz energética brasileira - 2017
-------------------------------------	--

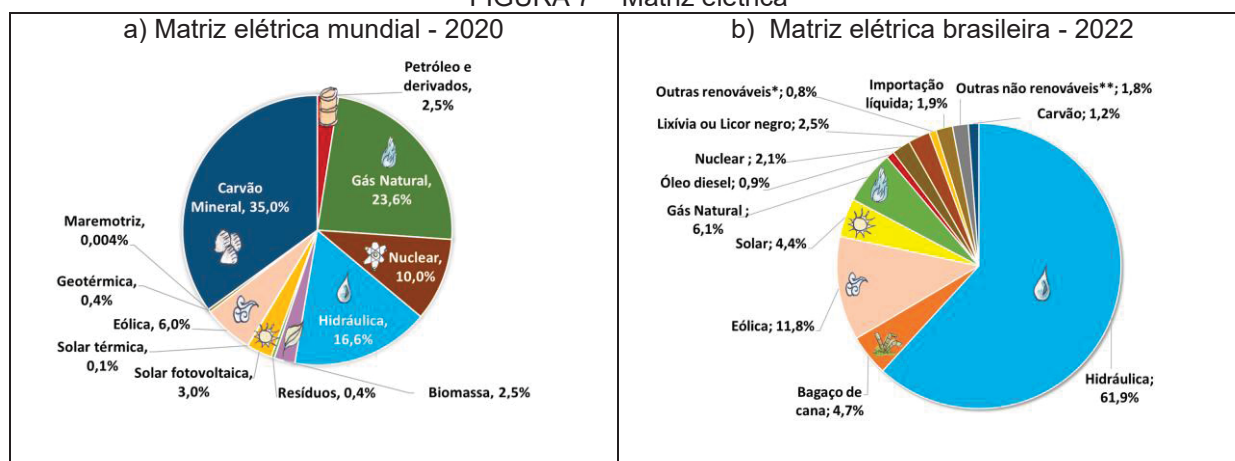


Fonte: EPE (2022, n.p.).

A matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial. No país, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usam-se mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras fontes renováveis, chega-se a 42,9%, quase metade da nossa matriz energética (EPE, 2022).

Já a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo (EPE, 2022), como exposto na FIGURA 7.

FIGURA 7 – Matriz elétrica



Fonte: EPE (2022, n.p.).

Com o objetivo de oferecer uma visão mais abrangente do panorama energético do Brasil, a EPE lançou a versão atualizada do Webmap EPE, proporcionando à sociedade maior transparência, acessibilidade e informações sobre o setor energético brasileiro (EPE, 2021).

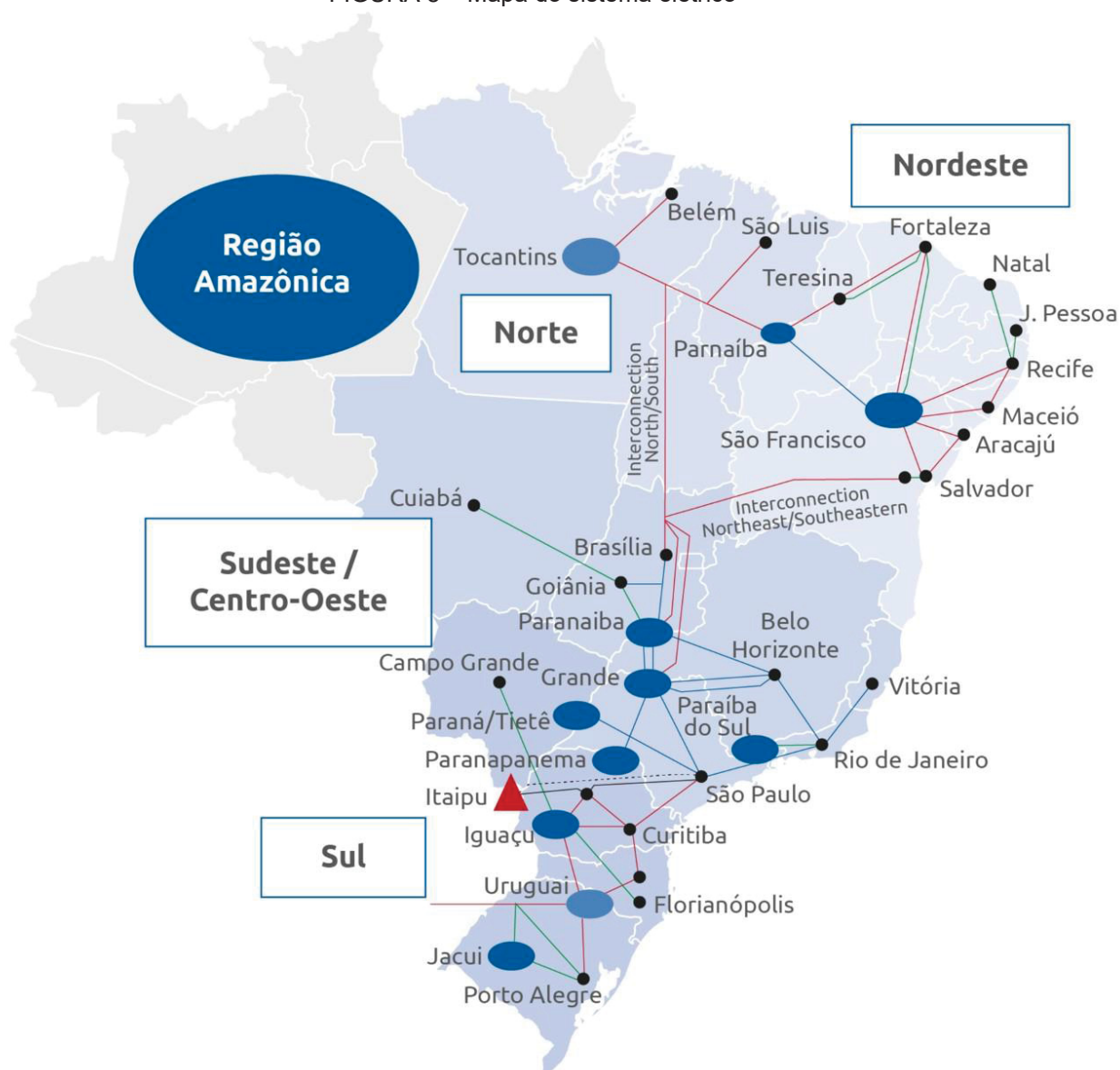
O setor elétrico brasileiro é integrado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que consiste em uma rede que interconecta os sistemas de geração com uma malha de transmissão de energia elétrica. O SIN é composto por quatro subsistemas: Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste, Sul e Norte.

- Subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), que abrange essas duas regiões do país e os estados de Rondônia e Acre;
- Subsistema Sul (S), que atende à toda a região sul do país;
- Subsistema Nordeste (NE), que seria a região nordeste menos o estado do Maranhão;
- Subsistema Norte (N), que abrange os estados do Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará e Tocantins.

Também existem os chamados sistemas isolados. De acordo com o ONS, existem 212 localidades isoladas no Brasil, cujo consumo representa menos de 1% da carga total do país.

A FIGURA 8 exibe o mapa do sistema elétrico interligado. (Portal da Indústria, 2021).

FIGURA 8 – Mapa do sistema elétrico



Fonte: ANEEL

FONTE: ANEEL acesso <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/setor-eletrico-brasileiro/> (c2021, n.p.).

Considerado o sistema hidro-termo-eólico brasileiro, as hidrelétricas são responsáveis pela maior parte da geração, com mais de 60% da capacidade instalada. Essas usinas localizadas em 16 bacias hidrográficas de diferentes regiões atuam de forma integrada para levar luz a lares e indústrias em unção do SIN.

Já as usinas térmicas desempenham um papel estratégico no SIN, garantido a gestão dos reservatórios de água para o atendimento futuro. A energia eólica tem aumentado sua participação na matriz e ganhado cada vez mais importância no atendimento ao mercado consumidor. (ESFERAENERGIA, 2021).

3.3 USINAS E FONTES DE ENERGIA DO BRASIL

O item a seguir apresenta em detalhe as fontes de energia citadas acima e os estudos científicos existentes.

3.3.1 Usinas hidrelétricas

As usinas hidrelétricas são formadas por um conjunto de obras e equipamentos usados para produzir energia elétrica aproveitando o potencial hidráulico existente em um rio. A geração se dá através da força proporcionada pela vazão do rio e pela concentração dos desníveis existentes ao longo de seu curso. Esses desníveis podem ser naturais, construídos na forma de barragens ou, também, através do desvio do rio de seu leito natural para a formação de reservatórios. Mesmo utilizando fonte de energia renovável para gerar eletricidade, a usina pode gerar impactos socioambientais irreversíveis na região em que for instalada (AZEVEDO, 2020).

Para produzir eletricidade em uma usina hidrelétrica, é necessário que exista integração entre a vazão do rio, o desnível do terreno e a quantidade de água disponível. A água armazenada no reservatório é canalizada e conduzida para as grandes turbinas. Com o fluxo dessa água, as turbinas giram e acionam os geradores que irão produzir a eletricidade. Ocorre, então, a transformação da energia mecânica, proveniente do movimento da água, em energia elétrica. Após essa conversão, os transformadores aumentam a tensão dessa energia, permitindo que ela possa viajar pelos fluxos de transmissão e chegar aos estabelecimentos que precisem dela. Uma usina hidrelétrica é composta por: barragem, sistema de captação (adução) de água, casa de força, canal de fuga e vertedouro (AZEVEDO, 2020).

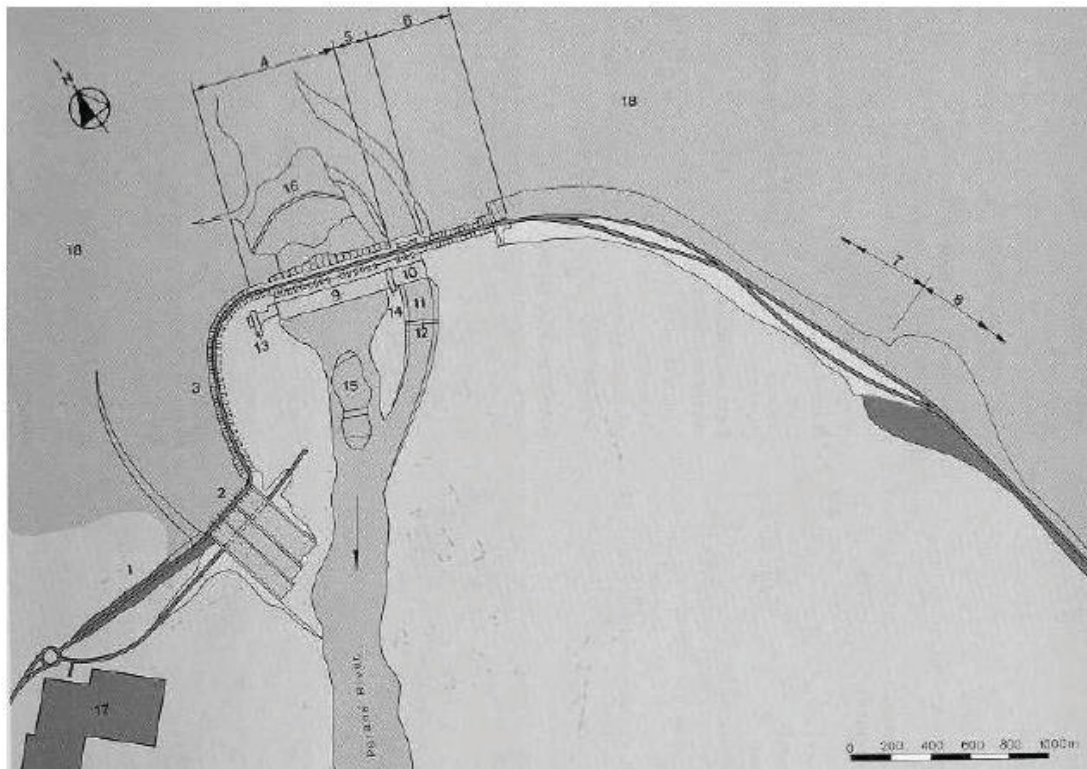
Com relação aos componentes de uma usina hidrelétrica com relação às estruturas, tem-se a barragem, barreira física com objetivo de impedir o fluxo natural do rio e permitir o acúmulo de água no reservatório. Já o vertedouro é uma estrutura lateral à barragem que permite o escoamento da água em períodos de cheia, ou quando a vazão esteja excedendo a que possa ser absorvida pelas turbinas (JAKOBSSON, 2019).

Para conduzir a água do reservatório aos órgãos adutores, tem-se a tomada d'água, equipada com grades de proteção e comportas, normalmente de acionamento hidráulico (JAKOBSSON, 2019).

A casa de força é o local onde se encontram os equipamentos eletromecânicos responsáveis pela produção de energia (ITAIPU BINACIONAL, 2021). O canal de fuga, a jusante do tubo de sucção entre a casa de força e o rio, é o meio através do qual a vazão turbinada é restituída ao rio. O dimensionamento de sua geometria será sempre condicionado pelo tipo e pelas dimensões da casa de força, assim como pela distância entre ela e o rio (ELETROBRÁS, 2010).

A FIGURA 9 ilustra a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Anta, com seus componentes construtivos.

FIGURA 9– Planta PCH Anta

**LEGENDA**

- | | |
|---|--|
| 1- Barragem de terra – Lado Direito; | 10- Casa de força- Canal de desvio; |
| 2- Vertedouro; | 11- Canal de desvio; |
| 3- Barragem lateral direita; | 12- Ponte de serviço; |
| 4- Barragem principal e de ligação- Lado direito; | 13- Área de montagem- Margem direita; |
| 5- Estrutura de desvio; | 14- Área de montagem- Margem esquerda; |
| 6- Barragem de ligação- Lado Esquerdo; | 15- Ensecadeira jusante; |
| 7- Barragem enrocamento; | 16- Ensecadeira- montante; |
| 8- Barragem de terra – Lado Esquerdo; | 17- Subestação; |
| 9- Casa de força – Leito do rio; | 18- Reservatório. |

FONTE: Itaipu (1994 *apud* RIBEIRO, 2003, p. 28).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (TRADENER, 2021), 67% da energia gerada no Brasil em 2021 e 62,48% da potência instalada vieram de usinas movidas pela força dos rios. Há em operação no país 739 centrais geradoras hidrelétricas, 425 pequenas centrais hidrelétricas e 219 usinas hidrelétricas, que são responsáveis por 109,3 gigawatts (GW) de capacidade instalada em operação. Três das usinas no país estão entre as dez maiores do planeta – Itaipu Binacional (14.000 megawatts – MW), divididos entre Brasil e Paraguai), Belo Monte (11.233 MW) e Tucuruí (8.370 MW). Em 2020, a energia gerada no Brasil a partir de fonte hidráulica foi de 415.483 gigawatts-hora (GWh).

Outra fonte de energia renovável em crescimento é a usina eólica explicitada a seguir.

3.3.2 Usinas eólicas

O termo “energia eólica” descreve o processo pelo qual o vento é usado para gerar energia mecânica ou elétrica. As turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia mecânica. Essa última pode ser usada para tarefas específicas, por exemplo, moer grãos ou bombear água; ou um gerador pode convertê-la em energia elétrica. Para gerar a eletricidade, uma turbina eólica de geração de energia funciona ao contrário de um ventilador. Em vez de usar eletricidade para fazer ventar, como um ventilador, as turbinas eólicas usam o vento para produzir eletricidade. O vento gira as pás, as quais giram um eixo que se liga a um gerador, produzindo eletricidade. O gerador é composto basicamente de dois ímãs, que, ao girarem um sobre o outro, produzem carga elétrica. Essa é, então, direcionada para uma estação de armazenamento, que funciona como um *nobreak* gigante, e é distribuída pela rede elétrica (ATENDIMENTO INSIGHT, 2002).

Entre a década de 1990 e o ano de 2001, com a implantação das primeiras usinas eólicas no país, estudos foram realizados em torres com alturas de 50 a 70 m, trazendo resultados animadores: o estado do Ceará, por exemplo, revelou um potencial aproveitável de 12 TWh na altura de 50 m e de 51,9 TWh na altura de 70 m, com ventos médios anuais superiores a 7 m/s (AMARANTE; ZACK; SÁ, 2001).

Moreira *et al.* (2017) comentam que a energia eólica tem apresentado crescimento no mundo, e essa expansão tem relação com a questão ambiental. Apesar de a distribuição ser diferenciada entre os países, o potencial dessa energia é considerado maior que o da produção elétrica no mundo; no caso brasileiro, é estimado um potencial de 300 GW.

A energia eólica é gerada pela energia cinética formada nas massas de ar em movimento, ou seja, pelo vento. Os aerogeradores são responsáveis por converter a energia cinética de translação na chamada energia cinética de rotação. No Brasil, as regiões Nordeste, Sul e Sudeste são as áreas com maior potencial eólico (GTSOL, 2018).

Em 1992, foi dado o primeiro passo prático do Brasil no contexto da energia eólica. Em Fernando de Noronha foi instalada uma pequena unidade de teste, a qual

gerava o equivalente a 1 MW. Como resultado, outras portas se abriram para pesquisas mais aprofundadas a respeito do potencial eólico brasileiro e para a instalação de uma quantidade cada vez maior de turbinas eólicas (PINTO; SANTOS, 2019).

O avanço da energia eólica no Brasil tem sido rápido e importante. Por exemplo, de acordo com Gannoum (2014), desde 2009, a indústria eólica vem crescendo a uma taxa média anual de 2,3 GW, o que, em termos de geração eólica total, levou o país a atingir cerca de 21.626 GWh em 2015, valor quase 90 vezes maior que aquele registrado em 2006 (237 GWh) (PINTO; SANTOS, 2019).

Ainda no Brasil, a capacidade instalada é considerada muito pequena quando comparada à dos países líderes em geração eólica. Todavia, as políticas de incentivos estão começando a produzir os primeiros resultados, e a expectativa é de crescimento da exploração desse recurso nos próximos anos. Para dar suporte a esse crescimento, torna-se necessária a formação de recursos humanos e o desenvolvimento de pesquisas científicas de âmbito nacional com o intuito de produzir e disponibilizar informações confiáveis sobre os recursos eólicos no território brasileiro. Entre os esforços mais recentes e disponíveis publicamente, pode-se citar o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro e a base de dados do projeto SONDA (INPE, 2021). Os resultados e produtos dessas pesquisas demonstram o potencial energético e a viabilidade econômica de projetos de aproveitamento desse recurso renovável no país (PINTO; SANTOS, 2019).

A importância da fonte eólica para geração de energia elétrica fica ainda mais evidente quando se leva em conta a capacidade total instalada para geração de energia elétrica no Brasil. Conforme a EPE (2016), em 2015, essa capacidade alcançou 140.858 MW, sendo a energia eólica a maior contribuinte, uma vez que registrou 39,5% de participação, ficando até mesmo à frente da tradicional fonte hidráulica (PINTO; SANTOS, 2019).

O Centro de Energia Eólica (CE-EÓLICA) (c2022) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) destacam que os parques eólicos (também chamados de usinas eólicas) são espaços onde estão reunidas várias turbinas para transformar energia eólica em elétrica. No Brasil, conforme a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) (2018), esses parques, normalmente, são administrados por empresas particulares, as quais recebem uma concessão para exploração e produção de energia, de acordo com o estabelecido em contrato para o mercado regulado, por períodos de 20 a 35 anos (PINTO; SANTOS, 2019).

Entre as regiões mais participativas nessa oferta, o grande destaque é o Nordeste, que possui o maior número de parques em operação e, conseqüentemente, a maior capacidade de geração do país. Isso fica evidente em um estudo realizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) entre dezembro de 2013 e dezembro de 2014, em que o Nordeste respondeu por 81% da geração média (em MW) das usinas eólicas (PINTO; SANTOS, 2019).

O funcionamento de uma usina eólica para geração de energia elétrica é feito por meio de aerogeradores (turbinas eólicas). Uma torre de energia eólica funciona transformando a energia cinética dos ventos em força mecânica e, depois, em energia elétrica. O funcionamento de um aerogerador (gerador eólico) começa pelas suas hélices (ou pás), que giram ao entrar em contato com a força dos ventos, mas sempre de forma controlada. O movimento das hélices faz girar o rotor e o eixo principal, o qual está conectado a uma caixa multiplicadora (*gearbox*), que aumenta a velocidade de rotação. Por fim, essa energia mecânica da rotação chega ao gerador, no qual dois ímãs criam o processo de indução eletromagnética para produzir eletricidade em corrente alternada (PORTAL SOLAR, c2022).

Ainda segundo o Portal Solar (c2022), existem geradores que produzem eletricidade em corrente contínua. Nessa situação, a turbina eólica deve conter um conversor (inversor) para adaptá-la em corrente alternada, o tipo utilizado na rede elétrica e pelos aparelhos eletrônicos. Nos grandes parques eólicos, a energia dos aerogeradores é enviada às subestações de transformadores, que elevam a sua voltagem para ela ser transportada aos centros urbanos por meio das linhas de transmissão de alta tensão.

É comum diferenciar a energia eólica em dois tipos, de acordo com o local em que as turbinas são instaladas: costeira (*onshore*) ou marítima (*offshore*). Nas usinas *onshore*, as instalações de energia eólica são feitas em terra e, normalmente, perto da costa, onde ocorrem mais ventos. Os parques eólicos *onshore* também podem ser instalados mais no interior do continente, desde que a região ofereça boas condições para a geração (constância de ventos fortes). Entretanto, devido ao ruído dos aerogeradores, as usinas precisam ser instaladas em locais afastados dos centros populacionais, como em áreas rurais despovoadas. Os parques eólicos *onshore* possuem algumas vantagens em relação aos projetos *offshore*, como os custos de instalação e operação mais baratos e a maior proximidade dos centros de consumo, reduzindo custos e perdas na transmissão (PORTAL SOLAR, c2022).

Já os parques *offshore* representam as instalações de torres de energia eólica em alto mar, que podem estar localizadas a quilômetros de distância da costa. Os aerogeradores *offshore* podem ser fixados diretamente no leito marinho ou sobre um casco flutuante ancorado no fundo, que pode ser de metal ou concreto. A escolha é feita de acordo com a profundidade da água. Para locais com até 50 m, as instalações de torres eólicas fixas no fundo são economicamente mais viáveis. Assim, as turbinas sobre estruturas flutuantes podem ser instaladas mais distantes da costa, onde os ventos são mais fortes e constantes, o que aumenta a produtividade. Uma vantagem da energia eólica *offshore* em relação à *onshore* é o maior tamanho e a maior eficiência elétrica dos seus projetos. Como não demandam o uso de terra, os aerogeradores *offshore* podem ser bem maiores e mais potentes que suas versões costeiras. Outra vantagem é que eles também contam com a maior força e constância dos ventos marítimos, os quais não encontram barreiras, como ocorre com os ventos que sopram em terra (PORTAL SOLAR, c2022).

A ANEEL liberou para operação comercial, em 20/1/2021, 45,9 MW em unidades geradoras das usinas eólicas. Com essa liberação, o Brasil supera a marca de 20 GW de capacidade instalada em geração eólica. Essa capacidade pode atender a uma demanda de mais de 20 milhões de habitantes.

FIGURA 10– Unidades geradoras das usinas eólicas

	Código	Empreendimento	Empreendedor	Processo	FCA	TR (SEI)	Aerogerador	Pot. Unit (MW)	Quant.	Pot.Tot. (MW)	Torre (m)	Pá (m)	Altura (m)	Dist. costa (km)	<Prof. (m)	LT (km)
	BA-01	Nova Energia	Sowitex	02001.008294/2019-51	20/03/2019	Não	SG 3.4-132	3,4	1	3,4	132	66	198	0,2		
***	CE-01	Caucaia - BI Energia	BI Energia Ltda	02001.003915/2016-68	01/08/2016	0860900	Haliade-X	12	48	576	150	110	260	4	10	32
***	CE-02	Asa Branca	Asa Branca	02001.000823/2017-15	02/03/2017	0661881	SWT-8.0-154	8	50	400	140	90	230	3	7	120
	CE-03	Jangada	Força Eólica do Brasil	02001.035371/2019-46	10/12/2019	8769176	WTG-15.0-246	15	200	3000	155	123	278	22	20	91
	CE-04	Camocim	Camocim Eireli	02001.015445/2020-61	04/07/2020	Não	Haliade-X	12	100	1200	150	110	260			
	CE-05	Dragão do Mar	Qair Marine Brasil	02001.015184/2021-61	20/07/2021	Não	MHI Vestas 174	9,5	128	1216	100	85	185	20	9	12
*	ES-01	Votu Winds	Votu Winds	02001.029651/2020-59	28/12/2020	9244802	SG 10.0-193DD	10	144	1440	150	96,5	246,5	20	18	
	PI-01	Vento Tupi	Ventos do Atlântico	02001.000178/2021-17	05/01/2021	9220568	NGT236	13,5	74	999	150	118	268	14	10	30,48
**	PI-02	Palmas do Mar	Bosford Participações	02001.007423/2021-17	13/04/2021	Não	V236-15MW	15	93	1395	155	118	268	5,5	5	43,03
	RJ-01	Maravilha	Força Eólica do Brasil	02001.035364/2019-44	10/12/2019	8731886	WTG-15.0-246	15	200	3000	155	123	278	26	20	40
	RJ-02	Aracatu	Equinor Brasil Energia	02001.019115/2020-45	19/08/2020	8769411	Não definido	12	320	3840	136	110	246	20	15	133
	RJ-03	Ventos do Atlântico	Ventos do Atlântico	02001.000230/2021-27	06/01/2021	9220602	NGT236	13,5	371	5008,5	150	118	268	12	10	40,3
	RJ-04	Ventos Fluminenses	Bosford Participações	02001.007463/2021-51	13/04/2021	Não	V236-15MW	15	188	2820	150	118	268	25	50	28,92
	RJ-05	Ventos do Açú	Prumo Logística SA	02001.016348/2021-77	06/08/2021	Não	IEA Wind 15-MW	15	144	2160	150	120	270	20	14	45,72
	RN-01	Pedra Grande	Pedra Grande	02001.027228/2020-14	30/11/2020	9114875	Haliade-X	12	52	624	150	110	260			
	RN-02	Maral	Ventos do Atlântico	02001.000036/2021-41	04/01/2021	9220582	NGT236	13,5	149	2011,5	150	118	268	17	11	44,35
*	RN-03	Alísios Potiguar	Bosford Participações	02001.007450/2021-81	13/04/2021	Não	V236-15MW	15	123	1845	150	118	268	5	5	278,95
*	RN-04	Ventos Potiguar	Internacional Energias	02001.008883/2021-54	03/05/2021	Não	Haliade-X	12	207	2484	138	110	248	8,2		
	RS-01	Águas Claras	Força Eólica do Brasil	02001.035351/2019-75	10/12/2019	8769062	WTG-15.0-246	15	200	3000	155	123	278	7,3	20	59
	RS-02	Ventos do Sul	Ventos do Atlântico	02001.000176/2021-10	05/01/2021	9220620	NGT236	13,5	482	6507	150	118	268	21	24	30,3
	RS-03	Tramandaí Offshore	Ventos do Atlântico	02001.000177/2021-64	05/01/2021	9220612	NGT236	13,5	52	702	150	118	268	6	11	22,79
***	RS-04	Ventos Litorâneos	Bosford Participações	02001.007465/2021-40	13/04/2021	Não	V236-15MW	15	83	1245	150	118	268	7,8	25	33,2
	RS-05	Bravo Vento	João Amílcar Roehrs	02001.016875/2021-81	10/08/2021	Não	Não definido	15	77	1155	-	-	-	1	6	45
							TOTAIS		3486	46631,4						

* Poligonal parcialmente sobreposta à poligonal definida em empreendimento com processo mais antigo (Referência: data do protocolo da FCA - Ficha de Caracterização da Atividade - no IBAMA).

** Aerogeradores a menos de 2.000 m de aerogeradores projetados em empreendimento com processo mais antigo (Referência: data do protocolo da FCA no IBAMA).

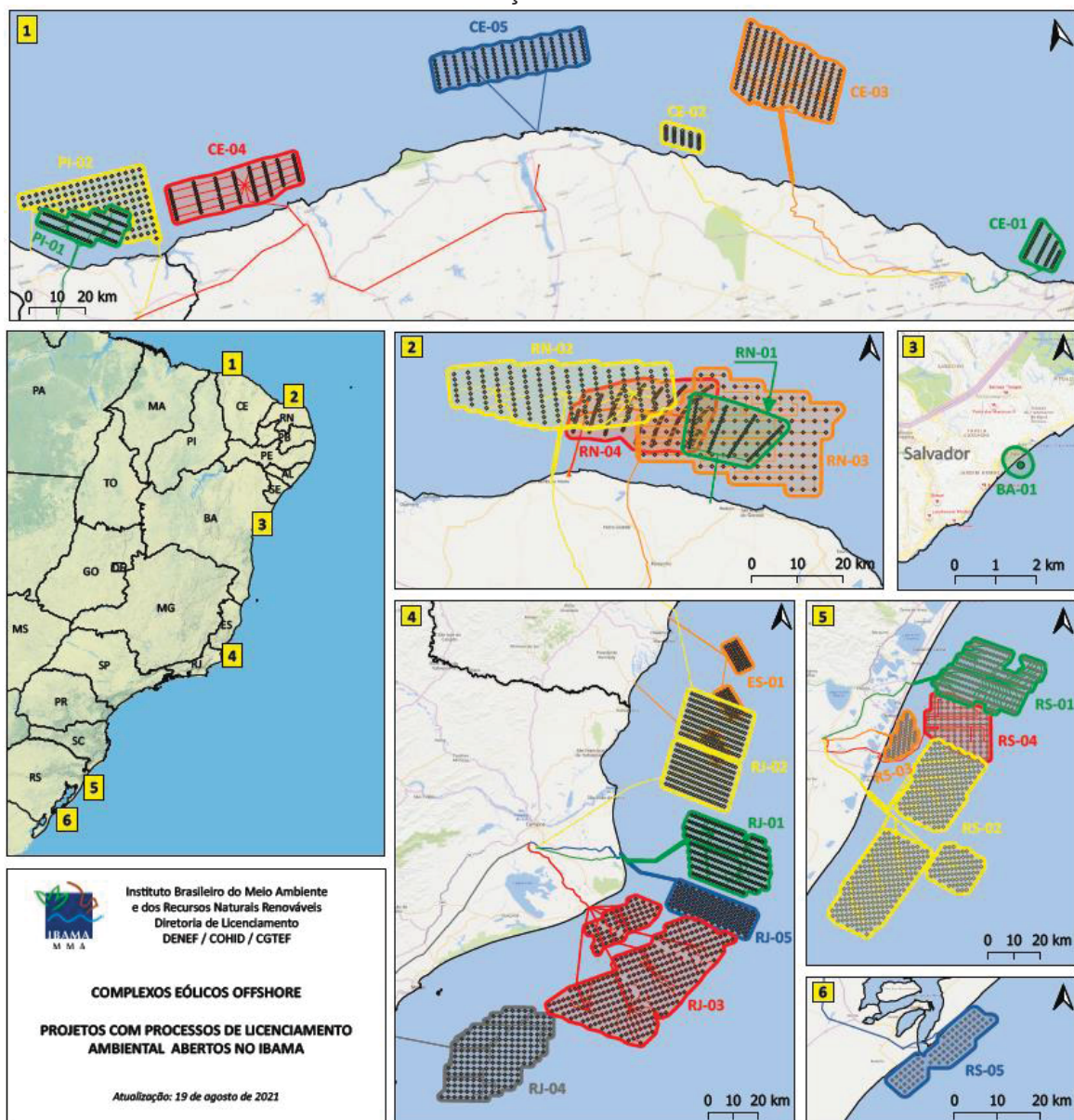
*** Termo de Referência (TR) emitido há mais de 2 (dois) anos.

Elaboração: Mozart Lauen
NIA/IBAMA/RS

FONTE: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (2021, n.p.).

Dessa forma, a força dos ventos se consolida como a terceira maior fonte de geração de energia elétrica no país. Segundo o Global Wind Energy Council (GWEC) (BRASIL, 2021), existem 750 parques eólicos em operação no território brasileiro, com mais de 10 mil torres eólicas. O Brasil ocupa a sétima posição no *ranking* mundial de geração eólica, com destaque para a região Nordeste, responsável por, aproximadamente, 90% da capacidade instalada.

FIGURA 11– Localização das usinas eólicas no Brasil



FONTE: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (2021, n.p.).

As quatro usinas dessa região que romperam juntas a marca dos 20 GW são: Ventos de Arapuá 1, 2 e 3 (Paraíba); Chafariz 4 (Paraíba); Filgueira II (Rio Grande do Norte); e Ventos de Santa Martina 11 (Rio Grande do Norte) (FIGURA 11). Além disso, mais de 12 GW de novas energias eólicas já foram outorgados pela ANEEL, distribuídos em 353 empreendimentos. Desses, 170 já estão em construção. A expectativa é de que a geração eólica alcance a marca de 25 GW nos próximos dois anos.

Entretanto segundo OrigoEnergia (2022) a produção da energia eólica exige diversos cuidados e recursos. Para a construção dos parques eólicos, são necessários estudos sobre localização, força e velocidade dos ventos ao longo do ano, além da migração das aves. Sendo que alguns pontos chamam a atenção como:

- Imprevisibilidade, devido à irregularidade dos ventos;
- Alto custo dos equipamentos para a geração de energia;
- Necessidade de grandes espaços livres para a implementação dos parques eólicos;
- Possibilidade de afetar o curso migratório das aves;
- O impacto dessas construções pode ser medido também no dia a dia das pessoas que residem nas proximidades do local. A poluição sonora, devido ao ruído das turbinas, é um importante fator para essa parcela da população.

Outra consideração são os impactos sobre ecossistemas sensíveis, como áreas montanhosas e dunas litorâneas, que são importantes e precisam ser mais bem avaliados, segundo o pesquisador Felipe Melo. A construção de linhas de transmissão e estradas para o estabelecimento dessas fazendas igualmente causam danos consideráveis, pois destroem vegetação nativa e facilitam o acesso de pessoas a regiões, o que antes não ocorria (Silveira, 2019).

De acordo com a Fundação Biodiversitas (2021), o projeto das eólicas pode impactar de forma drástica o habitat da arara-azul-de-lear, já que, com a operação de 97 turbinas, as aves têm alto risco de colisões fatais com as hélices de aerogeradores. Segundo recomendação do Ministério Público do Estado da Bahia (MPBA), a instalação do empreendimento pode causar “impactos irreversíveis para a fauna da região e para as comunidades tradicionais” (Mapa de Conflitos, 2024).

