UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ORLANDO MARCOS QUADRO CARDOSO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UMA USINA TERMELÉTRICA A CASCA DE ARROZ: PEGADA CARBONO E VALORIZAÇÃO DA CINZA NA PRODUÇÃO DE VIDRO

Caçapava do Sul

2025

ORLANDO MARCOS QUADRO CARDOSO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UMA USINA TERMELÉTRICA A CASCA DE ARROZ: PEGADA CARBONO E VALORIZAÇÃO DA CINZA NA PRODUÇÃO DE VIDRO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Mateus Guimarães da Silva

Caçapava do Sul

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C268a Cardoso, Orlando Marcos Quadro
AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UMA USINA TERMELÉTRICA A CASCA DE ARROZ: PEGADA CARBONO E VALORIZAÇÃO DA CINZA NA PRODUÇÃO DE VIDRO / Orlando Marcos Quadro Cardoso.
116 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2025.
"Orientação: Mateus Guimarães da Silva".

1. Gestão Ambiental. 2. Avaliação de Ciclo de Vida. 3. Geração de Energia. 4. Biomassa. I. Título.

ORLANDO MARCOS QUADRO CARDOSO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UMA USINA TERMELÉTRICA A CASCA DE ARROZ: PEGADA CARBONO E VALORIZAÇÃO DA CINZA NA PRODUÇÃO DE VIDRO

Dissertação apresentada ao Programa de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Dissertação defendida e aprovada em: 18 de novembro de 2025.

Banca examinadora:

_____

Prof. Dr. Mateus Guimarães da Silva

Orientador

UFRN

_____

Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich

UFSM

_____

Profa.Dra. Jessica Weiler

UNIPAMPA

SISBI/Folha de Aprovação Orlando (1932849) SEI 23100.017783/2025-02 / pg. 1

Assinado eletronicamente por **PEDRO DANIEL DA CUNHA KEMERICH**, **Usuário Externo**, em 18/12/2025, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **JESSICA WEILER**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **MATEUS GUIMARAES DA SILVA**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/01/2026, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1932849** e o código CRC **733D788F**.

AGRADECIMENTO

A Deus, por me fortalecer nos momentos de dúvida e por iluminar meu caminho até aqui.

À minha avó Oralvina e às minhas tias Vanda, Selma e Elza, por todo o apoio, pelos conselhos que me acompanharam durante esta trajetória e pela base sólida que sempre me deram. Sou profundamente grato pela força e pelo carinho constantes.

À minha esposa Andresa e ao meu filho Miguel, meus maiores motivos para continuar evoluindo. Obrigado pela compreensão nas ausências, pela paciência nos dias difíceis e por serem meu porto seguro. Esta conquista também é de vocês.

Ao meu orientador professor Mateus, pela orientação atenta, pela confiança depositada e por cada contribuição que elevou a qualidade deste trabalho. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais para que eu chegasse até o fim deste percurso.

Agradeço também à empresa Sepé Geração de Energia Ltda., onde atuo, pela oportunidade de conciliar minhas responsabilidades profissionais com as aulas e atividades da pós-graduação. Sou especialmente grato pela autorização para utilizar os dados do processo, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

“*Intentions are everything, intentions will set you free. Just try to be...”.*

Twenty One Pilots, Intentions.

RESUMO

Esta dissertação avalia o desempenho ambiental da geração de energia elétrica a partir da casca de arroz e o aproveitamento da cinza da casca de arroz (CCA) resultante na produção de vidro soda-cal, utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) conforme as normas ISO 14040 e 14044. O estudo baseou-se em dados primários da Usina Termelétrica São Sepé (RS) e secundários do banco Ecoinvent, modelados no software OpenLCA, com fronteira “do berço ao portão”. A análise da usina indicou uma pegada de carbono de 0,036 kg CO_2 eq/kWh, valor significativamente inferior ao de termelétricas a combustíveis fósseis e dentro da faixa observada em estudos internacionais sobre biomassa. O transporte da casca representou a principal fonte de emissões (81%), seguido pela destinação da cinza (10%). O uso local da biomassa e a valorização da cinza foram identificados como estratégias eficazes para redução dos impactos. Na segunda etapa, a CCA foi testada como substituto da areia na formulação de vidro soda-cal. Os resultados mostraram redução de até 90% nas emissões de CO_2 (de 25,0 para 2,3 kg CO_2 eq/kg de vidro) e diminuição de 92% na escassez de recursos fósseis. As categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade também apresentaram reduções expressivas, confirmadas por simulação de Monte Carlo. De modo geral, a substituição da areia pela CCA melhora o desempenho ambiental do vidro sem comprometer suas propriedades técnicas, integrando os setores energético e industrial em um modelo de bioeconomia circular. Conclui-se que a geração elétrica com casca de arroz e o aproveitamento da CCA representam soluções sustentáveis e economicamente viáveis, capazes de reduzir emissões, valorizar resíduos agroindustriais e contribuir para a transição energética de baixo carbono no Brasil.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais; Biomassa; Geração de energia; Desempenho Ambiental; Economia circular.

ABSTRACT

This dissertation assesses the environmental performance of electricity generation from rice husk and the utilization of the resulting rice husk ash (RHA) in soda-lime glass production, using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in accordance with ISO 14040 and 14044 standards. The study was based on primary data from the São Sepé Thermoelectric Power Plant (RS, Brazil) and secondary data from the Ecoinvent database, modeled with OpenLCA software under a “cradle-to-gate” system boundary. The analysis indicated a carbon footprint of 0.036 kg CO_2 eq/kWh, significantly lower than fossil-fuel-based thermoelectric plants and within the range reported in international biomass studies. Rice husk transportation was identified as the main emission source (81%), followed by ash disposal (10%). Local biomass use and ash valorization were shown to be effective strategies for impact reduction. In the second stage, RHA was tested as a substitute for silica sand in soda-lime glass formulations. Results showed up to 90% reduction in CO_2 emissions (from 25.0 to 2.3 kg CO_2 eq/kg of glass) and a 92% decrease in fossil resource scarcity. Human toxicity and ecotoxicity categories also showed significant reductions, confirmed by Monte Carlo simulation. Overall, replacing silica sand with RHA improved the environmental performance of glass production without compromising technical properties, integrating the energy and industrial sectors within a circular bioeconomy model. It is concluded that electricity generation from rice husk and the reuse of RHA are sustainable and economically viable solutions capable of reducing emissions, adding value to agro-industrial residues, and contributing to Brazil’s low-carbon energy transition.

Keywords: Agro-industrial waste; Biomass; Energy generation; Environmental performance; Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Usina Termelétrica São Sepé. 27
Figura 2 - Cinza de casca de arroz extraída de uma caldeira com grelha rotativa. ... 32
Figura 3 - Comparação visual entre o vidro produzido com CCA e o vidro convencional. 34
Figura 4 - Mapa de localização da Usina Termelétrica e Empresas Beneficiadoras de Arroz. 37
Figura 5 - Ciclo da geração de energia na Usina Termelétrica São Sepé. 38
Figura 6 - Rampa de aquecimento da mufla. 51
Figura 7 - Fluxograma das etapas e fronteiras do sistema. 54
Figura 8 - Fluxograma das etapas e fronteira do sistema da produção de vidro soda-cal utilizando CCA. 57
Figura 9 - Comparativo de contribuições para emissão de GEE's. 66
Figura 10 - Comparação entre as emissões em diferentes tecnologias de geração de energia. 68
Figura 11 - Gráfico comparativo das emissões da geração de energia entre variedades de biomassa. 69
Figura 12 - Comparação da Pegada de Carbono na Geração de Eletricidade a partir da Casca de Arroz segundo Diferentes Estudos de ACV. 70
Figura 13 - Comparação das contribuições dos inputs da produção de vidro soda-cal com CCA em cada categoria de impacto. 77
Figura 14 - Comparação das contribuições dos inputs da produção de vidro soda-cal convencional em cada categoria de impacto. 78
Figura 15 - Gráfico comparativo entre os cenários com dados normalizados. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química da casca de arroz. 21
Tabela 2- Poder calorífico da casca de arroz de acordo com a literatura. 22
Tabela 3- Empreendimentos de geração de energia a base de biomassa de casca de arroz. 26
Tabela 4 - Inventário de entradas (inputs) no cultivo e beneficiamento de arroz. 39
Tabela 5- Parâmetros de Controle de Recebimento de Biomassa. 42
Tabela 6 - Características do combustível (casca de arroz). 44
Tabela 7 - Emissões de gases do processo de queima de biomassa na caldeira. 44
Tabela 8 - Dados diários de geração de resíduos de cinza da casca de arroz. 48
Tabela 9 - Materiais utilizados na produção de vidro soda-cal. 50
Tabela 10 - Inventário de insumos químicos utilizados nos tratamentos de água e efluentes da usina termelétrica. 61
Tabela 11 - Inventário de insumos energéticos considerando as principais unidades e equipamentos da termelétrica. 62
Tabela 12 - Inventário de transportes relacionados ao transporte de biomassa e cinzas da termelétrica. 63
Tabela 13 - Levantamento econômico dos produtos do ciclo de vida. 64
Tabela 14 - Pegada carbono do ciclo de vida da geração de energia a partir de casca de arroz. 65
Tabela 15 - Inventário da Geração de CCA e energia elétrica na Usina Termelétrica São Sepé 73
Tabela 16 - Inventário da produção de Vidro Soda-Cal com CCA. 74
Tabela 17 - Inventário da produção de vidro soda-cal convencional. 74
Tabela 18 - Levantamento econômico dos produtos do ciclo de vida. 76