A Fundação Biodiversitas propôs ao MPBA a criação de um grupo técnico para assessorar e acompanhar os estudos a respeito das aves, em complementariedade à equipe técnica da empresa, que, segundo a fundação, fez orientações equivocadas sobre o trabalho com as araras. Ao contrário do que especialistas em aves da Voltalia apregoam, o parque eólico pode reverter a trajetória positiva de recuperação da espécie, resultado de um trabalho de muitos anos

3.3.3 Usinas fotovoltaicas

A energia solar chega à Terra nas formas térmica e luminosa. Estudo do *Plano Nacional de Energia 2030*, produzido pela EPE (BRASIL, 2007b), comenta da irradiação solar incidente por ano na superfície terrestre é suficiente para atender milhares de vezes ao consumo anual de energia do mundo. Quando se utiliza uma superfície escura para a captação, a energia solar é transformada em calor. Caso se utilizem células solares fotovoltaicas (painéis solares fotovoltaicos), o resultado é eletricidade. Os equipamentos necessários à produção do calor são chamados de coletores e concentradores – pois, além de coletar, às vezes é necessário concentrar a radiação em um só ponto. Esse é o princípio de muitos aquecedores solares de água. Para a produção de energia elétrica, existem dois sistemas: o heliotérmico e o fotovoltaico. No primeiro, a irradiação solar é convertida em calor, utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade. O processo completo compreende quatro fases: coleta da irradiação, conversão em calor, transporte e armazenamento e, finalmente, conversão em eletricidade. Para o aproveitamento da energia heliotérmica, é necessário um local com alta incidência de irradiação solar direta, o que implica pouca intensidade de nuvens e baixos índices pluviométricos, como ocorre no semiárido brasileiro. Já no sistema solar fotovoltaico, a transformação da radiação solar em eletricidade é direta. Para tanto, é necessário um material semicondutor (geralmente o silício), que, à medida que é estimulado pela radiação, permite o fluxo eletrônico (partículas positivas e negativas) (CRUZ, 2012).

Desde a Antiguidade até 2023 o aumento da participação da energia fotovoltaica, considerando que há diferença entre energia solar e energia fotovoltaica. Essas duas tecnologias parecem bem semelhantes, pois ambas precisam do Sol para funcionar. De maneira prática, aquecedores solares são

exclusivamente para o aquecimento da água utilizada em chuveiros, piscinas e torneiras. Já sistemas fotovoltaicos têm a função de gerar energia elétrica, distribuindo-a para o consumo em diversos aparelhos elétricos, exercendo exatamente a mesma função da energia elétrica distribuída por meio convencional (SOLAR BRASIL, 2020).

As usinas solares fotovoltaicas operam de forma semelhante ao funcionamento dos sistemas de energia solar fotovoltaica residencial, porém em escala bem maior, uma vez que são projetadas para a produção e a venda de grande volume de energia em alta tensão. Nessas usinas fotovoltaicas, que são o único tipo de usina instalado de forma comercial no Brasil, milhares, senão milhões, de Painéis Fotovoltaicos (PV) captam a luz do Sol e a convertem em energia elétrica, através de um processo chamado efeito fotovoltaico (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2021).

De acordo com levantamentos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) atualmente, o Brasil conta com 5.312 MW de potência instalada das usinas de energia solar em operação (PORTAL SOLAR, 2022). A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) estima que, até 2040, pode-se chegar a 126 GW de energia gerados pela luz solar no Brasil, com essa modalidade se tornando a tecnologia líder no setor e ultrapassando até mesmo a fonte hídrica (PORTAL SOLAR, 2022). Podem-se citar como as maiores usinas fotovoltaicas no Brasil: Usina Solar São Gonçalo (475 MW); Usina Solar Pirapora (321 MW); Usina Solar Nova Olinda (292 MW); Parque Solar Ituverava (292 MW); Complexo Solar Lapa (168 MW); Central Fotovoltaica Juazeiro Solar (156 MW); Usina Solar Guaimbê (150 MW); Usina Solar Apodi (132 MW); Parque Solar Paracatu (132 MW); e Usina Solar de Tauá (1 MW) (PORTAL SOLAR, c2022).

FIGURA 12– Lista de empresas de energia solar



FONTE: Portal Solar (c2022, n.p.).

No Brasil, a energia de centrais fotovoltaicas e de outras usinas elétricas é injetada e distribuída pelas regiões do país por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN). O funcionamento da usina solar fotovoltaica se dá através dos painéis solares que produzem eletricidade, a qual passa por um inversor solar para converter essa energia em corrente alternada, para ser transmitida pelas redes de transmissão de energia e distribuída para o uso em casas ou empreendimento. Como os painéis solares produzem energia elétrica em corrente contínua, eles precisam de um inversor solar para converter essa energia em corrente alternada. Os inversores entregam a energia produzida pelos PVs em até 380 volts. A fim de fazer a transmissão de energia nas linhas de alta tensão, é preciso uma voltagem bem mais alta que isso; assim, utilizam-se transformadores para elevar a tensão para 13.800 volts, 69.000 volts, 138.000 volts e até acima de 230.000 volts. As usinas fotovoltaicas, normalmente, são instaladas em áreas mais isoladas e distantes, e, desse modo, sua energia é enviada aos centros urbanos por meio de linhas de transmissão, para posteriormente atender ao consumo das casas, das empresas e do que estiver conectado à rede da distribuidora local (PORTAL SOLAR, c2022). A FIGURA 9 apresenta a lista de empresas de energia solar.

3.3.4 Usinas de biomassa

A biomassa se refere a toda matéria orgânica existente na biosfera, de origem vegetal ou animal, bem como àqueles materiais obtidos por meio de sua

transformação natural ou artificial. Biocombustíveis derivados de biomassa incluem lenha, aparas de madeira, *pellets*, alguns caroços de frutas, como de azeitonas e abacates, bem como cascas de nozes. Desses materiais, a lenha cortada e picada é a menos processada e, geralmente, é queimada diretamente em aparelhos domésticos, como fogões e caldeiras. Os *chips* vêm da trituração de biomassa agrícola e florestal, apresentando tamanho variável a depender do processo de fabricação do qual são derivados, ou do processo de transformação que possam ter sofrido. Por fim, os *pellets*, que são o biocombustível mais elaborado, consistem em pequenos cilindros de 6 a 12 mm de diâmetro e de 10 a 30 mm de comprimento, obtidos por prensagem de biocombustíveis com aglutinantes. Caroços e sementes de frutas, bem como as cascas delas – embora usados em menor grau do que outros combustíveis padronizados, como lenha, aparas de madeira e pelotas –, também representam um biocombustível sólido cada vez mais utilizado. Na verdade, foi demonstrado que o caroço da manga, a casca do amendoim e a casca da semente de girassol possuem alto potencial energético, com valor de aquecimento semelhante ao de outros biocombustíveis comercializados. Esse fato, junto do aumento da produção mundial desses subprodutos, torna-os especialmente atraentes para a geração de energia térmica, assim como para a redução das emissões de CO₂.

A biomassa está presente em uma variedade de materiais diferentes: madeira, serragem, palha, resíduos de sementes, esterco, resíduos de papel, resíduos domésticos, águas residuais etc. (PEREA-MORENO; MANZANO; PEREA-MORENO, 2019). Ela pode ser convertida em energia térmica, combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, bem como em outros produtos químicos, mediante uma variedade de processos de conversão. Biopoder e tecnologias são opções comprovadas de geração de eletricidade nos Estados Unidos, com 10 GW de capacidade instalada. Toda a capacidade de hoje é baseada em combustão direta madura de tecnologia. As futuras melhorias de eficiência incluirão queima de biomassa em caldeiras a carvão existentes, introdução de gaseificação de alta eficiência, ciclo combinado de sistemas, sistemas de células de combustível e sistemas modulares. Geralmente, as tecnologias de bioenergia proeminentes são compostas de combustão direta, coqueima, gaseificação, pirólise, digestão anaeróbica – *Anaerobic Digestion* (AD) – e fermentação (KHAN *et al.*, 2015).

Existem algumas tecnologias utilizadas para transformar a biomassa em energia elétrica. Todas fazem a conversão da matéria-prima em produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz a qual produzirá a energia mecânica, acionando o gerador de energia elétrica. As duas principais tecnologias são: combustão e gaseificação (CBIE, 2019).

A combustão é a queima direta da biomassa em caldeiras realizada a altas temperaturas na presença abundante de oxigênio, produzindo vapor a alta pressão, usado para mover turbinas de geradores elétricos. Trata-se de uma das formas mais comuns do uso energético da biomassa. Sua eficiência energética situa-se na faixa de 20% a 25% (CBIE, 2019).

A gaseificação é o processo em que a biomassa é aquecida na ausência do oxigênio, originando como produto um gás inflamável. Esse gás ainda pode ser filtrado, visando à remoção de alguns componentes químicos residuais. A gaseificação não exige altas temperaturas, fazendo a biomassa resultar apenas em biogás, usado ou como energia mecânica que ativa um gerador, ou em caldeiras para queima direta e cogeração de energia térmica. No Brasil, a biomassa é a terceira maior fonte de geração de energia, de acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME) (CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE), 2019). Ela vem depois da hidráulica e da queima do gás natural na matriz elétrica, o que mostra a importância dessa fonte (CBIE, 2019).

Segundo o *site* Esfera Energia (2021), a energia de biomassa é resultado da queima de matérias-primas orgânicas, não englobando combustíveis fósseis, apesar de esses serem derivados do ramo vegetal e mineral, como nos casos do carvão, do petróleo e do gás natural.

O termo “biomassa” no *site* Esfera Energia (2021) se refere somente aos derivados de organismos vivos. Portanto, o grande diferencial em relação aos combustíveis fósseis é que a energia de biomassa é renovável. Sua renovação acontece por meio do ciclo do carbono: a queima libera CO₂ na atmosfera, e as plantas, pela fotossíntese, transformam-no em hidratos de carbono, liberando oxigênio. A usina de biomassa tem funcionamento parecido com o das termelétricas, convertendo o calor da queima dos materiais orgânicos em energia. O processo de queima pode ser realizado de quatro maneiras

- a) **Combustão:** a forma mais convencional de produzir energia a partir de biomassa. Funciona mediante a sua queima em altas temperaturas e na presença abundante de oxigênio. O vapor produzido por essa combustão é direcionado para mover turbinas e, assim, produzir eletricidade;
- b) **Pirólise:** a queima da biomassa também acontece em altas temperaturas, mas sem oxigênio, para acelerar o processo de decomposição. Os produtos obtidos por meio desse processo podem ser líquidos (como o bio-óleo) ou sólidos (como o carvão vegetal) e podem ser queimados para produzir calor e eletricidade;
- c) **Gaseificação:** assim como na pirólise, a biomassa é queimada na ausência de oxigênio, mas seu produto é um gás inflamável chamado de *syngas*, ou gás de síntese. Esse biocombustível é uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono de alta combustão e pode ser usado para produzir energia;
- d) **Co-combustão:** essa técnica utiliza a biomassa para substituir parte do carvão mineral usado para produzir energia. Suas principais vantagens são a redução da emissão de poluentes e do nível de poluição nos solos e nas águas, além da diminuição dos desperdícios.

Segundo informações da Yara Brasil (2021), a produção mundial de cana-de-açúcar é de, aproximadamente, 1,7 bilhão de toneladas anualmente, em 24 milhões de ha em todo o mundo. O maior produtor é o Brasil, com 720 milhões de toneladas e 40% do cultivo em todo o mundo.

FIGURA 13– Localização das usinas de cana no Brasil



FONTE: Novacana (2022, n.p.).

A FIGURA 13 conforme *site* Novacana (2022) apresenta a localização das usinas de cana no Brasil. No Brasil, há mais de 400 usinas, concentradas principalmente no Centro-Sul e no Nordeste. O estado de São Paulo produz cerca de 60% de toda a cana, todo o açúcar e todo o etanol do país. O Paraná é o segundo maior produtor, com 8% da cana moída. No município de Pradópolis/SP, está localizada a maior usina de cana do Brasil e do mundo, a Usina São Martinho, com capacidade de moer 10 milhões de toneladas por ano.

3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

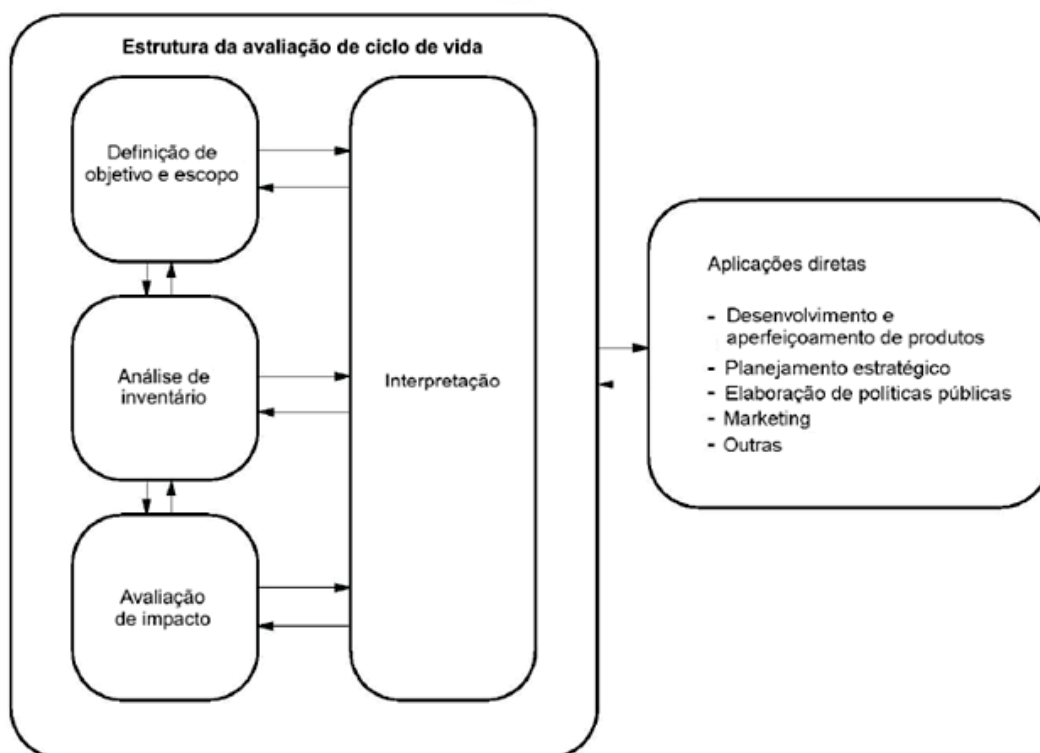
A ACV busca identificar e quantificar os impactos ambientais visando à geração de parâmetros para compará-los entre bens e serviços similares. Crescentes demandas sobre bens e serviços que geram impactos ambientais ocorrem de modo que se percebem suas consequências, mas nem sempre suas causas (Tavares, 2006).

Os primeiros estudos de avaliação ambiental de produtos situam-se no início da década de 1960, representados inicialmente por inventários de consumo energético. O estudo mais conhecido dessa fase inicial da ACV foi a análise que a

Coca-Cola encomendou para o *Midwest Research Institute*, cujo relatório publicado em 1969 comparou diversas embalagens de bebida no que diz respeito a emissões ao ambiente, bem como ao consumo de recursos naturais (RIBEIRO, 2003).

A ACV, segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2011), é composta por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos ambientais e interpretação, conforme apresentado na FIGURA 14.

FIGURA 14– Estrutura da ACV



FONTE: Adaptado de ABNT (2011).

As quatro etapas podem ser explicadas da seguinte forma:

- I. **Definição do objetivo e do escopo:** consiste na descrição do sistema de produto a ser estudado e apresenta o propósito e a extensão do estudo, por meio do estabelecimento de suas fronteiras (HAUSCHILD, 2005). O objetivo do estudo deve especificar a aplicação pretendida e o público-alvo a quem serão comunicados os resultados. Nessa fase é importante definir a unidade funcional, principalmente em estudos comparativos de diferentes produtos, de forma a quantificar o sistema e

permitir a determinação de fluxos de referência. Segundo Ribeiro (2003), deve-se considerar e descrever claramente os seguintes itens:

- **Sistema de produto:** de acordo com a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2011), o sistema de produto consiste no conjunto de unidades de processo, conectadas material ou energeticamente, que realizam uma ou mais funções definidas. Trata-se, assim, da pormenorização do modelo a ser estudado na ACV, descendo muitas vezes ao nível das operações unitárias envolvidas;
- **Função do sistema de produto:** define a que se presta o sistema que está sendo analisado, ou seja, qual a sua função;
- **Unidade Funcional (UF):** unidade de medida da função anteriormente estabelecida. Deve prover referência a respeito de quais quantificações das entradas e saídas do sistema (aspectos ambientais) serão normalizadas (ABNT, 2011).

- II. **Análise de inventário:** a fase de inventário constitui uma ferramenta indispensável para a avaliação quantitativa de impactos ambientais. Engloba a coleta de dados e os procedimentos de cálculo utilizados na quantificação de fluxos de entrada e saída de matéria e energia para um determinado sistema de produto. Com relação aos cálculos realizados, é fundamental destacar a importância de considerar procedimentos de alocação para os processos que produzam mais de uma saída ou para materiais que sejam reciclados.

Conforme apontam Frankl e Rubik (2000), os inventários possibilitam a identificação de limitações ou a necessidade de mais informações para a avaliação do processo, podendo gerar mudanças nos procedimentos de coleta de dados e a revisão dos objetivos ou do escopo do estudo realizado. A consistência dos dados viabiliza a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis.

- III. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV):** permite avaliar a significância de aspectos ambientais apresentados durante a etapa de inventário e agregar as intervenções em um ou em vários indicadores. Os fluxos elementares do sistema são relacionados aos impactos gerados ao meio ambiente, em nível global, regional ou mesmo local.

IV. **Interpretação:** essa quarta fase da ACV consiste na avaliação do estudo, de acordo com os objetivos estabelecidos; ou seja, trata-se da análise dos resultados e da formulação de conclusões e recomendações para a minimização de impactos ambientais potencialmente gerados pelo sistema (Graedel, 1998). Envolve um processo iterativo de revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e da qualidade dos dados coletados (Frankl; Kubik, 2000). Aspectos como sensibilidade e incertezas também são avaliados no julgamento de qualidade dos resultados obtidos (HAauschild, 2005).

A NBR ISO 14040 (ABNT, 2011) resume algumas características-chave da ACV:

- É conveniente que estudos da ACV abordem sistemática e adequadamente os aspectos ambientais de sistemas de produto, desde a aquisição de matéria-prima até a disposição final;
- O grau de detalhe e o período de um estudo da ACV podem variar em larga escala, dependendo da definição de objetivo do escopo;
- Convém que o escopo, as suposições, a descrição da qualidade dos dados, as metodologias e a saída de estudos da ACV sejam transparentes, bem como que os estudos da ACV discutam e documentem as fontes de dados, as quais devem ser claras e apropriadamente comunicadas;
- É recomendado que sejam tomadas providências para respeitar questões de confidencialidade e propriedade, dependendo da aplicação pretendida do estudo da ACV;
- Convém que a metodologia da ACV permita a inclusão de novas descobertas científicas e melhorias no estado da arte da tecnologia;
- São aplicados requisitos específicos a estudos da ACV, usados para fazer uma afirmação comparativa, disponibilizada ao público;
- Não existe base científica para reduzir resultados da ACV a um único número ou pontuação globais, uma vez que existem *trade-offs* e complexidades para os sistemas analisados em diferentes estágios do seu ciclo de vida;

- Não existe um único método para conduzir estudos da ACV. Convém que as organizações tenham flexibilidade para implementar na prática a ACV conforme estabelecido nessa norma, com base na aplicação específica e nos requisitos do usuário.

A ACV pode ser aplicada no estudo de sistemas energéticos para: ajudar na tomada de decisões no planejamento energético, estimar emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), realizar rotulagem ambiental, calcular ecotaxas, diagnosticar planos de eficiência energética e criar banco de dados (Ribeiro, 2003).

Varun; Bhat; Prakash (2009) aplica a ACV para avaliar o impacto no meio ambiente em decorrência da geração de eletricidade e permitir que se tomem as melhores decisões relativas à proteção do ambiente. Em seu estudo estimou a redução de CO₂ nas usinas de energia elétrica movidas a combustível fóssil comercial. Outros estudos estimam emissões de CO₂ ao longo da vida a partir do carvão, da energia fotovoltaica e da energia solar térmica em plantas nos EUA. Essas estimativas de CO₂ são baseadas em análises derivadas de ambos os sistemas operacionais e detalhadas nos estudos dos projetos.

Barros (2017) em seu estudo observou uma predominância de pesquisas em países europeus sobre a utilização da metodologia ACV. Os autores a utilizaram juntamente com algum outro método, como o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), para aquecimento global; a Avaliação de recursos abióticos em nível de ponto médio (modelo ReCiPe); o *Cumulative Energy Demand* (CED), usado como indicador para o desempenho universal; o modelo CML, desenvolvido pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda, usado como conjunto de indicadores ambientais; entre outros. O uso de fontes renováveis, como a eólica e a solar, de origem limpa, é bem-vindo no portfólio da geração de energia elétrica.

Os autores dos artigos recuperados na pesquisa fizeram uma previsão para a geração de energia elétrica a longo prazo, em que apontaram as fontes renováveis, principalmente as provenientes do Sol e do vento, como as mais limpas e menos impactantes ao meio ambiente.

3.4.1 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas hidrelétricas

Os trabalhos abordaram a ACV em usinas hidrelétricas, cada qual com a sua especificidade. Assim, buscou-se compilar os estudos já publicados.

Ribeiro (2003) estruturou um Inventário de Ciclo de Vida (ICV) e adotou como simplificação a geração de eletricidade na Usina Hidrelétrica de Itaipu, a qual no ano 2000 era responsável por 22,4% da eletricidade consumida no Brasil. Para a construção do ICV, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso da ACV em usinas hidrelétricas, estabelecendo recomendações gerais. Após essa análise, estudou a Itaipu com relação à obra civil e ao consumo de insumos na construção e na operação por cem anos, obtendo-se ao fim um ICV com os aspectos ambientais mais significativos em termos de energia gerada (MWh).

Geller (2016) teve como objetivo a investigação, baseada na ACV, dos impactos ambientais das fases de construção, operação, manutenção e desativação de uma hidrelétrica. Sua pesquisa focou no estudo da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una, localizada na região amazônica, na cidade de Santarém/PA. Os resultados foram apresentados em relação à produção, tendo como unidade funcional 1 MWh, para que possíveis comparações possam ser realizadas. Entre as categorias analisadas estão: Potencial de Aquecimento Global – *Global Warming Potential* (GWP) –, Potencial de Acidificação, Toxicidade Humana, Depleção de Recursos Abióticos e Potencial de Ecotoxicidade da Água. Os resultados apontados pela ACV, indicam a fase de construção como a mais influente para as emissões, e os insumos que mais contribuem para tais emissões são o aço e o concreto. Considerando o fator produtividade, os índices encontrados no cenário de maior produtividade foram menores do que no de menor produtividade. Comparou ainda os resultados da ACV da Usina Hidrelétrica Curuá-Una com ACVs de pesquisas que analisaram outras tecnologias de produção de energia, e indicou que, para as categorias analisadas, a hidrelétrica tem boa *performance* ambiental, considerando as emissões quantificadas por essa metodologia.

A avaliação do Ciclo de Vida da hidrelétrica Pari-Cachoeira realizada por Cordeiro, Kasper e Cruz (2017) avaliaram, do ponto de vista ambiental, a Central Geradora Hidrelétrica (CGH) Pari-Cachoeira, instalada no Alto Rio Negro, no Amazonas. Foi realizada uma ACV da CGH Pari-Cachoeira com base nos métodos CED e *Cumulative Exergy Demand* (CExD). Para o estudo, foi utilizado o *software*

SimaPro e foi determinado um horizonte de 20 anos de vida útil da CGH, não sendo considerada a etapa de descomissionamento. Os resultados encontrados na fase de construção, ambos os métodos, identificaram o uso de aço e concreto como as principais fontes de impacto. Na fase operacional, o método CED apontou tanto o óleo lubrificante quanto a operação da central como principais componentes de impacto, ao passo que a avaliação pelo método CExD, cujas categorias de impacto são mais amplas que as do CED, identificou a operação da central como a maior responsável pelo impacto. A pesquisa concluiu, portanto, que estudos de ACV em hidrelétricas deveriam priorizar o método CExD, pois ele ofereceu resultados mais precisos.

3.4.2 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas fotovoltaicas

Fthenakis e Kim (2005) apresentaram que as ACVs no *Brookhaven National Laboratory* mostram que: i) o sistema de balanço de uma instalação otimizada tem um tempo de retorno de energia – *Energy Payback Time* (EPBT) – de apenas 0,4 anos para a insolação média nos Estados Unidos, que é 70% menor do que as estimativas relatadas anteriormente; ii) o EPBT dos módulos *Cadmium Telluride* (CdTe) produzidos e usados nos EUA é de 0,85 anos; iii) as emissões de CO₂ do ciclo de vida do combustível nuclear nos EUA são quase iguais às do ciclo PV, o que contrasta com os estudos europeus que mostram que as emissões de CO₂ nuclear são dez vezes menores do que as do PV.

Lou *et al.* (2017) estudaram o período de retorno dos PVs conectados à rede pelo método do valor presente líquido. Os dados de desempenho dos PVs foram obtidos no local por meio de medições de dois projetos de telhados na região subtropical de Hong Kong. A sensibilidade de diversas variáveis para o período de retorno foi avaliada pelo *Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*.

Os períodos de retorno monetário foram avaliados em diferentes valores das variáveis mais relevantes e comparados incorporando períodos de recuperação de energia e GEE. Os PVs dos dois projetos produziram 122-143 kWh/m² de eletricidade por ano em Hong Kong, o que economizou 139-163 da tarifa de eletricidade HKD por m² por ano. A análise de sensibilidade mostrou que o período de retorno monetário foi sensível ao custo inicial e ao aumento tarifário das taxas de incertezas. O período de retorno monetário do PV variou de 13,4 a 16,8 anos em diferentes taxas de aumento de tarifas e custos de investimento, com base no

carbono atual como benefício comercial. O período de retorno monetário foi muito maior do que o incorporado em períodos de recuperação de energia e GEE, que foram de 10,8 a 12,7 anos e 5,3 a 6,2 anos, respectivamente. As implicações das diferenças do período de recuperação foram discutidas (Lou *et al.*, 2017).

As emissões de CO₂ são a principal fonte de GEE, e a redução delas gera receitas adicionais com o comércio de carbono. Para estimar a redução das emissões de CO₂ por PVs, foram determinadas a produção local de eletricidade e as emissões de CO₂ de 2009 a 2015 da *China Light and Power Company* (CLP), as quais são apresentadas na TABELA 1 (LOU *et al.*, 2017).

TABELA 1 – Geração de eletricidade e emissões de CO₂ da usina local (2009-2015)

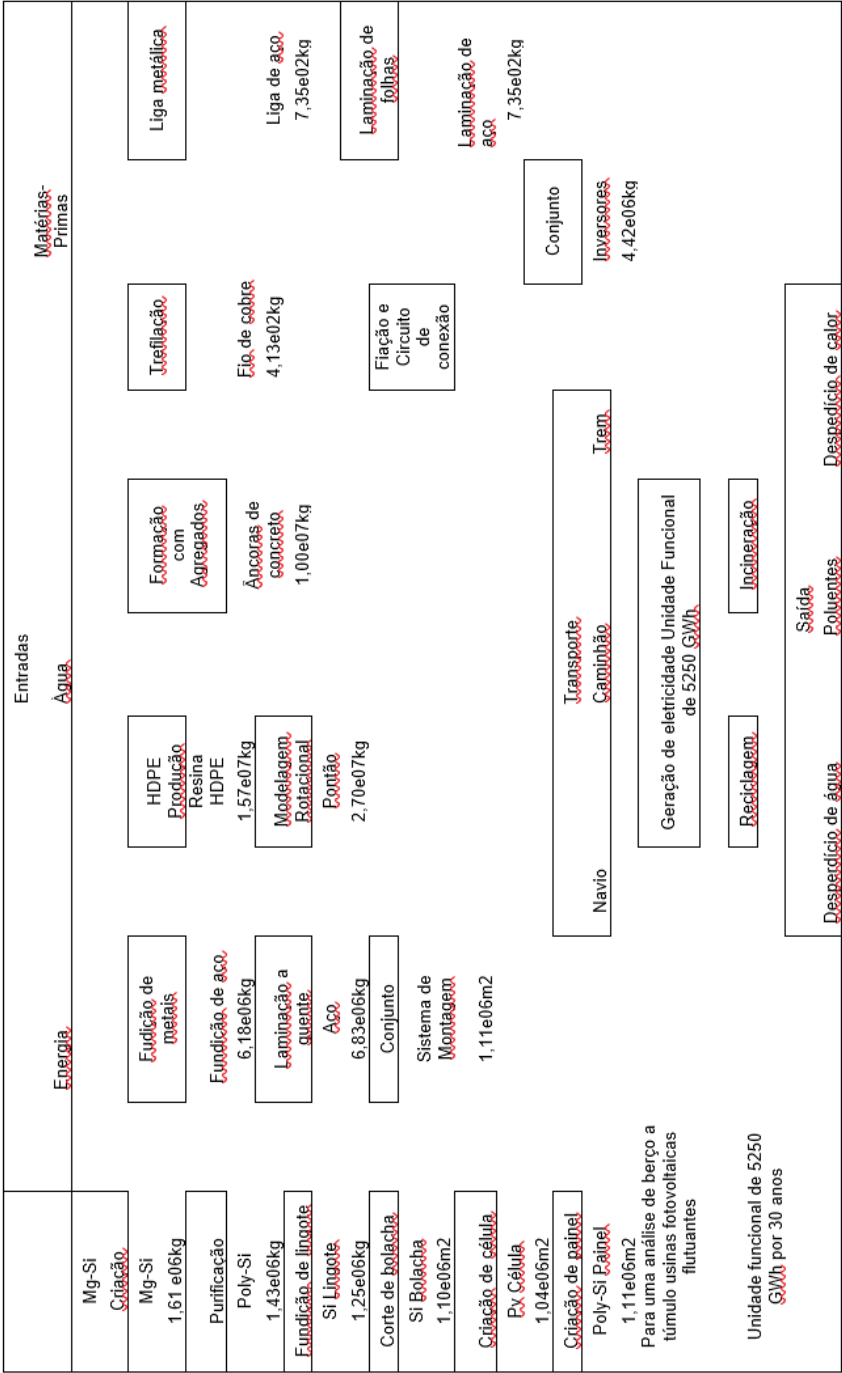
Month	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Power generated (GWh)	24920	24552	24955	24102	25084	25597	24075
CO ₂ (kton)	19209	18111	20134	19623	21063	21857	18479

FONTE: Lou *et al.* (2017, p. 8).

Clemons *et al.* (2021) examinaram, através da ACV, os impactos ambientais e econômicos de uma usina flutuante fotovoltaica e compararam os resultados com os de uma usina convencional fotovoltaica. Embora estudos já realizados mostrem as vantagens do uso de usinas flutuantes fotovoltaicas, existem alguns poucos artigos que usam o método da ACV para comparar os impactos entre os dois tipos de usinas fotovoltaicas.

Os objetivos desse estudo ajudam nas decisões na Tailândia sobre energias renováveis e dar subsídios para executivos que estejam procurando investir. Na FIGURA 15, é possível verificar os limites do sistema.

FIGURA 15 – Limites do sistema



FONTE: Adaptado Clemons et al. (2021, p. 451).

Mesmo que os resultados obtidos visem ao uso no país, uma análise sensitiva mostra como os resultados dos impactos ambientais podem variar dependendo da região analisada

TABELA 2 – Impacto dos resultados

Resultados de impactos midpoint de ACV (Balanço do Sistema)				
Impactos de Categoria Midpoint	Produção PV	Flutuadores Montagem Manutenção	Fim de vida	Total
Mudança climática (kg Co ₂ to air)	2.75E+08	1.27E+08	2.98E+05	3.85E+08
Depleção do Ozônio (kg CFC-11 to air)	9.92E-01	1.59E+01	7.80E-09	1.69E+01
Radiação ionizante (kbq Co-60 to air)	4.37E-01	1.20E+09	0.00E+00	1.20E+09
Formação de partículas finas (kg PM 2,5 to air)	7.96E+04	5.17E+05	3.10E+02	6.00E+05
Formação fotoquímica de Ozônio - Danos ao ecossistema (kg Nox to air)	1.59E+05	4.59E+03	6.60E+02	1.64E+05
Formação fotoquímica de Ozônio - Saúde Humana (kg Nox to air)	1.37E+05	3.75E+03	6.60E+02	1.41E+05
Toxicidade cancerígena humana (kg 1,4 DCB to urban air)	0.00E+00	7.31E+05	4.43E-02	7.31E+05
Toxicidade não-cancerígena humana (kg 1,4 DCB to urban air)	0.00E+00	1.02E+07	2.12E+00	1.02E+07
Acidificação terrestre (kg SO ₂ to air)	1.07E+05	5.17E+05	2.55E+02	6.24E+05
Eutrofização de água doce (kg P por água doce)	1.89E+02	9.12E+01	0.00E+00	2.81E+02
Eutrofização marinha (kg N por água marinha)	4.71E+03	1.05E+05	1.16E-10	1.10E+05
Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4 DCB solo industrial)	0.00E+00	1.02E+07	6.79E-07	1.02E+07
Ecotoxicidade água doce (kg 1,4 DCB água doce)	0.00E+00	1.59E+04	1.66E+09	1.66E+09
Ecotoxicidade marinha (kg 1,4 DCB água marinha)	0.00E+00	4.58E+04	5.49E-08	4.58E+04
Consumo de água (m ³ água)	1.75E+08	4.04E+08	0.00E+00	5.79E+08
Uso de terra (m ² cultivo anual de terra)	0.00E+00	0.00E+00	5.72E+03	5.72E+03
Escassez de recursos minerais (kg Cobre)	2.64E+06	5.66E+08	1.38E-05	5.69E+08
Escassez de recursos fósseis (kg óleo)	1.01E+07	3.71E+07	2.30E+00	4.72E+07

FONTE: Adaptado Clemons *et al.* (2021, p. 454).

A TABELA 2 apresenta 18 categorias de impacto, separando as emissões e os recursos usados em três processos durante o tempo de vida da usina flutuante fotovoltaica: produção da fotovoltaica; fabricação dos flutuadores, montagem do sistema e balanço do sistema, bem como a manutenção durante sua vida útil; e fase final da vida.

3.4.3 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas eólicas

Gomes, Moris e Nunes (2018) incluem em sua investigação sobre as usinas eólicas as emissões de poluentes para o meio ambiente e o consumo de recursos

naturais, além de outros impactos, como o uso do solo urbano etc. Eles realizaram uma revisão sistemática da literatura existente de ACV de energia eólica *offshore*. A triagem de, aproximadamente, 430 artigos que avaliam os impactos ambientais da energia eólica *offshore* resultou em 18 artigos. Concluíram que o grande número de estimativas de ACV para energia eólica *onshore* não se reflete na energia eólica *offshore*. Porém, em comparação com estudos anteriores, notaram que os parâmetros e resultados utilizados pela indústria *offshore* são semelhantes aos da indústria *onshore* (GOMES, MORIS e NUNES, 2018).

Segundo Nian, Liu e Zhong (2019) os recursos de energia renovável *offshore* são opções para atender aos objetivos de energia e clima de um país, sem ter que ocupar grande quantidade de espaço de terra. A produção de energia eólica *offshore*, entre as várias opções renováveis, ganhou popularidade, mesmo com a sua dependência das condições de vento do local de implantação, o desafio técnico na sua construção e na conexão à rede e o custo de capital potencialmente alto. As condições do vento no Sudeste Asiático são, geralmente, muito menos favoráveis em comparação com as de outras partes do mundo, mas várias economias nessa região consideram a energia eólica *offshore* como solução de longo prazo para descarbonizar o setor elétrico e diversificar as fontes de eletricidade. Há, portanto, a necessidade de avaliar os verdadeiros benefícios da energia eólica *offshore* sob as condições climáticas da região.