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
AR6	Sixth Assessment Report
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCS	Carbon Capture and Storage
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CFB	Circulating Fluidized Bed
CHP	Combined Heat and Power
COP	Conference of the Parties
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
ETA	Estação de Tratamento de Água
FEU	Freshwater Eutrophication
FET	Freshwater Ecotoxicity
FRS	Fossil Resource Scarcity
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
HCT	Human Carcinogenic Toxicity
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISSO	International Organization for Standardization
MET	Marine Ecotoxicity

NBR	Norma Brasileira
ND	Não Detectado
NDS	Nationally Determined Contributions
OFT	Ozone Formation, Territorial Ecosystems
OFH	Ozone Formation, Human Health
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PC	Pulverized Coal
PCS	Poder Calorífico Superior
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
RIVM	National Institute for Public Health and the Environment
SIN	Sistema Interligado Nacional
TAC	Terrestrial Acidification
TET	Territorial Ecotoxicity
UF	Unidade Funcional
UTE	Usina Termelétrica

SUMÁRIO

RESUMO....7
ABSTRACT....8
LISTA DE FIGURAS....9
LISTA DE TABELAS....10
LISTA DE SIGLAS....11
1. INTRODUÇÃO....15
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA....19
2.1. Casca de Arroz como Fonte Energética....19
2.1.1. Importância Econômica e Produtiva do Arroz....19
2.1.2. Características Físico-Químicas e Poder Calorífico da Casca....20
2.1.3. Processos Tecnológicos de Conversão da Casca de Arroz....22
2.1.4. Combustão Direta da Biomassa....22
2.2. Estudos de Caso de Usinas Termelétricas a Casca de Arroz....24
2.3. Energia Renovável, Emissões e Mudanças Climáticas....27
2.3.1. O papel do Setor Energético no Aquecimento Global....27
2.3.2. Tecnologias Renováveis e Redução de Emissões....28
2.3.3. Políticas Globais de Mitigação e Transição Energética....28
2.3.4. O Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 29
2.3.5. Desafios e Tendências para o Futuro Energético Sustentável....30
2.4. Aplicações Industriais da Cinza da Casca de Arroz....30
2.4.1. Produção de Vidro a Partir da Cinza da Casca de Arroz....32
2.5. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)....34
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO....36
3.1.1. Localização....36
3.2. Descrição do Sistema, Inventário e Dados Coletados....37
3.2.1. Cultivo de Arroz e Beneficiamento....38
3.2.2. Transporte da Casca de Arroz....40
3.2.3. Usina Termelétrica....40
3.2.4. Classificação da biomassa....41
3.2.5. Armazenamento da Biomassa....41
3.2.6. Alimentação da Caldeira....42
3.2.7. Queima na Caldeira....42
3.2.8. Sistemas de Tratamento de Água e Efluentes....45
3.2.9. Tratamento da Água da Caldeira....46
3.2.10. Sistema de Resfriamento de Vapor....46

3.2.11. Produtos Químicos 47
3.2.12. Transporte e destinação final da cinza 47
3.2.13. Consumo interno de energia elétrica 48
3.3. Fabricação Experimental do Vidro com CCA 49
4. METODOLOGIA 52
4.1. Materiais e Métodos para Avaliação do Ciclo de Vida da Usina a Casca de Arroz 52
4.1.1. Unidade Funcional e Fronteiras do Sistema 52
4.1.2. Avaliação de Impactos 55
4.1.3. Alocação de Impactos Ambientais 55
4.2. Avaliação do Ciclo de Vida do Vidro Produzido a Partir da CCA 55
4.2.1. Unidade Funcional e Fronteira do Sistema 56
4.2.2. Avaliação de Impactos Ambientais 58
4.2.3. Alocação de Impactos Ambientais 59
4.2.4. Descrição do Sistema, Inventário e Dados Coletados 59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 60
5.1. Resultado da Avaliação do Ciclo de Vida da Usina a Casca de Arroz 60
5.1.1. Inventário de Insumos Químicos 60
5.1.2. Inventário de insumos energéticos 61
5.1.3. Inventário de Transporte de Insumos e Resíduos 63
5.1.4. Alocação de impactos ambientais 63
5.1.5. Emissões de GEE do ciclo de vida 64
5.1.6. Comparação das Emissões de GEE's com Outros Combustíveis 68
5.2. Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do Vidro Produzido Pela Cinza da Casca de Arroz 72
5.2.1. Inventário de dados 72
5.2.2. Alocação de Impactos 75
5.2.3. Resultados do Cenário de Produção de Vidro Soda-cal com CCA 76
5.2.4. Resultados do Cenário de Produção de Vidro Soda-cal Convencional 78
5.2.5. Comparação entre os Cenários 79
5.2.6. Simulação de Monte Carlo 81
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 83
7. REFERÊNCIAS 85

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a intensificação das atividades produtivas têm ampliado a pressão sobre os recursos naturais, resultando em elevados níveis de extração mineral e geração de resíduos em escala global. Esse cenário tem despertado crescentes preocupações quanto à sustentabilidade dos sistemas produtivos e à necessidade de transição para modelos alinhados aos princípios da economia circular (GEISSDOERFER et al., 2017; KIRCHHERR et al., 2018). A exploração intensiva de matérias-primas não renováveis, aliada ao aumento da quantidade de resíduos sólidos industriais e agroindustriais, impõe desafios significativos à gestão ambiental, tanto pela escassez de insumos quanto pelos impactos associados ao descarte inadequado (UNEP, 2020). Nesse contexto, a busca por alternativas que conciliem eficiência produtiva e redução de impactos ambientais tem direcionado a atenção para o aproveitamento de resíduos agroindustriais abundantes no Brasil, entre os quais se destaca a casca de arroz, cuja produção acompanha a expressiva representatividade do cereal no cenário agrícola nacional.

Assim como a gestão de resíduos agroindustriais, o setor de energia elétrica também enfrenta alguns desafios. O Brasil é líder mundial na geração de energias renováveis convencionais, com as plantas hidrelétricas sendo responsáveis por mais da metade da produção elétrica do país, cerca de 51,97% (ANEEL, 2025). Embora as hidrelétricas representem uma fonte de geração elétrica com reduzidas emissões de gases de efeito estufa, a recorrência e a intensidade das secas nos últimos anos evidenciam a vulnerabilidade do setor elétrico brasileiro diante de sua elevada dependência da matriz hidroenergética. (BONDARIK et al., 2018). Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de diversificar a matriz energética, incorporando outras fontes de energia renováveis.

A geração de energia elétrica a partir da biomassa tem se destacado como uma alternativa com grande potencial de crescimento. No Brasil, há uma grande oferta de biomassa para a produção energética, devido às produções agrícolas, agroindustriais e silviculturais (SANTOS et al., 2017). Os tipos de biomassa mais utilizados para geração de energia incluem lenha, carvão vegetal, resíduos de madeira, lixívia negra de origem florestal, palha e bagaço de cana de açúcar, palha e casca de arroz, capim-

elefante, palha de milho e soja, além de resíduos urbanos e industriais (REZENDE, 2018).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a cultura do arroz é cultivada em quase todo o território brasileiro, sendo a maior produção concentrada em cinco estados: Rio Grande do Sul (67,6%), Santa Catarina (10,8%), Tocantins (7,1%), Mato Grosso (3,2%) e Maranhão (1,8%) (MAPA, 2024). No Rio Grande do Sul, o beneficiamento do arroz, que inclui a secagem, descascamento e embalagem, é realizado em engenhos próximos aos campos de cultivo (MURARO et al., 2018). Durante esse processo, é gerada a casca do arroz, que representa cerca de 20% do peso total do grão. Apresentando baixo valor nutritivo e elevado teor de sílica, a casca de arroz não se mostra adequada para o consumo animal (CHUNGSANGUNSIT et al., 2010; ALMEIDA, 2010), tampouco para aplicação direta no solo como insumo agrícola. Embora seja gerada em grandes volumes, seu uso como fertilizante é limitado em razão da alta concentração de sílica e da estrutura lignocelulósica resistente, que dificulta sua decomposição natural (SATBAEV et al., 2021). Tradicionalmente, parte desse resíduo é aproveitada como combustível para secagem dos grãos; entretanto, se for disposto de forma incorreta, como muitas vezes ocorre por meio da queima a céu aberto ou da decomposição lenta no ambiente, práticas que resultam na emissão de gases de efeito estufa e na contaminação de corpos hídricos, contribuindo para processos de eutrofização (TAM & LINH, 2023).

Apesar dessas limitações, a casca de arroz apresenta poder calorífico superior de 15,97 MJ/kg (JAGNADE & PANWAR, 2024), caracterizando-se como fonte renovável de energia com potencial de aproveitamento. Nesse contexto, foi implantada em 2018 a Usina Termelétrica São Sepé, no Rio Grande do Sul, com capacidade instalada de 8 MW, destinada à geração de energia elétrica a partir da biomassa da casca. Atualmente, cerca de 15 usinas termelétricas operam no Brasil utilizando esse resíduo como combustível, totalizando 59,46 MWh de potência instalada, das quais dez estão localizadas no Rio Grande do Sul, com 50,14 MWh (ANEEL, 2025). No processo de combustão em caldeiras de alta pressão, a biomassa é convertida em energia térmica e posteriormente em energia elétrica, tendo como subproduto a cinza da casca de arroz (CCA), que representa aproximadamente 20% da biomassa utilizada (PIYATHISSA et al., 2023).

Atualmente, a principal destinação da CCA é sua incorporação ao solo agrícola, prática que contribui para reduzir o descarte inadequado, mas envolve custos logísticos elevados e exige adequação legal e técnica. Diante disso, diversas pesquisas têm investigado alternativas de maior valor agregado para o resíduo, como sua aplicação em cimentos e argamassas, como material catalítico e adsorvente, na estabilização de solos, na correção de pH agrícola e na pavimentação (TASHIMA et al., 2011; BEZERRA et al., 2011; ISLABÃO et al., 2014; FREITAS, 2018). Entre essas alternativas, destaca-se a utilização da sílica presente na CCA como substituto parcial da areia na produção de vidro soda-cal, o que possibilita a inserção do resíduo em cadeias industriais de maior valor agregado (GONÇALVES et al., 2020).

O vidro soda-cal é o tipo mais produzido e consumido mundialmente, devido à sua transparência, resistência mecânica e estabilidade química, características que o tornam amplamente aplicável em embalagens, construção civil e indústria automotiva. Contudo, sua produção convencional baseia-se no uso de matérias-primas minerais (principalmente carbonato de sódio, calcário e areia) cuja extração e processamento acarretam impactos ambientais significativos, como emissões atmosféricas, elevado consumo energético e esgotamento de recursos naturais. A mineração de areia, em particular, provoca alterações na morfologia fluvial, degradação da vegetação ripária, assoreamento, erosão de margens, redução da biodiversidade aquática e degradação visual, além de gerar poeira, ruído e conflitos com o uso urbano do solo (COLANGELO, 2023).

Diante desse cenário, a adoção de estratégias compatíveis com os princípios da economia circular tem impulsionado a substituição de matérias-primas convencionais por resíduos agroindustriais e industriais. A CCA, por sua abundância, elevado teor de sílica e subaproveitamento atual, constitui alternativa estratégica para a indústria vidreira (GONÇALVES et al., 2020). Embora diversos estudos tenham demonstrado seu potencial na produção de vidro soda-cal, a maior parte das investigações permanece restrita a experimentos em escala laboratorial (BERKIN, 2008; GONÇALVES et al., 2020; MARÇAL et al., 2025).

Entretanto, os impactos ambientais decorrentes da substituição de matérias-primas tradicionais pela CCA na produção de vidro soda-cal ainda são pouco explorados. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme

estabelecido pela ISO 14040, configura-se como ferramenta metodológica robusta para quantificar e comparar impactos ambientais, identificar pontos críticos e propor melhorias ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até sua disposição final. Diante de todas as vantagens da produção de energia elétrica a partir da queima de casca de arroz, e da escassez de bancos de dados e estudos focados na avaliação da pegada carbono do ciclo de vida dessa atividade no Brasil, é de extrema importância construir um inventário e avaliar o seu desempenho ambiental.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da geração de energia termelétrica a partir da casca de arroz na Usina Termelétrica São Sepé, localizada no município de São Sepé, Rio Grande do Sul, e da produção de vidro obtido com a cinza proveniente da combustão dessa biomassa. Para atingir esse propósito, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos:

(i) desenvolver os inventários de entradas e saídas referentes aos sistemas de geração de energia com casca de arroz na Usina Termelétrica São Sepé e de produção de vidro com cinza da casca de arroz;

(ii) avaliar os impactos ambientais associados aos ciclos de vida de ambos os processos, considerando suas principais etapas e fluxos de matéria e energia;

(iii) comparar os resultados obtidos com os sistemas convencionais de produção de energia e de vidro, de modo a identificar potenciais benefícios ambientais e oportunidades de valorização da biomassa e de seus coprodutos; e

(iv) realizar análise de incerteza dos resultados.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Casca de Arroz como Fonte Energética

2.1.1. Importância Econômica e Produtiva do Arroz

O arroz, juntamente com o trigo, destaca-se entre os cereais mais produzidos e consumidos mundialmente, integrando a base alimentar diária de mais da metade da população global (CONAB, 2015; CARCEA, 2021). Trata-se de um alimento de elevado valor energético, uma vez que sua composição química é predominantemente constituída por carboidratos, especialmente o amido. Estima-se que o arroz responda por cerca de 20% do suprimento energético mundial, enquanto o trigo e o milho contribuem, respectivamente, com 19% e 5% (DOMENE et al., 2021).

No contexto histórico brasileiro, a introdução do arroz remonta ao período das grandes navegações, sendo atribuída à expedição de Pedro Álvares Cabral. Contudo, registros sobre o cultivo efetivo do cereal datam apenas após o ano de 1530. A partir de 1824, a cultura do arroz consolidou-se no cenário agrícola do Rio Grande do Sul, impulsionada pela chegada de imigrantes alemães. Inicialmente, a produção possuía caráter de subsistência, com um pequeno excedente destinado à comercialização. Com o avanço do tempo, os engenhos locais passaram a adotar tecnologias mais aprimoradas para o beneficiamento do arroz colhido na região (PEREIRA, 2002).

Botanicamente, o arroz pertence à família das Poaceae (gramíneas) e ao gênero Oryza, que compreende aproximadamente 20 espécies. No Brasil, a espécie mais amplamente cultivada é a Oryza sativa (CONAB, 2015). Segundo Lopes & Lopes (2008), o grão de arroz, em sua forma bruta, é composto essencialmente pela cariopse, recoberta por uma camada protetora denominada casca. Essa estrutura é formada por duas folhas modificadas (pálea e lema) que envolvem e protegem o grão durante seu desenvolvimento.

Para o consumo humano, o arroz em casca é submetido a um processo de beneficiamento que se inicia com a etapa de descascamento, responsável pela remoção da camada protetora. A casca representa, em média, 20% do peso total do grão. O produto descascado, ainda integral, segue então para as etapas de brunição e polimento, nas quais são retirados o embrião e parte significativa da película externa.