As descobertas do estudo de Nian, Liu e Zhong (2019) sugerem que o custo da energia eólica *offshore* permanece alto no momento para esse local. As evidências contribuíram ainda mais para o debate sobre a energia eólica *offshore*, definindo o resultado para a implantação em condições climáticas desfavoráveis na região tropical e em todo o mundo. No entanto, o parque eólico *offshore* ainda pode representar uma opção plausível por meio da inovação tecnológica em projetos de turbinas eólicas e reduções no seu custo e no do cabo de energia submarino. Conforme sugerido nesse estudo, há potencial para que o custo de energia eólica *offshore* alcance a paridade com o das energias renováveis *onshore*, como a energia solar no contexto do Sudeste Asiático (NIAN; LIU; ZHONG, 2019).

A energia eólica é uma das tecnologias de energia renovável mais populares e considerada indispensável em qualquer *mix* de energia de baixo carbono. Tecnologias eólicas de pequena escala que ocupam menos espaço e podem fornecer eletricidade diretamente para seus proprietários são consideradas mais

ecologicamente corretas do que as grandes turbinas e, portanto, atraem menos críticas. Partindo dessa premissa, as energias renováveis em menor escala, especialmente as microturbinas eólicas, devem ser a solução ideal. O objetivo de Kouloumpis, Soboloewski e Yan (2020) foi investigar se vale a pena desenvolver turbinas eólicas de eixo vertical em menor escala como solução para mitigar as mudanças climáticas.

Um caso real de uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus H-Rotor 5 kW na Polônia foi investigado por seu desempenho, usando dados reais de geração. Mais importante, uma ACV foi realizada, compilando um ICV muito detalhado com base em dados primários, e dois cenários foram examinados para o tratamento de fim de vida, incluindo reciclagem e incineração. Os resultados da avaliação de desempenho mostram que o desempenho real é muito ruim, principalmente devido à baixa velocidade do vento. Por essa razão, uma série de fatores de capacidade hipotéticos foram usados para facilitar a comparação com outros estudos. Usando a metodologia de avaliação de impacto, 11 categorias de impacto ambiental foram avaliadas. Os resultados mostram que a maioria dos impactos são credenciados ao apoio de infraestrutura – especialmente o mastro e as fundações – e não à própria turbina, cujo GWP é responsável por apenas 30% (Kouloumpis; Soboloewski; Yan, 2020).

Embora o uso de turbinas eólicas de eixo vertical em menor escala específico não possa alcançar uma geração que poderia reduzir os impactos ambientais ao nível da energia do vento existente na Polónia, um fator de capacidade viável de 1,4% poderia tornar o GWP inferior à média do *mix* de eletricidade de tensão nesse país. O desempenho ambiental é muito sensível às flutuações do fator de capacidade, e as recomendações são fornecidas para localização apropriada, reciclagem dos metais e integração da turbina na estrutura do edifício existente (KOULOUMPIS; SOBOLOEWSKI; YAN, 2020).

3.4.4 Avaliação do Ciclo de Vida em usinas de biomassa

Nguyen e Hermansen (2012) estabeleceram um procedimento para o manuseio de coprodutos na ACV de um típico sistema de cana-de-açúcar. O procedimento é essencial para a avaliação ambiental do etanol de melaço, um coproduto do açúcar, que há muito é usado principalmente para rações.

Compararam-se a expansão do sistema e dois procedimentos de alocação, a fim de estimar as emissões de GEE do etanol de melaço.

Os resultados encontrados por Nguyen e Hermansen (2012) apontam que a expansão do sistema produz a estimativa mais alta entre os três procedimentos. No entanto, independentemente de qual procedimento é utilizado, há redução significativa das emissões da fase de combustível no cenário de abatimento, o que pressupõe a implementação da substituição de energia de base fóssil por bioenergia, para reduzir as emissões de GEE. Além disso, observou-se um nível desprezível de emissões desde a fase de uso, o que mantém a estimativa de emissões do ciclo de vida do etanol abaixo do da gasolina.

Os autores consideram que a mudança indireta do uso do solo é uma consequência do desvio do melaço da alimentação para o combustível, a expansão do sistema é o método mais adequado quando o objetivo da ACV é apoiar os tomadores de decisão na ponderação das opções e consequências. Conforme mostrado na análise de sensibilidade, uma adição de emissões de carbono de *Indirect Land Use Change* (ILUC) piora o equilíbrio de GEE de etanol, com o desmatamento sendo o pior cenário, no qual o combustível não é mais um poupador de carbono líquido, mas um emissor de carbono.

A produção de açúcar da cana-de-açúcar no Irã tem aumentado constantemente nos últimos anos. O mesmo ocorre para o bagaço remanescente após a extração do açúcar do colmo da cana-de-açúcar, um dos seus principais coprodutos. Hoje, o resíduo é praticamente descartado e, por isso, causa preocupações ambientais. Mas o bagaço pode ser usado para o fornecimento de calor e/ou eletricidade nas refinarias de açúcar. O estudo de Mohammadi *et al.* (2020) examinou e comparou os impactos do ciclo de vida, “do berço ao túmulo”, da geração de energia a partir do bagaço e a partir da palha da cana, com base na combustão, na gaseificação ou na AD, no Irã. O estudo mostrou que as três opções de conversão do bagaço são caracterizadas por aspectos bastante distintos em termos ambientais. A opção de combustão mostrou os números mais promissores em comparação com a gaseificação e a AD, especialmente quando se considerou o potencial de exportação do excedente da eletricidade para a rede e a economia de emissões de GEE. No entanto, a gaseificação e a produção de biogás podem ser potencialmente caracterizadas por um desempenho ambiental muito melhor em algumas categorias de impacto. Além disso, a maturidade do mercado da opção de

combustão, com sua disponibilidade e confiabilidade de dados, é muito melhor do que a das outras duas opções (MOHAMMADI *et al.*, 2020).

3.5 SINTESE CONCLUSIVA

Após o embasamento da literatura existente para a continuidade do trabalho foram adotados inventários já existentes das quatro fontes de geração de energia estudadas: hidrelétrica, fotovoltaica, solar e eólica. Para comparação de todas as usinas a unidade de geração foi de 1 MWh, valor já adotado em outros estudos conforme explicitado. Os inventários cuja unidade base era de 1KWh os valores foram adaptados para 1 MWh.

Para a análise do ciclo de vida foi adotado o software Open LCA após a pesquisa realizada em função de ser bem recomendado pela facilidade de manuseio e por ser gratuito. Como método de avaliação foi adotado o ReCIPE midpoint para verificar as categorias de impacto, o qual quantifica de acordo com as características no meio ambiente.

De posse dos dados inventariados para lançar os valores no software escolhido e mantendo os valores de 1 MWh, alguns valores foram transformados para MWh e casos como concreto que não possuía essa especificação foi transformado nos insumos para avaliação.

Embasando a análise também foi utilizado o método ReCIPE endpoint. Assim pode-se avaliar cada empreendimento adotado com relação as categorias ambientais, para ajudar na análise de escolha para novas usinas.

4 ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DAS ENERGIAS RENOVAVEIS

A proposta deste item é organizar os dados dos inventários para a ACV das usinas hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e de biomassa e na sequência se propõe a determinar o ciclo de vida de usinas específicas, considerando a geração de 1 MWh de energia. Para tanto, o método de avaliação do impacto escolhido foi o Recipe o qual é um método de AICV desenvolvido por: RIVM, a Radboud University Nijmegen, o centro de pesquisa CML da Universidade de Leiden e a empresa PRé Consults. A metodologia do ReCIPE teve como base os métodos CML e Eco-Indicator 99. As categorias de impacto ambiental que abrangem o método ReCIPE o Midpoint e o Endpoint (PIEKARSKI *et al.*, 2012).

- a) Midpoint: acidificação terrestre, redução da camada de ozônio, depleção de água, depleção de combustíveis fósseis, redução de recursos minerais, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, formação de material particulado, formação de oxidantes fotoquímicos, mudanças climáticas, ocupação de solo agrícola, ocupação de solo urbano, radiação ionizante, toxicidade humana e transformação de solo natural
- b) Endpoint: Danos à saúde humana, danos à diversidade dos ecossistemas, e danos à disponibilidade de recursos.

A explicação de cada item avaliado permite o entendimento do método ReCIPE Midpoint. no qual o fator de caracterização do ponto médio selecionado para as mudanças climáticas é o potencial de aquecimento global (GWP), o qual quantifica o aumento de um gás de efeito estufa (GEE) e é expresso em kg CO₂-eq (JOINT RESEARCH CENTRE, 2010).

A redução da camada de ozônio (PDO) expresso em kg equivalente de CFC-11 refere-se à diminuição do tempo de concentração de ozono. A radiação ionizante é relatada em Cobalto-60 equivalente para o ar. A formação de material particulado fino, é considerada como sendo a ingestão de PM_{2,5} pela população

humana. Os potenciais de formação de partículas são expressos em kg de equivalentes primários de PM_{2,5}.

O potencial de formação de ozono para a saúde humana é expresso em kg NO_x-eq. A acidificação terrestre é expressa em kg equivalentes SO₂, a mudança na acidez do solo devido a uma mudança na deposição ácida foi derivada com o modelo geoquímico de estado estacionário PROFILE (Roy et al. 2012b). Com relação a eutrofização da água doce o destino do fósforo que constitui a base dos fatores de caracterização do ponto médio. A unidade é expressa em kg de fósforo equivalentes da água doce. O destino e os efeitos das emissões químicas expressos em kg de equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4DCB-eq) foram utilizados como fator de caracterização no nível médio para toxicidade humana, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre.

O fator de caracterização ao nível do ponto médio é m³ de água consumida por m³ de água extraída no caso do uso de água, já para o uso de solo o fator de caracterização do ponto médio refere-se a perda relativa de espécies causada por algum tipo específico de uso da terra como culturas anuais, terrenos urbanos, silvicultura, entre outros.

O fator de escassez de recursos minerais é o potencial excedente de minério, expresso em kg Cu-eq. A extração primária de um recurso mineral levará a uma diminuição global do teor do minério, o que significa a concentração desse recurso em minérios em todo o mundo, o que por sua vez aumentará a quantidade de minério produzido por quilograma de recurso mineral extraído.

O indicador de ponto médio para a utilização de recursos fósseis, determinado como o Potencial de Combustível Fóssil (FFP em kg equivalente-óleo), é definido como a razão entre o maior poder calorífico de um recurso fóssil e o conteúdo energético do petróleo bruto.

Os dados inventariados de ACV foram provenientes de pesquisas realizadas por Ribeiro (2003) - usina hidrelétrica, Leandro (2019) - usina fotovoltaica e Souza (2021) - usina eólica e biomassa.

4.1 ANÁLISE DE INVENTÁRIO USINA HIDRELÉTRICA

O inventário usado para embasar a ACV foi o desenvolvido por Ribeiro (2003) que estudou na Usina Hidrelétrica de Itaipu. A fronteira contemplou os processos envolvidos no fornecimento e os insumos básicos para a obra. As etapas

consideradas foram de construção e operação da usina. Não foi incluída a desativação da usina. A unidade funcional foi de 1 MWh de eletricidade, obtido na saída do gerador de usina. No caso da Usina de Itaipu, para as fronteiras em relação ao sistema natural, foram considerados os seguintes recursos:

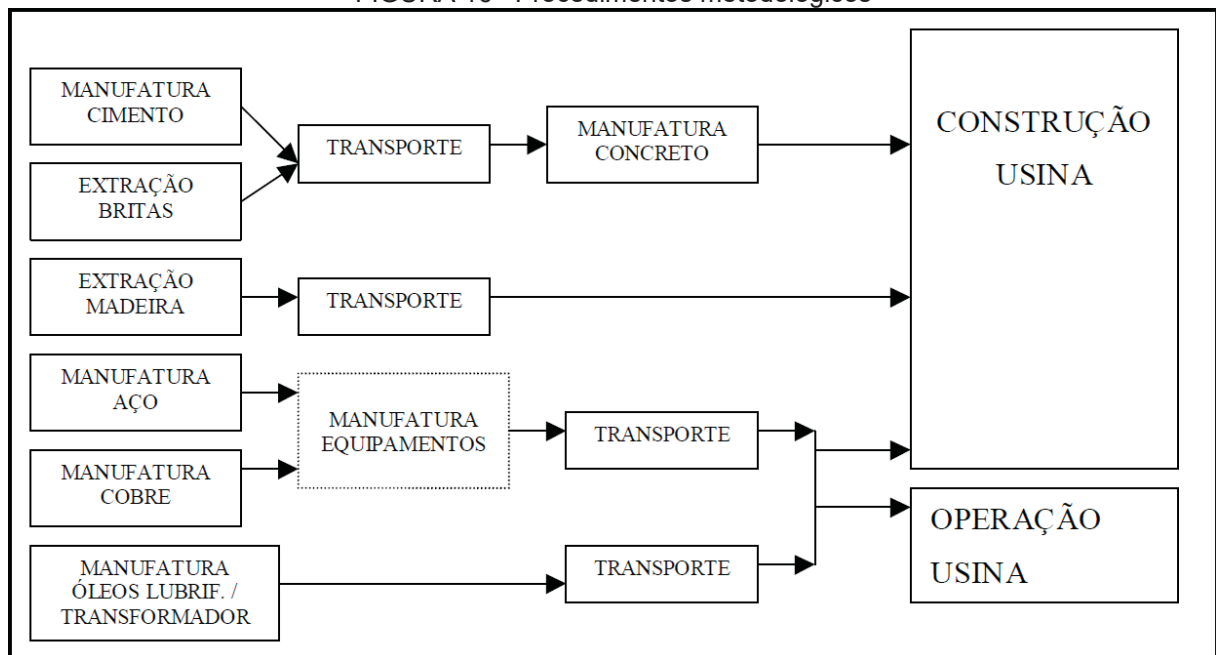
- água captada do Rio Paraná e incorporada à usina;
- rocha, terra e areia retiradas do entorno da obra.

Com relação às fronteiras de bens de capital, Ribeiro (2003) considerou a própria usina como bem de capital. Com relação à infraestrutura, dois aspectos foram avaliados: as obras de infraestrutura habitacional e o canteiro de obras.

Quanto às fronteiras em relação a outros sistemas, Ribeiro (2003) avaliou como *screening* os resultados da empresa Vattenfall, em que os insumos principais foram aço, cobre, *diesel*, óleos lubrificantes e de transformador e cimento. A FIGURA 16 apresenta as fronteiras iniciais.

Parâmetros da análise: Com relação à fronteira geográfica considerou-se o local da obra e os fornecedores de insumos. Quanto à fronteira temporal, foi considerado o uso de cem anos, a partir de 1974, o ano de início das obras. Os dados utilizados foram coletados diretamente com os funcionários da Itaipu Binacional, e complementado com a literatura.

FIGURA 16– Procedimentos metodológicos



FONTE: Ribeiro (2003).

Nas TABELAS 3 e 4 são apresentadas as consolidações das estimativas do ciclo de vida de Itaipu e a consolidação dos insumos.

Os valores que foram usados como dados entrada no OpenLCA foram da do inventário de Ribeiro, com os mesmos valores, apenas traduzindo para o inglês visto que o programa tem as informações em inglês.

Os dados de entrada foram inseridos como “*inputs*” e as emissões em “outputs”.

TABELA 3 – Consolidação das estimativas do ciclo de vida de Itaipu

Total para os cem anos				Valores por				
Unidade	Construção	Operação	Total	Unidade	Construção	Operação	Total	
Consumos recursos								
Rocha	m³	3,20E+07	0	3,20E+07	m³/MWh	3,59E+03	0	3,59E-03
Terra	m³	2,36E+07	0	2,36E+07	m³/MWh	2,65E-03	0	2,65E-03
Água	t	2,16E+06	0	2,16E+06	t/MWh	2,42E-04	0	2,42E-04
Areia	t	3,68E+06	0	3,68E+06	t	4,12E-04	0	4,12E-04
Madeira	t	5,27E+03	0	5,27E+03	t	5,91E-07	0	5,91E-07
Consumos insumos								
Elettricidade	MWh	2,64E+06	4,73E+02	2,64E+06	MWh/MWh	2,96E-04	5,31E-08	2,96E-04
Cimento	t	2,48E+06	0	2,48E+06	t/MWh	2,78E-04	0	2,78E-04
Cinzas	t	3,00E+06	0	3,00E+05	t/MWh	3,36E-05	0	3,36E-05
Aço	t	7,97E+05	4,69E+05	1,27E+06	t/MWh	8,94E-05	5,26E-05	1,42E-04
Cobre	t	5,48E+03	1,63E+04	2,18E+04	t/MWh	6,15E-05	1,83E-06	2,45E-06
Diesel/	t	2,95E+05	0	2,95E+05	t/MWh	3,31E-05	0	3,31E-05
Óleo tranf.	m³	3,37E+03	0	3,37E+03	m³/MWh	3,78E-07	0	3,78E-07
Óleo lubrif.	m³	1,50E+03	0	1,50E+03	m³/MWh	1,68E-07	0	1,68E-07
Transportes								
Transp. caminhão	t.km	3,90E+09	0	3,90 x 10 ⁹	t.km/MWh	4,37E-01	0	4,37E-01
Transp. ônibus	km	1,50E+07	0	1,50 x 10 ⁷	km/MWh	1,68E-03	0	1,68E-03
(continua)								

(continua)

TABELA 3 – Consolidação das estimativas do ciclo de vida de Itaipu

Total para os cem anos					Valores por			(conclusão)
Unidade	Construção	Operação	Total	Unidade	Construção	Operação	Total	
Emissões atmosféricas								
Aldeídos	t	3,03E+02	0	3,03E+02	t/MWh	3,40E-08	0	3,40E-08
CH ₄	t	0,00	1,18E+06	1,18E+06	t/MWh	0,00	1,32E-04	1,32E-04
CO	t	4,62E+03	0	4,62E+03	t/MWh	5,18E-07	0	5,18E-07
CO ₂	t	9,26E+05	9,64E+06	1,06E+07	t/MWh	1,04E-04	1,08E-03	1,19E-03
Hidrocarbonetos	t	8,45E+02	0	8,45E+02	t/MWh	9,48E-08	0	9,48E-08
Particulado	t	8,74E+02	0	8,74E+02	t/MWh	9,80E-08	0	9,80E-08
Nox	t	1,26E+04	0	1,26E+04	t/MWh	1,41E-06	0	1,41E-06
SOx	t	1,30E+03	0	1,30E+03	t/MWh	1,46E-07	0	1,46E-07
Aspectos não materiais								
Uso do solo	km ²	0	1,35E+03	1,35E+03	km ² /MWh	0	1,51E-07	1,51E-07

FONTE: Adaptado de Ribeiro (2003).

Unid.	Óleo diesel	Óleo combustível	Óleo lubrificante	Transp. caminhão	Transp. ferroviário	Transp. marítimo	Transp. ônibus	Escavações e obras de terra	Elétrica e transmissão	Aço	Cimento	Cobre
	(/kg diesel)	(/kg óleo comb.)	(/kg óleo lubrif.)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/usina)	(/MJ)	(/kg aço)	(/kg cimento)	(/kg cobre)
Xileno	kg									7,86E-07	8,32E-07	
Efluentes líquidos												
Ac. Acético	kg			1,61E-07	2,82E-11	2,35E-07	7,06E-09			4,11E-02		
Acetaldeído	kg									5,73E-04		
Acetona	kg									1,06E-03		
Ácido (H+)	kg	2,94E-05	2,76E-05	2,95E-05				8,72E+03	1,34E-07	5,99E-06	3,37E-06	7,82E-07
Alcatrão	kg									9,83E-02		
Amoníaco	kg									3,68E-07		
Chumbo	kg									2,81E-08		2,97E-08
Cianeto	kg									2,26E-06		
C1-	kg	3,87E-05	3,63E-05	3,88E-05	2,12E-07	3,71E-11	3,09E-07	9,29E-09	1,15E+04	1,77E-07	7,88E-06	4,43E-06
Cobre	kg									8,42E-09		8,91E-09
Cromo 3+	kg									1,04E-08		
DQO	kg	2,53E-06	2,38E-06	2,54E-06	1,38E-08	2,43E-12	2,02E-08	6,08E-10	7,51E+02	1,16E-08	5,16E-07	2,90E-07
Fenol	kg	5,12E-08	4,80E-08	5,14E-08	2,80E-10	4,19E-14	4,09E-10	1,23E-11	1,52E+01	2,34E-10	3,78E-06	5,86E-09
Ferro	kg									3,81E-05		
Fluoreto	kg									1,58E-05		
H2	kg	1,59E-06	1,49E-06	1,59E-06	8,68E-09	1,52E-12	1,27E-08	3,81E-10	4,71E+02	7,25E-09	3,23E-07	1,82E-07
Hidrocarbonetos	kg	1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05	1,07E-07	1,88E-11	1,56E-07	4,70E-09	5,81E+03	8,95E-08	5,39E-06	2,24E-06
Hexano	kg									3,80E-07		
Inorgânicos gerais	kg											2,82E+00
Ions metálicos	kg	5,16E-06	4,84E-06	5,18E-06	2,82E-08	4,94E-12	4,11E-08	1,24E-09	1,53E+03	2,36E-08	1,05E-06	5,90E-07
Manganês	kg									8,14E-07		1,37E-07

Unid.	Óleo diesel	Óleo combustível	Óleo lubrificante	Transp. caminhão	Transp. ferroviário	Transp. marítimo	Transp. ônibus	Escavações e obras de terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre	
	(/kg diesel)	(/kg óleo comb.)	(/kg óleo lubrif.)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/usina)	(/MJ)	(/kg aço)	(/kg cimento)	(/kg cobre)	
Mercurio	kg									1,68E-09	1,78E-09		
Metanol	kg									1,49E-02			
Metil acetato	kg									1,31E-03			
N total	kg									2,81E-07		2,97E-07	
NH3	kg									3,37E-05			
Nitrato	kg									3,36E-05			
Óleo	kg	5,45E-06	7,92E-06	8,48E-06	4,62E-08	8,10E-12	6,74E-08	2,03E-09	2,51E+03	3,86E-08	9,09E-05	9,67E-07	2,25E-07

(continua)

(continua)

TABELA 4 – Consolidação dos ICVS insumos do ciclo de vida de Itaipu (continuação)

Unid.	Óleo diesel	Óleo combustível	Óleo lubrificante	Transp. caminhão	Transp. ferroviário	Transp. marítimo	Transp. ônibus	Escavações e obras de terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre
	(/kg diesel)	(/kg óleo comb.)	(/kg óleo lubrif.)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/usina)	(/MJ)	(/kg aço)	(/kg cimento)	(/kg cobre)
Orgân. dissolvidos	kg 1,96E-05	1,84E-05	1,97E-05	1,07E-07	1,88E-11	1,56E-07	4,70E-09	5,81E+03	8,95E-08	3,99E-06	2,24E-06	5,22E-07
PAH	kg									2,81E-09		2,97E-09
Petróleo	kg 2,29E-05	2,15E-05	2,30E-05	1,25E-07	2,20E-11	1,83E-07	5,51E-09	6,81E+03	1,05E-07	4,67E-06	2,63E-06	6,11E-07
Sódio	kg 1,94E-05	1,82E-05	1,94E-05	1,06E-07	1,86E-11	1,54E-07	4,65E-09	5,74E+03	8,84E-08	3,94E-06	2,22E-06	5,15E-07
Sól. dissolvidos	kg							4,46E-05				
Sól. suspensos	kg							1,36E-04				
Subst. dissolvidas	kg			5,36E-08	9,40E-12	7,82E-08	2,35E-09	2,91E+03	4,48E-08	2,00E-06	1,12E-06	2,61E-07
Subst. suspensas	kg			3,75E-07	6,58E-11	5,47E-07	1,65E-08	2,04E+04	3,13E-07	1,40E-05	7,85E-06	1,83E-06
Sulfato	kg 9,80E-06	9,19E-06	9,84E-06							2,52E-06		
Sulfito	kg 6,86E-05	6,44E-05	6,89E-05							1,26E-04		2,08E-08
Zinco	kg											
Resíduos sólidos												
Inorgânico geral	kg											1,34E+02
Escória	kg 5,12E-07	4,80E-07	5,14E-07	2,80E-09	4,91E-13	4,09E-09	1,23E-10	1,52E+02	2,34E-09	1,04E-07	5,86E-08	1,36E-08
Lodo	kg											
Resíduo aciaria	kg											
Resíduo mineral	kg 5,63E-05	5,28E-05	5,64E-05	3,08E-07	5,40E-11	4,50E-07	1,35E-08	1,67E+04	2,57E-07	1,15E-07	6,45E-06	1,50E-06
Resíduo não inerte	kg 1,47E-03	1,38E-03	1,48E-03	8,04E-06	1,41E-09	1,17E-05	3,53E-07	4,36E+05	6,71E-06	2,99E-04	1,68E-04	3,91E-05
TABELA 4 – Consolidação dos ICVS insumos do ciclo de vida de Itaipu (conclusão)												
Unid.	Óleo diesel	Óleo combustível	Óleo lubrificante	Transp. caminhão	Transp. ferroviário	Transp. marítimo	Transp. ônibus	Escavações e obras de terra	Eletricidade transmitida	Aço	Cimento	Cobre

	(/kg diesel/)	(/kg óleo comb.)	(/kg óleo lubrif.)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/t.km)	(/usina)	(/MJ)	(/kg aço)	(/kg cimento)	(/kg cobre)
Resíduo sólido	kg									3,85E-05	1,96E-04	
Aspectos não materiais												
Perda calor (ar)	MJ								3,09E-02	5,63E-02	1,59E-02	1,29E-03
Perda calor (água)	MJ								1,59E-01	2,90E-01	8,16E-02	6,61E-03
Uso do solo	m²	1,05E-06	9,90E-07	1,06E-06	5,77E-09	1,01E-12	8,42E-09	3,13E+02	4,82E-09	7,30E-03	1,21E-07	1,75E-02

FONTE: Adaptado de Ribeiro (2003).

Ribeiro (2003), para deixar o inventário no formato final, usou o programa SimaPro. Os processos dos ciclos de vida dos insumos que alimentam foram modelados, e os resultados são apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 – ICV consolidado

	Unidade (/MWh)	Total	Construção usina	Operação usina (cem anos)
Consumos de recursos minerais				
Água	kg	8,90E+00	7,16E+00	1,74E+00
Ar	kg	1,24E-05	7,86E-06	4,55E-06
Areia	kg	4,12E-01	4,12E-01	-
Argila	kg	8,34E-02	8,34E-02	4,15E-07
Basalto	kg	3,59E-03	3,59E-03	-
Bauxita	kg	4,00E-05	3,56E-05	4,36E-06
Calcita	kg	4,86E-01	4,70E-01	1,62E-02
Carvão	kg	5,40E+01	3,39E-02	2,01E-02
Dolomita	kg	9,69E-04	6,14E-04	3,55E-04
Fluorita	kg	6,63E-04	4,20E-04	2,43E-04
Petróleo	kg	1,19E-01	1,04E-01	1,51E-02
Gás natural	kg	8,84E-04	4,10E-04	4,74E-04
Gipsita	kg	8,33E-03	8,33E-03	-
Madeira	kg	1,44E-01	9,13E-02	5,25E-02
Min. cobre	kg	2,01E-03	5,47E-04	1,46E-03
Min. Ferro	kg	1,66E-01	1,05E-01	6,10E-02
Min. manganês	kg	1,27E-03	8,04E-04	4,65E-04
Quartzita	kg	2,54E-03	1,61E-03	9,31E-04
Sal gema	kg	1,90E-05	1,69E-05	2,07E-06
Sucata aço	kg	6,53E-02	4,14E-02	2,39E-02
Sucata cobre	kg	2,93E-04	7,99E-05	2,13E-04
Terra	m ³	2,65E-03	2,65E-03	-
Consumo de recursos energéticos				
Energia (inespec.)	MJ	4,32E-02	3,86E-02	4,73E-03
Energia do carvão	MJ	9,50E-04	8,46E-04	1,04E-04
Energia do gás natural	MJ	2,520E-01	2,24E-01	2,75E-02
Energia do petróleo	MJ	6,08E-02	5,42E-02	6,63E-03
Energia do urânio	MJ	9,50E-04	8,46E-04	1,04E-04
Energia hidrelétrica	MJ	1,46E+00	1,36E+00	9,61E-02

(continua)

TABELA 5 – ICV consolidado

(continuação)

	Unidade (/MWh)	Total	Construção usina	Operação usina (cem anos)
Emissões atmosféricas				
1,3 Butadieno	kg	1,40E-07	1,28E-07	1,17E-08
Aldeídos	kg	3,40E-05	3,40E-05	-
Amônia	kg	2,16E-07	1,36E-07	8,06E-08
Benzeno	kg	1,64E-05	1,60E-05	4,17E-07
Benzopireno	kg	2,42E-09	1,52E-09	9,00E-10
CaO	kg	1,21E-03	7,69E-04	4,45E-04
CH ₄	kg	1,32E-01	4,50E-04	1,32E-01
Chumbo	kg	1,65E-11	1,04E-11	6,10E-12
CO	kg	1,12E-01	7,12E-02	4,08E-02
CO ₂	kg	1,56E+00	4,45E-01	1,12E+00
COV	kg	2,64E-04	1,77E-04	8,66E-05
COV (exceto metano)	kg	1,10E-04	9,81E-05	1,21E-05
Etano	kg	3,70E-05	2,34E-05	1,36E-05
F ₂	kg	7,65E--08	4,80E-08	2,85E-08
FeO	kg	8,18E-04	5,18E-04	3,00E-04
Fluoretano	kg	2,42E-08	1,52E-08	9,00E-09
Fluoreto	kg	1,72E-06	1,10E-06	6,19E-07
Fuligem	kg	5,84E-05	5,16E-05	6,73E-06
H ₂	kg	1,83E-04	1,16E-04	6,70E-05
H ₂ S	kg	1,10E-05	6,98E-06	4,07E-06
HC1	kg	4,97E-08	4,42E-08	5,42E-09
Hidrocarbonetos	kg	3,86E-04	3,43E-04	4,33E-05
Hidroc. alifáticos	kg	3,45E-05	3,06E-05	3,75E-06
Hidroc. aromáticos	kg	3,26E-07	2,05E-07	1,22E-07
Inespec.	kg	1,03E-05	6,47E-06	3,84E-06
Material particulado	kg	1,37E-02	8,78E-03	4,96E-03
Mercurio	kg	8,27E-15	5,22E-15	3,05E-15
Metais pesados	kg	9,50E-08	8,46E-08	1,04E-08
Metil-mercaptano	kg	1,35E-09	1,20E-09	1,47E-10
N ₂ O	kg	5,89E-07	5,77E-07	1,21E-08
NO ₂	kg	1,49E-05	1,17E-05	3,20E-06
Nox	kg	2,97E-03	2,70E-03	2,67E-04
Petróleo	kg	1,79E-05	1,60E-05	1,95E-06
PM10	kg	4,01E-04	4,01E-04	7,62E-07

(continua)

TABELA 5 – ICV consolidado

(continuação)				
	Unidade (/MWh)	Total	Construção usina	Operação usina (cem anos)
Poeira (SPM)	kg	1,07E-02	1,04E-02	3,59E-04
SO ₂	kg	3,49E-03	1,85E-03	1,64E-03
SOx	kg	2,70E-04	2,53E-04	1,76E-05
Tolueno	kg	1,05E-07	6,57E-08	3,90E-08
Xileno	kg	1,13E-07	7,07E-08	4,20E-08
Efluentes líquidos				
Ac. acético	kg	5,80E-03	3,68E-03	2,13E-03
Acetaldeído	kg	8,09E-05	5,12E-05	2,96E-05
Acetona	kg	1,50E-04	9,52E-05	5,51E-05
Ácido (H ⁺)	kg	2,85E-06	2,54E-06	3,11E-07
Alcatrão	kg	1,39E-02	8,79E-03	5,08E-03
Amoníaco	kg	5,19E-08	3,29E-08	1,90E-08
Chumbo	kg	4,03E-09	2,53E-09	1,50E-09
Cianeto	kg	3,18E-07	2,02E-07	1,17E-07
C1-	kg	3,75E-06	3,34E-06	4,09E-07
Cobre	kg	1,21E-09	7,58E-10	4,50E-10
Cromo 3+	kg	1,47E-09	9,32E-10	5,39E-10
DQO	kg	2,46E-07	2,19E-07	2,68E-08
Fenol	kg	5,37E-07	3,41E-07	1,95E-07
Ferro	kg	5,38E-06	3,41E-06	1,97E-06
Fluoreto	kg	2,23E-06	1,41E-06	8,16E-07
H ₂	kg	1,54E-07	1,37E-07	1,68E-08
Hidrocarbonetos	kg	5,36E-08	3,40E-08	1,97E-08
Hexano	kg	2,10E-06	1,82E-06	2,82E-07
Inorgânicos gerais	kg	6,36E-03	1,73E-03	4,63E-03
Íons metálicos	kg	5,00E-07	4,45E-07	5,45E-08
Manganês	kg	1,15E-07	7,28E-08	4,21E-08
Mercurio	kg	2,42E-10	1,52E-10	9,00E-11
Metanol	kg	2,10E-03	1,33E-03	7,71E-04
Metil acetato	kg	1,85E-04	1,17E-04	6,78E-05
N total	kg	4,03E-08	2,53E-08	1,50E-08
NH ₃	kg	4,76E-06	3,02E-06	1,75E-06
Nitrato	kg	4,75E-06	3,01E-06	1,74E-06
Óleo	kg	1,34E-05	8,67E-06	4,69E-06
Orgân. dissolvidos	kg	1,90E-06	1,69E-06	2,07E-07
(continua)				

TABELA 5 – ICV consolidado

(conclusão)				
	Unidade (/MWh)	Total	Construção usina	Operação usina (cem anos)
PAH	kg	4,03E-10	2,53E-10	1,50E-10
Petróleo	kg	2,22E-06	1,98E-06	2,43E-07
Sódio	kg	1,88E-06	1,67E-06	2,05E-07
Sól. dissolvidos	kg	6,30E-06	3,99E-06	2,31E-06
Sól. suspensos	kg	1,92E-05	1,21E-05	7,03E-06
Subst. dissolvidas	kg	9,50E-07	8,46E-07	1,04E-07
Subst. suspensas	kg	6,65E-06	5,93E-06	7,26E-07
Sulfito	kg	3,56E-07	2,25E-07	1,30E-07
Zinco	kg	1,78E-05	1,13E-05	6,53E-06
Resíduos sólidos				
Escória	kg	4,97E-08	4,42E-08	5,42E-09
Lodo	kg	2,12E-03	1,34E-03	7,76E-04
Resíduo aciaria	kg	5,65E-03	3,58E-03	2,07E-03
Resíduo inorgânico	kg	3,02E-01	8,24E-02	2,20E-01
Resíduo mineral	kg	5,46E-06	4,87E-06	5,96E-07
Resíduo não inerte	kg	1,43E-04	1,27E-04	1,56E-05
Resíduo sólido	kg	5,99E-05	5,79E-05	1,99E-06
Perda calor (ar)	kg	1,24E-02	9,44E-03	2,91E-03
Perda calor (água)	kg	6,35E-02	4,85E-02	1,50E-02
Uso do solo	kg	1,52E-01	6,64E-04	1,52E-01

FONTE: Adaptado de Ribeiro (2003).

Os dados apresentados foram inseridos no software OpenLCA para a obtenção dos resultados dos impactos. Os valores utilizados foram os fornecidos por Ribeiro, a diferença se deu na tradução dos itens e casos omissos que foram utilizados componentes similares.