O processo de brunição é complementado pelo polimento, que confere acabamento final ao grão e elimina resíduos de farelo aderidos à sua superfície. O material removido nessas etapas constitui o farelo de arroz, que corresponde a aproximadamente 8% do peso do grão em casca, ou cerca de 10% do arroz descascado (LOPES & LOPES, 2008).

De acordo com projeções recentes da Food and Agriculture Organization (FAO, 2025), a produção mundial de arroz deverá apresentar um crescimento de 0,9% na safra 2025/2026 em relação à safra anterior, alcançando um novo recorde de 549,1 milhões de toneladas. Paralelamente, o consumo global deve aumentar 1,7%, atingindo o mesmo patamar de 549,1 milhões de toneladas.

No cenário nacional, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2024) projeta estabilidade na produção brasileira de arroz para o período de 2024 a 2034, com uma média anual estimada em 10,8 milhões de toneladas. O consumo interno deverá permanecer em torno de 11,0 milhões de toneladas, o que demandará importações aproximadas de 1,7 milhão de toneladas por ano. O estado do Rio Grande do Sul se mantém como o principal produtor do país, respondendo por 7,16 milhões de toneladas em 2024.

2.1.2. Características Físico-Químicas e Poder Calorífico da Casca

Tendo em vista a produção nacional, o Brasil tem potencial de gerar cerca de 2,16 milhões de toneladas de casca de arroz, sendo que só no Rio Grande do Sul pode-se gerar 1,43 milhões de toneladas. De acordo com Lopes et al (2017), a composição da casca de arroz tem como principais componentes orgânicos a celulose (43,5%), hemicelulose (22%) e a lignina (17,2%). Esses valores podem apresentar pequenas variações conforme a safra, clima, condições do solo e localização geográfica. Na Tabela 1, mostra-se a composição elementar.

Tabela 1- Composição química da casca de arroz.

Composto	Composição (% mássica)
C	38,2 – 39,4
O	38,2 – 40,5
H	5,13 – 5,70
N	0,3 – 1,3
Voláteis	68,7 – 73,5
Carbono fixo	12,9 – 16,6
Cinzas	11,8 – 16,5
Sílica nas Cinzas	~98

Fonte: Adaptado de Rocha (2018).

.

De acordo com Radenahmad et al. (2020), a utilização de resíduos de biomassa vegetal como fonte de energia tem se consolidado como uma alternativa promissora. Para que um material seja considerado adequado à geração energética, é essencial realizar sua caracterização química e determinar seu poder calorífico, parâmetro fundamental para avaliar seu potencial energético. A biomassa tem se mostrado cada vez mais relevante na geração de eletricidade, especialmente por meio da gaseificação integrada à cogeração de calor e energia (CHP), uma tecnologia capaz de produzir simultaneamente eletricidade e calor, com maior eficiência e custos reduzidos em comparação às turbinas a gás convencionais. Além disso, a utilização de fontes renováveis em sistemas CHP contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, promovendo benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

O poder calorífico indica a quantidade de energia contida na biomassa e é o primeiro parâmetro considerado ao projetar processos de conversão termoquímica da casca de arroz (SHEN et al., 2012). Segundo Paula et al. (2011), para que um resíduo de biomassa seja considerado um bom gerador de energia, é imprescindível determinar seu valor calorífico. A Tabela 2 apresenta medições de poder calorífico superior (PCS) da casca de arroz reportadas por diferentes autores, permitindo comparações entre os resultados obtidos em distintos estudos.

Tabela 2- Poder calorífico da casca de arroz de acordo com a literatura.

Referência	Poder Calorífico Superior ($MJ.kg^{-1}$)
Jagnade & Panwar (2024)	15,97
Arranz et al. (2021)	18,14
Radenahmad et al. (2020)	15,46
Shen et al. (2012)	15,94
Paula et al. (2011)	15,95
Diniz et al. (2004)	16,35

Fonte: Autor.

2.1.3. Processos Tecnológicos de Conversão da Casca de Arroz

Como visto, a casca de arroz apresenta um poder calorífico relevante, o que a torna um resíduo agrícola com potencial de aproveitamento energético por meio de processos termoquímicos, como a combustão, gaseificação e pirólise. Entretanto, o uso direto desse material é tecnicamente desafiador, devido ao seu elevado teor de cinzas e à predominância de sílica em sua composição. De acordo com Beidaghy Dizaji et al. (2022), o teor de cinzas da casca de arroz situa-se na faixa de 13 a 15% em base seca, sendo a fração inorgânica composta majoritariamente por sílica e potássio. Durante a combustão, ocorrem reações que resultam na formação de silicatos e fosfatos de potássio de baixo ponto de fusão, o que pode levar à fusão parcial das cinzas e, consequentemente, à deposição em superfícies de troca térmica. Essas características exigem o emprego de tecnologias de conversão adequadas e estratégias de mitigação de fusão e deposição para assegurar a eficiência operacional e a durabilidade dos equipamentos.

2.1.4. Combustão Direta da Biomassa

A combustão da biomassa é um dos métodos mais consolidados para geração de energia, consistindo na oxidação completa do material orgânico na presença de oxigênio e na liberação de calor, posteriormente convertido em energia elétrica por meio de caldeiras e sistemas termelétricos (JAHIRUL et al., 2012; ZHANG et al., 2023). Apesar de ser uma tecnologia madura, o uso de resíduos agrícolas, como a casca de

arroz, apresenta desafios operacionais associados à formação de cinzas com alto teor de compostos alcalinos. Durante o processo de queima, ocorre a volatilização de sais de potássio (como KCl e K_2SO_4), que podem condensar em superfícies metálicas, resultando em corrosão a altas temperaturas e incrustações em trocadores de calor (BLOMBERG et al., 2019).

A combustão direta destaca-se pela implementação simples e pelo estágio avançado de desenvolvimento, operando com temperaturas entre 800–1000 °C para produzir vapor e acionar turbinas geradoras de eletricidade. Essa tecnologia é considerada uma alternativa viável em regiões agrícolas com ampla oferta de resíduos e infraestrutura limitada, promovendo o aproveitamento energético sustentável de subprodutos agroindustriais (PEREA-MORENO, 2019; BALOPI et al., 2025).

Entre as tecnologias utilizadas, a grelha rotativa (ou grelha móvel) se sobressai pela robustez e pela capacidade de operar com combustíveis sólidos heterogêneos e com alta umidade. Nesse sistema, a biomassa avança gradualmente sobre uma superfície metálica móvel, passando sequencialmente pelas etapas de secagem, pirólise, combustão e queima do carvão remanescente, o que garante conversão térmica uniforme e controlada (FERREIRA et al., 2024). Estudos demonstram que grelhas móveis oferecem boa estabilidade térmica e reduzida emissão de compostos orgânicos voláteis e material particulado, desde que haja controle adequado do ar primário e secundário. Segundo Yin et al. (2008), trata-se de uma tecnologia consolidada para geração de calor e eletricidade a partir de biomassa, apresentando alta flexibilidade quanto ao tipo e à granulometria do combustível, além de permitir operação contínua com baixos requisitos de manutenção.

Pesquisas recentes também têm empregado modelagem numérica integrada para simular o comportamento da biomassa durante a combustão em grelhas, combinando modelos transientes da camada de combustível com simulações CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) da zona livre. Essa abordagem possibilita compreender as interações entre secagem, pirólise, combustão e formação de gases em caldeiras industriais, contribuindo para o aprimoramento da eficiência e para o controle de emissões (ZHOU et al., 2018). Dessa forma, os sistemas de grelha rotativa representam uma solução tecnicamente madura e aplicável para conversão termoquímica de biomassa em energia elétrica, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de resíduos agroindustriais.

2.2. Estudos de Caso de Usinas Termelétricas a Casca de Arroz

A casca de arroz é reconhecida como um recurso promissor de biomassa para a produção significativa de bioenergia, especialmente por sua abundância em áreas rurais (GOWLLA et al., 2025). Nesse contexto, a geração descentralizada de eletricidade surge como uma solução viável para aproveitar essa biomassa subutilizada, consolidando a casca de arroz como uma fonte eficiente e acessível de combustível para usinas termelétricas em regiões produtoras (RAO et al., 2023). Além disso, a biomassa da casca de arroz apresenta vantagens econômicas e ambientais frente aos combustíveis fósseis, promovendo redução nas emissões líquidas de CO_2, valorização de cadeias produtivas locais e geração de renda em regiões rurais (GOWLLA et al., 2025).

A utilização da casca de arroz como biocombustível tem avançado de forma significativa em países com forte produção agrícola, especialmente em regiões onde a disponibilidade desse resíduo favorece soluções energéticas descentralizadas. No Vietnã, iniciativas apoiadas por mecanismos internacionais de mitigação climática demonstram que usinas movidas à casca de arroz contribuem tanto para o aproveitamento sustentável do resíduo quanto para a geração distribuída de energia, com inserção em programas de créditos de carbono vinculados ao desenvolvimento rural (SONG et al., 2021). Na Tailândia, a consolidação de plantas dedicadas à biomassa, incluindo sistemas em leito fluidizado e empreendimentos habilitados em programas governamentais de cogeração, evidencia um estágio mais maduro de aplicação tecnológica, com estabilidade operacional e integração à matriz elétrica regional (UEASIN et al., 2015; GEC, 2010). De forma semelhante, a Índia tem demonstrado o potencial socioeconômico da tecnologia por meio de sistemas descentralizados capazes de fornecer eletricidade e calor a comunidades rurais, frequentemente adotando configurações híbridas e modelos de negócios comunitários baseados no reaproveitamento da casca de arroz (RAO et al., 2011). No contexto brasileiro, análises de viabilidade técnica e econômica apontam que a utilização da casca como fonte energética pode ser especialmente competitiva em regiões com elevada concentração orizícola, sobretudo no Sul do país, embora a eficiência dos projetos dependa de fatores logísticos e da disponibilidade contínua do resíduo

(COSTA et al., 2018).

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) demonstram que a substituição de combustíveis fósseis pela casca de arroz pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa. No Vietnã, Song et al. (2021) analisaram usinas movidas à casca de arroz registradas no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e verificaram importante redução de emissões associada ao uso do resíduo agroindustrial, destacando benefícios socioambientais e energéticos. Resultados semelhantes foram observados na Malásia, onde Shafie et al. (2012) identificaram potencial expressivo de mitigação climática em sistemas de geração elétrica a partir de casca de arroz, com redução relevante de CO_2eq em comparação com cenários fósseis. De forma consistente, Prasara-A et al. (2009) avaliando alternativas de uso da casca de arroz na Tailândia, concluíram que sua utilização energética apresenta desempenho ambiental superior ao descarte e a opções convencionais baseadas em combustíveis não renováveis. Em conjunto, esses estudos demonstram que a valorização energética da casca de arroz contribui para a descarbonização do setor elétrico em contextos agrícolas. Entretanto, o tratamento e destinação das cinzas provenientes da queima da casca (ricas em sílica) continuam sendo um desafio técnico e ambiental. A literatura destaca o reaproveitamento dessas cinzas como matéria-prima para cimento, vidro e materiais cerâmicos, promovendo a integração entre o setor energético e o industrial e avançando para um modelo de bioenergia circular (CHEN et al., 2022).

Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL, no estado do Rio Grande do Sul, existem 11 usinas termelétricas que utilizam a casca de arroz como combustível, sendo que 10 já estão em operação somando uma potência de 50,14 MWh (ANEEL, 2025). Na Tabela 3 é mostrada a relação de usinas termelétricas do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 3- Empreendimentos de geração de energia a base de biomassa de casca de arroz.

Empreendimento	Cidade	Status	Potência (MWh)
Itaqui	Itaqui - RS	Operação	4,20
Urbano São Gabriel	São Gabriel - RS	Operação	2,22
CAAL	Alegrete - RS	Operação	3,83
SVA	Alegrete - RS	Operação	4,90
São Borja	São Borja - RS	Operação	12,50
Camil Alimentos - Camaquã	Itaqui - RS	Operação	4,00
PCT SLC Alimentos	Capão do Leão - RS	Operação	5,80
Engenho Coradini	Dom Pedrito - RS	Operação	1,20
São Sepé	**São Sepé - RS**	**Operação**	**8,00**
Camil Cambaí	Itaqui - RS	Construção	12,09
Santa Lucia - Blue Ville	Camaquã - RS	Operação	3,50

Fonte: Adaptado de ANEEL (2025).

Na cidade de São Sepé, Rio Grande do Sul, a Usina Termelétrica São Sepé é um projeto voltado à geração de energia a partir da combustão de biomassa da casca de arroz proveniente das indústrias beneficiadoras da região. O projeto foi desenvolvido com o objetivo de promover o aproveitamento energético de resíduos agrícolas e contribuir para a diversificação da matriz elétrica regional. A usina possui potência instalada de 8 MW, capaz de gerar aproximadamente 56 milhões de kWh por ano, energia suficiente para suprir o consumo de mais de 100 mil pessoas. Seu sistema opera em ciclo termodinâmico a vapor, utilizando uma caldeira com grelha móvel para a queima controlada da biomassa e um gerador acoplado a turbina a vapor para conversão em energia elétrica. Inaugurada em 2018, a UTE São Sepé representa um marco no aproveitamento sustentável de resíduos agrícolas no Rio Grande do Sul, reforçando o papel das cooperativas no desenvolvimento de soluções energéticas renováveis (CRERAL, 2025). Na Figura 1 é mostrado uma foto aérea da UTE São Sepé.

Figura 1 - Usina Termelétrica São Sepé.

Fonte: CRERAL (2025).

2.3. Energia Renovável, Emissões e Mudanças Climáticas

2.3.1. O papel do Setor Energético no Aquecimento Global

O setor energético é amplamente reconhecido como um dos principais responsáveis pelas emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), estando diretamente relacionado ao aquecimento global e às mudanças climáticas (IPCC, 2023). A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para geração de eletricidade, calor ou transporte representa a maior parte das emissões de CO_2 associadas ao setor energético (IEA, 2022). De acordo com o relatório de síntese do Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6 – Síntese), a temperatura média global já aumentou cerca de 1,1 °C em relação ao período pré-industrial, e a redução drástica das emissões do setor de energia é essencial para que o aquecimento global se mantenha perto ou abaixo de 1,5 °C (IPCC, 2023). Nesse cenário, a substituição de fontes fósseis por energias renováveis é considerada fundamental para a transição energética e o avanço rumo a uma economia de baixo carbono (IEA, 2022).

2.3.2. Tecnologias Renováveis e Redução de Emissões

As energias renováveis como a solar, eólica, biomassa, hidráulica e geotérmica têm se consolidado como alternativas limpas e sustentáveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor elétrico. De acordo com a International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023), o custo médio de geração solar fotovoltaica caiu substancialmente desde 2010, tornando-a altamente competitiva frente aos combustíveis fósseis. Além disso, a expansão de sistemas híbridos e descentralizados, como micro-redes e cogeração distribuída que melhoram a segurança energética e reduzem a vulnerabilidade das redes elétricas é apontada por Moslem Uddin et al. (2023) como tendência central na transição energética. No Brasil, a matriz elétrica também apresenta forte perfil renovável conforme o estudo de Daniel Féo Castro de Araújo (2023), o país tem adotado políticas que favorecem a diversificação da matriz e a incorporação de fontes renováveis, embora ainda persista o desafio da intermitência das fontes variáveis e da modernização da rede de transmissão.

2.3.3. Políticas Globais de Mitigação e Transição Energética

As políticas globais de mitigação do clima têm enfatizado o papel estratégico do setor energético na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), com base em resultados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e inventários setoriais. Estudos mostram que a geração termoelétrica a carvão sem captura apresenta estimativas de emissões de ciclo de vida na faixa de aproximadamente 675 a 1.689 g CO_2-eq/kWh (mediana $\approx$ 1,001 g CO_2-eq/kWh) resultado da meta-análise de Whitaker et al. (2012). Em contraste, tecnologias renováveis demonstram impactos climáticos muito inferiores: por exemplo, a geração geotérmica apresenta medianas da ordem de $\approx$ 32 g CO_2-eq/kWh (Eberle et al., 2017) e análises harmonizadas da National Renewable Energy Laboratory (NREL) indicam que fontes renováveis apresentam tipicamente entre 400 e 1.000 g CO_2-eq/kWh a menos do que fontes fósseis equivalentes. Outros estudos de revisão apontam faixas mais amplas para solar, eólica, biomassa e hidráulica (Turconi et al., 2013). Nesse cenário, mecanismos regulatórios como a precificação de carbono, a expansão da eletrificação de setores industriais intensivos em energia e o investimento em tecnologias de captura,

utilização e armazenamento de carbono são considerados componentes fundamentais para acelerar a transição energética e alcançar a meta de neutralidade de carbono até meados do século XXI (International Renewable Energy Agency – IRENA, 2023; Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2023).