4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA FOTOVOLTAICA

O inventário usado para embasar a ACV da usina fotovoltaica foi elaborado por Leandro (2019) analisou o inventário do processo de produção, uso, operação e desmantelamento das tecnologias solares: fotovoltaica (células monocristalinas e policristalinas); de concentração solar de calha parabólica; e de prato parabólico solar com motor *stirling*. Na sequência será apresentado o inventário para o uso de fotovoltaica com células monocristalinas e policristalinas.

Leandro (2019) adotou os inventários referentes ao processo de beneficiamento do silício até a fabricação do módulo fotovoltaico derivados dos inventários publicados por Frischknecht *et al.* (2015), desconsiderando o transporte desses inventários. Todos os processos de manufatura do silício até a produção do painel foram realizados na cidade de São Paulo/SP, e os painéis finalizados foram levados de caminhão até a cidade de Poços de Caldas/MG, onde a planta foi construída.

O inventário refere-se à construção e à instalação da planta de tecnologia fotovoltaica monocristalina e policristalina, localizada na cidade de Jaíba/MG, de 3 MW. As entradas e saídas foram adaptadas para uma planta de 1 MW, por meio de uma estimativa de cálculo por escalonamento de acordo com as condições brasileiras (PETERS; TIMMERHAUS, 1991).

Os inventários estão especificados nas TABELAS de 6 a 11.

TABELA 6 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – entradas

Entradas	Unidade	Quantidade
Eletricidade	Kwh	1,10E+01
Madeira	M3	3,25E-03
Coque de carvão	MJ	2,31E+01
Grafite	kg	1,00E-01
Carvão	kg	1,70E-01
Coque de petróleo	kg	5,00E-01
Areia de sílica	kg	2,70E+00
Oxigênio líquido	kg	2,00E-02
Escória de mg-Si	kg	2,50E-02
Silicone	Un	1,00E-11

FONTE: Adaptado de Leandro (2019).

TABELA 7 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – saídas/emissões

Saída/emissões	Unidade	Quantidade
Calor	MJ	7,13E+01
Arsênico	kg	9,42E-09
Alumínio	kg	1,55E-06
Antimônio	kg	7,85E-09
Boro	kg	2,79E-07
Cádmio	kg	3,14E-10
Cálcio	kg	7,75E-07
CO não fóssil	kg	6,20E-04
CO fóssil	kg	1,38E-03
CO ₂ não fóssil	kg	1,61E+00
CO ₂ fóssil	kg	3,58E+00

Saída/emissões	Unidade	Quantidade
Cromo	kg	7,85E-09
Cloro	kg	7,85E-08
Cianeto	kg	6,87E-06
Flúor	kg	3,88E-08
H ₂ S	kg	5,00E-04
HF	kg	5,00E-04
Ferro	kg	3,88E-06
Chumbo	kg	3,44E-07
Mercúrio	kg	7,85E-09
NMVOC	kg	9,65E-05
Nox	kg	9,74E-03
Partículas > 10 mm	kg	7,75E-03
Potássio	kg	6,20E-05
Silicone	kg	7,51E-03
Sódio	kg	7,75E-07
SO ₂	kg	1,22E-02
Estanho	kg	7,85E-09

FONTE: Adaptado de Leandro (2019).

TABELA 8 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício eletrônico (e-Si) – entradas

Entradas	Unidade	Quantidade
Água	m ³	8,14E+01
Mg-Si	kg	1,05E+00
Polietileno	kg	6,79E-04
Ácido hidrolórico	kg	1,43E+00
Hidrogênio líquido	kg	8,97E-02
Tetrafluoretileno	kg	6,39E-04
Hidróxido de sódio	kg	4,63E-01
Grafite	kg	7,10E-04
Calor	MJ	1,74E+02
Eletricidade	kWh	1,632E+02
Resíduos	Unidade	Quantidade
Plástico	kg	1,32E-03
Planta de silício	um	1,07E-11
Calor	MJ	3,92E+02
Emissões para a água	Unidade	Quantidade
AOX	kg	1,26E-05
DBO	kg	2,05E-04
DQO	kg	2,02E-03
Cloreto	kg	3,60E-02
Cobre íon	kg	1,02E-07
Emissões para a água	Unidade	Quantidade
Fosfato	kg	2,80E-06
Íon Sódio	kg	3,38E-02
Íon Zinco	kg	1,96E-06
Íon Ferro	kg	5,61E-06
COD	kg	9,10E-04

TOC kg 9,10E-04

FONTE: Adaptado de Leandro (2019).

TABELA 9 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício solar

Entradas	Unidade	Quantidade
Mg-Si	kg	1,13E+00
Ácido hidrolórico	kg	1,60E+00
Hidrogênio líquido	kg	5,01E-02
Hidróxido de sódio	kg	3,48E-01
Eletricidade	kWh	1,10E+01
Calor	MJ	1,85E+02
Planta de silício	Un	1,00E-11
Emissões para o ar	Unidade	Quantidade
Calor	MJ	3,15E+02
Emissões para a água	Unidade	Quantidade
AOX	kg	1,26E-05
DBO	kg	2,05E-04
DQO	kg	2,02E-03
Cloreto	kg	3,60E-02
Cobre íon	kg	1,02E-07
Nitrogênio	kg	2,08E-04
Fosfato	kg	2,80E-06
Íon Sódio	kg	3,38E-02
Íon Zinco	kg	1,96E-06
Íon Ferro	kg	5,61E-06
COD	kg	9,10E-04
TOC	kg	9,10E-04

FONTE: Adaptado de Leandro (2019)

TABELA 10 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de m-Si e p-Si

Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si
m-Si	kg	1	-
p-Si	kg	-	1
Eletricidade	kWh	6,82E+01	1,55E+01
Gás natural	MJ	5,82E+01	-
Água resfriamento	M ³	5,09E+00	-
Água	kg	9,41E+01	9,43E-01
Água deionizada	kg	4,01E+00	-
Silício <i>mix</i> de produção	kg	7,81E-01	7,00E-01
Argônio	kg	1,00E+00	2,52E-01

TABELA 10 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de m-Si e p-Si

(continuação)			
Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si
Hélio	kg	-	7,76E-05
HF	kg	1,00E-02	-
Ácido nítrico	kg	6,68E-02	-
Hidróxido de sódio	kg	4,15E-02	5,00E-03
Nitrogênio líquido	kg	-	3,04E-02
Ladrilhos cerâmicos	kg	1,67E-01	2,14E-01
Cal hidratada	kg	2,22E-02	-
Planta de silício	un	1,00E-11	1,00E-11
Resíduos	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si
Si wafer	kg	1,67E-01	-
Emissões para o ar	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si
Calor	MJ	2,46E+02	5,58E+01
Hidróxido	kg	3,76E-01	-
DBO	kg	1,30E-01	-
DQO	kg	1,30E-01	-
COD	kg	4,05E-02	-
TOC	kg	4,05E-02	-
Nox	kg	3,39E-02	-
Nitrato	kg	8,35E-02	-

FONTE: Adaptado de Leandro (2019).

TABELA 11 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m² de bolacha de silício: m-Si e p-Si

Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si
m-Si	m ²	1	-
p-Si	m ²	-	1
Eletricidade	kWh	2,57E+01	2,08E+04
Gás natural	MJ	4,00E+00	2,08E+04
Água	kg	6,00E-03	1,64E+02
Água deionizada	kg	1,80E+01	-
P-Si fundido	kg	-	1,02E+00
m-Si CZ	kg	1,58+E00	-
Carboneto de silício	kg	6,20E-01	6,20E-1
Carboneto de silício reciclado	kg	1,41E+00	1,41E+00
Vidro plano	kg	9,99E-03	4,08E-02
Hidróxido de sódio	kg	1,50E-02	1,50E-02
Ácido hidrolórico	kg	2,70E-03	2,70E-03
Ácido acético	kg	3,90E-02	3,90E-02
Trietilenoglicol	kg	2,18E-01	2,18E-01
Trietilenoglicol reciclado	kg	1,95E+00	1,95E+00
Éter monometílico de dipropileno glicol	kg	3,00E-01	3,00E-01
Sulfonato de alquilbenzeno	kg	3,00E-01	2,40E-01
Ligante acrílico	kg	2,00E-03	3,85E-03

TABELA 11 – Inventário da fase de extração e fabricação de 1m² de bolacha de silício: m-Si e p-Si (conclusão)

Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	
Latão	kg	7,44E-03	7,44E-03	
Aço	kg	7,97E-01	7,97E-01	
Alma de aço	kg	8,05E-01	8,05E-01	
Resíduos	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Fonte
Desperdício de silício	kg	1,10E-01	1,70E-01	Simapro 8.0.3.14
Fator <i>water</i>	un	4,00E-06	4,00E-06	Simapro 8.0.3.14
Emissões para o ar	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Fonte
Calor	MJ	9,25E+01	1,70E-01	Simapro 8.0.3.14
Emissões para o ar	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Fonte
DBO	kg	2,95E-02	2,95E-02	Simapro 8.0.3.14
DQO	kg	2,95E-02	2,95E-02	Simapro 8.0.3.14
COD	kg	1,11E-02	1,11E-02	Simapro 8.0.3.14
TOC	kg	1,11E-02	1,11E-02	Simapro 8.0.3.14

FONTE: Adaptado de Leandro (2019)

Os valores indicados no inventário de Leandro (2019) foram replicados no programa OpenLCA, com as mesmas unidades de entrada. No caso dos dados da TABELA 11 os valores foram somados.

4.3 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA EÓLICA

Para o inventário da usina eólica foi usado como base o estudo realizado por Souza (2021), o qual abordou a ACV consequential da maximização das fontes renováveis em cenários futuros da matriz elétrica no Brasil. Em sua análise, a estrutura seguiu o padrão de estudo de ACV definido nas normas ISO 14040/14044.

A unidade funcional no estudo foi de 1 kWh de eletricidade, e a abordagem estudada foi “do berço ao túmulo”. Foram abordados os processos *upstream* (construção e fabricação) e o ciclo do combustível (produção/extração). Considerando o consumo de energia, foram analisados os processos *upstream* (extração de recursos e matérias-primas, processamento e transporte) e de operação da planta foram analisados. Com relação à produção de infraestrutura e transporte, o autor a considerou apenas quando representou mais de 5% do total dos impactos. Também não foram considerados a transmissão, o uso de eletricidade e o descomissionamento da planta.

O resumo com os valores encontrados é apresentado na TABELA 12.

TABELA 12 – Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1 kWh

	Unidade	Quantidade
Rotor		
Aço carbono	kg	1,432E-01
Alumínio	kg	7,47E-02
Plástico	kg	0,68E-02
Cobre	kg	4,10E-03
Pintura	kg	0,27E-02
Primer	kg	1,241E-01
Intermediate	kg	4,61E-02
Finishing	kg	1,65E-02
Nacele		
Ferro fundido	kg	1,976E-01
Aço forjado	kg	1,427E-01
Aço inoxidável	kg	8,56E-02
Aço	kg	6,92E-02
Fibra de vidro	kg	1,98E-02
Cobre	kg	1,76E-02
Plástico	kg	1,10E-02
Alumínio	kg	5,50E-03
Eletrônicos	kg	3,30E-03
Óleo	kg	3,30E-03
Torre de aço		
Aço carbono	kg	0,187E-01
Alumínio	kg	2,85E-02
Plástico	kg	2,20E-02
Cobre	kg	1,43E-02
Pintura	kg	8,40E-03
Primer	kg	2,70E-03
Intermediate	kg	4,40E-03
Finishing	kg	1,30E-03
Torre de concreto		
Concreto	kg	0,84231E+01
Materiais minerais sólidos e inertes	kg	0,69406E+01
Cimento	kg	0,12972E+01
Steel	kg	8,095E-01
Alumínio	kg	2,85E-02
Plástico	kg	2,20E-02
Cobre		1,43E-02
Transformador		
Aço elétrico	kg	1,16E-02
Alumínio	kg	9,10E-03
Cobre	kg	7,20E-03
Aço carbono	kg	5,40E-03
Papel (celulose)	kg	1,10E-03
Porcelana e pintura	kg	1,80E-03
Óleo mineral	kg	1,15E-02

FONTE: Adaptado de Souza (2021).

Como a unidade funcional adotada para o sistema hidrelétrico e solar foi de 1 MWh, os valores foram convertidos para apresentarem a mesma unidade funcional, conforme se observa na TABELA 13.

TABELA 13 – Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1MWh

	Unidade	Quantidade
Rotor		
Aço carbono	kg	1,43E-04
Alumínio	kg	7,47E-05
Plástico	kg	6,80E-06
Cobre	kg	4,10E-06
Pintura	kg	2,70E-06
Primer	kg	1,24E-04
Intermediate	kg	4,61E-05
Finishing	kg	1,65E-05
Nacele		
Ferro fundido	kg	1,98E-04
Aço forjado	kg	1,43E-04
Aço inoxidável	kg	8,56E-05
Aço	kg	6,92E-05
Fibra de vidro	kg	1,98E-05
Cobre	kg	1,76E-05
Plástico	kg	1,10E-05
Alumínio	kg	5,50E-06
Eletrônicos	kg	3,30E-06
Óleo	kg	3,30E-06
Torre de aço		
Aço carbono	kg	1,87E-05
Alumínio	kg	2,85E-05
Plástico	kg	2,20E-05
Cobre	kg	1,43E-05
Pintura	kg	8,40E-06
Primer	kg	2,70E-06
Intermediate	kg	4,40E-06
Finishing	kg	1,30E-06
Torre de concreto		
Concreto	kg	8,42E-03
Materiais minerais sólidos e inertes	kg	6,94E-03
Cimento	kg	1,30E-03
Steel	kg	8,10E-04
Alumínio	kg	2,85E-05
Plástico	kg	2,20E-05
Cobre	kg	1,43E-05
Transformador		

Aço elétrico	kg	1,16E-05
Alumínio	kg	9,10E-06
Cobre	kg	7,20E-06
Aço carbono	kg	5,40E-06
Papel (celulose)	kg	1,10E-06
Porcelana e pintura	kg	1,80E-06
Óleo mineral	kg	1,15E-05

FONTE: A autora (2022).

Como os dados fornecidos por Souza (2021) eram para geração de 1KWh esses valores foram atualizados para a unidade de 1MWh.

4.4 ANÁLISE DO INVENTÁRIO USINA DE BIOMASSA

Para o inventário da usina de biomassa, também foi usado como base o estudo realizado por Souza (2021). As TABELAS de 14 a 19 apresentam os valores utilizados no inventário de cana-de-açúcar.

TABELA 14 – Etapa industrial da produção de eletricidade de 1 KWh – unidade funcional

Entradas		
Cal	0,0055	kg
Ácido sulfúrico	1,967	g
Outros produtos químicos	0,0406	g
Equipamentos industriais (aço)	0,00038	kg
Óleo lubrificante	0,00007	kg
Zeólito	0,09011	g
Saídas		
Etanol (anidro)	0,221	kg
Açúcar	0,279	kg
Eletricidade	1	kwh
Vinhaça	3,0659	kg
Lama de torta de filtro	0,0565	kg
Cinzas	0,0489	kg
Emissões para o ar		
Dióxido de carbono biogênico da caldeira	1,730	kg
Dióxido de carbono biogênico da fermentação	0,0227	kg
Etanol de destilação	0,00044	kg

FONTE: Adaptado de Souza (2021).

TABELA 15 – Etapa da agricultura

Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade
Uso da terra		
Ocupação, arável, não irrigada	6,61E-05	ha/ano
Transformação, de pasto e prado, extensa	1,06E-05	ha/ano
Transformação, de arbustiva e esclerófila	1,32E-08	ha/ano
Transformação, de arável, não irrigado	2,51E-07	ha/ano
Transformação, para arável, não irrigado	1,32E-06	ha/ano
Entradas		
Energia, valor calorífico bruto, em biomassa	0,000327	MJ/ano
Ureia (como nitrogênio)	0,004496	kg/ha/ano
Superfosfato simples (como P ₂ O ₅)	0,001984	kg/ha/ano
Cloreto de potássio (como K ₂ O)	0,003306	kg/ha/ano
Calcário	0,026448	kg/ha/ano
Gesso	0,013224	kg/ha/ano
Vinhaça	0,006943	kg/ha/ano
Torta de filtro e cinzas (base seca)	0,076037	kg/ha/ano
<i>Diesel</i> , operações agrícolas	0,009091	kg/ha/ano
Colheitadeira, produção	0,000259	kg/ha/ano
Trator, produção	0,000163	kg/ha/ano
Maquinaria agrícola, geral, produção	0,000153	kg/ha/ano
Propagação de vinhaça	0,006943	kg/ha/ano
Glifosato	1,72E-05	kg/ha/ano
Diuron	6,61E-06	kg/ha/ano
Carbofurano	7,93E-06	kg/ha/ano
Inseticidas	2,64E-06	kg/ha/ano
Herbicidas	1,79E-05	kg/ha/ano
Outros pesticidas	6,61E-06	kg/ha/ano
Transporte, caminhão 7,5-16 ton	0,003967	tkm/ha/ano
Transporte, caminhão 16-32 ton	0,02691	tkm/ha/ano
Transporte, caminhão > 32 ton	0,137925	tkm/ha/ano
Saídas		
Rendimento da cana	0,005495	ton/ha/ano
Emissões para o ar		
Dióxido de carbono da combustão de <i>diesel</i>	0,029304	kg/ha/ano
Monóxido de carbono da combustão de <i>diesel</i>	0,000124	kg/ha/ano
Óxidos de nitrogênio da combustão de <i>diesel</i>	0,000345	kg/ha/ano
Partículas da combustão de <i>diesel</i>	1,59E-05	kg/ha/ano
Dióxido de enxofre da combustão de <i>diesel</i>	4,63E-05	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio da combustão de <i>diesel</i>	7,27E-07	kg/ha/ano
Metano da combustão de <i>diesel</i>	1,65E-06	kg/ha/ano
Hidrocarbonetos da combustão de <i>diesel</i>	3,31E-05	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de fertilizante de nitrogênio	9,46E-05	kg/ha/ano
Amônia de fertilizante de nitrogênio	0,00164	kg/ha/ano
Dióxido de carbono da cal	0,012609	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de vinhaça	4,83E-05	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio da torta de filtro	1,06E-05	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de lixo não queimado	9,46E-05	kg/ha/ano

(continua)

TABELA 15 – Etapa da agricultura

		(conclusão)
Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade
Emissões para o ar		
Monóxido de dinitrogênio de raízes de cana-de-açúcar	5,75E-05	kg/ha/ano
Dióxido de carbono, mudança no uso da terra	-0,00393	kg/ha/ano
Emissões para a água		
Nitrato para águas subterrâneas	0,000998	kg/ha/ano
Glifosato para águas superficiais	0,000258	g/ha/ano
Carbofurano para águas superficiais	0,000119	g/ha/ano
Diuron para águas superficiais	9,92E-05	g/ha/ano
Fipronil para águas superficiais	3,97E-05	g/ha/ano
Imazapic para águas superficiais	0,000139	g/ha/ano
Trinexapac-etil para águas superficiais	9,92E-05	g/ha/ano
Hexazinona para águas superficiais	2,64E-05	g/ha/ano
Tebuthiuron para águas superficiais	9,92E-05	g/ha/ano
Emissões para o solo		
Glifosato	1,65E-05	kg/ha/ano
Carbofurano	7,93E-06	kg/ha/ano
Diuron	6,61E-06	kg/ha/ano
Emissões para a água		
Fipronil	2,64E-06	kg/ha/ano
Imazapic	9,26E-06	kg/ha/ano
Trinexapac-etil	6,61E-06	kg/ha/ano
Hexazinona	1,85E-06	kg/ha/ano
Tebuthiuron	6,61E-06	kg/ha/ano

FONTE: Adaptado de Souza (2021).

TABELA 16 – Emissão dos veículos pesados para 25 km

Emissão	Quantidade	Unidade
CO2	23.375	g
NOx	192,3	g
CO	44	g
Particulados finos	4,6	g
Carbono orgânico	0,9	g
Nitrato	0	g
Silício	0	g
Carbono	1,4	g
Amônia	0	g
Sulfato	0	g
Alcanos	395	mg
Olefinas	432,5	mg
Aromático	352,5	mg
Formaldeído	557,5	mg
Acetaldeído	1.045	mg
Propanol	350	mg
Acetona	550	mg
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	45	mg

Emissão	Quantidade	Unidade
Ácidos aromáticos	50	mg
Ácidos alcalinos	10	mg
Carbono	1.400	mg

FONTE: Adaptado de Souza (2021).

TABELA 17 – Produção de 15 l de *diesel*

Emissão	Quantidade	Unidade
Petróleo	1,35E+01	kg
Gás natural	5,74E-01	kg
Água	9,60E-02	kg
Bauxita	4,15E-03	kg
Energia não especificada	3,35E+01	MJ
Uso do solo	2,12E+02	mm ²

Emissões para o ar

CO ₂	2,52E+00	kg
CO	3,60E-03	kg
CH ₄	4,94E-04	kg
NH ₃	4,47E-07	kg
Metais	2,64E-06	kg
N ₂ O	1,07E-06	kg
NO _x	3,98E-02	kg
SO _x	6,94E-04	kg
Metil mercaptano	1,53E-07	kg
H ₂ S	3,20E-05	kg
Composto orgânico volátil (não metano)	1,24E-02	kg
Material particulado	6,33E-05	kg
Óleo	3,49E-03	kg
Composto orgânico volátil	4,59E-05	kg
Fuligem	2,48E-05	kg
Material particulado em suspensão	2,67E-03	kg
SO ₂	1,62E-02	kg
Aldeído	8,96E-07	kg
C _x H _y alifáticos insaturados	6,68E-03	kg
H ₂	8,79E-05	kg
HCl	1,01E-04	kg

Emissões para a água

Demanda de oxigênio bioquímico	1,35E-07	kg
Demanda de oxigênio químico	2,99E-05	kg
Hidrocarbonetos	5,30E-06	kg
Íons de metal	5,19E-05	kg
Óleos e graxas	9,44E-05	kg
Sólidos dissolvidos totais	2,84E-04	kg
Sólidos suspensos totais	1,35E-07	kg
Na ⁺	2,13E-04	kg
Cl ⁻	3,20E-04	kg

(conclusão)

TABELA 17 – Produção de 15 l de *diesel*

Emissão	Quantidade	Unidade
Resíduos para o solo		
Resíduos oleosos	3,66E-03	kg
Resíduos minerais	1,15E-02	kg
Resíduos sólidos não inertes	3,49E-05	kg
Escória	1,02E-04	kg

FONTE: Adaptado de Souza (2021).

Como a unidade funcional adotada para o sistema hidrelétrico e solar foi de 1 MWh, os valores foram convertidos para apresentarem a mesma unidade funcional, conforme se observa nas tabelas a seguir.

TABELA 18 – Etapa industrial da produção de eletricidade de 1MWh – unidade funcional

Entradas		
Cal	0,0000055	kg
Ácido sulfúrico	0,001967	g
Outros produtos químicos	0,0000406	g
Equipamentos industriais (aço)	0,00000038	kg
Óleo lubrificante	0,00000007	kg
Zeólito	0,00009011	g
Saídas		
Etanol (anidro)	0,000221	kg
Açúcar	0,000279	kg
Eletricidade	0,0001	kwh
Vinhaça	0,00030659	kg
Lama de torta de filtro	0,0000565	kg
Cinzas	0,0000489	kg
Emissões para o ar		
Dióxido de carbono biogênico da caldeira	0,0001730	kg
Dióxido de carbono biogênico da fermentação	0,0000227	kg
Etanol de destilação	0,00000044	kg

FONTE: A autora (2022).

TABELA 19 – Etapa da agricultura

Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade
Uso da terra		
Ocupação, arável, não irrigada	6,61E-08	ha/ano
Transformação, de pasto e prado, extensa	1,06E-08	ha/ano
Transformação, de arbustiva e esclerófila	1,32E-011	ha/ano
Transformação, de arável, não irrigado	2,51E-10	ha/ano
Transformação, para arável, não irrigado	1,32E-09	ha/ano
Entradas		
Energia, valor calorífico bruto, em biomassa	0,000000327	MJ/ano
Ureia (como nitrogênio)	0,000004496	kg/ha/ano
Superfosfato simples (como P2O5)	0,000001984	kg/ha/ano
Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade

Entradas		
Cloreto de potássio (como K ₂ O)	0,000003306	kg/ha/ano
Calcário	0,000026448	kg/ha/ano
Gesso	0,000013224	kg/ha/ano
Vinhaça	0,000006943	kg/ha/ano
Torta de filtro e cinzas (base seca)	0,000076037	kg/ha/ano
<i>Diesel</i> , operações agrícolas	0,000009091	kg/ha/ano
Colheitadeira, produção	0,000000259	kg/ha/ano
Trator, produção	0,000000163	kg/ha/ano
Maquinaria agrícola, geral, produção	0,000000153	kg/ha/ano
Propagação de vinhaça	0,000006943	kg/ha/ano
Glifosato	1,72E-08	kg/ha/ano
Diuron	6,61E-09	kg/ha/ano
Carbofurano	7,93E-09	kg/ha/ano
Inseticidas	2,64E-09	kg/ha/ano
Herbicidas	1,79E-08	kg/ha/ano
Outros pesticidas	6,61E-09	kg/ha/ano
Transporte, caminhão 7,5-16 ton	0,000003967	tkm/ha/ano
Transporte, caminhão 16-32 ton	0,00002691	tkm/ha/ano
Transporte, caminhão > 32 ton	0,000137925	tkm/ha/ano
Saídas		
Rendimento da cana	0,000005495	ton/ha/ano
Emissões para o ar		
Dióxido de carbono da combustão de <i>diesel</i>	0,000029304	kg/ha/ano
Monóxido de carbono da combustão de <i>diesel</i>	0,000000124	kg/ha/ano
Óxidos de nitrogênio da combustão de <i>diesel</i>	0,000000345	kg/ha/ano
Partículas da combustão de <i>diesel</i>	1,59E-11	kg/ha/ano
Dióxido de enxofre da combustão de <i>diesel</i>	4,63E-11	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio da combustão de <i>diesel</i>	7,27E-13	kg/ha/ano
Metano da combustão de <i>diesel</i>	1,65E-12	kg/ha/ano
Hidrocarbonetos da combustão de <i>diesel</i>	3,31E-11	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de fertilizante de nitrogênio	9,46E-08	kg/ha/ano
Amônia de fertilizante de nitrogênio	0,00000164	kg/ha/ano
Dióxido de carbono da cal	0,000012609	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de vinhaça	4,83E-08	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio da torta de filtro	1,06E-08	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de lixo não queimado	9,46E-08	kg/ha/ano
Monóxido de dinitrogênio de raízes de cana-de-açúcar	5,75E-08	kg/ha/ano
Dióxido de carbono, mudança no uso da terra	-0,00000393	kg/ha/ano
Emissões para a água		
Nitrato para águas subterrâneas	0,000000998	kg/ha/ano
Glifosato para águas superficiais	0,000000258	g/ha/ano
Carbofurano para águas superficiais	0,000000119	g/ha/ano
Diuron para águas superficiais	9,92E-08	g/ha/ano
Fipronil para águas superficiais	3,97E-08	g/ha/ano

(conclusão)

TABELA 19 – Etapa da agricultura

Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade
Emissões para a água		
Imazapic para águas superficiais	0,000000139	g/ha/ano
Trinexapac-etil para águas superficiais	9,92E-08	g/ha/ano
Hexazinona para águas superficiais	2,64E-08	g/ha/ano
Tebuthiuron para águas superficiais	9,92E-08	g/ha/ano
Emissões para o solo		
Glifosato	1,65E-08	kg/ha/ano
Carbofurano	7,93E-09	kg/ha/ano
Diuron	6,61E-09	kg/ha/ano
Emissões para a água		
Fipronil	2,64E-09	kg/ha/ano
Imazapic	9,26E-09	kg/ha/ano
Trinexapac-etil	6,61E-09	kg/ha/ano
Hexazinona	1,85E-09	kg/ha/ano
Tebuthiuron	6,61E-09	kg/ha/ano

FONTE: A autora (2022).

TABELA 20 – Emissão dos veículos pesados para 25 km

Emissão	Quantidade	Unidade
CO ₂	23,375	g
NO _x	0,1923	g
CO	0,044	g
Particulados finos	0,00046	g
Carbono orgânico	0,0009	g
Nitrato	0	g
Silício	0	g
Carbono	0,0014	g
Amônia	0	g
Sulfato	0	g
Alcanos	0,395	mg
Olefinas	0,432	mg
Aromático	0,352	mg
Formaldeído	0,5575	mg
Acetaldeído	1,0450	mg
Propanol	0,350	mg
Acetona	0,550	mg
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,045	mg
Ácidos aromáticos	0,050	mg
Ácidos alcalinos	0,010	mg
Carbono	1,140	mg

FONTE: A autora (2022).

TABELA 21 – Produção de 15 l de *diesel*

Emissão	Quantidade	Unidade
Petróleo	1,35E-02	kg
Gás natural	5,74E-04	kg
Água	9,60E-05	kg
Bauxita	4,15E-06	kg
Energia não especificada	3,35E-02	MJ
Uso do solo	2,12E-01	mm2
Emissões para o ar		
CO2	2,52E-03	kg
CO	3,60E-06	kg
CH4	4,94E-07	kg
NH3	4,47E-10	kg
Metais	2,64E-09	kg
N2O	1,07E-09	kg
NOx	3,98E-05	kg
SOx	6,94E-07	kg
Metil mercaptano	1,53E-10	kg
H2S	3,20E-08	kg
Composto orgânico volátil (não metano)	1,24E-05	kg
Material particulado	6,33E-08	kg
Óleo	3,49E-06	kg
Composto orgânico volátil	4,59E-08	kg
Fuligem	2,48E-08	kg
Material particulado em suspensão	2,67E-06	kg
SO2	1,62E-05	kg
Aldeído	8,96E-10	kg
CxHy alifáticos insaturados	6,68E-06	kg
H2	8,79E-08	kg
HCl	1,01E-07	kg
Emissões para a água		
Demanda de oxigênio bioquímico	1,35E-10	kg
Demanda de oxigênio químico	2,99E-08	kg
Hidrocarbonetos	5,30E-09	kg
Íons de metal	5,19E-08	kg
Óleos e graxas	9,44E-08	kg
Sólidos dissolvidos totais	2,84E-07	kg
Sólidos suspensos totais	1,35E-10	kg
Na+	2,13E-07	kg
Cl-	3,20E-07	kg
Óleo		kg
H2		kg
Fenol		kg
Resíduos para o solo		
Resíduos oleosos	3,66E-06	kg
Resíduos minerais	1,15E-05	kg
Resíduos sólidos não inertes	3,49E-08	kg
Escória	1,02E-07	kg

FONTE: A autora (2022).

As informações fornecidas por Souza eram para uma geração de 1KWh, como a os inventários da usina hidrelétrica e solar já estavam para 1 MWh os valores foram convertidos para 1MWh para uma análise igualitária.

4.5 SÍNTESE DOS DADOS COLETADOS

O Quadro 2 apresenta um resumo das considerações por sistema para a Análise do Ciclo de Vida.

QUADRO 2 - Resumo Parâmetros para inventário

Parâmetros	Hidroelétrica	Solar	Eólica	Biomassa
Processos envolvidos	Fornecimento e insumos básicos para obras.	Beneficiamento do silício até a fabricação do módulo fotovoltaico, foram derivados dos inventários publicados por Frischknecht et al. (2015), desconsiderando o transporte desses inventários.	Upstream (construção e fabricação) e o ciclo do combustível (produção/extração	Upstream (construção e fabricação) e o ciclo do combustível (produção/extração
Abordagem estudada			Berço ao portão	Berço ao portão
Etapas Avaliadas	Construção e operação da usina. Não foi incluída a desativação da usina.	Construção e instalação da planta de tecnologia fotovoltaica monocristalina e policristalina, localizada na cidade de Jaíba-MG de 3MW,	O consumo de energia, os processos upstream (extração de recursos e matérias-primas, processamento e transporte) e operação da planta foram analisados.	O consumo de energia, os processos upstream (extração de recursos e matérias-primas, processamento e transporte) e operação da planta foram analisados
Fronteiras em relação ao sistema natural	Usina de Itaipu - água captada do Rio Paraná e incorporada a usina.	Processos de manufatura do silício até a produção do painel foram realizados na cidade de São Paulo-SP, e os painéis finalizados foram trazidos de caminhão até a cidade de Poços de Caldas-MG local onde a planta foi	A produção de infraestrutura e transporte) a autora considerou apenas quando representou mais de 5% do total dos impactos. Também não foram considerados a transmissão, o uso de eletricidade e o descomissionamento da planta.	A produção de infraestrutura e transporte) a autora considerou apenas quando representou mais de 5% do total dos impactos. Também não foram considerados a transmissão, o uso de eletricidade e o descomissionamento da planta.

Unidade funcional	1 MWh de eletricidade, obtido na saída do gerador de usina	construída As entradas e saídas foram adaptadas para uma planta de 1MW, por meio de uma estimativa de cálculo por escalonamento de acordo com as condições brasileiras (PETERS e TIMMERHAUS, 1991).	Transformado inventário para 1 MW	Transformado inventário para 1 MW
Fronteira temporal	100 anos considerando a partir de 1974 o início das obras	- A vida útil da planta foi adotada como sendo 25 anos, e os resíduos e materiais resultantes do fim da vida útil das plantas vão ser levados para a cidade de São Paulo para destinação final, onde passarão por processos de reciclagem e disposição final, de acordo com as normas brasileiras vigentes	-	-

FONTE: A Autora (2023)

No inventário da usina hidrelétrica a fronteira temporal foi de 100 anos considerando a partir de 1974 o início das obras. No caso da usina solar a vida útil da planta foi adotada como sendo 25 anos, e os resíduos e materiais resultantes do fim da vida útil das plantas vão ser levados para a cidade de São Paulo para destinação final, onde passarão por processos de reciclagem e disposição final, de acordo com as normas brasileiras vigentes. Para as usinas eólicas e biomassa não foi informado a fronteira temporal.

5.1 USINA HIDRELÉTRICA

Com base nos dados do inventário de Ribeiro (2003), o programa processa os elementos de entrada e saída foram inseridos no programa, conforme apresentado na TABELA 22.