2.3.4. O Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

No cenário das políticas internacionais de mitigação climática, o Acordo de Paris, adotado em 2015 durante a 21ª Conferência das Partes (COP21), constitui o principal compromisso global para limitar o aquecimento global e enfrentar as mudanças climáticas. Firmado no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o tratado estabelece que os países participantes desenvolvam e atualizem suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), com o objetivo de manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar o aquecimento a 1,5 °C (UNFCCC, 2015).

O Acordo de Paris impulsionou políticas de transição energética, mecanismos de mercado de carbono e investimentos em tecnologias de baixo carbono, destacando o papel de fontes renováveis, infraestrutura elétrica resiliente e eficiência energética para alcançar a neutralidade climática até meados do século XXI (IRENA, 2023).

No contexto brasileiro, a NDC submetida ao acordo estabeleceu o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e em 50% até 2030, em relação aos níveis de 2005, incluindo ações voltadas à expansão das energias renováveis, ao aumento da eficiência energética e ao combate ao desmatamento (UNFCCC, 2022; MMA, 2023).

Essas metas se articulam aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7 – Energia Acessível e Limpa e o ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, que orientam políticas integradas para garantir acesso universal à energia limpa, promover desenvolvimento sustentável e fortalecer a resiliência climática (UNITED NATIONS, 2015). Pesquisas recentes evidenciam que a ampliação das fontes renováveis gera benefícios socioeconômicos associados à criação de empregos, aumento da segurança energética, inovação tecnológica e

inclusão social, reforçando a sinergia entre transição energética e desenvolvimento sustentável (RAMASUBRAMANIAN & RAMAKRISHNA, 2023).

Assim, o avanço da transição energética global depende de políticas integradas, investimentos sustentáveis e cooperação internacional para acelerar a descarbonização dos sistemas produtivos e garantir o cumprimento das metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris.

2.3.5. Desafios e Tendências para o Futuro Energético Sustentável

Apesar dos avanços alcançados nas últimas décadas, persistem desafios estruturais à plena implementação da transição energética global. Entre eles, destacam-se a dependência contínua de combustíveis fósseis em países emergentes, as barreiras regulatórias que dificultam a inserção de novas tecnologias limpas e a escassez de mecanismos eficazes de financiamento climático (IRENA, 2023).

A integração entre políticas energéticas e climáticas, associada ao fortalecimento da governança ambiental e institucional, é considerada essencial para o desenvolvimento de economias resilientes e sustentáveis (UNDP, 2023).

Assim, o setor energético ocupa uma posição estratégica no enfrentamento das mudanças climáticas, constituindo o eixo central das ações globais de mitigação e adaptação.

2.4. Aplicações Industriais da Cinza da Casca de Arroz

A cinza da casca de arroz (CCA) é um subproduto obtido pela queima controlada da biomassa da casca, sendo rica em sílica amorfa (SiO_2) e reconhecida pelo seu elevado potencial industrial. Diversos estudos indicam que a CCA contém entre 85% e 95% de sílica amorfa, dependendo da temperatura e das condições de combustão, o que a torna um insumo de alto valor agregado e de grande interesse tecnológico (HOSSAIN et al., 2018).

Essa composição permite seu aproveitamento em diversos segmentos industriais, como na fabricação de cimento, cerâmicas, vidros e materiais adsorventes, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais e para a redução da

extração de matérias-primas não renováveis. Além disso, o uso da CCA está alinhado aos princípios da economia circular e da produção sustentável, pois valoriza resíduos agrícolas, reduz impactos ambientais e fecha o ciclo produtivo da cadeia do arroz, promovendo a integração entre o setor agroindustrial e o energético (CHEN et al., 2022).

Na indústria da construção civil, a cinza da casca de arroz (CCA) tem se destacado como uma aditiva pozolânica de alta reatividade em materiais cimentícios. Quando incorporada ao cimento Portland ou ao concreto, a sílica amorfa presente na CCA reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação, formando compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) — responsáveis por aumentar a resistência mecânica, melhorar a durabilidade e reduzir a permeabilidade das estruturas (HOSSAIN et al., 2019).

Estudos recentes mostram que substituições parciais do cimento entre 10% e 30% por CCA podem resultar em reduções expressivas das emissões de CO_2, uma vez que diminuem a necessidade de clínquer, contribuindo para uma produção de concreto de baixo carbono (ALMEIDA et al., 2022).

Além disso, a CCA pode ser empregada como agregado fino em argamassas, blocos cerâmicos e compósitos ecológicos, promovendo maior estabilidade dimensional e resistência à penetração de agentes agressivos, o que amplia sua viabilidade técnica e ambiental no setor da construção. Outras aplicações industriais de destaque para a cinza da casca de arroz (CCA) incluem seu uso como matéria-prima para a obtenção de sílica precipitada, zeólitas e vidros técnicos, em razão de sua alta pureza e reatividade (CHEN et al., 2022).

A sílica derivada da cinza da casca de arroz (CCA) tem se destacado como insumo de alto valor agregado em aplicações industriais. Estudos mostram que sua morfologia controlável, elevada pureza e estrutura rica em grupos silanóis favorecem sua utilização como agente reforçador em matrizes elastoméricas e termoplásticas, incluindo compostos de borracha natural e polímeros utilizados na fabricação de pneus (HUANG et al., 2021).

Além disso, pesquisas recentes demonstram o elevado potencial da CCA como adsorvente sustentável para remoção de metais pesados em efluentes aquosos, devido à sua elevada área superficial e estrutura porosa, atuando como alternativa ambientalmente favorável a adsorventes convencionais (YEFREMOVA et al., 2023).

2.4.1. Produção de Vidro a Partir da Cinza da Casca de Arroz

A aplicação da cinza da casca de arroz (CCA) como matéria-prima alternativa na fabricação de vidros tem se consolidado como uma abordagem inovadora voltada à valorização de resíduos agroindustriais e à promoção da sustentabilidade no setor de materiais vítreos. Durante o processo de geração de energia em usinas termelétricas que utilizam a casca de arroz como biomassa, aproximadamente 20% da massa original desse resíduo é convertida em cinzas, as quais apresentam potencial significativo para reaproveitamento em diversas aplicações industriais. Na Figura 2 é possível observar uma amostra de cinza da casca de arroz coletada do sistema de extração de cinzas de uma caldeira com grelha rotativa.

Figura 2 - Cinza de casca de arroz extraída de uma caldeira com grelha rotativa.

Fonte: Autor.

A casca de arroz, submetida à combustão controlada, origina uma cinza de alto teor de sílica, frequentemente superior a 90% de SiO_2, o que a torna tecnicamente viável como substituto parcial da areia silicosa na produção de vidros soda-cal e outros materiais vítreos (FERNANDES, 2017; GONÇALVES et al., 2020). Essa elevada concentração de sílica e a possibilidade de purificação tornam a CCA promissora na formulação de vidros soda-cal, vidros borossilicato e vitrocerâmicos, com potencial

para reduzir a extração de recursos minerais não renováveis e mitigar impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos agrícolas (GONÇALVES et al., 2020; FERNANDES, 2017).

Estudos experimentais demonstram que a incorporação parcial de cinza de casca de arroz em formulações de vidro pode produzir materiais com propriedades físico-químicas compatíveis com aplicações comerciais, desde que se adotem tratamentos para controlar impurezas (Fe, Mn) e se ajustem as condições de fusão. Trabalhos com substituições na faixa de 10–30% relatam vidros com boa transmissão óptica e propriedades mecânicas adequadas, além de redução do consumo energético de fusão quando comparados a formulações convencionais, o que evidencia o potencial sustentável dessa rota de produção (VALSECCHI, 2020; ALAZEMI et al., 2021).

Do ponto de vista da avaliação ambiental, estudos de LCA e revisões sobre usos de resíduos agroindustriais indicam que a valorização da CCA em processos produtivos pode reduzir impactos ambientais relativos à extração e processamento de matérias-primas minerais. A magnitude da redução do potencial de aquecimento global depende do cenário (porcentagem de substituição, tratamento da cinza, transporte, processo de fusão), mas análises de ciclo de vida mostram reduções relevantes no GWP em cenários de substituição parcial e quando a CCA é processada de forma eficiente (GU, 2025; FERNANDO et al., 2021).

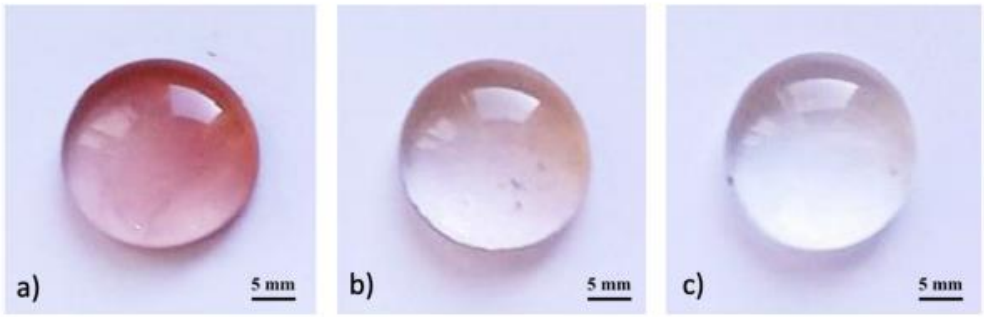
Além disso, a utilização da CCA evita a disposição inadequada do resíduo — prática ainda comum em algumas regiões — e possibilita o desenvolvimento de cadeias produtivas circulares que agregam valor local e reduzem passivos ambientais (CHEN; LIN; WANG, 2022). Entre as principais vantagens econômicas e ambientais apontadas na literatura estão (i) menor custo da matéria-prima residual em relação à sílica mineral, (ii) redução da extração mineral, (iii) estímulo à economia circular regional e (iv) diminuição de impactos associados à gestão inadequada dos resíduos (CHEN et al., 2022; GONÇALVES et al., 2020).

Persistem, contudo, desafios técnicos e logísticos: variabilidade composicional da CCA (presença de K, Ca, carbono residual e óxidos metálicos), necessidade de pré-tratamentos (lavagem, lixiviação ácida, controle de temperatura de queima) para obter sílica amorfa de alta pureza, e barreiras à escala industrial pela logística de coleta, transporte e armazenagem de grandes volumes de resíduo. Superar esses

desafios requer protocolos padronizados de processamento, regionalização de unidades de beneficiamento e integração entre polos agroindustriais e indústrias consumidoras (FERNANDES, 2017; GONÇALVES et al., 2020; CHEN et al., 2022).

Por fim, há potencial tecnológico para aplicações avançadas (p. ex. microsferas vítreas para sinalização viária e produtos vitrocerâmicos de alto valor), desde que se controle a pureza e as condições de processamento — caminhos que podem ampliar a sustentabilidade do setor vítreo ao vincular inovação, economia circular e redução de impactos ambientais. Na Figura 3, mostra-se um exemplo de produção de vidro utilizando cinza de casca de arroz, onde (a) é o vidro produzido com casca de arroz industrial; (b) vidro produzido com cinza casca de arroz em condições controladas de laboratório e; (c) é o vidro produzido de forma convencional com areia.

Figura 3 - Comparação visual entre o vidro produzido com CCA e o vidro convencional.



Fonte: Marçal et al. (2024).

2.5. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta metodológica amplamente reconhecida para a quantificação dos impactos ambientais de produtos, processos ou serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida — desde a extração de matérias-primas até a disposição final. De acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2009; ISO, 2009), a ACV fornece uma abordagem sistêmica que permite identificar e quantificar fluxos de energia, materiais e emissões, possibilitando a melhoria do desempenho ambiental e subsidiando decisões estratégicas em políticas

públicas e processos industriais.

A metodologia da ACV é estruturada em quatro fases principais: (1) definição do objetivo e escopo, (2) análise de inventário, (3) avaliação de impactos ambientais e (4) interpretação dos resultados. Essa estrutura padronizada visa assegurar transparência, reprodutibilidade e coerência na comparação entre estudos (CASTELLANI & SALA, 2019).

Nas últimas décadas, o uso da ACV tem crescido significativamente, impulsionado pela necessidade de mensurar o desempenho ambiental de sistemas produtivos e atender metas de sustentabilidade e climáticas estabelecidas internacionalmente (MOUTIK et al., 2023).

A primeira etapa da ACV determina a finalidade, o público-alvo e as fronteiras do sistema analisado. A definição do objetivo e escopo orienta decisões metodológicas, como unidade funcional, critérios de corte e nível de detalhamento (CASTELLANI & SALA, 2019). Conforme a ISO 14044 (ISO, 2009), essa etapa deve especificar claramente a aplicação pretendida do estudo, seja para comparação entre produtos, apoio à gestão ambiental ou formulação de políticas públicas.

A unidade funcional (UF) é o elemento de referência quantitativa que garante comparabilidade entre estudos, enquanto as fronteiras do sistema delimitam os processos incluídos na análise, podendo abranger desde o “berço ao portão” até o “berço ao túmulo”. A escolha apropriada dessas fronteiras impacta diretamente os resultados e sua interpretação.

A fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) compreende a coleta e quantificação de fluxos de materiais, energia e emissões associados ao sistema estudado. Ferramentas como SimaPro, GaBi, Umberto e OpenLCA são amplamente utilizadas, com bases de dados como Ecoinvent e Agri-Footprint. Estudos indicam que diferentes softwares podem gerar variações significativas devido a escolhas metodológicas e estrutura dos bancos de dados (ISWARA et al., 2020; WIDANKA et al., 2024).

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) converte os fluxos do inventário em indicadores de impacto potencial, contemplando etapas de classificação, caracterização e, opcionalmente, normalização e ponderação, conforme ISO 14044 (ISO, 2009).

Entre os métodos mais consolidados destaca-se o ReCiPe 2016, que integra abordagens midpoint e endpoint, considerando 17 categorias midpoint e 3 categorias

endpoint (HUIJBREGTS et al., 2017). O método permite diferentes perspectivas culturais e temporais e é amplamente utilizado em plataformas como OpenLCA, dada sua compatibilidade com bases de dados e flexibilidade (HUIJBREGTS et al., 2017; OPENLCA, 2025).

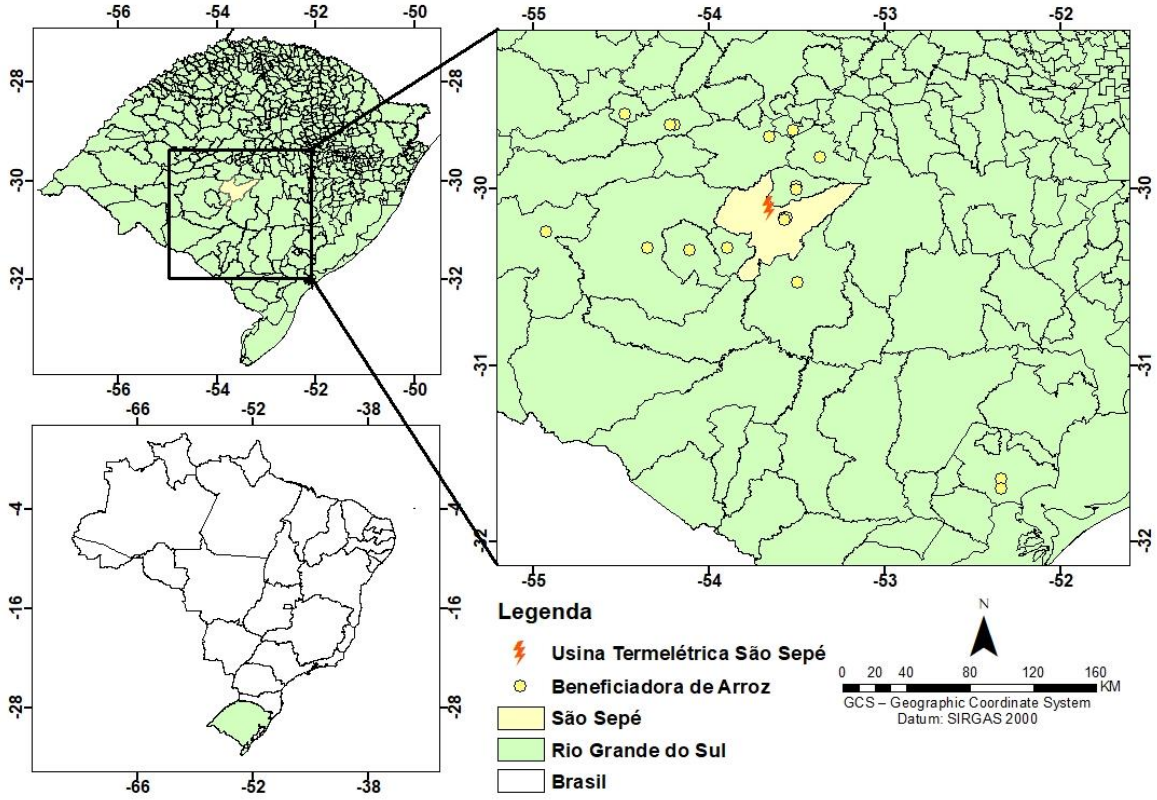
O OpenLCA é um software livre para modelagem de ACV, permitindo integração com bases de dados reconhecidas internacionalmente e aplicações colaborativas (OPENLCA, 2025).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Localização