TABELA 22– Dados de entrada/saída inventario de usina hidrelétrica de ribeiro (2003)

Dados de entrada/saída hidrelétrica							
Inputs			Outputs				
Flow	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit	Result
Petroleum naphtha, heavy alkylate	Emission to air	kg	0,119	Aldehydes, unspecified	Emission to air	kg	0,000034
Copper	Emission to air	kg	0,00201	Benzene	Emission to air	kg	0,0000164
Sodium chloride, rock salt	Emission to water	kg	0,000019	Benzophenone	Emission to air	kg	2,42E-09
Calcite, in ground	Resource	kg	0,486	Butadiene	Emission to air	kg	1,4E-07
Coal, hard, unspecified	Resource	kg	54	Calcium	Emission to air	kg	0,00121
Dolomite	Resource	kg	0,0097	Carbon dioxide	Emission to air	kg	1,56
Fluorine, in ground	Resource	kg	0,00066	Carbon monoxide	Emission to air	kg	0,112
Gas, natural	Resource	m3	0,00088	Fluoranthene	Emission to air	kg	2,42E-08
Gypsum	Resource	kg	0,00833	Lead	Emission to air	kg	1,65E-11
Iron, in ground	Resource	kg	0,1666	Methane	Emission to air	kg	0,132
Sand, unspecified	Resource	kg	0,412	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air	kg	0,00011
Water	Resource	kg	8,9	VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	Emission to air	kg	0,000264
Air	Resource	kg	0,0000124	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	1,56
Basalt	Resource	kg	0,00359	Carbon monoxide, fossil	Emission to air	kg	0,112
Bauxite	Resource	kg	4,36E-06	Ammonia	Emission to air	kg	2,16E-07
Calcite	Resource	kg	0,486	C.I. Oxidation base 4	Emission to air	kg	0,00297
Clay	Resource	kg	0,0834	Carbon dioxide	Emission to air	kg	1,56
Copper	Resource	kg	0,00201	Dust, unspecified	Emission to air	kg	0,0107
Dolomite	Resource	kg	0,000969	Ethane	Emission to air	kg	0,000037
Energy, from coal	Resource	MWh	2,639E-07	Fluoride	Emission to air	kg	1,72E-06
Energy, from gas, natural	Resource	MWh	0,00007	Fluorine	Emission to air	kg	7,65E-08
Energy, from hydro power	Resource	MWh	0,000012	Heat, waste	Emission to air	MWh	3,444E-06
Energy, from oil	Resource	MWh	1,689E-05	Heavy metals, unspecified	Emission to air	kg	9,5E-08
Energy, from uranium	Resource	MWh	2,639E-07	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Emission to air	kg	0,0000345

(continua)

Dados de entrada/saída hidrelétrica						
Inputs Flow	Inputs			Outputs		
	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit Result
Energy, primary, from water power	Resource	MWh	0,0004056	Hydrocarbons, aromatic	Emission to air	kg 3,26E-07
Fluorine	Resource	kg	0,000663	Hydrocarbons, unspecified	Emission to air	kg 0,000386
Fuller's earth	Resource	kg	0,00265	Hydrogen	Emission to air	kg 0,000183
Gas, natural	Resource	m3	0,000884	Hydrogen sulfide	Emission to air	kg 0,000011
Iron	Resource	kg	0,166	Iron	Emission to air	kg 0,000818
Manganese	Resource	kg	0,00127	Mercury	Emission to air	kg 8,27E-15
Sand, quartz	Resource	kg	0,00254	Methyl mercaptan	Emission to air	kg 1,35E-09
Wood, unspecified, standing/kg	Resource	kg	0,144	Nitrogen dioxide	Emission to air	kg 0,0000149
Copper waste	Waste	kg	0,000293	Nitrous acid	Emission to air	kg 5,89E-07
Steel waste	Waste	kg	0,05965	p-Hydrazinobenzoic acid hydrochloride	Emission to air	kg 4,97E-08
				Particulates, unspecified	Emission to air	kg 0,0137103
				Petroleum distillate	Emission to air	kg 0,0000179
				Soot	Emission to air	kg 0,0000584
				Sulfur dioxide	Emission to air	kg 0,00349
				Sulfur oxides	Emission to air	kg 0,00027
				Toluene	Emission to air	kg 1,05E-07
				Water, PM	Emission to air	kg 0,000401
				Xylene	Emission to air	kg 1,13E-07
				COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg 2,46E-07
				Dissolved solids	Emission to water	kg 0,0000063
				Acetaldehyde	Emission to water	kg 0,0000809
				Acetic acid	Emission to water	kg 0,0058
				Acetone	Emission to water	kg 0,00015
				Ammonia	Emission to water	kg 4,812E-06
				C.I. Eriochrome black T	Emission to water	kg 1,47E-09
				Carbon monoxide	Emission to water	kg 3,75E-06
				Copper	Emission to water	kg 1,21E-09

(Continuação)

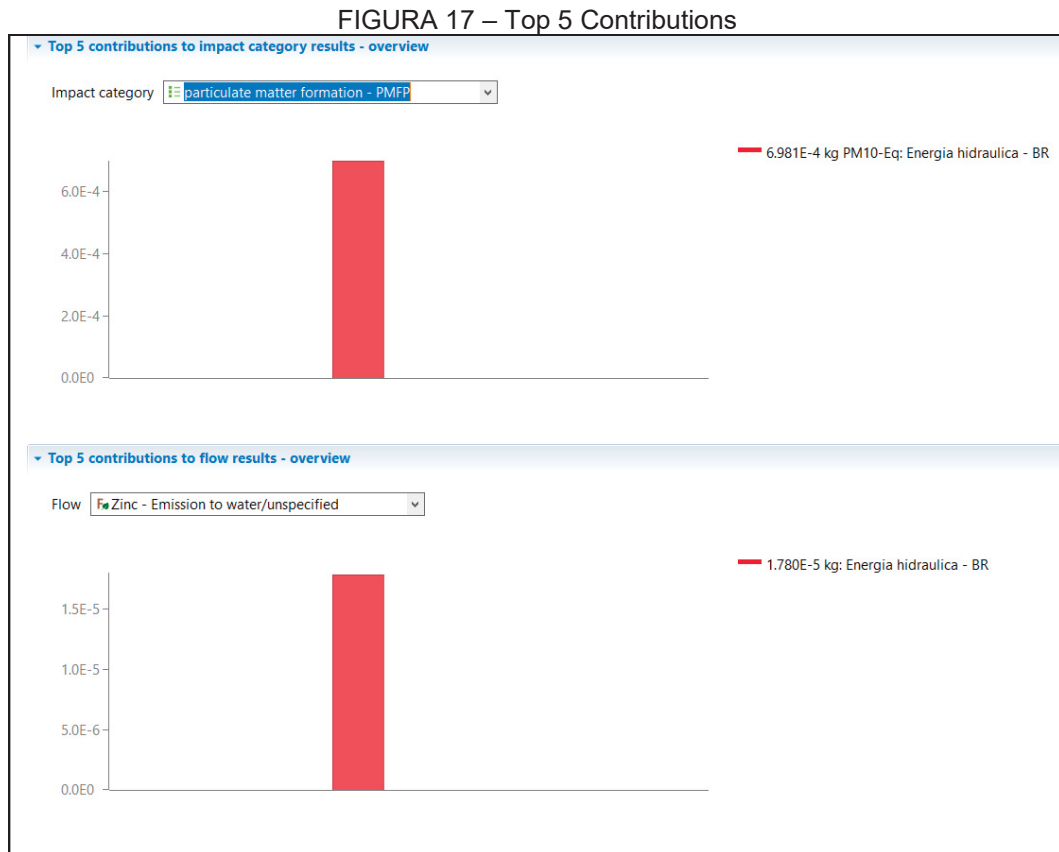
Datos de entrada/salida hidrelétrica							
Inputs		Outputs					
Flow	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit	Result
				Cyanide	Emission to water	kg	3,18E-07
				Dissolved solids	Emission to water	kg	9,5E-07
				Fluoride	Emission to water	kg	2,23E-06
				Heat, waste	Emission to water	MWh	1,764E-05
				Hexane	Emission to water	kg	0,0000021
				Hydrocarbons, aromatic	Emission to water	kg	4,03E-10
				Hydrocarbons, unspecified	Emission to water	kg	5,36E-08
				Hydrogen	Emission to water	kg	3,004E-06
				Inorganic dissolved matter (unspecified)	Emission to water	kg	0,0063619
				Iron	Emission to water	kg	5,38E-06
				Lead	Emission to water	kg	4,03E-09
				Manganese	Emission to water	kg	1,15E-07
				Mercury	Emission to water	kg	2,42E-10
				Metallic ions, unspecified	Emission to water	kg	0,0000005
				Methanol	Emission to water	kg	0,0021
				Methyl acetate	Emission to water	kg	0,000185
				Nitrate	Emission to water	kg	4,75E-06
				Nitrogen, total	Emission to water	kg	4,03E-08
				Oils, unspecified	Emission to water	kg	0,0000134
				Petroleum oil	Emission to water	kg	2,22E-06
				Phenol	Emission to water	kg	0,7000001
				Sodium	Emission to water	kg	3,76E-06
				Sulfite	Emission to water	kg	3,56E-07
				Suspended solids, unspecified	Emission to water	kg	2,585E-05
				Tar	Emission to water	kg	0,0139
				Zinc	Emission to water	kg	0,0000178
				Soil	Resource	kg	0,152

(continuação)

Dados de entrada/saída hidrelétrica					
Inputs Flow	Outputs				
	Category	Unit	Result	Flow	Category
				Mineral waste	Waste
				Production waste, not inert	Waste
				Slags	Waste
				Sludge	Waste
				Waste, inorganic	Waste
				Waste, solid	Waste

FONTE: A autora (2023).

O programa também permitiu analisar o que ele chama de “*top 5 contributions*”, que são as principais contribuições, apresentado na FIGURA 17:



FONTE: A autora (2023).

As informações dos gráficos acima é para ilustrar os impactos em forma gráfica, quais as maiores contribuições, no programa é possível visualizar todos os impactos, o que ajuda a identificar os maiores problemas e tentar mitigá-los.

Os resultados encontrados para ACV da usina hidrelétrica com base nos dados coletados por Ribeiro (2003) são apresentados na TABELA 23 e no GRÁFICO 1 a seguir.

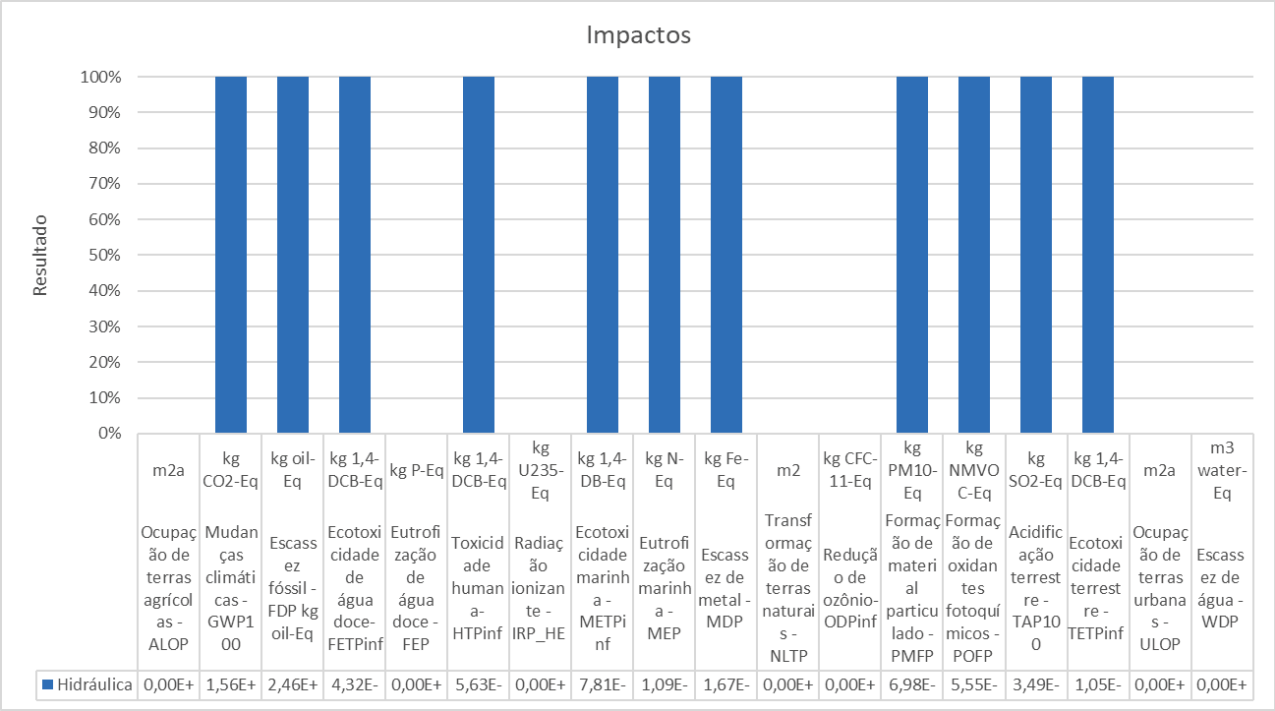
TABELA 23 – Resultados da Análise do Ciclo de Vida da usina hidrelétrica - Dados de Ribeiro (2003)

Categoria de impacto	Referência	Hidrelétrica
Ocupação de terras agrícolas – ALOP	m2a	0,00E+00
Mudanças climáticas – GWP100	kg CO2-Eq	1,56E+00
Escassez fóssil – FDP kg oil-Eq	kg oil-Eq	2,46E+01
Ecotoxicidade de água doce – FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	4,32E-02
Eutrofização de água doce – FEP	kg P-Eq	0,00E+00
Toxicidade humana – HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	5,63E-02
Radiação ionizante – IRP_HE	kg U235-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade marinha – METPinf	kg 1,4-DB-Eq	7,81E-01
Eutrofização marinha – MEP	kg N-Eq	1,09E-06
Escassez de metal – MDP	kg Fe-Eq	1,67E-01
Transformação de terras naturais – NLTP	m2	0,00E+00
Redução de ozônio – ODP inf	kg CFC-11-Eq	0,00E+00
Formação de material particulado – PMFP	kg PM10-Eq	6,98E-04
Formação de oxidantes fotoquímicos – POFP	kg NMVOC-Eq	5,55E-03
Acidificação terrestre – TAP100	kg SO2-Eq	3,49E-03
Ecotoxicidade terrestre – TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,05E-02
Ocupação de terras urbanas – ULOP	m2a	0,00E+00
Escassez de água – WDP	m3 water-Eq	0,00E+00

FONTE: A autora (2022).

A análise revela que o principal impacto considerado está relacionado à escassez de recursos fósseis. Esse impacto refere-se à extração, em kg de combustíveis fósseis da natureza, com base nas reservas existentes e na provável insuficiência dessas matérias-primas para as gerações futuras. Já no trabalho de Fisher como uma comparação dos impactos das usinas solares e fotovoltaicas um dos impactos mais pontuados foi o de ecotoxicidade de água doce. Mas não foi apresentado o inventário utilizado no estudo.

GRÁFICO 1 – Resultados: usina hidrelétrica



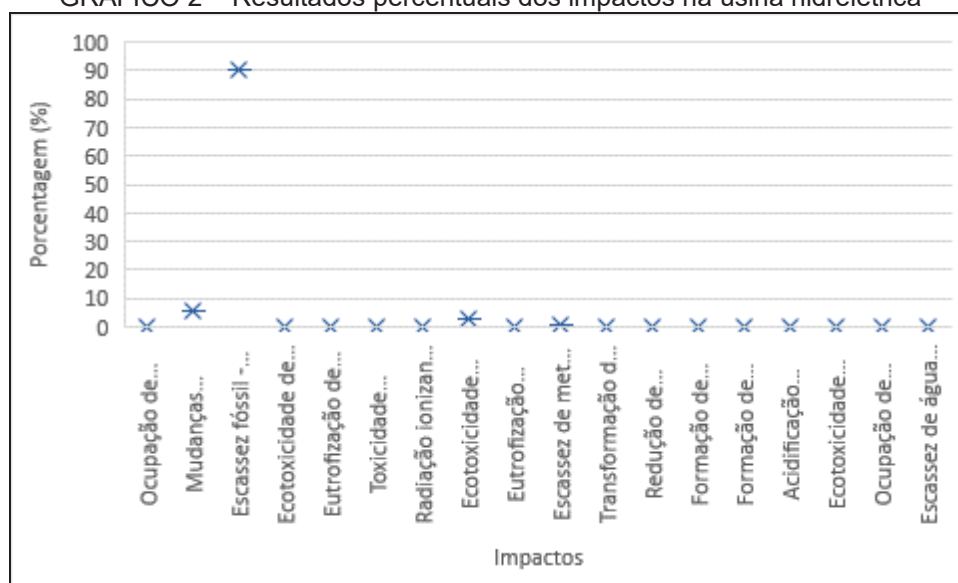
Fonte: A autora (2023).

Outra categoria de impactos que apresenta resultados foi a toxicidade humana, a qual é caracterizada como sendo a influência da destinação, da exposição e dos efeitos tóxicos de diversas substâncias químicas à saúde do ser humano.

A ecotoxicidade da água doce também foi identificada ao avaliar o efeito de substâncias químicas tóxicas sobre organismos representativos do ecossistema aquático. A eutrofização marinha refere-se ao excesso de minerais e nutrientes no ambiente marinho.

Acrescente-se ainda a formação de material particulado se refere ao conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e materiais sólidos e líquidos que porventura se mantenham suspensos na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. A formação de oxidantes fotoquímicos pode ser proveniente da queima de combustíveis, por exemplo, e pelo uso de produtos para pinturas e solventes; pode-se resumir como sendo uma mistura complexa de poluentes formados quimicamente na atmosfera.

GRÁFICO 2 – Resultados percentuais dos impactos na usina hidrelétrica



FONTE: A autora (2023).

A acidificação terrestre corresponde ao aumento do conteúdo ácido em ecossistemas terrestres e aquáticos. O excesso dessas acidez no ecossistema pode ocasionar a eliminação de bactérias, algas e outros microrganismos necessários para manter o equilíbrio ecológico. Com relação a mudança climática cuja unidade é kg CO₂-Eq percebeu-se também uma contribuição, acaba tendo relação com os materiais usados na construção, visto que tem na usina de Itaipu foi usada uma quantidade característica de concreto.

O último impacto registrado foi a ecotoxicidade terrestre, que verifica a contaminação do solo com produtos ou resíduos. O GRÁFICO 2 a seguir apresenta, em termos percentuais, cada impacto observado.

Em níveis percentuais, a escassez de fóssil correspondeu a quase 100% dos impactos gerados.

5.2 USINA FOTOVOLTAICA

Como explicitado os dados do inventário foram extraídos do trabalho de Leandro, o qual utilizou os dados de inventários referentes ao processo de beneficiamento do silício até a fabricação do módulo fotovoltaico da publicação de Frischknecht et al. (2015), sendo que o transporte adotado nestes inventários foi desconsiderado. E fez uma adaptação considerando que os painéis finalizados

foram trazidos de caminhão até a cidade de Poços de Caldas-MG onde a planta foi construída.

As informações do inventário foram inseridas no programa, no caso da usina fotovoltaica em etapas como inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico, inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício eletrônico, inventário da fase de extração e fabricação de 1kg de silício eletrônico, inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício solar. A TABELA 24 apresenta os dados totais entrados no programa.

TABELA 24– Dados de entrada/saída Fotovoltaica

Dados de entrada e saída Fotovoltaica						
Inputs Flow	Inputs			Outputs		
	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit Result
Water, embodied in product	Economic	kg	82,003	Antimony	Emission to air	kg 7,85E-09
Acetic acid	Emission to air	kg	0,039	Arsenic	Emission to air	kg 9,42E-09
Acrylic acid	Emission to air	kg	0,002925	Boron	Emission to air	kg 2,79E-07
Copper	Emission to air	kg	0,00744	C.I. Eriochrome black T	Emission to air	kg 7,85E-09
Dipropylene glycol	Emission to air	kg	0,3	Cadmium	Emission to air	kg 3,14E-10
Hydrochlorothiazide	Emission to air	kg	3,03	Calcium	Emission to air	kg 7,75E-07
Hydrogen	Emission to air	kg	0,1398	Carbon dioxide	Emission to air	kg 1,61
Magnesium	Emission to air	kg	1,13	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg 3,58
Petroleum naphtha, heavy alkylate	Emission to air	kg	0,5	Carbon monoxide	Emission to air	kg 0,00062
Silicon	Emission to air	kg	78,85249	Carbon monoxide, fossil	Emission to air	kg 0,00138
Silicon tetrachloride	Emission to air	kg	0	Chlorine	Emission to air	kg 7,85E-08
Sodium hydroxide	Emission to air	kg	0,811	Cyanide	Emission to air	kg 6,87E-06
Tetrafluoroethylene (TFE)	Emission to air	kg	0,000639	Fluorine	Emission to air	kg 3,88E-08
Triethylene glycol	Emission to air	kg	0,0218	Heat, waste	Emission to air	MWh 0,1776764
Oxygen	Emission to air	kg	0,02	Iron	Emission to air	kg 3,88E-06
Acid gases, unspecified	Emission to air	kg	0,0027	Lead	Emission to air	kg 3,44E-07
Boron carbide	Emission to air	kg	0,62	Mercury	Emission to air	kg 7,85E-09
Energy, primary, unused, from wind power	Emission to air	MWh	0	Potassium	Emission to air	kg -0,509938
Natural gas leakage	Emission to air	kg	10402	Sodium	Emission to air	kg 7,75E-07
Sodium hydroxide	Emission to air	kg	0,15	Aluminum compounds, unspecified	Emission to air	kg 1,55E-06
Wood, dust	Emission to air	kg	0,00325	BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water	kg 0,029705
Metamorphous rock, graphite containing	Resource	kg	0,1	COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg 0,00802
Coal, 18 MJ per kg	Resource	kg	23,1	AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	Emission to water	kg 0,0000126
Coal, brown	Resource	kg	0,17	BOD5, Biological Oxygen Demand	Emission to water	kg 0,000205
Energy, from coal	Resource	MWh	0,011	Chloride	Emission to water	kg 0,072

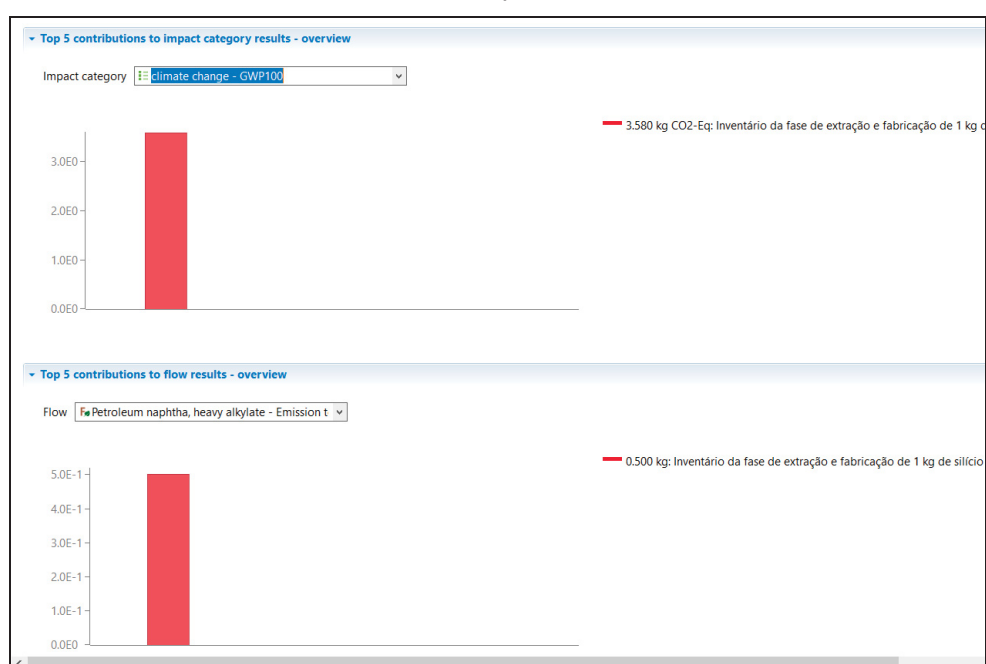
Dados de entrada e saída Fotovoltaica						
Inputs Flow	Inputs		Outputs			
	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit Result
Magnesium, in ground	Resource	kg	1,05	COD, Chemical Oxygen Demand	Emission to water	kg 0,00293
Sand, unspecified	Resource	kg	2,7	Copper	Emission to water	kg 1,02E-07
Silicon	Resource	kg	0	Copper, ion	Emission to water	kg 1,02E-07
Wood, unspecified, standing/kg	Resource	kg	0	Iron, ion	Emission to water	kg 7,57E-06
Water	Resource	kg	81,4	Nitrogen	Emission to water	kg 0,000416
Energy, environmental, water	Resource	MWh	0,1632	Phosphate	Emission to water	kg 0,0000056
Energy, primary, from wind power	Resource	MWh	0	Silicate particles	Emission to water	kg 0,00775
Energy, waste heat, water	Resource	MWh	0,0483333	Sodium, ion	Emission to water	kg 0,0676
Graphite	Resource	kg	0,0071	TOC, Total Organic Carbon	Emission to water	kg 0,00091
Oxygen	Resource	kg	0	Zinc, ion	Emission to water	kg 3,92E-06
Glass waste	Waste	kg	0,025395	Silicon	Resource	kg 1,07E-11
Steel waste	Waste	kg	0,805	Plastic waste	Waste	kg 0,00132
Waste to recycling	Waste	kg	3,36	Secondary Water	Waste	kg 0,000004
Polyethylene waste	Waste	kg	0,000679			
Steel waste	Waste	kg	0,797			

FONTE: A autora (2023).

Os dados apresentados na TABELA 23 representam as entradas e saídas utilizadas, os valores de referência foram do inventário de Leandro (2019). As unidades foram as mesmas, dados omissos caso não existissem no banco foram apresentados no apêndice.

A FIGURA 18 exemplifica a saída das “top 5 contributions” resultantes, que são valores representativos em contribuição.

FIGURA 18 – Top 5 contributions



FONTE: A autora (2023).

Como apresentado no item 5.1 as informações dos gráficos acima é para ilustrar os impactos em forma gráfica, quais as maiores contribuições, no programa é possível visualizar todos os impactos, o que ajuda a identificar os maiores problemas e tentar mitigá-los.

Os resultados encontrados são apresentados na TABELA 25 e no GRÁFICO 3 a seguir.

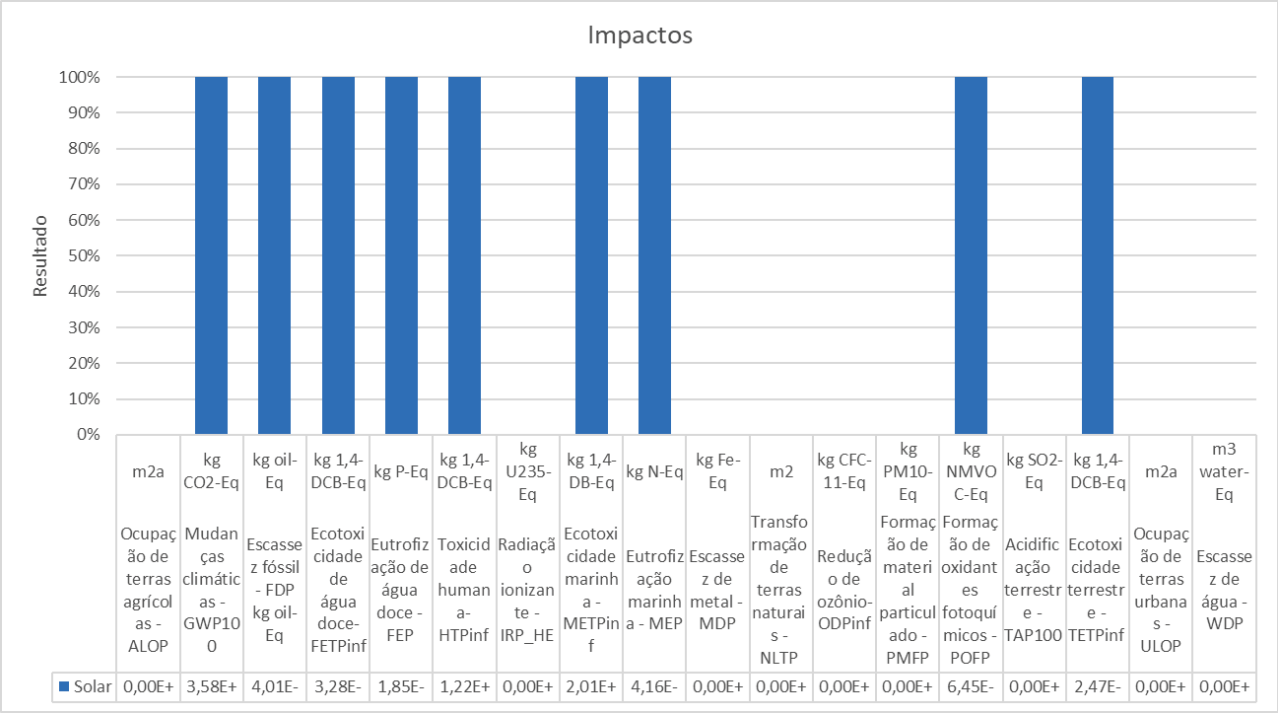
TABELA 25 – Resultados: usina fotovoltaica

Categoria de impacto	Unidade	Solar
Ocupação de terras agrícolas – ALOP	m ² a	0,00E+00
Mudanças climáticas – GWP100	kg CO ₂ -Eq	3,58E+00
Escassez fóssil – FDP kg oil-Eq	kg oil-Eq	4,01E-02
Ecotoxicidade de água doce – FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	3,28E-02
Eutrofização de água doce – FEP	kg P-Eq	1,85E-06
Toxicidade humana – HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,22E+00
Radiação ionizante – IRP_HE	kg U235-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade marinha – METPinf	kg 1,4-DB-Eq	2,01E+00
Eutrofização marinha – MEP	kg N-Eq	4,16E-04
Escassez de metal – MDP	kg Fe-Eq	0,00E+00
Transformação de terras naturais – NLTP	m ²	0,00E+00
Redução de ozônio – ODPinf	kg CFC-11-Eq	0,00E+00
Formação de material particulado – PMFP	kg PM10-Eq	0,00E+00
Formação de oxidantes fotoquímicos – POFP	kg NMVOC-Eq	6,45E-03
Acidificação terrestre – TAP100	kg SO ₂ -Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade terrestre – TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	2,47E-01
Ocupação de terras urbanas – ULOP	m ² a	0,00E+00
Escassez de água – WDP	m ³ water-Eq	0,00E+00

FONTE: A autora (2022).

Pela análise, percebe-se que o maior impacto considerado se refere à mudança climática. Ela caracteriza as transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima, sendo que essas mudanças podem ocorrer de forma natural ou por variações no ciclo solar. Fischer (2021) em seu estudo chegou em um resultado também de impacto para as condições climáticas, sendo que para as alterações climáticas, um painel solar produz quase 18 gramas de CO₂ equivalente, em comparação com os 3 gramas de uma turbina eólica.

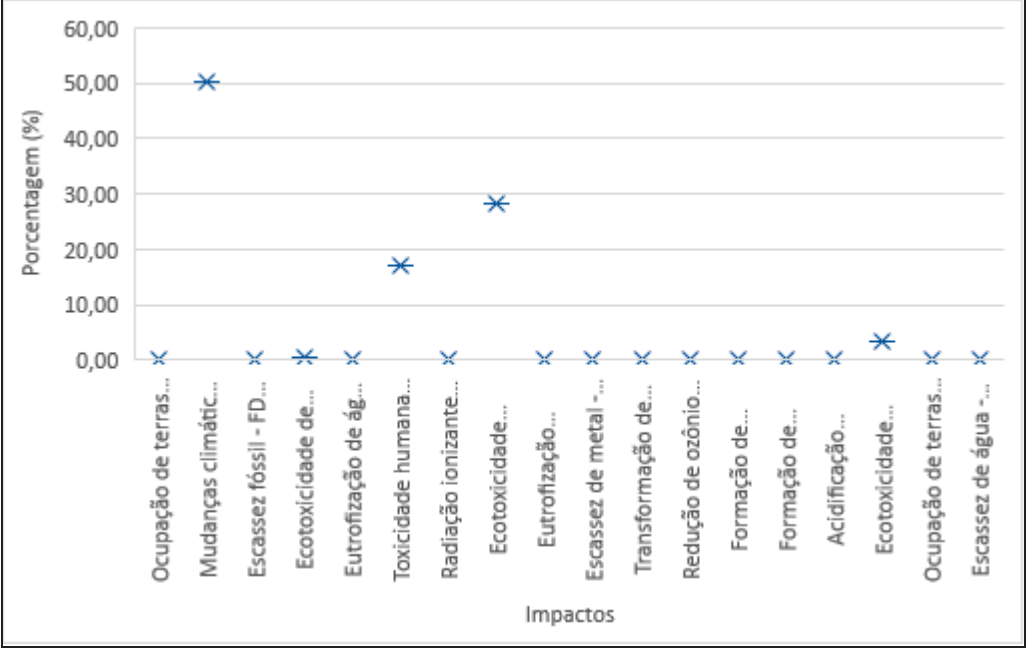
GRÁFICO 3 – Resultados: usina solar



FONTE: A autora (2023).

Os demais impactos obtidos se referem à ecotoxicidade de água doce, marinha e terrestre; à toxicidade humana; à acidificação terrestre; e à formação de oxidantes fotoquímicos. Esses elementos estão representados no GRÁFICO 4.

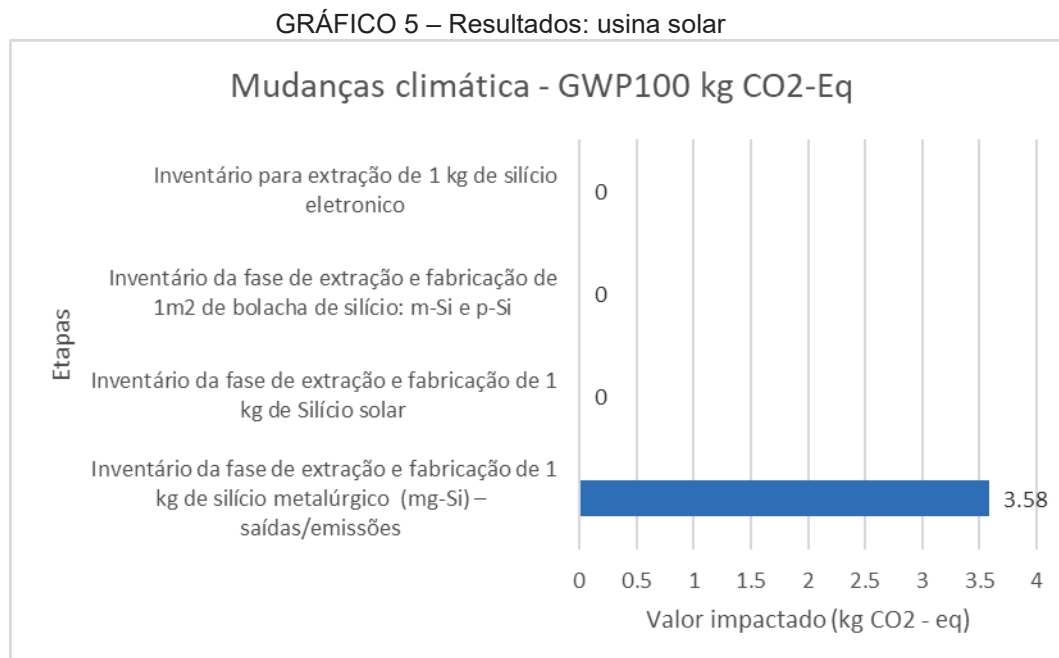
GRÁFICO 4 – Resultados percentuais dos impactos na usina solar



FONTE: A autora (2023).

Como analisado, em termos percentuais, as mudanças climáticas totalizam quase 50% dos impactos analisados.

Como no inventário foi usado mais de uma categoria de entrada, o GRÁFICO 5 apresenta, por etapa os valores calculados para o item de mudança climática.



Um fator que chamou a atenção que por não ter pontuado foi a ocupação de terras, visto que para a construção desses parques são necessárias áreas consideráveis que podem mudar o meio ambiente terrestre. Sem considerar que essas mudanças podem impactar na fauna e flora da região.

5.3 USINA EÓLICA

No caso do estudo da usina eólica, o inventário utilizado foi o de Souza (2021) e após a inserção das informações gerais os dados do inventário foram inseridos no programa, como é apresentado na TABELA 26.

TABELA 26 – Dados de entrada/Saída Usina Eólica

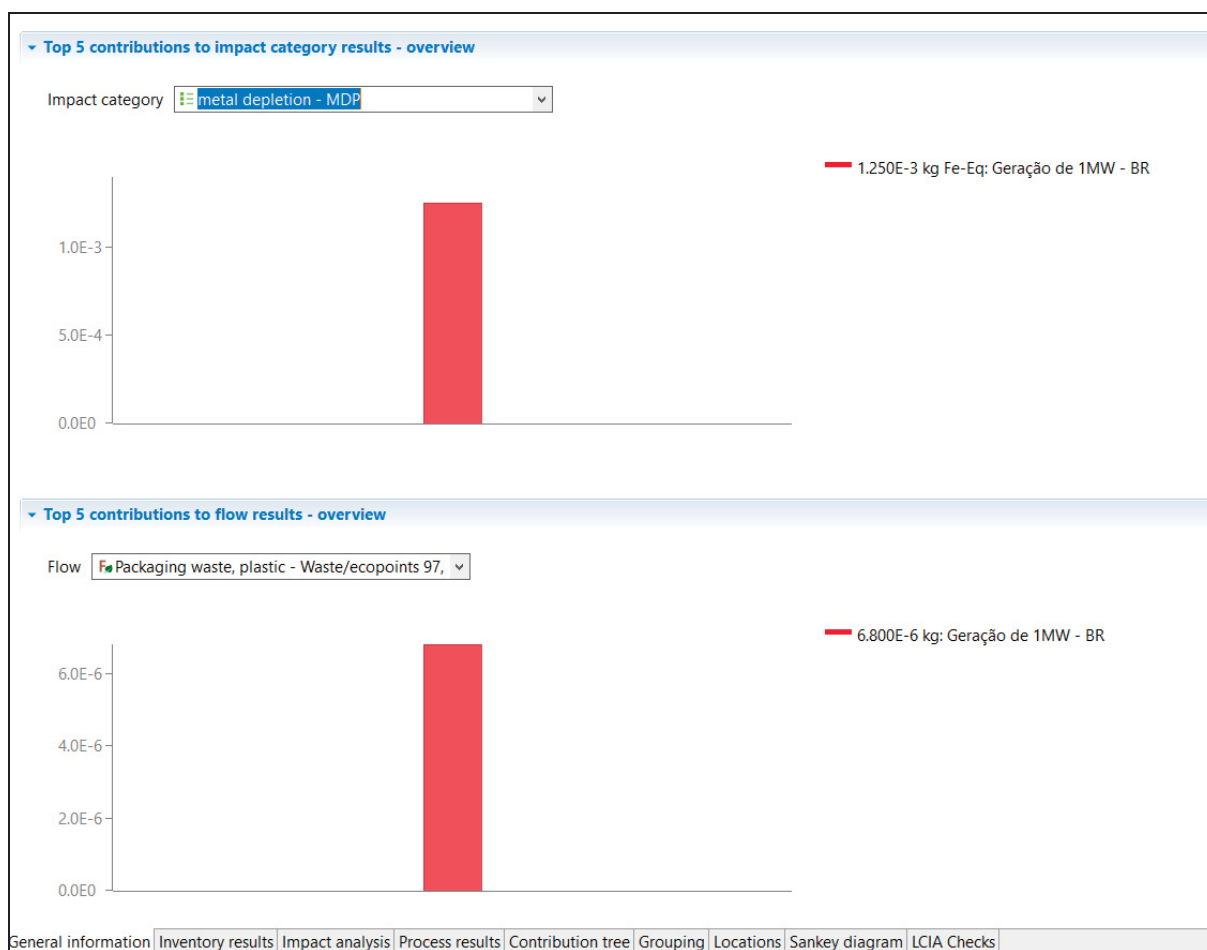
Inputs Flow	Dados de entrada e saída eólica				
	Category	Unit	Result	Flow	Outputs Category Unit Result
Aluminium	Emission to air	kg	6,61E-05	Transformation, from dump site, inert material landfill	Resource m2 1,78E-05
Cellulose, nitrate	Emission to air	kg	1,1E-06	Waste, final, inert	Waste kg 1,78E-05
Copper	Emission to air	kg	3,58E-05		
Copper compounds	Emission to air	kg	3,3E-06		
Iron	Emission to air	kg	0,000846		
Iron	Emission to air	kg	0,00125		
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	0,00973		
Clay, bentonite	Emission to air	kg	9,14E-06		
Iron	Emission to air	kg	9,14E-06		
Copper compounds	Emission to air	kg	4,4E-06		
Mineral oil	Emission to air	kg	1,15E-05		
Mineral spirits composite	Emission to air	kg	1		
Particulates, fine mineral fibers	Emission to air	kg	0,00694		
Oils, unspecified	Emission to soil	kg	1,78E-05		
Clay, bentonite	Emission to water	kg	1		
Aggregate, natural	Resource	kg	0,008437		
Clay, unspecified	Resource	kg	1,11E-05		
Gravel	Resource	kg	0,00843		
Iron, in ground	Resource	kg	0,00125		
Limestone, in ground	Resource	kg	0,001301		
Metal ore, precious, unspecified, ROM	Resource	kg	0,000143		
Natural aggregate	Resource	kg	1		
Sand, unspecified	Resource	kg	9,14E-06		
Aluminium	Resource	kg	8,02E-05		
Copper	Resource	kg	2,17E-05		

Dados de entrada e saída eólica			
Iron	Resource	kg	0,000353
Oil, crude	Resource	kg	3,3E-06
Glass waste	Waste	kg	1,98E-05
Packaging waste, plastic	Waste	kg	6,8E-06
Paint waste	Waste	kg	1,29E-05
Plastic waste	Waste	kg	0,000055
Packaging waste, steel	Waste	kg	4,61E-05
Paint waste	Waste	kg	0,000127

FONTE: A autora (2023).

A FIGURA 19 apresenta a saída dos “*Top 5 Contributions*”.

FIGURA 19 – Top 5 Contributions Usina Eólica



FONTE: A autora (2023).

Os resultados encontrados são apresentados na TABELA 27 e no GRÁFICO 6 a seguir.

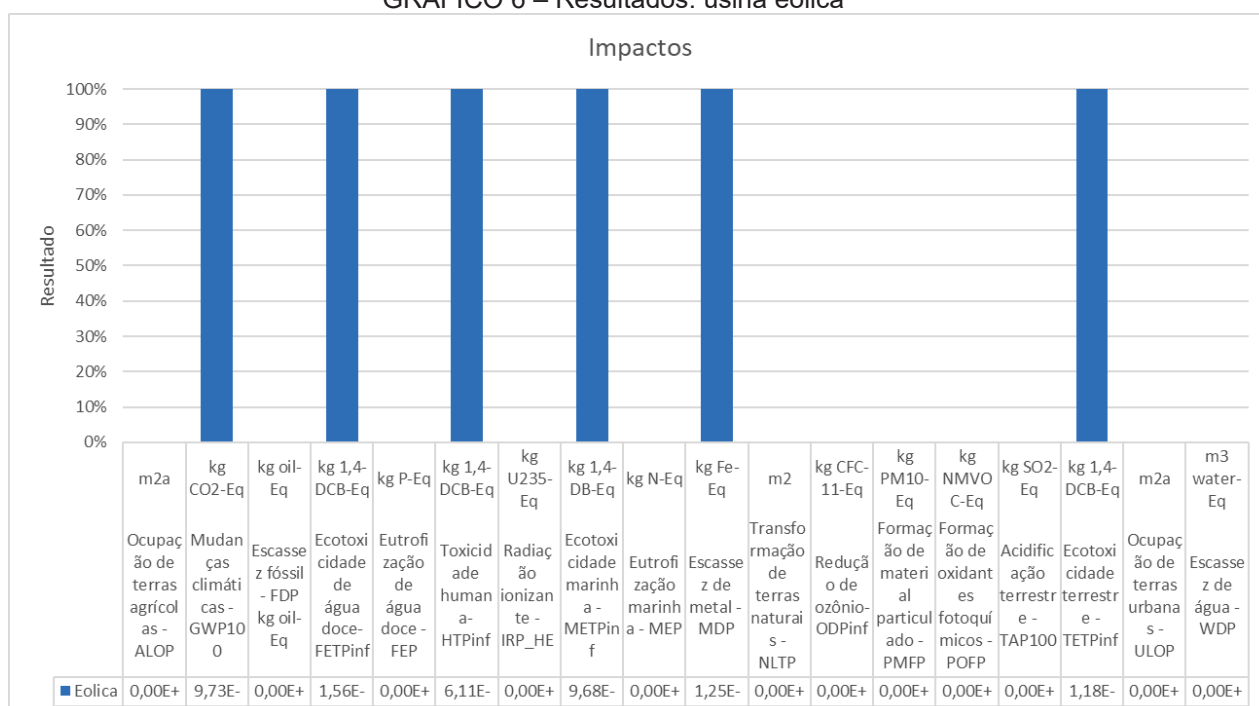
TABELA 27 – Resultados: usina eólica

Categoria de impacto	Unidade	Eólica
Ocupação de terras agrícolas – ALOP	m2a	0,00E+00
Mudanças climáticas – GWP100	kg CO2-Eq	9,73E-03
Escassez fóssil – FDP kg oil-Eq	kg oil-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade de água doce – FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,56E-04
Eutrofização de água doce – FEP	kg P-Eq	0,00E+00
Toxicidade humana – HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	6,11E-04
Radiação ionizante – IRP_HE	kg U235-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade marinha – METPinf	kg 1,4-DB-Eq	9,68E-03
Eutrofização marinha – MEP	kg N-Eq	0,00E+00
Escassez de metal – MDP	kg Fe-Eq	1,25E-03

Categoria de impacto	Unidade	Eólica
Transformação de terras naturais – NLTP	m2	0,00E+00
Redução de ozônio – ODPinf	kg CFC-11-Eq	0,00E+00
Formação de material particulado – PMFP	kg PM10-Eq	0,00E+00
Formação de oxidantes fotoquímicos – POFP	kg NMVOC-Eq	0,00E+00
Acidificação terrestre – TAP100	kg SO2-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade terrestre – TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,18E-03
Ocupação de terras urbanas – ULOP	m2a	0,00E+00
Escassez de água – WDP	m3 water-Eq	0,00E+00

FONTE: A autora (2022).

GRÁFICO 6 – Resultados: usina eólica

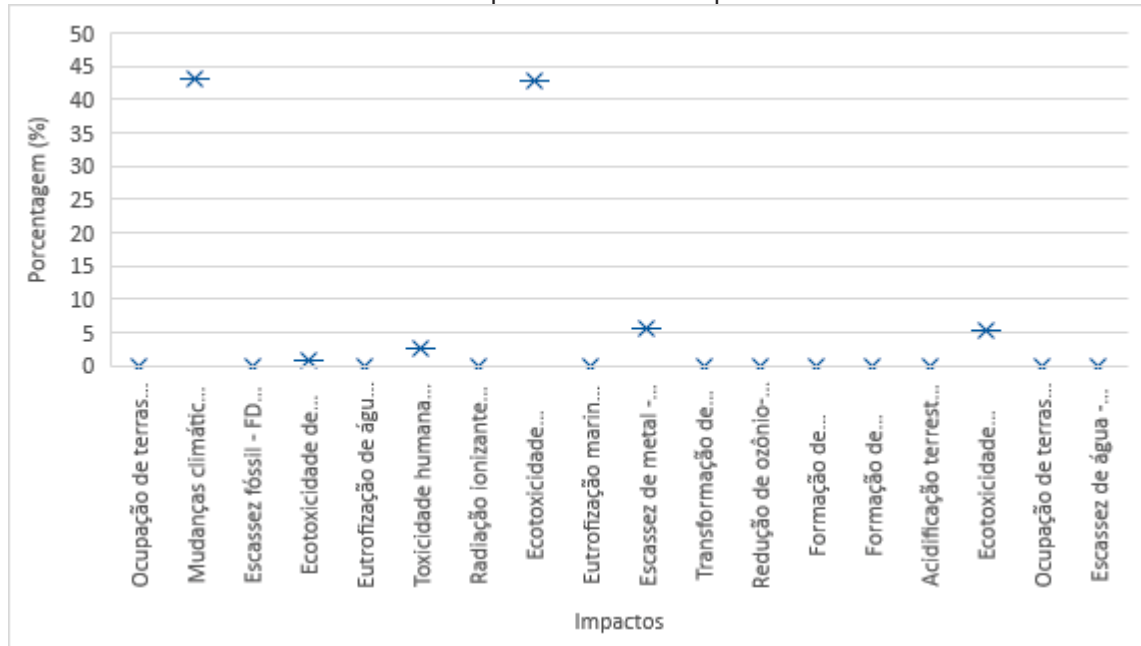


FONTE: A autora (2023).

Pela análise, percebe-se que os maiores impactos considerados se referem à ecotoxicidade marinha e as mudanças climáticas. O objetivo desse indicador é avaliar o efeito de substâncias químicas tóxicas sobre organismos representativos do ecossistema marinho.

Os demais impactos observados foram a ecotoxicidade de água doce e terrestre, bem como a toxicidade humana, os quais são representados no GRÁFICO 6.

GRÁFICO 7 – Resultados percentuais dos impactos na usina eólica



FONTE: A autora (2023).

Percebe-se no GRÁFICO 7 que os impactos de mudanças climáticas e ecotoxicidade marinha representam juntos quase 85% dos impactos da usina analisada.

Em função da área para sua ocupação e mudança da camada vegetal, esperava-se pontuação nessa área também.

5.4 USINA DE BIOMASSA

No caso do estudo da usina de biomassa, o inventário utilizado foi o de Souza (2021) e após a inserção das informações gerais os dados do inventário foram inseridos no programa, também separados pelos inventários e como o inventário era para 1KWh foi transformado para 1 MWh, como é apresentado na TABELA 28.

TABELA 28 – Dados de entrada e saída biomassa

Dados de entrada/saída biomassa							
Inputs Flow	Outputs			Category	Unit	Result	
	Flow	Flow	Flow				
Carbofuran	Emission to air	kg	7,93E-09	Alkane sulfonic acids (sodium salt)	Emission to air	kg	1E-08
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	0,00016	Alkanes, C11	Emission to air	kg	3,95E-07
Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	1	Carbon dioxide	Emission to air	kg	0,05270
Carbon dioxide, fossil, domestic air transport	Emission to air	kg	0,00016	Carbon dioxide, fossil	Emission to air	kg	0,10945
Chemicals, unspecified	Emission to air	kg	0,00004	Carbon dioxide, from soil or biomass stock	Emission to air	kg	0,00017
Diuron	Emission to air	kg	6,61E-09	Carbon monoxide	Emission to air	kg	0,00031
Glyphosate	Emission to air	kg	1,72E-08	Carbon monoxide, fossil	Emission to air	kg	4
Particulates, diesel soot	Emission to air	kg	1,818E-05	Dinitrogen monoxide	Emission to air	kg	0,01219
Petroleum distillate	Emission to air	kg	0,0135	Nitrogen oxides	Emission to air	kg	7,27E-07
Sulfuric acid	Emission to air	kg	0	Propanol	Emission to air	kg	3,45E-07
Herbicides, unspecified	Emission to soil	kg	1,79E-08	Sulfur dioxide	Emission to air	kg	3,5E-07
Insecticides, unspecified	Emission to soil	kg	2,64E-09	Particulates, diesel soot	Emission to air	kg	4,63E-08
Pesticides, unspecified	Emission to soil	kg	6,61E-09	Acetaldehyde	Emission to air	kg	1,59E-08
Water	Resource	kg	9,605E-05	Acetone	Emission to air	kg	1,045E-06
Phosphate ore	Resource	kg	0,00198	Aldehyde	Emission to air	kg	5,5E-07
Phosphorus ore (29% P2O5)	Resource	kg	1,984E-06	Ammonia	Emission to air	kg	8,96E-10
Biotic Production	Resource	kg	5,75E-07	Aromatics	Emission to air	kg	4,47E-10
Occupation, arable, non-irrigated	Resource	m2*	0,00066	Butane	Emission to air	kg	4,025E-07
					Emission to air	kg	4,94E-07

Inputs Flow	Dados de entrada/saída biomassa					
	Category	Unit	Result	Flow	Category	Unit Result
		a	1			07
Bauxite	Resource	kg	4,15E-06	Carbon (total)	Emission to air	kg 0,0000 28
Energy, gross calorific value, in biomass	Resource	MW h	6,583E-11	Carbon dioxide	Emission to air	kg 0,01512 9
Energy, unspecified	Resource	MW h	9,306E-06	Carbon dioxide, land transformation	Emission to air	kg -0,00393 0,00000 36
Gas, natural/kg	Resource	kg	0,00057 4	Carbon monoxide	Emission to air	kg 4,325E-07 1,09E-05
Limestone	Resource	kg	2,645E-05	Cyclic olefins or di-olefins, C11	Emission to air	kg 0,00044 5,575E-07
Nitrogen	Resource	kg	4,496E-06	Dinitrogen monoxide	Emission to air	kg 2,64E-09 6,68E-06
Oils, unspecified	Resource	kg	0,00330 6	Ethanol	Emission to air	kg 3,31E-08 8,79E-08
Potassium chloride	Resource	kg		Formaldehyde	Emission to air	kg 1,53E-10 3,49E-06
Soil	Resource	kg	0,0212 2,51E-10	Heavy metals, unspecified	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
Transformation, from arable, non-irrigated	Resource	m2	1,06E-08	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	Emission to air	kg 8,79E-08
Transformation, from pasture and meadow, extensive	Resource	m2	1,32E-11	Hydrocarbons, unspecified	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
Transformation, from shrub land, sclerophyllous	Resource	m2	1,32E-09	Hydrogen	Emission to air	kg 1,53E-10 3,49E-06
Transformation, to arable, non-irrigated	Resource	m2	0,00016 88	Hydrogen sulfide	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
Transformation, to traffic area, rail/road embankment	Resource	m2		Methane	Emission to air	kg 1,53E-10 3,49E-06
Steel waste	Waste	kg	0	Methyl mercaptan	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
Wood ashes	Waste	kg	1	Mineral oil	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
Zeolite waste	Waste	kg	0	Nitrate	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
				Nitric oxide	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09
				Nitrogen	Emission to air	kg 3,2E-08 1,65E-09

Dados de entrada/saída biomassa					
Inputs Flow	Outputs		Category	Unit	Result
	Flow	Result			
	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		Emission to air	kg	0,00001 24
	Organic carbon		Emission to air	kg	0,00000 09
	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons		Emission to air	kg	5E-08
	Particulates, fine mineral fibers		Emission to air	kg	0,00000 46
	Particulates, SPM		Emission to air	kg	2,67E-06
	Particulates, unspecified		Emission to air	kg	6,33E-08
	Silicon		Emission to air	kg	0
	Soot		Emission to air	kg	2,48E-08
	Sulfate		Emission to air	kg	0
	Sulfur dioxide		Emission to air	kg	1,689E-05
	VOC, volatile organic compounds		Emission to air	kg	4,59E-08
	Imazapic		Emission to soil	kg	1,483E-07
	Carbofuran		Emission to soil	kg	7,93E-06
	Diuron		Emission to soil	kg	6,61E-09
	Glyphosate		Emission to soil	kg	1,65E-08
	COD, Chemical Oxygen Demand		Emission to water	kg	2,99E-08
	BOD5, Biological Oxygen Demand		Emission to water	kg	1,35E-10
	Carbofuran		Emission to water	kg	0,00011 9
	Dissolved solids		Emission to water	kg	2,84E-07
	Diuron		Emission to water	kg	9,92E-08

Dados de entrada/saída biomassa					
Inputs Flow	Outputs		Category	Unit	Result
	Flow	Result			
	Ethanol		Emission to water	kg	0,000221
	Fipronil		Emission to water	kg	4,234E-08
	Glyphosate		Emission to water	kg	2,58E-07
	hexazinone		Emission to water	kg	2,825E-08
	Hydrocarbons, unspecified		Emission to water	kg	5,3E-09
	Metallic ions, unspecified		Emission to water	kg	5,19E-08
	Nitrate		Emission to water	kg	9,98E-07
	Oils, unspecified		Emission to water	kg	9,44E-08
	Sodium		Emission to water	kg	2,13E-07
	Sucrose		Emission to water	kg	0,000279
	Suspended solids, unspecified		Emission to water	kg	1,35E-10
	tebuthiuron		Emission to water	kg	1,058E-07
	Trinexapac-ethyl		Emission to water	kg	1,058E-07
	Energy, from biomass		Resource	MW h	0,0000001
	Slags		Waste	kg	0,0001054
	Mineral waste		Waste	kg	0,0000115
	Oil waste		Waste	kg	0,0000366
	Production waste, not inert		Waste	kg	3,49E-08
	Slags		Waste	kg	0,0007

Dados de entrada/saída biomassa					
Inputs Flow	Inputs		Outputs		Unit Result
	Category	Unit Result	Category	Unit Result	

FONTE: A autora (2023).

Os resultados apresentados no “Top 5 Contributions” saem no formato da FIGURA 20.

FIGURA 20– Top 5 Contributions Biomassa



FONTE: A autora (2023).

Os resultados encontrados são apresentados na TABELA 29 e no GRÁFICO 8 a seguir.

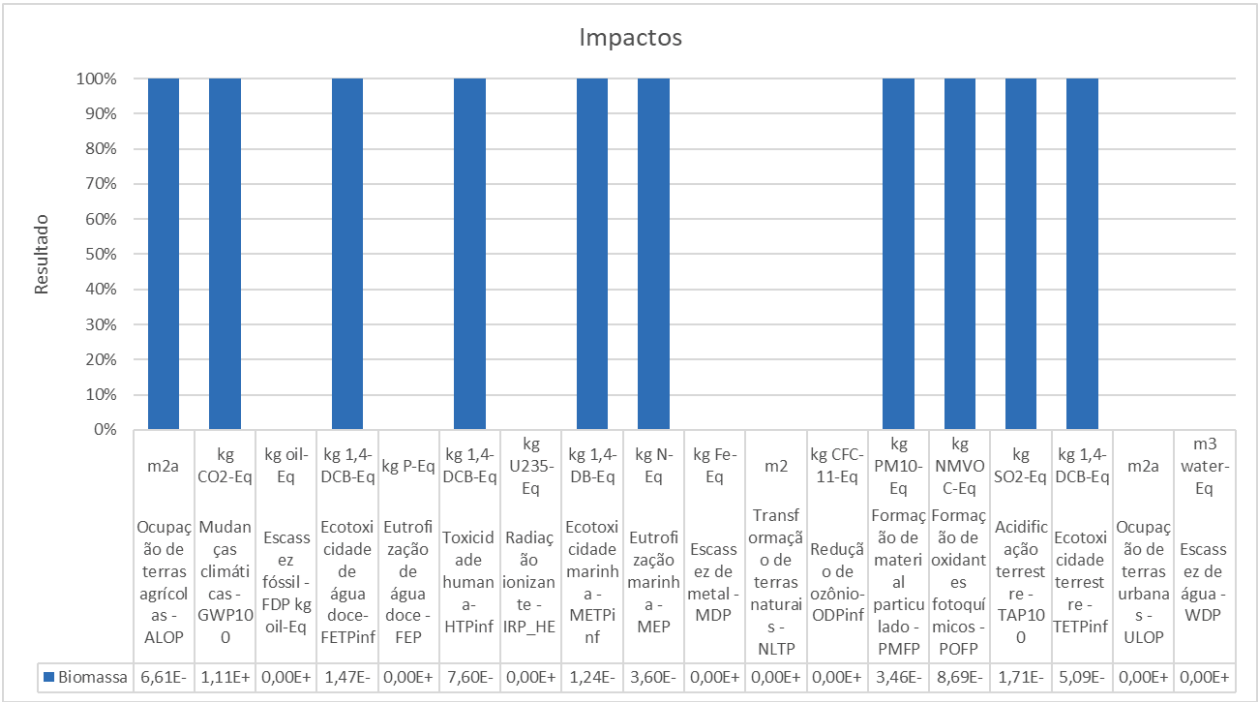
TABELA 29 – Resultados: usina de biomassa

Categoria de impacto	Unidade	Biomassa
Ocupação de terras agrícolas – ALOP	m2a	6,61E-04
Mudanças climáticas – GWP100	kg CO2-Eq	1,11E+00
Escassez fóssil – FDP kg oil-Eq	kg oil-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade de água doce – FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,47E-08
Eutrofização de água doce – FEP	kg P-Eq	0,00E+00
Toxicidade humana – HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	7,60E-05
Radiação ionizante – IRP_HE	kg U235-Eq	0,00E+00
Ecotoxicidade marinha – METPinf	kg 1,4-DB-Eq	1,24E-08
Eutrofização marinha – MEP	kg N-Eq	3,60E-07
Escassez de metal – MDP	kg Fe-Eq	0,00E+00
Transformação de terras naturais – NLTP	m2	0,00E+00

Categoria de impacto	Unidade	Biomassa
Redução de ozônio – ODPinf	kg CFC-11-Eq	0,00E+00
Formação de material particulado – PMFP	kg PM10-Eq	3,46E-06
Formação de oxidantes fotoquímicos – POFP	kg NMVOC-Eq	8,69E-04
Acidificação terrestre – TAP100	kg SO2-Eq	1,71E-05
Ecotoxicidade terrestre – TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	5,09E-08
Ocupação de terras urbanas – ULOP	m2a	0,00E+00
Escassez de água – WDP	m3 water-Eq	0,00E+00

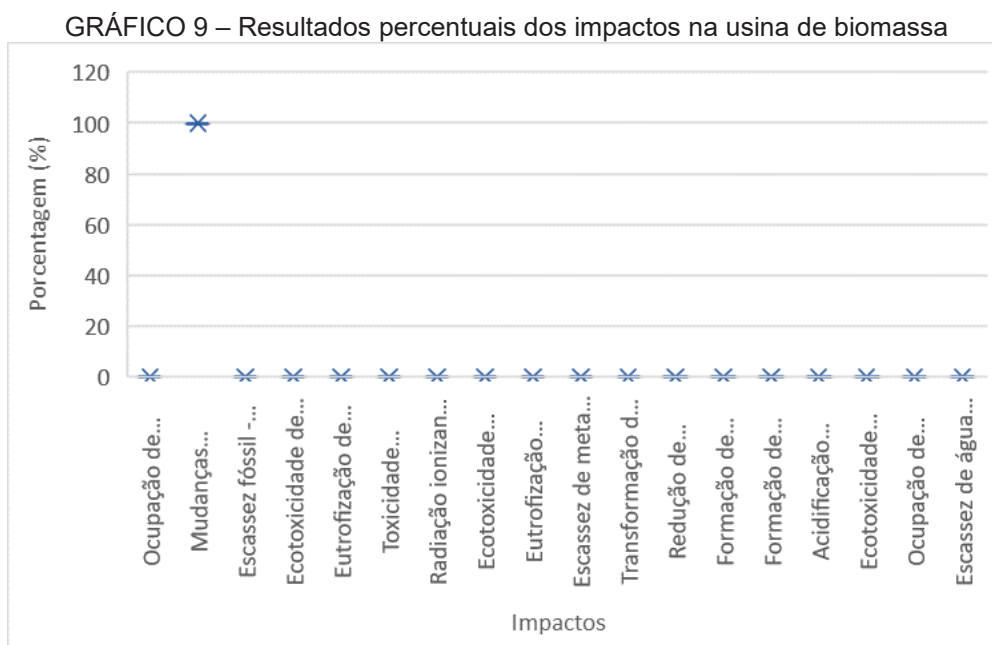
FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 8 – Resultados: usina de biomassa



FONTE: A autora (2023).

Pela análise, percebe-se que os maiores impactos considerados se refere à ocupação da área agrícola e mudança climática. Os demais fatores observados são apresentados no GRÁFICO 9.

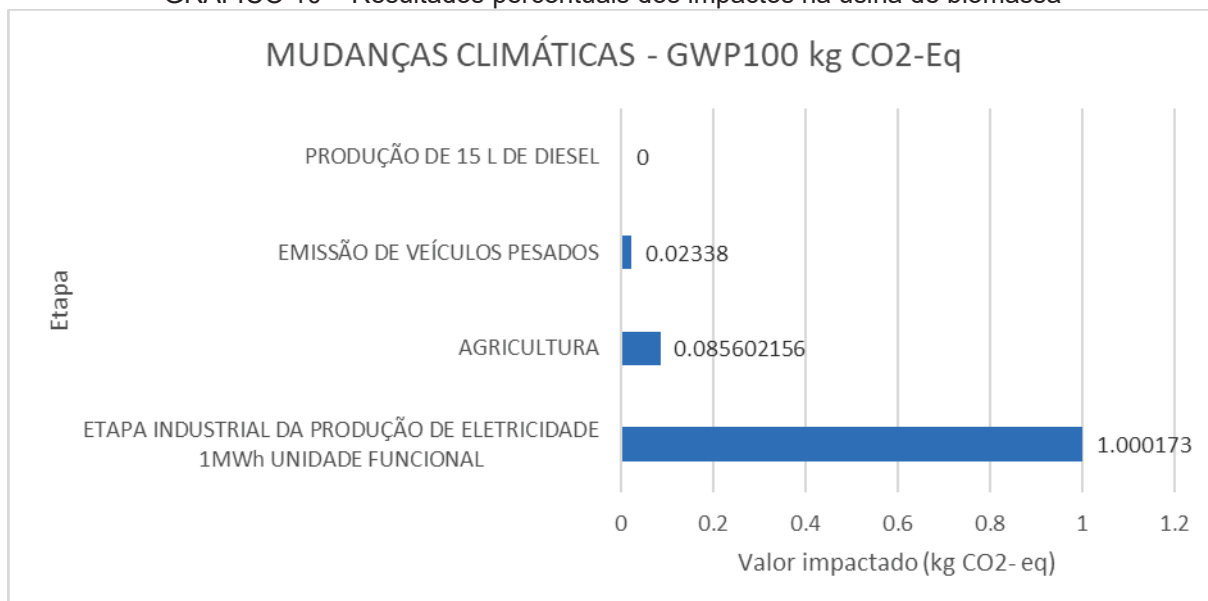


FONTE: A autora (2023).

Percebe-se que os impactos mais significativos no caso da usina de biomassa analisada foram os de mudanças climáticas e ocupação de terras, o que em se tratando de usina de biomassa dependendo do uso, caso da produção de biodiesel, como exemplo, utiliza grandes plantações como o da cana de açúcar.

No inventário da usina de biomassa tem-se mais de uma atividade estudada sendo que o GRÁFICO 10 apresenta a contribuição por etapas no impacto de mudanças climáticas que foi o mais expressivo.

GRÁFICO 10 – Resultados percentuais dos impactos na usina de biomassa



FONTE: A autora (2023).

Os dados de entrada/saída conforme aparecem no programa de todas as fontes apresentadas estão no capítulo apêndice.

5.5 FONTES RENOVÁVEIS

Mesmo sabendo que as considerações no inventário de cada usina divergem, foi realizada uma análise conjunta, para a avaliação dos resultados gerais.

Os resultados encontrados são apresentados na TABELA 30 e no GRÁFICO 9 a seguir.

TABELA 30 – Resultados geral da análise do ciclo de vida das fontes renováveis brasileiras

Categoria de impacto	Unidade	Hidrelétrica	Solar	Eólica	Biomassa
Acidificação terrestre – TAP100	kg SO2-Eq	3,49E-03	0,00E+00	0,00E+00	1,71E-05
Ecotoxicidade de água doce – FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	4,32E-02	3,28E-02	1,56E-04	1,47E-08
Ecotoxicidade marinha – METPinf	kg 1,4-DB-Eq	7,81E-01	2,01E+00	9,68E-03	1,24E-08
Ecotoxicidade terrestre – TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq	1,05E-02	2,47E-01	1,18E-03	5,09E-08
Escassez de água – WDP	m3 water-Eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Escassez de metal – MDP	kg Fe-Eq	1,67E-01	0,00E+00	1,25E-03	0,00E+00
Escassez fóssil – FDP kg oil-Eq	kg oil-Eq	2,46E+01	4,01E-02	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização de água doce – FEP	kg P-Eq	0,00E+00	1,85E-06	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofização marinha – MEP	kg N-Eq	1,09E-06	4,16E-04	0,00E+00	3,60E-07
Formação de material particulado – PMFP	kg PM10-Eq	6,98E-04	0,00E+00	0,00E+00	3,46E-06
Formação de oxidantes fotoquímicos – POFP	kg NMVOC-Eq	5,55E-03	6,45E-03	0,00E+00	8,69E-04
Mudanças climáticas – GWP100	kg CO2-Eq	1,56E+00	3,58E+00	9,73E-03	1,11E+00
Ocupação de terras agrícolas – ALOP	m2a	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,61E-04
Ocupação de terras urbanas – ULOP	m2a	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Radiação ionizante – IRP_HE	kg U235-Eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Redução de ozônio – ODPinf	kg CFC-11-Eq	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Toxicidade humana – HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq	5,63E-02	1,22E+00	6,11E-04	7,60E-05
Transformação de terras naturais – NLTP	m2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

FONTE: A autora (2023) calculado com OpenLCA com base nos dados coletados por Ribeiro (2003), Leandro (2019) e Souza (2021).

Cada empreendimento, em função do que foi considerado no seu inventário, resultou nas categorias de impacto apresentadas na TABELA 26. Como explicitado os inventários divergem com relação as fronteiras, objetivos e escopos, fato esse que resultaram em algumas considerações que são descritas na sequência.

No caso da geração de energia usando a biomassa os maiores os maiores impactos estão relacionados aos insumos usados a ocupação de terras agrícolas e mudanças climáticas. Com relação ao impacto de mudanças climáticas analisando as literaturas consultadas durante a elaboração dessa tese, mesmo tendo esse impacto eles consideram como sendo um valor baixo, que a geração via biomassa emite poucos gases poluentes na atmosfera. Os valores apresentados em estudos anteriores (SOUZA, 2021) indicam que o menor GWP foi o estudo de Spath e Mann (2004), com o valor de -667 gCO₂-eq / kWh e o maior impacto foi para Turconi *et al* (2013) com 130 gCO₂-eq / kWh. A diferença de valores entre os estudos pode estar relacionada com a fronteiras considerada, deslocamento, plantação isso mostra a variabilidade do estudo, sendo fundamental definir bem a fronteira e o escopo. O valor encontrado de 2,12 gCO₂-eq nesse estudo estaria dentro dos valores já analisados.

Já a relação de ocupação de terras tem a questão do desmatamento da área ou o plantio do cultivo agrícola que acaba mudando a vegetação original. Outra questão também está relacionada ao tempo de reposição da fonte de biomassa. Outros aspectos levantados são com relação a contaminação humana, da água e terrestre.

Os impactos encontrados na geração eólica foram os menores impactos na análise conjunta, destacando mudanças climáticas e ecotoxicidade marinha. Estudos anteriores apresentam a seguinte variação de valores encontrados para o GWP (SOUZA, 2021) o menor resultado para o GWP foi de 3 gCO₂-eq/kWh, Rule *et al* (2009), e o maior impacto foi de 8 gCO₂-eq/kWh Masanet (2013). Mesmo o valor do impacto não estando na faixa indicada, percebe-se que há uma diferença e isso pode acontecer pelo inventário usado que inclui, distância de transporte, escopo do projeto, itens já mencionados na análise dos impactos da geração por biomassa.

Os demais impactos observados foram a ecotoxicidade de água doce e terrestre, bem como a toxicidade humana. Com relação a esses impactos deve erosão de material o que pode alterar as características naturais. As águas residuais dos canteiros também podem contaminar o bioma local.

GRÁFICO 11 – Impactos das fontes de energia avaliadas



FONTE: A autora (2023).

No entanto, o que pode surpreender é o maior impacto proveniente da energia solar. A principal razão para isso pode ser a grande quantidade de materiais e mão de obra necessários por unidade de produção de energia para a energia solar. Outro aspecto observado é que a natureza dispersa da energia solar é que requer grandes sistemas de recolha e armazenamento para produzir uma quantidade apreciável de energia. Estudos pretéritos indicaram como base valores variando da faixa de GWP para fonte solar foi entre 13 gCO₂-eq/kWh, WMA (2011) e 190 gCO₂-eq/kWh, AGENCY (1998).

A energia solar também tem um impacto na saúde humana quando comparada à energia. Quanto ao impacto nos recursos, os valores não são muito consideráveis renováveis registam impactos insignificantes.

Com relação aos impactos encontrados na energia hidráulica o impacto predominante foi escassez fóssil e mudança climática. A escassez fóssil relaciona o impacto quanto à extração, em quilogramas de combustíveis fósseis da natureza, baseado nas reservas de concentração existentes e considerando a provável insuficiência destas matérias-primas para as gerações futuras.

Valores encontrados em outros estudos com relação a mudança climática indica uma variabilidade de 2 gCO₂-eq/kWh a 120 gCO₂-e/kWh (SOUZA, 2021). Uma diferença considerável que pode ser explicada pelo tipo de reservatório, transporte na construção, inclusive o que foi considerado como escopo, essa discrepância nos resultados, mostra a importância de ter bem definido o que será analisado no ciclo de vida.

Na análise conjunta alguns impactos não foram pontuados para nenhuma fonte analisada como radiação ionizante; transformação de terras naturais; redução de ozônio e ocupação de terras urbanas.

De todas as fontes de energia incluídas nesta comparação, a energia eólica ainda assim contribui menos para as categorias ambientais e de danos, mas com as ressalvas que os critérios de entrada no programa OpenLCA foram de acordo com inventários existentes.

Outros pontos importantes também que devem ser discutidos é com relação ao programa OpenLCA embora seja gratuito, alguns cuidados devem ser tomados na sua utilização. Os dados de entrada divergem em categorias, sendo que algumas

Uma mudança de dióxido de carbono, para dióxido de carbono (fóssil) tem uma análise diferente, o que pode dar resultados diferentes para os impactos analisados. Embora o programa seja intuitivo é necessário ter uma base para manuseá-lo.

A análise dos estudos de ACV de sistemas de geração de energia a partir de inventários existentes identificou muitas diferenças nos limites do sistema, nas unidades funcionais, nas categorias de impacto e nas características geográficas. Portanto, foi encontrado um problema na comparabilidade dos resultados da ACV.

O que poderia melhorar essa análise seria o fato de encontrar inventários para cada fonte considerando o mesmo objetivo e o mesmo escopo. Dessa forma, a análise conjunta teria maior assertividade.

Percebe-se uma variação nos resultados para cada tipo de usina. Como explicitado anteriormente, nessa análise conjunta, não é possível afirmar com acuracidade qual o empreendimento apresenta um menor risco ambiental.

Em função dessa variação de resultados, para uma maior acurácia dos valores apresentado foi realizado uma análise com o Recipe Endpoint. A Tabela 31 e o Gráfico 12 apresentam o resumo dos resultados encontrados.

TABELA 31 – Resultados: geral

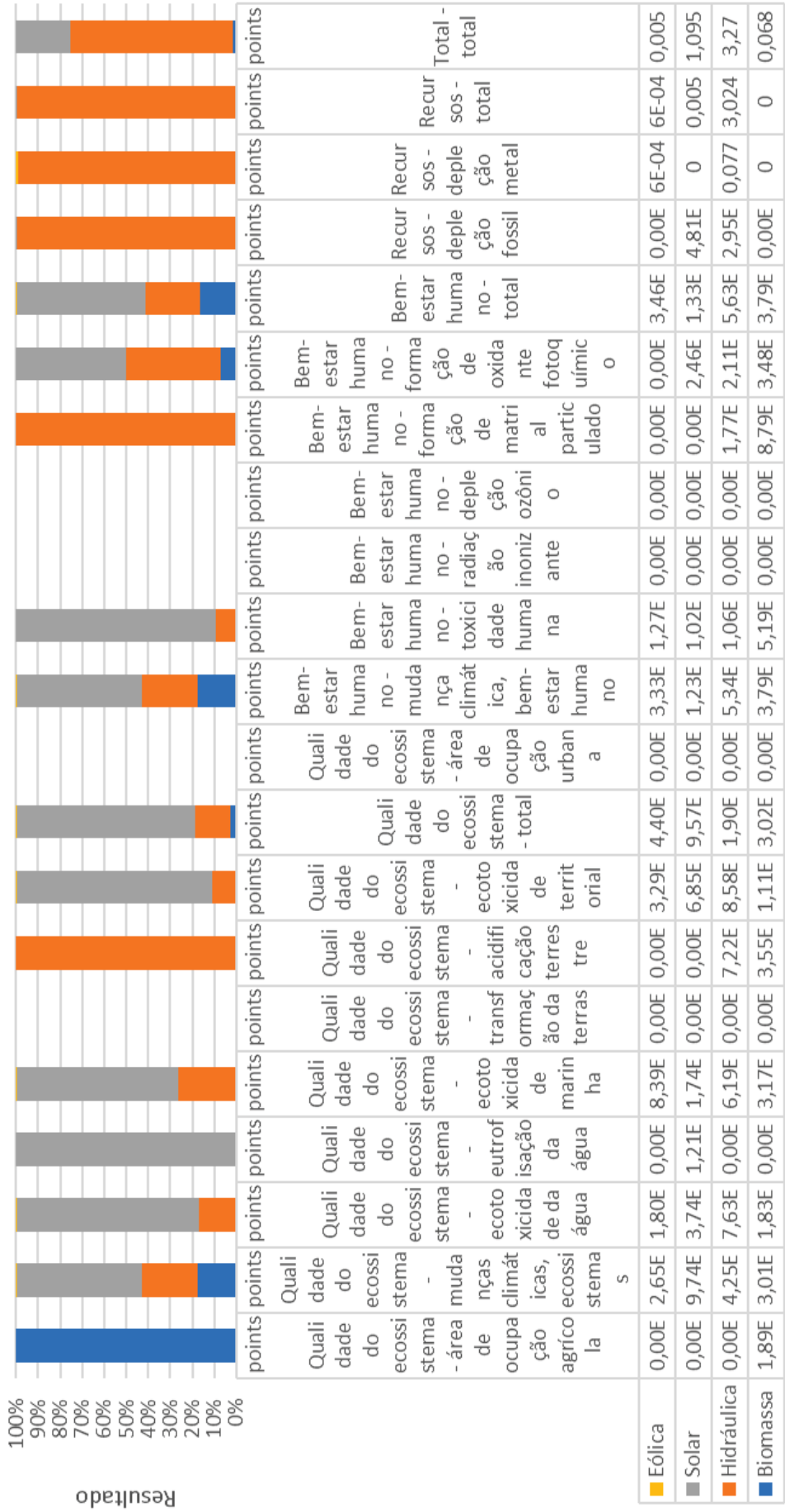
Categoria de Impacto	Unidade de Referência	Biomassa	Hidráulica	Solar	Eólica
Qualidade do ecossistema - área de ocupação agrícola	points	1,89E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Qualidade do ecossistema - mudanças climáticas, ecossistemas	points	3,01E-02	4,25E-02	9,74E-02	2,65E-04
Qualidade do ecossistema - ecotoxicidade da água	points	1,83E-11	7,63E-05	3,74E-04	1,80E-06
Qualidade do ecossistema - eutrofização da água	points	0,00E+00	0,00E+00	1,21E-07	0,00E+00
Qualidade do ecossistema - ecotoxicidade marinha	points	3,17E-12	6,19E-02	1,74E-01	8,39E-04
Qualidade do ecossistema -transformação da terra	points	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Qualidade do ecossistema - acidificação terrestre	points	3,55E-07	7,22E-05	0,00E+00	0,00E+00
Qualidade do ecossistema - ecotoxicidade territorial	points	1,11E-08	8,58E-02	6,85E-01	3,29E-03
Qualidade do ecossistema - total	points	3,02E-02	1,90E-01	9,57E-01	4,40E-03
Qualidade do ecossistema - área de ocupação urbana	points	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Categoria de Impacto	Unidade de Referência	Biomassa	Hidráulica	Solar	Eólica
Bem-estar humano - mudança climática, bem-estar humano	points	3,79E-02	5,34E-02	1,23E-01	3,33E-04
Bem-estar humano - toxicidade humana	points	5,19E-07	1,06E-03	1,02E-02	1,27E-05
Bem-estar humano - radiação ionizante	points	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Bem-estar humano - depleção ozônio	points	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Bem-estar humano - formação de material particulado	points	8,79E-06	1,77E-03	0,00E+00	0,00E+00
Bem-estar humano - formação de oxidante fotoquímico	points	3,48E-07	2,11E-06	2,46E-06	0,00E+00
Bem-estar humano - total	points	3,79E-02	5,63E-02	1,33E-01	3,46E-04
Recursos - depleção fóssil	points	0,00E+00	2,95E+00	4,81E-03	0,00E+00
Recursos -depleção metal	points	0	0,07735	0	0,00058
Recursos - total	points	0	3,02374	0,004811	0,00058
Total - total	points	0,068096	3,270315	1,094894	0,005326

FONTE: A autora (2023).

GRÁFICO 12 – Impactos encontrados na categoria ReCIPE Endpoint

Impactos



FONTE: A autora (2023).

Pela análise usando o Recipe Endpoint, as pontuações obtidas pela sina eólica são, apresentaram valores mais baixos. O Recipe Endpoint avalia três indicadores que estão relacionadas ao bem-estar humano, qualidade do ecossistema e os recursos utilizados.

Como já explicitado e reforçando como os inventários já estavam prontos, percebe-se que no inventário da usina eólica não consta, por exemplo, o descomissionamento, o que poderia mudar os valores obtidos, já que precisaria ser incluído o desmonte de turbinas; a fundação usada, qual seria a tratativa e as torres e pás.

Outros fatores que não entram nessa análise é a questão do ruído e dos pássaros que acabam colidindo com as hélices e morrendo, sem contar o impacto na saúde das pessoas e na agricultura praticada por estes moradores.

Um dos pontos de soluções mitigadoras seria o reaproveitamento das turbinas por exemplo, analisando que a vida útil está estimada em vinte anos, tentar aproveitar esses materiais pode diminuir os impactos ambientais.

Com relação a usina hidrelétrica embora tenha sido a mais pontuada, seu inventário foi o mais completo, mas é um ponto de alerta para as ações mitigadoras, tentando minimizar seus impactos, e um ponto é transporte, área e concreto. Pesquisas tentando minimizar a emissão de gases no cimento ou sua diminuição no traço do concreto estão sendo realizadas e são muito bem-vindas na busca de menor impacto nas usinas hidrelétricas.

Outro ponto de reflexão seria o porquê de não ter levado em consideração uma fonte de geração de energia não-renovável como comparação dos impactos com as fontes renováveis, o objetivo, realmente era analisar soluções mais limpas de energia. De acordo com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (Organização das Nações Unidas) o objetivo 7 em específico trata de energia limpa e acessível.

Pelas duas análises a fonte de geração de energia eólica acabou gerando os menores impactos ambientais. A geração por biomassa também apresentou menos impactos do que a usina hidrelétrica e solar. Sendo uma fonte de energia que pode ser mais explorada na matriz energética.

5.6 SÍNTESE DA TESE

Através do estudo de ciclo de fontes de geração de energia renováveis, foi possível comprovar a aplicabilidade da ferramenta ACV não só a produtos, como também à indústria da geração de energia, atingindo-se, assim, o objetivo geral proposto neste trabalho.

Se fosse considerada uma análise geral, a geração eólica teria menos impacto ambiental em comparação com as demais fontes de geração de energia estudadas.

Um dos motivos pode ser com relação aos materiais usados nas usinas eólicas percebe-se pelo inventário que sua lista é mais enxuta, com relação aos demais inventários utilizados.

Já com relação aos materiais utilizados nos painéis solares eles necessitam de mais processamento e, portanto, requerem mais energia inserida.

No caso das usinas de biomassa tem toda a questão da área principalmente dependendo da cultura que é feita e as usinas hidrelétricas têm contribuições em função dos gases, tanto na fase de construção quanto operação.

Com a análise da usina hidrelétrica, percebeu-se que o maior impacto considerado é relacionado à escassez fóssil. O que chamou atenção foi o fato de a categoria de impacto de mudanças climáticas ter sido pontuada, mas esperava-se um valor mais elevado em função dos materiais usados em sua construção, bem como emissão de gases.

Cada usina estudada tem suas vantagens e desvantagens com relação ao meio ambiente, mesmo sendo energia limpa percebe-se que produzem alguns impactos ambientais.

Para a mitigação dos impactos de cada usina, essa avaliação pode ser mais bem elaborada com uma análise individual de cada etapa considerada no ciclo de vida, para verificar os valores por etapa. No caso desse trabalho a análise acabou sendo coletiva, não por etapas de processo. Mas um fator que tem que ser verificado é a diminuição da emissão de CO₂. Seja com materiais alternativos ou diminuindo a distância para transportar o material, ajudando a minimizar as variações climáticas.

O objetivo dessa tese focou na análise do inventário existente, mas como já explanado outros pontos podem ser levados em consideração na análise ambiental,

como o impacto na saúde das pessoas e na agricultura praticada, bem como impacto nos animais que possam ser afetados.

O presente estudo se limitou a analisar fontes renováveis de geração de energia visto que embora sejam consideradas energias limpas, ambas demonstraram impactos, e o objetivo era verificar qual teria menos impacto.

A organização dos dados de inventários para as quatro fontes de energia estudo desse trabalho, foi realizada, foram utilizados os dados para usina hidrelétrica, biomassa, eólica e fotovoltaica, de posse desses dados foi possível verificar os impactos gerados.

Com uma breve explanação sobre o objetivo da tese de analisar os impactos ambientais de fontes de geração de energia, percebe-se a importância social e ambiental do tema. Impactos ambientais devem ser diminuídos cada vez mais. Para que isso aconteça é necessário mensurar esses impactos por isso a escolha do tema. Alguns conceitos abordados nesse trabalho como análise do ciclo de vida, inventário do ciclo de vida, energia renovável, impactos ambientais. Para que fosse possível obter os resultados pretendidos foi usado o software OpeLCA e para quantificar os impactos ambientais foi usado o Recipe Midpoint e Endpoint, sendo possível analisar cada usina estudada.

Essa tese tem uma importância social e ambiental, ambiental como já explicitado para analisar os impactos e dessa maneira adotar métodos para diminuição deles. Social, porque visa a energia que é fundamental e direito da população acesso à energia limpa e barata.

Se fosse para alterar algo para melhorar o trabalho não adotaria inventários prontos, faria um inventário considerando o mesmo escopo para todas as usinas, para uma melhor avaliação conjunta, o que fica como sugestão para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo de desenvolver a ACV para fontes de energia elétrica renovável – hidrelétrica, eólica, fotovoltaica e de biomassa –, incluídas na matriz energética brasileira, foi possível, apenas a comparação entre eles não corresponde a uma mesma análise de ACV, o que pode prejudicar uma análise igualitária entre as quatro fontes citadas. Mesmo assim o trabalho abre possibilidades para novas análises para que se possa cada vez mais incentivar o uso de energia limpa e renovável.

Com a investigação já realizada, ainda há trabalho futuro a fazer que beneficiará o setor das energias renováveis. Um melhor entendimento sobre o ciclo de vida ajudará a analisar de forma mais eficaz os impactos com relação a geração de energia desde as etapas iniciais até suas fases finais. Com um ciclo de vida completo, melhorias nas diversas etapas do ciclo podem ser realizadas. Com o aumento do uso da ferramenta ACV as questões ambientais podem ser cada vez mais abordadas.

6.1 LIMITAÇÕES

Dentre as limitações do trabalho: os inventários utilizados foram existentes, ou seja, o escopo difere para cada usina.

O software utilizado foi o OpenLCA, software bem-conceituado, gratuito, mas não é nacional, então os dados de entrada algumas vezes tiveram que ser adaptados para insumos existentes.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se elaborar os inventários das fontes de geração considerando os mesmos requisitos; e aí sim comparar a pegada de carbono ((Kg CO₂ eq.) / MWh) referente as emissões e impactos ambientais, das diferentes fontes de geração de energia, para ter uma maior assertividade.

Outra linha de pesquisa poderia ser a análise dos impactos por categoria de impacto ambiental estudada para fazer um plano de ação para mitigar esses impactos.

Também sugere-se incluir a análise de impactos não apresentados nos inventários, como impactos com aves no caso das usinas eólicas fazendo um levantamento problemas ambientais nem sempre levantados nos inventários.

REFERÊNCIAS

ACV BRASIL. **Avaliação do Ciclo de Vida**: objetivo e escopo. [material didático]. 2020.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil**. Produto 6.1. Brasília: ABDI, 2018.

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DA INDÚSTRIA. Setor Elétrico Brasileiro, 2021. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/setor-eletrico-brasileiro/>. Acesso em: 29 out. 2023.

AGENCY, I.E. Benign energy?: the environmental implications of renewables, OECD, Paris, 1998.

AMARANTE, O. A. C.; ZACK, M. B. J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia; Eletrobrás; CEPEL; CRESESB; Truewind Solutions; Camargo Schubert, 2001. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

ARVESEN, A.; HERTWICH, E. G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 5994-6006, out. 2012.

ASDRUBALI, F. *et al.* Life cycle assessment of electricity production from renewable energies: Review and results harmonization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 42, p. 1113-1122, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Disponível em: <http://licenciadorambiental.com.br/wp->

content/uploads/2015/01/NBR-14.040-Gest%C3%A3o-Ambiental-avaliac%C3%A3o-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura.pdf. Acesso em: 14 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em: www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/28378/abnt-nbriso14044-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-requisitos-e-orientacoes. Acesso em: 14 nov. 2022.

ATENDIMENTO INSIGHT. Como funciona a energia eólica? **Insight**, Belo Horizonte, fev. 2002. Disponível em: <https://insightdex.com.br/blog/Como-funciona-a-energia-eolica>. Acesso em: 23 out. 2022.

ATILGAN, B.; AZAPAGIC, A. Assessing the environmental sustainability of electricity generation in Turkey on a Life Cycle Basis. **Energie**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 31, 2016a.

ATILGAN, B.; AZAPAGIC, A. Renewable electricity in Turkey: Life cycle environmental impacts. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 89, p. 649-657, 2016b.

AZEVEDO, J. Usina hidrelétrica: o que é e como funciona. **Ecycle**, [s. l.], 2020. Disponível em: www.ecycle.com.br/usina-hidreletrica/. Acesso em: 11 nov. 2020.

BARROS, M. **Avaliação do Ciclo de Vida de geração de energia elétrica no Brasil**: histórico e perspectivas futuras em termos de aquecimento global. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BARROS, M. V.; PIEKARSKI, C. M.; SALVADOR, R. Avaliação de Ciclo de Vida de sistemas de geração de energia elétrica mais limpa: uma análise de produção científica. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP: ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION – ACADEMIC WORK, 6., 2017. **Anais [...]**. São Paulo: UNIP, 2017. p. 1-10.

BERRILL, P. *et al.* Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe. **Environmental Research Letters**, [s. l.], n. 11, 014012, 2016.

BLUESOL ENERGIA SOLAR. Usina Solar: como funciona e os principais projetos no Brasil. **BlueSol**, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/usina-solar-no-brasil/>. Acesso em: 19 nov. 2022.

BOLEA, M.; BOLEA, I.; SERRA, L. Comparison of environmental impacts of renewable and non-renewable energy. *In*: ENERGY ECONOMICS IBERIAN CONFERENCE, 1., 2016. **Proceedings** [...]. Lisbon: APEEN; AEEE; ISEL; GOVCOOP, 2016. p. 511-518.

BRASIL. Ministério de Minas de Energia. Geração eólica ultrapassa os 20 GW de capacidade instalada no Brasil. **Gov.br**, Brasília, 23 nov. 2021. Disponível em: www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/11/geracao-eolica-ultrapassa-os-20-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil. Acesso em: 9 jan. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas de Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007a. Disponível em: <https://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/matriz-energetica-nacional-2030>. Acesso em: 14 nov. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas de Energia. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007b. Disponível em: www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es.pdf. Acesso em: 4 out. 2023.

BREHM, M. A. **Geração de energia elétrica fotovoltaica distribuída por pequenos consumidores domésticos no Paraná: potencialidades e aspectos socioambientais**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

CARNEVALE, E.; LOMBARDI, L.; ZANCHI, L. Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale. **Energy**, [s. l.], v. 77, n. 1, p. 434-446, dez. 2014.

CARRASCAL, O. M. H.; MAGRINI, A.; LA ROVERE, E. L. Análise das ACV aplicadas na avaliação dos sistemas de geração de eletricidade em um contexto internacional e suas novas perspectivas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 11., 2018. **Anais** [...]. Cuiabá: CBPE, 2018. p. 1-13.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE). Como a biomassa se transforma em energia elétrica? **CBIE**, [s. l.], 29 nov. 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/como-a-biomassa-se-transforma-em-energia-eletrica/#:~:text=A%20gera%C3%A7%C3%A3o%20el%C3%A9trica%20a%20partir,e%20depois%20%20em%20energia%20el%C3%A9trica>. Acesso em: 19 nov. 2022.

CENTRO DE ENERGIA EÓLICA (CE-EÓLICA). Porto Alegre: PUCRS, c2022. Disponível em: <https://cambioclimatico-regatta.org/index.php/en/key-institutions/item/centro-de-energia-eolica-pontifica-universidades-catolica-do-rio-grande-do-sul>. Acesso em: 14 nov. 2022.

CHOHFI, F.; DUPAS, F.; LORA, E. Balanço, análise de emissão e sequestro de CO₂ na geração de eletricidade excedente no setor sucroalcooleiro. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004. **Anais** [...]. Campinas: AGRENER, 2004. p. 1-8.

CLEMONS, S. K. C. *et al.* Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. **Renewable Energy**, [s. l.], n. 168, p. 448-162, 2021.

CORDEIRO, A. A.; KASPER, D.; CRUZ, R. W. A. Avaliação do Ciclo de Vida da Hidrelétrica Pari-Cachoeira. **InterfaceHS: Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 1-15, 2017.

CRUZ, A. A. P. **Usina Solar Fotovoltaica de Juiz de Fora**. 2012. 58 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

DZIKUĆ, M.; PIWOWAR, A. Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 55, p. 856-862, 2016.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2010. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 5 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em: 1º nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. **EPE**, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica. Acesso: 25 abr. 2022.

ESFERA ENERGIA. Entenda o que é energia de biomassa e seu papel na matriz energética brasileira. **Blog Esfera**, [s. l.], 16 maio 2021. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-biomassa>. Acesso em: 23 out. 2022.

FISCHER, J. **Comparing Wind and Solar Energy Impacts on the Environment: A LCA Approach Using openLCA Platform**. Bryant University Honors Program. RI, 2021.

FRANKL, P.; RUBIK, F. **Life Cycle Assessment in Industry and Business: Adoption of Patterns, Applications and Implications**. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

FRISCHKNECHT R. *et al.* Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems. **International Energy Agency**: IEA PVPS Task 12. Report T12-04. Paris: IEA, 2015.

FTHENAKIS, V.; KIM, H. C. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of CdTe Photovoltaics. **MRS Online Proceedings Library**, [s. l.], n. 895, 2005.

FUKUROZAKI, S. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio**: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e de energia solar fotovoltaica. Tese (Doutorado na Área de Ciências de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GANNOUM, E. S. O desenvolvimento da indústria de energia eólica no Brasil: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. **Cadernos Adenauer**, [s. l.], n. 3, p. 57-71, 2014.

GARCIA, R.; MARQUES, P.; FREIRE, F. Life-cycle assessment of electricity in Portugal. **Applied Energy**, [s. l.], v. 134, p. 563-572, dez. 2014.

GELLER, M. T. B. **Análise do Ciclo de Vida da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una (Baixo Amazonas, Brasil)**. Tese (Doutorado em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2016.

GOGA, T.; FRIEDRICH, E.; BUCKLEY, C. A. Environmental life cycle assessment for potable water production: a case study of seawater desalination and mine-water reclamation in South Africa. **Water SA**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 700-709, out. 2019.

GOMES, M. S.; MORIS, V. A.; NUNES, A. O. Avaliação de Ciclo de Vida da Energia Eólica *offshore*: uma revisão da literatura. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 7, n. 2, p. 199-213, 2018.

GÓRALCZYK, M. Life-cycle assessment in the renewable energy sector. **Applied Energy**, [s. l.], v. 75, n. 3-4, p. 205-211, jul./ago. 2003.

GRAEDEL, T. E. **Streamlined Life-Cycle Assessment**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

GTSOL. Geradores eólicos. **GTsol**, Vitória, 30 jul. 2018. Disponível em: <https://gtsol.com.br/2018/07/30/geradores-aeolicos/>. Acesso em: 3 nov. 2022.

HAUSCHILD, M. Z. Assessing Environmental Impacts in a Life Cycle Perspective. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 81A-88A, 2005.

HELLER, M. C. *et al.* Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 29, n. 7, p. 1023-1042, jun. 2004.

INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos. *In: WORKSHOP INTERNACIONAL BRASIL-JAPÃO: IMPLICAÇÕES REGIONAIS E GLOBAIS EM ENERGIA, MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL*, 3., 2012. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP, 2012. p. 1-14.

INPE. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). São José dos Campos, 2021. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 23 out. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. Disponível em: <https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>. Acesso em: 15 jul. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Usinas Eólicas 2021**. Brasília: IBAMA, 2021. Disponível em: www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2021/mapa-situa-projetos-de-complexos-eolicos-offshore-licenciados-pelo-ibama/20210819UsinasEolicas.pdf. Acesso em: 19 nov. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. Casa de Força. **Itaipu**, [s. l.], 2021. Disponível em: www.itaipu.gov.br/energia/casa-de-forca#:~:text=A%20Casa%20de%20For%C3%A7a%20concentra,e%20o%20regulador%20de%20velocidade. Acesso em: 2 nov. 2021.

JAKOBSSON, T. V. F. **Projeto conceitual do sistema hidráulico de uma Usina Hidrelétrica**. Projeto (Curso de Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

JANUZZI, G. M. Energia e Meio Ambiente. **Com Ciência**, Campinas, 10 jul. 2001. (Seção Energia: crise e planejamento). Disponível em: www.comciencia.br/dossies-1-72/reportagens/energiaeletrica/energia12.htm. Acesso em: 19 out. 2022.

JOINT, Research Centre. Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document. (ILCD Handbook), 2010.

KHAN, S. *et al.* Biomass as Renewable Energy. **IMS Engineering College**, Ghaziabad, v. 2, n. 1, p. 301-304, maio 2015.

KOULOUMPIS, V.; SOBOLOEWSKI, R.; YAN, X. Performance and life cycle assessment of a small scale vertical axis wind turbine. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 247, 119520, 2020.

LEANDRO, F. S. **Análise do ciclo de vida de quatro diferentes tecnologias de aproveitamento de energia solar para produção de energia elétrica para poços de Caldas-MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

LELEK, L. *et al.* Life cycle assessment of energy generation in Poland. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 1-14, 2016.

LENZEN, M.; MUNKSGAARD, J. Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines: review and applications. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 339-362, 2002.

LIMA, B. **Geração distribuída aplicada a edificações**: edifícios de energia zero e o caso do laboratório de ensino da FEC-UNICAMP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

LIMA, B. W. F. Geração **Distribuída Aplicada à Edificações**: Edifícios de Energia Zero e o caso do Laboratório de Ensino da FEC-Unicamp. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2012.

LOU, S. *et al.* Life-cycle analysis of photovoltaic systems in Hong Kong. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [s. l.], n. 9, 045901, 2017.

LUND, C.; BISWAS, W. A Review of the Application of Lifecycle Analysis to Renewable Energy Systems. **Bulletin of Science, Technology and Society**, [s. l.], v. 28, n. 3, 2008.

LUO, L.; YANG, L.; HANAFIAH, M. M. Construction of renewable energy supply chain model based on LCA. **Open Physics**, [s. l.], v. 16, n. 1, 2018.

MAPA DE NOTÍCIAS. Comunidades tradicionais de fundo e fecho de pasto lutam contra instalação de complexo eólico. <https://mapadeconflitos.ensp.fiocruz.br/conflito/comunidades-tradicionais-de-fundo-e-fecho-de-pasto-lutam-contra-instalacao-de-complexo-eolico/>. Acesso em: 12 de out. 2024.

MASANET, E. Life-Cycle Assessment of Electric Power Systems, *Annu. Rev. Environ. Resour.* pp. 7–36, 2013, doi: 10.1146/annurev-environ-010710-100408.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil**: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida.

Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MOHAMMADI, F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 145, p. 1870-1882, 2020.

MOREIRA, R. N. *et al.* Sustentabilidade e energia eólica: percepções comunitárias no interior do Ceará – Brasil. **Colóquio: Revista do Desenvolvimento Regional**, Taquara, v. 14, n. 1, p. 79-97, jul. 2017.

NGUYEN, T. L.; HERMANSEN, J. System expansion for handling co-products in LCA of sugar cane bio-energy systems: GHG consequences of using molasses for ethanol production. **Applied Energy**, [s. l.], v. 89, n. 1, p. 254-261, 2012.

NIAN, V.; LIU, Y.; ZHONG, S. Life cycle cost-benefit analysis of offshore wind energy under the climatic conditions in Southeast Asia: setting the bottom-line for deployment. **Applied Energy**, [s. l.], n. 233-234, p. 1003-1004, 2019.

NOVACANA. A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo). **Novacana**, Curitiba, c2022. Disponível em: www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo. Acesso em: 19 nov. 2022.

OPENLCA. Berlin: GreenDelta, c2022. 1 *software*. Disponível em: www.openlca.org/. Acesso em: 5 out. 2023.

PEHNT, M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 55-71, 2006.

PEREA-MORENO, M. A.; SAMERÓN-MANZANO, E.; PEREA-MORENO, A. J. Biomass as renewable energy: Worldwide research trends. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 3, p. 863, 2019.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. **Plant design and economics for chemical engineers**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 1991. (Chemical Engineering Series).

PIEKARSKI, C.M.; LUZ, L.M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A.C. Métods de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**. UTFPR- Campus Ponta Grossa - Paraná – Brasil, 2012.

PINTO, R. J.; SANTOS, V. M. L. Energia eólica no Brasil: evolução, desafios e perspectivas. **RISUS: Journal on Innovation and Sustainability**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 124-142, mar./maio 2019.

PORTAL SOLAR. Energia eólica: o que é, como funciona, vantagens e desvantagens. **Portal Solar**, São Paulo, c2022. Disponível em: www.portalsolar.com.br/energia-solar-x-energia-eolica-precos.html. Acesso em: 14 nov. 2022.

RAMOS, L. A.; DURANTE, L.; CALLEJAS, I. J. A. Geração de eletricidade abordando o Ciclo de Vida: uma revisão sistemática sob a ótica da sustentabilidade ambiental. **Engineering and Science**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 14-28, 2017.

RAUGEI, M.; LECCISI, E. A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom. **Energy Policy**, [s. l.], v. 90, p. 46-59, 2016.

RULE, B.M.; WORTH, Z. J.; BOYLE, C. A. “Comparison of Life Cycle Carbon Dioxide Emissions and Embodied Energy in Four Renewable Electricity Generation Technologies in New Zealand,” *Environ. Sci. Techonology*, vol. 43, pp. 6406–6413, 172 2009.

RENTIZELAS, A.; GEORGAKELLOS, D. Incorporating life cycle external cost in optimization of the electricity generation mix. **Energy Policy**, [s. l.], v. 65, p 134-149, 2014.

RIBEIRO, F. M.. **Inventário de Ciclo de Vida de geração hidrelétrica no Brasil – Usina de Itaipu: primeira aproximação**. Dissertação (Mestrado em Energia) –

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Doi.org/10.11606/D.86.2004.tde-23082004-123349

RUBIO-RODRÍGUEZ, M. A. *et al.* Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study. **Applied Energy**, [s. l.], v. 107, p. 329-337, 2013.

ŞENGÜLA, H. *et al.* A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 129, p. 478-490, 2016.

SILVEIRA, E. O pouco conhecido impacto negativo da energia eólica no Nordeste. **BBC News Brasil**, São Paulo, 6 out. 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-49858734>. Acesso em 12/02/2024.

SINGH, A.; PANT, D.; OLSEN, S. I. (ed.). **Importance of Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources**. New York: Springer, 2013.

SOLAR BRASIL. Qual a diferença entre energia fotovoltaica e aquecimento solar térmico? **Solar Brasil**, São Paulo, 7 abr. 2020. Disponível em: www.solarbrasil.com.br/blog/qual-a-diferenca-entre-energia-fotovoltaica-e-aquecimento-solar-termico/. Acesso em: 19 nov. 2022.

SOUZA, L. L. P. **Análise do ciclo de vida consequencial da maximização das fontes renováveis em cenários futuros da matriz elétrica no Brasil**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

SPATH, P. L.; MANN, M. K. Biomass Power and Coventional Fossil Systems with and without CO₂ Sequestration - Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics, Contract, vol. 30, no. January, p. 38, 2004, [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/32575.pdf>. Acesso em: 29 out. 2023

STAMFORD, L.; AZAPAGIC, A. Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070. **Energy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 23, p. 194-211, dez. 2014.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Florianópolis, 2006.

TRADENER. Energia gerada pela força das águas é limpa e renovável. **Tradener**, Curitiba, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://tradener.com.br/2021/12/09/energia-gerada-pela-forca-das-aguas-e-limpa-e-renovavel/>. Acesso em: 4 nov. 2022.

TREYER, K.; BAUER, C. Life cycle inventories of electricity generation and power supply in version 3 of the ecoinvent database – part I: electricity generation. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 21, p. 1236-1254, 2016.

TURCONI, R. *et al.* Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: Detailed life cycle assessment of a Danish case study. **Applied Energy**, [s. l.], v. 132, n. 1, p. 66-73, nov. 2014.

VARUN, I. K.; BHAT. I; PRAKASH, R. LCA of renewable energy for electricity generation systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], n. 13, p. 1067-1073, 2009.

VÁZQUEZ-ROWE, I. *et al.* Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? **Applied Energy**, [s. l.], v. 159, p. 108-116, 2015.

WEBMAP EPE. Rio de Janeiro: EPE, c2021. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>. Acesso em: 5 nov. 2022.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources, London, 2011.

YARA BRASIL. Produção mundial de cana-de-açúcar. **Yara Brasil**, [s. /], 2021. Disponível em: www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/producao-mundial-de-cana-de-acucar/. Acesso em: 19 nov. 2022.

APÊNDICE A: INPUTS/OUTPUTS DO PROGRAMA

Inputs/Outputs: Energia hidraulica									
Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncerta...	Avoide...	Provider	Data qu...	Descri...
Air	Resource/unspeci...	1.24000E-5	kg		none				
Basalt	Resource/unspeci...	0.00359	kg		none				
Bauxite	Resource/unspeci...	4.36000E-6	kg		none				
Calcite	Resource/unspeci...	0.48600	kg		none				
Calcite, in ground	Resource/in grou...	0.48600	kg		none				
Clay	Resource/unspeci...	0.08340	kg		none				
Coal, hard, unspecified	Resource/in grou...	54.00000	kg		none				
Copper	Emission to air/lo...	0.00201	kg		none				
Copper	Resource/unspeci...	0.00201	kg		none				
Copper waste	Waste/unspecified	0.00029	kg		none				
Dolomite	Resource/in grou...	0.00970	kg		none				
Dolomite	Resource/unspeci...	0.00097	kg		none				
Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncerta...	Avoide...	Provider	Data qu...	Descri...
Acetaldehyde	Emission to water...	8.09000E-5	kg		none				
Acetic acid	Emission to water...	0.00580	kg		none				
Acetone	Emission to water...	0.00015	kg		none				
Aldehydes, unspecified	Emission to air/hi...	3.40000E-5	kg		none				
Ammonia	Emission to air/u...	2.16000E-7	kg		none				
Ammonia	Emission to water...	5.19000E-8	kg		none				
Ammonia	Emission to water...	4.76000E-6	kg		none				
Benzene	Emission to air/hi...	1.64000E-5	kg		none				
Benzophenone	Emission to air/hi...	2.42000E-9	kg		none				
Butadiene	Emission to air/hi...	1.40000E-7	kg		none				
C.I. Eriochrome black T	Emission to water...	1.47000E-9	kg		none				
C.I. Oxidation base 4	Emission to air/u...	0.00297	kg		none				

FONTE: A autora (2023) - Hidráulica

Inputs/Outputs: Geração de 1MW

Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided w...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Aggregate, natural	Resource/in ground	7.53000E-6	kg		none				
Aggregate, natural	Resource/in ground	0.00842	kg		none				
Aggregate, natural	Resource/in ground	9.10000E-6	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	2.85000E-5	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	2.85000E-5	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	9.10000E-6	kg		none				
Aluminium	Resource/unspecified	7.47000E-5	kg		none				
Aluminium	Resource/unspecified	5.50000E-6	kg		none				
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/lower str...	0.00973	kg		none				
Cellulose, nitrate	Emission to air/high pop...	1.10000E-6	kg		none				
Clay, bentonite	Emission to air/lower str...	9.14000E-6	kg		none				
Clay, bentonite	Emission to water/fossil-	1.00000	kg		none				
Clay, unspecified	Resource/in ground	1.11000E-5	kg		none				
Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Energy, kinetic (in wind), convert...	Resource/in air	1.00000	MWh		none				
Geração de 1MW		1.00000	MWh		none				
Transformation, from dump site...	Resource/land	1.78000E-5	m2		none				
Waste, final, inert	Waste/unspecified	1.65000E-5	kg		none				
Waste, final, inert	Waste/unspecified	1.30000E-6	kg		none				

FONTE: A autora (2023) - Eólica

Inputs/Outputs: Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – saídas/emissões

Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
Coal, 18 MJ per kg	Resource/in ground	23.10000	kg		none				
Metamorphous rock, gra...	Resource/biotic	0.10000	kg		none				
Oxygen	Emission to air/lo...	0.02000	kg		none				
Petroleum naphtha, hea...	Emission to air/hig...	0.50000	kg		none				
Sand, unspecified	Resource/in ground	2.70000	kg		none				
Silicon	Emission to air/hig...	1.00000E-11	kg		none				
Wood, dust	Emission to air/uns...	0.00325	kg		none				
Energy, from coal	Resource/in ground	11.00000	kWh		none				
Coal, brown	Resource/in ground	0.17000	kg		none				
Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
Inventário da fase de ...		1.00000	kg		none				
Aluminum compounds, ...	Emission to air/uns...	1.55000E-6	kg		none				
Antimony	Emission to air/hig...	7.85000E-9	kg		none				
Arsenic	Emission to air/hig...	9.42000E-9	kg		none				
Boron	Emission to air/hig...	2.79000E-7	kg		none				
C.I. Eriochrome black T	Emission to air/hig...	7.85000E-9	kg		none				
Cadmium	Emission to air/hig...	3.14000E-10	kg		none				
Calcium	Emission to air/hig...	7.75000E-7	kg		none				
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/hig...	3.58000	kg		none				
Carbon monoxide, fossil	Emission to air/hig...	0.00138	kg		none				
Chlorine	Emission to air/hig...	7.85000E-8	kg		none				
Cyanide	Emission to air/hig...	6.87000E-6	kg		none				
Fluorine	Emission to air/hig...	3.88000E-8	kg		none				

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

FONTE: A autora (2023) - Fotovoltaica.

Inputs/Outputs: Inventário da fase de extração e fabricação de 1m2 de bolacha de silício: m-Si e p-Si

Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
Acetic acid	Emission to air/hig...	0.07800	kg		none				
Acid gases, unspecified	Emission to air/uns...	0.00540	kg		none				
Acrylic acid	Emission to air/hig...	0.00585	kg		none				
Boron carbide	Emission to air/uns...	1.24000	kg		none				
Copper	Emission to air/hig...	0.01488	kg		none				
Dipropylene glycol	Emission to air/hig...	0.60000	kg		none				
Glass waste	Waste/ecopoints 9...	0.05079	kg		none				
Natural gas leakage	Emission to air/uns...	2.08040E4	kg		none				
Potassium	Emission to air/hig...	1.02000	kg		none				
Silicon	Emission to air/hig...	158.00000	kg		none				
Sodium hydroxide	Emission to air/uns...	0.30000	kg		none				
Steel waste	Waste/ecopoints 9...	1.61000	kg		none				
Steel waste	Waste/unspecified	1.59400	kg		none				

Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
BOD5, Biological Oxyge...	Emission to water/...	0.05900	kg		none				
COD, Chemical Oxygen ...	Emission to water/...	0.01200	kg		none				
Heat, waste	Emission to air/hig...	92.67000	MJ		none				
Inventário da fase de e...		2.00000	m2		none				
Secondary Water	Waste/unspecified	8.00000E-6	kg		none				
Silicon	Emission to air/hig...	0.28000	kg		none				

FONTE: A autora (2023) - Fotovoltaica.

Inputs/Outputs: Inventário para extração de 1 kg de silício eletrônico

Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
Water	Resource/in water	81.40000	kg		none				
Magnesium, in ground	Resource/in ground	1.05000	kg		none				
Polyethylene waste	Waste/unspecified	0.00068	kg		none				
Hydrochlorothiazide	Emission to air/hig...	1.43000	kg		none				
Hydrogen	Emission to air/hig...	0.08970	kg		none				
Tetrafluoroethylene (TFE)	Emission to air/hig...	0.00064	kg		none				
Energy, environmental, ...	Resource/unspecifi...	163.20000	kWh		none				
Energy, waste heat, water	Resource/unspecifi...	174.00000	MJ		none				
Sodium hydroxide	Emission to air/hig...	0.46300	kg		none				
Graphite	Resource/unspecifi...	0.00710	kg		none				

Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Re...	Uncertai...	Avoided...	Provider	Data qu...	Descri...
Inventário para extraç...		1.00000	kg		none				
Plastic waste	Waste/ecopoints 9...	0.00132	kg		none				
Silicon	Resource/unspecifi...	1.07000E-11	kg		none				
Heat, waste	Emission to air/hig...	392.00000	MJ		none				
Chloride	Emission to water/...	0.03600	kg		none				
Copper	Emission to water/...	1.02000E-7	kg		none				
Nitrogen	Emission to water/...	0.00021	kg		none				
Phosphate	Emission to water/...	2.80000E-6	kg		none				
BOD5, Biological Oxyge...	Emission to water/...	0.00020	kg		none				
COD, Chemical Oxygen ...	Emission to water/...	0.00202	kg		none				
Zinc, ion	Emission to water/...	1.96000E-6	kg		none				
Sodium, ion	Emission to water/...	0.03380	kg		none				
Iron, ion	Emission to water/...	5.61000E-6	kg		none				

FONTE: A autora (2023) - Fotovoltaica.

Inputs/Outputs: Geração de 1MW									
Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided w...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Aggregate, natural	Resource/in ground	7.53000E-6	kg		none				
Aggregate, natural	Resource/in ground	0.00842	kg		none				
Aggregate, natural	Resource/in ground	9.10000E-6	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	2.85000E-5	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	2.85000E-5	kg		none				
Aluminium	Emission to air/high pop...	9.10000E-6	kg		none				
Aluminium	Resource/unspecified	7.47000E-5	kg		none				
Aluminium	Resource/unspecified	5.50000E-6	kg		none				
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/lower str...	0.00973	kg		none				
Cellulose, nitrate	Emission to air/high pop...	1.10000E-6	kg		none				
Clay, bentonite	Emission to air/lower str...	9.14000E-6	kg		none				
Clay, bentonite	Emission to water/fossil-	1.00000	kg		none				
Clay, unspecified	Resource/in ground	1.11000E-5	kg		none				
Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Geração de 1MW		1.00000	MWh		none				
Transformation, from dump site...	Resource/land	1.78000E-5	m2		none				
Waste, final, inert	Waste/unspecified	1.65000E-5	kg		none				
Waste, final, inert	Waste/unspecified	1.30000E-6	kg		none				

Fonte: A autora (2023) - Eólica

Inputs/Outputs: ETAPA INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE 1MWh UNIDADE FUNCIONAL									
Inputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided w...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Agricultura		1.00000	MWh		none				
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/unspecifi...	1.00000	kg		none				
Chemicals, unspecified	Emission to air/unspecifi...	0.04060	g		none				
Emissão dos veículos pesados		1.00000	MWh		none				
Limestone	Resource/unspecified	0.0055	kg		none				
Oils, unspecified	Resource/unspecified	0.00007	kg		none				
Produção de 15 l de diesel		1.00000	MWh		none				
Steel waste	Waste/unspecified	0.00038	kg		none				
Sulfuric acid	Emission to air/unspecifi...	1.967	g		none				
Wood ashes	Waste/unspecified	1.00000	kg		none				
Zeolite waste	Waste/unspecified	0.09011	g		none				
Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Descripti...
Carbon dioxide	Emission to air/high pop...	2.27000E-5	kg		none				
Carbon dioxide, fossil	Emission to air/high pop...	0.00017	kg		none				
Carbon dioxide, from soil or bio...	Emission to air/high pop...	0.00017	kg		none				
Energy, from biomass	Resource/unspecified	0.00010	kWh		none				
ETAPA INDUSTRIAL DA PROD...		1.00000	MWh		none				
Ethanol	Emission to air/unspecifi...	0.00044	kg		none				
Ethanol	Emission to water/unspe...	0.00022	kg		none				
Slags	Waste/ecopoints 97, CH	0.00011	kg		none				
Sucrose	Emission to water/unspe...	0.00028	kg		none				

Fonte: A autora (2023) - Biomassa

APÊNDICE B: DADOS DE ENTRADA

Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1MWh		
	Unidade	Quantidade
Rotor		
Carbon steel	kg	1.43E-04
Aluminum	kg	7.47E-05
Plastic	kg	6.80E-06
Copper	kg	4.10E-06
Painting	jkg	2.70E-06
primer	kg	1.24E-04
Intermediate	kg	4.61E-05
Finishing	kg	1.65E-05
Nacele		
Cast iron	kg	1.98E-04
Forged steel	kg	1.43E-04
Stainless steel	kg	8.56E-05
Steel	kg	6.92E-05
Fiberglass	kg	1.98E-05
Copper	kg	1.76E-05
Plastic	kg	1.10E-05
Aluminum	kg	5.50E-06
Electronics	kg	3.30E-06
Oil	kg	3.30E-06
Torre de aço		
Carbon steel	kg	1.87E-05
Aluminum	kg	2.85E-05

Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1MWh		
	Unidade	Quantidade
Plastic	kg	2.20E-05
Copper	kg	1.43E-05
Painting	kg	8.40E-06
primer	kg	2.70E-06
Intermediate	kg	4.40E-06
Finishing	kg	1.30E-06
Torre de concreto		
Concrete	kg	8.42E-03
Solid and inert mineral materials	kg	6.94E-03
Cement	kg	1.30E-03
steel	kg	8.10E-04
Aluminum	kg	2.85E-05
Plastic	kg	2.20E-05
Copper	kg	1.43E-05
Transformador		
electric steel	kg	1.16E-05
Aluminum	kg	9.10E-06
Copper	kg	7.20E-06
Carbon steel	kg	5.40E-06
Paper (cellulose)	kg	1.10E-06
porcelain and painting	kg	1.80E-06
Mineral oil	kg	1.15E-05
Fundação		
Concrete	kg	9.14E-06
aggregate	kg	7.53E-06
cement	kg	0.0000014

Inventário de tecnologia eólica para unidade funcional de 1MWh		
	Unidade	Quantidade
CA-50 steel	kg	2.72E-08

Fonte: A autora (2023)

INVENTÁRIO BIOMASSA		
ETAPA INDUSTRIAL DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE 1MW UNIDADE FUNCIONAL		
Entradas		
Lime	0,0000055	kg
Sulfuric acid	0,001967	g
Other chemical products	0,0000406	g
Industrial equipment (steel)	0,00000038	kg
Lubricant	0,00000007	kg
Zeolite	0,00009011	g
Saídas		
Ethanol (anhydrous)	0,000221	kg
Sugar	0,000279	kg
Electricity	0,0001	khw
vinasse	0,00030659	kg
filter cake mud	0,0000565	kg
ashes	0,0000489	kg
Emissões para o ar		

INVENTÁRIO BIOMASSA		
Boiler biogenic carbon dioxide	0,0001730	kg
Biogenic carbon dioxide from fermentation	0,0000227	kg
distillation ethanol	0,00000044	kg
ETAPA DA AGRICULTURA		
Fluxos de material/energia	Unidade	Quantidade
Uso da terra		
Occupation, arable, non-irrigated	6.61E-08	ha/ano
Transformation, pasture and meadow, extensive	1.06E-08	ha/ano
Transformation, from shrub and sclerophyll	1.32E-11	ha/ano
Transformation, from arable, non-irrigated	2.51E-10	ha/ano
Transformation, to arable, non-irrigated	1.32E-09	ha/ano
Entradas		
Energy, gross calorific value, in biomass	0.000000327	MJ/ano
Urea (as nitrogen)	0.000004496	kg/ha/ano
Simple superphosphate (as P2O5)	0.000001984	kg/ha/ano
Potassium Chloride (as K2O)	0.000003306	kg/ha/ano

INVENTÁRIO BIOMASSA		
Limestone	0.000026448	kg/ha/ano
Plaster	0.000013224	kg/ha/ano
vinasse	0.000006943	kg/ha/ano
Filter cake and ash (dry basis)	0.000076037	kg/ha/ano
Diesel, agricultural operations	0.000009091	kg/ha/ano
harvester, production	0.000000259	kg/ha/ano
tractor, production	0.000000163	kg/ha/ano
Agricultural machinery, general, production	0.000000153	kg/ha/ano
vinasse propagation	0.000006943	kg/ha/ano
glyphosate	1.72E-08	kg/ha/ano
Diuron	6.61E-09	kg/ha/ano
carbofuran	7.93E-09	kg/ha/ano
insecticides	2.64E-09	kg/ha/ano

INVENTÁRIO BIOMASSA		
herbicides	1.79E-08	kg/ha/ano
Other pesticides	6.61E-10	kg/ha/ano
Transport, 7.5-16 ton truck	3.967E-07	tkm/ha/ano
Transport, truck 16-32 ton	0.00002691	tkm/ha/ano
Transport, truck > 32 ton	0.000137925	tkm/ha/ano
Saídas		
sugarcane yield	0.000005495	ton/ha/ano
Emissões para o ar		
Carbon dioxide from diesel combustion	0.000029304	kg/ha/ano
Carbon monoxide from diesel combustion	0.000000124	kg/ha/ano
Nitrogen oxides from diesel combustion	3.45E-08	kg/ha/ano
Diesel combustion particles	1.59E-09	kg/ha/ano

INVENTÁRIO BIOMASSA		
Sulfur dioxide from diesel combustion	4.63E-09	kg/ha/ano
Dinitrogen monoxide from diesel combustion	7.27E-10	kg/ha/ano
Methane from diesel combustion	1.65E-09	kg/ha/ano
Hydrocarbons from diesel combustion	3.31E-08	kg/ha/ano
Nitrogen Fertilizer Dinitrogen Monoxide	9.46E-08	kg/ha/ano
Nitrogen Fertilizer Ammonia	0.00000164	kg/ha/ano
lime carbon dioxide	0.000012609	kg/ha/ano
vinasse dinitrogen monoxide	4.83E-08	kg/ha/ano
Dinitrogen monoxide from filter cake	1.06E-08	kg/ha/ano
Dinitrogen monoxide from unburned garbage	9.46E-09	kg/ha/ano
Dinitrogen monoxide from sugarcane roots	5.75E-08	kg/ha/ano
Carbon dioxide, land use change	-0.00000393	kg/ha/ano
Emissões para a água		
Nitrate for groundwater	0.000000998	kg/ha/ano
Glyphosate for surface water	0.000000258	g/ha/ano
Carbofuran for surface water	0.000000119	g/ha/ano
Diuron for surface water	9.92E-08	g/ha/ano
Fipronil for surface water	3.97E-09	g/ha/ano
Imazapic for surface water	1.39E-08	g/ha/ano
Trinexapac-ethyl for surface water	9.92E-09	g/ha/ano
Hexazinone for surface water	2.64E-09	g/ha/ano
Tebuthiuron for surface water	9.92E-09	g/ha/ano
Emissões para o solo		
glyphosate	1.65E-09	kg/ha/ano
carbofuran	7.93E-10	kg/ha/ano
Diuron	6.61E-10	kg/ha/ano
Emissões para a água		
fipronil	2.64E-10	kg/ha/ano
imazapic	9.26E-10	kg/ha/ano

INVENTÁRIO BIOMASSA		
trinexapac-ethyl	6.61E-09	kg/ha/ano
hexazinone	1.85E-09	kg/ha/ano
Tebuthiuron	6.61E-09	kg/ha/ano

Produção de 15 l de diesel

Emissão	Quantidade	Unidade
Petroleum	1.35E+01	kg
Natural gas	5.74E-01	kg
Water	9.60E-02	kg
Bauxite	4.15E-03	kg
unspecified energy	3.35E+01	MJ
Use of the soil	2.12E+02	mm ²
Emissões para o ar		
CO2	2.52E+00	kg
CO	3.60E-03	kg
CH4 butane	4.94E-04	kg
NH3 ammonia	4.47E-07	kg
Metals	2.64E-06	kg
N2O Nitrous oxide	1.07E-06	kg
Nox oxido nitrico	3.98E-02	kg
Sox Sulfur dioxide	6.94E-04	kg
methyl mercaptan	1.53E-07	kg
H2S hydrogen sulfide	3.20E-05	kg
Volatile organic compound - not methane	1.24E-02	kg
particulate matter	6.33E-05	kg
Oil	3.49E-03	kg
volatile organic compound	4.59E-05	kg
Soot	2.48E-05	kg
Suspended particulate matter	2.67E-03	kg
SO2	1.62E-02	kg
Aldehyde	8.96E-07	kg
CxHy unsaturated aliphatics	6.68E-03	kg
H2 hydrogen	8.79E-05	kg
HCl hydrochloric acid	1.01E-04	kg
Emissões para a água		
Biochemical oxygen demand	1.35E-07	kg
chemical oxygen demand	2.99E-05	kg
Hydrocarbons	5.30E-06	kg
metal ions	5.19E-05	kg
oils and greases	9.44E-05	kg
Total dissolved solids	2.84E-04	kg
Total suspended solids	1.35E-07	kg
Na+ sodium	2.13E-04	kg

INVENTÁRIO BIOMASSA		
Cl-	3.20E-04	kg
Oil		kg
H2		kg
Phenol		kg
Resíduos para o solo		
oily waste	3.66E-03	kg
mineral waste	1.15E-02	kg
Non-inert solid waste	3.49E-05	kg
Slag	1.02E-04	kg

Fonte: A autora (2023)

* As linhas marcadas em vermelho não foram inseridas no programa OpenLCA por não terem no banco do programa

ICV DE ITAIPU CONSOLIDADO				
	Unidade (/MWh)	Total	Construção Usina	Operação Usina (100 anos)
Consumos de recursos minerais				
Water	kg	8.90E+00	7.16E+00	1.74E+00
Air	kg	1.24E-05	7.86E-06	4.55E-06
Sand	kg	4.12E-01	4.12E-01	-
Clay	kg	8.34E-02	8.34E-02	4.15E-07
Basalt	kg	3.59E-03	3.59E-03	-
Bauxite	kg	4.00E-05	3.56E-05	4.36E-06
calcite	kg	4.86E-01	4.70E-01	1.62E-02
Coal	kg	5.40E+01	3.39E-02	2.01E-02
Dolomite	kg	9.69E-04	6.14E-04	3.55E-04
fluorite	kg	6.63E-04	4.20E-04	2.43E-04
Petroleum	kg	1.19E-01	1.04E-01	1.51E-02
natural gas	kg	8.84E-04	4.10E-04	4.74E-04
Gypsum	kg	8.33E-03	8.33E-03	-
Wood	kg	1.44E-01	9.13E-02	5.25E-02
Min. Copper	kg	2.01E-03	5.47E-04	1.46E-03
Min. Iron	kg	1.66E-01	1.05E-01	6.10E-02
Min. Manganese	kg	1.27E-03	8.04E-04	4.65E-04
quartzite	kg	2.54E-03	1.61E-03	9.31E-04
rock salt	kg	1.90E-05	1.69E-05	2.07E-06
steel scrap	kg	6.53E-02	4.14E-02	2.39E-02
copper scrap	kg	2.93E-04	7.99E-05	2.13E-04
Earth	m ³	2.65E-03	2.65E-03	-
Consumo de recursos energéticos				

ICV DE ITAIPU CONSOLIDADO				
Energy (unspec.)	MJ	4.32E-02	3.86E-02	4.73E-03
coal energy	MJ	9.50E-04	8.46E-04	1.04E-04
Natural gas energy	MJ	2.52E-01	2.24E-01	2.75E-02
oil energy	MJ	6.08E-02	5.42E-02	6.63E-03
uranium energy	MJ	9.50E-04	8.46E-04	1.04E-04
Hydro-electric energy	MJ	1.46E+00	1.36E+00	9.61E-02
Emissões atmosféricas				
1,3 Butadiene	kg	1.40E-07	1.28E-07	1.17E-08
Aldehydes	kg	3.40E-05	3.40E-05	-
Ammonia	kg	2.16E-07	1.36E-07	8.06E-08
Benzene	kg	1.64E-05	1.60E-05	4.17E-07
Benzopyrene	kg	2.42E-09	1.52E-09	9.00E-10
Calcium	kg	1.21E-03	7.69E-04	4.45E-04
CH4 methane	kg	1.32E-01	4.50E-04	1.32E-01
Lead	kg	1.65E-11	1.04E-11	6.10E-12
CO carbon monoxide	kg	1.12E-01	7.12E-02	4.08E-02
CO2 carbom dioxide	kg	1.56E+00	4.45E-01	1.12E+00
VOC	kg	2.64E-04	1.77E-04	8.66E-05
VOCs except methane	kg	1.10E-04	9.81E-05	1.21E-05
Ethane	kg	3.70E-05	2.34E-05	1.36E-05
F2 fluorine	kg	7.65E-08	4.80E-08	2.85E-08
FeO óxido de ferro	kg	8.18E-04	5.18E-04	3.00E-04
Fluorethane	kg	2.42E-08	1.52E-08	9.00E-09
Fluoride	kg	1.72E-06	1.10E-06	6.19E-07
Soot	kg	5.84E-05	5.16E-05	6.73E-06
H2 hydrogen	kg	1.83E-04	1.16E-04	6.70E-05
H2S hydrogen sulfide	kg	1.10E-05	6.98E-06	4.07E-06
HC1 hydrochloric acid	kg	4.97E-08	4.42E-08	5.42E-09
Hydrocarbons	kg	3.86E-04	3.43E-04	4.33E-05
Hidroc. Aliphatic	kg	3.45E-05	3.06E-05	3.75E-06
Hidroc. aromatics	kg	3.26E-07	2.05E-07	1.22E-07
Unspec.	kg	1.03E-05	6.47E-06	3.84E-06
particulate matter	kg	1.37E-02	8.78E-03	4.96E-03

ICV DE ITAIPU CONSOLIDADO				
Mercury	kg	8.27E-15	5.22E-15	3.05E-15
Heavy metals	kg	9.50E-08	8.46E-08	1.04E-08
methyl mercaptan	kg	1.35E-09	1.20E-09	1.47E-10
N2O Nitrous oxide	kg	5.89E-07	5.77E-07	1.21E-08
NO2 nitrogen dioxide	kg	1.49E-05	1.17E-05	3.20E-06
NOx	kg	2.97E-03	2.70E-03	2.67E-04
Petroleum	kg	1.79E-05	1.60E-05	1.95E-06
PM10	kg	4.01E-04	4.01E-04	7.62E-07
Dust (SPM)	kg	1.07E-02	1.04E-02	3.59E-04
SO2 sulfur dioxide	kg	3.49E-03	1.85E-03	1.64E-03
Sox sulfur oxide	kg	2.70E-04	2.53E-04	1.76E-05
Toluene	kg	1.05E-07	6.57E-08	3.90E-08
Xylene	kg	1.13E-07	7.07E-08	4.20E-08
Efluentes líquidos				
B.C. Acetic Acetic Acid	kg	5.80E-03	3.68E-03	2.13E-03
acetaldehyde	kg	8.09E-05	5.12E-05	2.96E-05
Acetone	kg	1.50E-04	9.52E-05	5.51E-05
Acid (H+)	kg	2.85E-06	2.54E-06	3.11E-07
Tar	kg	1.39E-02	8.79E-03	5.08E-03
Ammonia	kg	5.19E-08	3.29E-08	1.90E-08
Lead	kg	4.03E-09	2.53E-09	1.50E-09
Cyanide	kg	3.18E-07	2.02E-07	1.17E-07
C1-anomeric carbon	kg	3.75E-06	3.34E-06	4.09E-07
Copper	kg	1.21E-09	7.58E-10	4.50E-10
Chrome 3+	kg	1.47E-09	9.32E-10	5.39E-10
COD Chemical Oxygen Demand	kg	2.46E-07	2.19E-07	2.68E-08
Phenol	kg	5.37E-07	3.41E-07	1.95E-07
Iron	kg	5.38E-06	3.41E-06	1.97E-06
Fluoride	kg	2.23E-06	1.41E-06	8.16E-07
H2 hydrogen gas	kg	1.54E-07	1.37E-07	1.68E-08
Hydrocarbons	kg	5.36E-08	3.40E-08	1.97E-08
hexane	kg	2.10E-06	1.82E-06	2.82E-07
general inorganics	kg	6.36E-03	1.73E-03	4.63E-03
metal ions	kg	5.00E-07	4.45E-07	5.45E-08
Manganese	kg	1.15E-07	7.28E-08	4.21E-08
Mercury	kg	2.42E-10	1.52E-10	9.00E-11
Methanol	kg	2.10E-03	1.33E-03	7.71E-04

ICV DE ITAIPU CONSOLIDADO				
methyl acetate	kg	1.85E-04	1.17E-04	6.78E-05
n total nitrogen	kg	4.03E-08	2.53E-08	1.50E-08
NH3 ammonia	kg	4.76E-06	3.02E-06	1.75E-06
Nitrate	kg	4.75E-06	3.01E-06	1.74E-06
Oil	kg	1.34E-05	8.67E-06	4.69E-06
Organic dissolved	kg	1.90E-06	1.69E-06	2.07E-07
PAH aromatic polycyclic hydrocarbons	kg	4.03E-10	2.53E-10	1.50E-10
Petroleum	kg	2.22E-06	1.98E-06	2.43E-07
Sodium	kg	1.88E-06	1.67E-06	2.05E-07
Sun. dissolved	kg	6.30E-06	3.99E-06	2.31E-06
suspended solids	kg	1.92E-05	1.21E-05	7.03E-06
Subst. dissolved	kg	9.50E-07	8.46E-07	1.04E-07
Subst. Suspended	kg	6.65E-06	5.93E-06	7.26E-07
Sulfite	kg	3.56E-07	2.25E-07	1.30E-07
Zinc	kg	1.78E-05	1.13E-05	6.53E-06
Resíduos sólidos				
Slag	kg	4.97E-08	4.42E-08	5.42E-09
Sludge	kg	2.12E-03	1.34E-03	7.76E-04
steelworks waste	kg	5.65E-03	3.58E-03	2.07E-03
inorganic waste	kg	3.02E-01	8.24E-02	2.20E-01
mineral residue	kg	5.46E-06	4.87E-06	5.96E-07
non-inert waste	kg	1.43E-04	1.27E-04	1.56E-05
Solid waste	kg	5.99E-05	5.79E-05	1.99E-06
Heat loss (air)	kg	1.24E-02	9.44E-03	2.91E-03
Heat loss (water)	kg	6.35E-02	4.85E-02	1.50E-02
Use of the soil	kg	1.52E-01	6.64E-04	1.52E-01

Fonte: A autora (2023)

INVENTARIO FOTOVOLTAICA				
Inventário da fase de extração e fabricação de 1m ² de bolacha de silício: m-Si e p-Si				
Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Soma
m-si	m ²	1	-	1
p-si	m ²	-	1	1
Electricity	kWh	2.57E+01	2.08E+04	20825.7
Natural gas	MJ	4.00E+00	2.08E+04	20804
Water	kg	6.00E-03	1.64E+02	164.006
Deionized water	kg	1.80E+01	-	18
fused P-Si	kg	-	1.02E+00	1.02
m-Si CZ	kg	1,58+E00	-	0
silicon carbide	kg	6.20E-01	6.20E-01	1.24
recycled silicon carbide	kg	1.41E+00	1.41E+00	2.82
flat glass	kg	9.99E-03	4.08E-02	0.05079
sodium hydroxide	kg	1.50E-02	1.50E-02	0.03
Hydrochloric Acid	kg	2.70E-03	2.70E-03	0.0054
Acetic Acid	kg	3.90E-02	3.90E-02	0.078
triethylene glycol	kg	2.18E-01	2.18E-01	0.436
Recycled Triethylene Glycol	kg	1.95E+00	1.95E+00	3.9
Dipropylene glycol monomethyl ether	kg	3.00E-01	3.00E-01	0.6
Alkylbenzene Sulfonate	kg	3.00E-01	2.40E-01	0.54
acrylic binder	kg	2.00E-03	3.85E-03	0.00585

INVENTARIO FOTOVOLTAICA				
Brass	kg	7.44E-03	7.44E-03	0.01488
Steel	kg	7.97E-01	7.97E-01	1.594
soul of steel	kg	8.05E-01	8.05E-01	1.61
Waste	Unidade	Quantidade	Quantidade	Fonte
		m-Si	p-Si	
silicon waste	kg	1.10E-01	1.70E-01	0.28
water factor	un	4.00E-06	4.00E-06	0.000008
emissions to air	Unidade	Quantidade	Quantidade	Fonte
		m-Si	p-Si	
Heat	MJ	9.25E+01	1.70E-01	92.67
emissions to air	Unidade	Quantidade	Quantidade	Fonte
		m-Si	p-Si	
BOD	kg	2.95E-02	2.95E-02	0.059
COD	kg	2.95E-02	2.95E-02	0.059
COD	kg	1.11E-02	1.11E-02	0.0222
OCD	kg	1.11E-02	1.11E-02	0.0222
Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de m-Si e p-Si				
Entradas	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	fonte
m-si	kg	1	-	1
p-si	kg	-	1	1
Electricity	kWh	6.82E+01	1.55E+01	83.7
Natural gas	MJ	5.82E+01	-	58.2
cooling water	M ³	5.09E+00	-	5.09
Water	kg	9.41E+01	9.43E-01	95.043
Deionized water	kg	4.01E+00	-	4.01
Silicon production mix	kg	7.81E-01	7.00E-01	1.481
argon	kg	1.00E+00	2.52E-01	1.252
Helium	kg	-	7.76E-05	0.0000776
HF	kg	1.00E-02	-	0.01
Nitric acid	kg	6.68E-02	-	0.0668
sodium hydroxide	kg	4.15E-02	5.00E-03	0.0465
Liquid nitrogen	kg	-	3.04E-02	0.0304
ceramic tiles	kg	1.67E-01	2.14E-01	0.381

INVENTARIO FOTOVOLTAICA				
hydrated lime	kg	2.22E-02	-	0.0222
silicon plant	un	1.00E-11	1.00E-11	2E-11
Waste	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Fonte
si wafer	kg	1.67E-01	-	0.167
Emissions to ar	Unidade	Quantidade m-Si	Quantidade p-Si	Fonte
Heat	MJ	2.46E+02	5.58E+01	301.8
Hydroxide	kg	3.76E-01	-	0.376
BOD	kg	1.30E-01	-	0.13
COD	kg	1.30E-01	-	0.13
COD	kg	4.05E-02	-	0.0405
OCD	kg	4.05E-02	-	0.0405
NOx	kg	3.39E-02	-	0.0339
Nitrate	kg	8.35E-02	-	0.0835
Inventário da fase de extração e fabricação de 1 kg de silício metalúrgico (mg-Si) – saídas/emissões				
Saída/emissões	Unidade	Quantidade	Fonte	
Heat	MJ	7.13E+01	Simapro 8.0.3.14	
Arsenic	kg	9.42E-09	Simapro 8.0.3.14	
Aluminum	kg	1.55E-06	Simapro 8.0.3.14	
Antimony	kg	7.85E-09	Simapro 8.0.3.14	
Boron	kg	2.79E-07	Simapro 8.0.3.14	
Cadmium	kg	3.14E-10	Simapro 8.0.3.14	
Calcium	kg	7.75E-07	Simapro 8.0.3.14	
non-fossil CO	kg	6.20E-04	Simapro 8.0.3.14	
CO fossil	kg	1.38E-03	Simapro 8.0.3.14	
non-fossil CO2	kg	1.61E+00	Simapro 8.0.3.14	
fossil CO2	kg	3.58E+00	Simapro 8.0.3.14	
Chrome	kg	7.85E-09	Simapro 8.0.3.14	
chlorine	kg	7.85E-08	Simapro 8.0.3.14	
Cyanide	kg	6.87E-06	Simapro 8.0.3.14	
Fluorine	kg	3.88E-08	Simapro 8.0.3.14	
H2S	kg	5.00E-04	Simapro 8.0.3.14	
HF	kg	5.00E-04	Simapro 8.0.3.14	
Iron	kg	3.88E-06	Simapro 8.0.3.14	
Lead	kg	3.44E-07	Simapro 8.0.3.14	
Mercury	kg	7.85E-09	Simapro 8.0.3.14	
NMVOC	kg	9.65E-05	Simapro 8.0.3.14	
NOx	kg	9.74E-03	Simapro 8.0.3.14	
Particles>10mm	kg	7.75E-03	Simapro 8.0.3.14	
Potassium	kg	6.20E-05	Simapro 8.0.3.14	
Silicone	kg	7.51E-03	Simapro 8.0.3.14	

INVENTARIO FOTOVOLTAICA			
Sodium	kg	7.75E-07	Simapro 8.0.3.14
SO2	kg	1.22E-02	Simapro 8.0.3.14
Tin	kg	7.85E-09	Simapro 8.0.3.14

Fonte: A autora (2023)

* As linhas marcadas em vermelho não foram inseridas no programa OpenLCA por não terem no banco do programa.