O presente estudo está inserido no contexto do processo de geração de energia elétrica da Usina Termelétrica São Sepé, a qual utiliza a casca de arroz (resíduo proveniente das indústrias de beneficiamento do grão) como fonte de energia renovável. Esse resíduo é armazenado e posteriormente encaminhado à usina termelétrica, onde passa por uma série de etapas até a conversão final em energia elétrica. O empreendimento está localizado no município de São Sepé, situado na região central do estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 281 km da capital Porto Alegre. A usina termelétrica recebe casca de arroz de cerca de 13 empresas beneficiadoras de arroz da região centro-oeste podendo abranger também outras regiões dependendo da necessidade e disponibilidade de biomassa. Na Figura 4 tem-se o mapa de localização do empreendimento, assim como a localização atual das empresas fornecedoras de biomassa e suas unidades de produção.

Figura 4 - Mapa de localização da Usina Termelétrica e Empresas Beneficiadoras de Arroz.



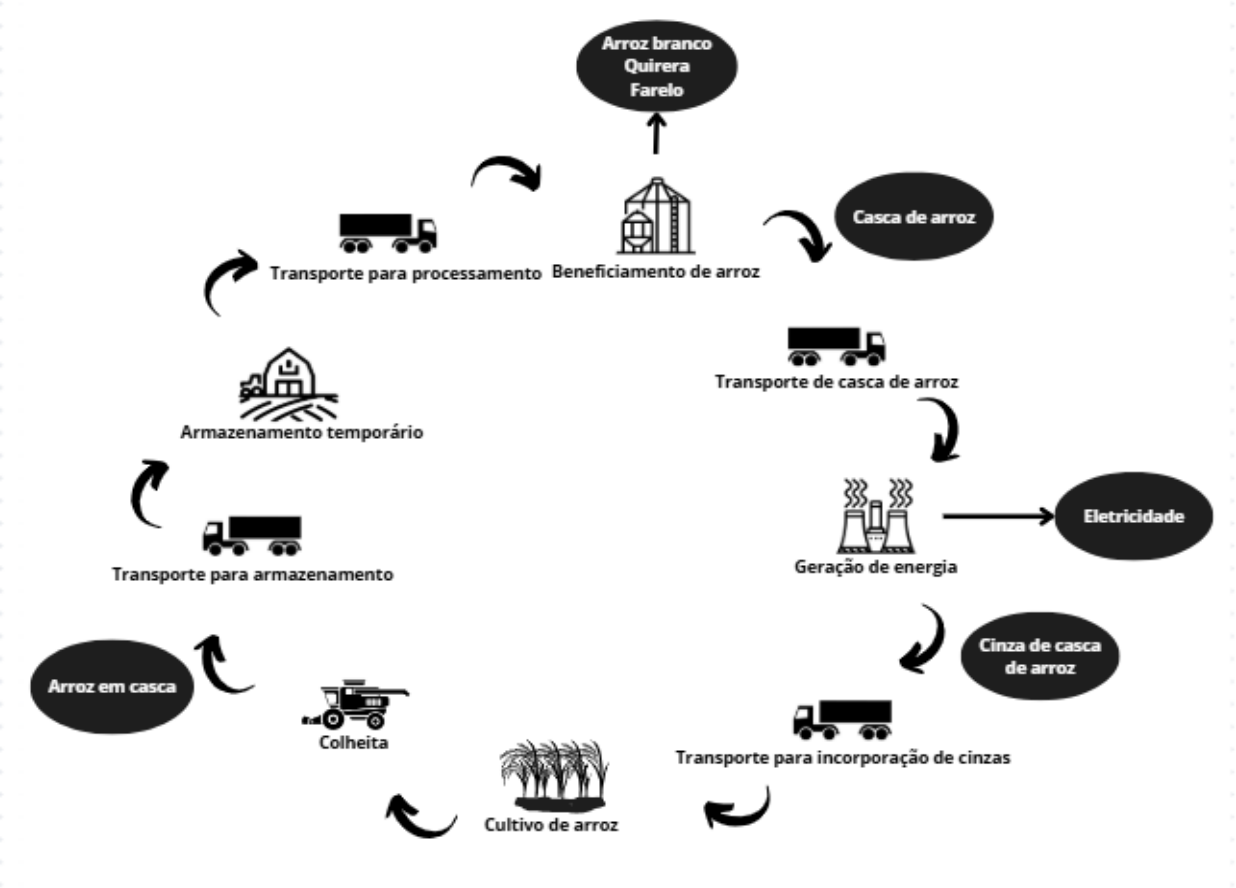
Fonte: Autor.

3.2. Descrição do Sistema, Inventário e Dados Coletados

O inventário do ciclo de vida da geração de energia a partir da casca de arroz é baseado em dados primários coletados in situ e em pesquisas bibliográficas. A construção do inventário do cultivo e beneficiamento do arroz se baseou em dados secundários, enquanto para o inventário da geração de energia na termelétrica assim como o modelo do ciclo de vida, baseou-se em dados primários obtidos diretamente dos relatórios de operação, controle e monitoramento da Usina termelétrica de São Sepé. O autor deste trabalho é engenheiro responsável pelo operação e processos ambientais da termelétrica, fator de grande relevância e destaque para esta pesquisa que busca soluções práticas baseadas em dados reais. Na Figura 5 é ilustrado o ciclo

específico para a geração de energia elétrica na Usina Termelétrica de São Sepé.

Figura 5 - Ciclo da geração de energia na Usina Termelétrica São Sepé.



Fonte: Autor.

3.2.1. Cultivo de Arroz e Beneficiamento

Foram coletados e correlacionados dados primários e secundários com os processos e unidades funcionais para a elaboração do inventário do ciclo de vida. A Tabela 4 apresenta o inventário dos principais insumos envolvidos no cultivo e beneficiamento do arroz (secagem, transporte do grão e embalagem).

Tabela 4 - Inventário de entradas (inputs) no cultivo e beneficiamento de arroz.

	Entradas (*Inputs*)		
Etapas	**Insumos**	**Valor**	**Unidade**
Cultivo de Arroz Padrão	Água	$7{,}20\times10^{-4}$	m³/kg arroz
	Ocupação Arável	1,33	m²/kg arroz
	Sementes de Arroz	$1{,}30\times10^{-2}$	kg/kg arroz
	Herbicida	$7{,}20\times10^{-7}$	kg/kg arroz
	Ureia, como N	$4{,}03\times10^{-2}$	kg/kg arroz
	Nitrato de Amônio, como N	$1{,}08\times10^{-2}$	kg/kg arroz
	Triplo Superfosfato, como P2O5	$1{,}37\times10^{-2}$	kg/kg arroz
	Cloreto de Potássio, como K2O	$3{,}10\times10^{-2}$	kg/kg arroz
	Fungicidas	$3{,}60\times10^{-8}$	kg/kg arroz
	Inseticidas	$1{,}07\times10^{-8}$	kg/kg arroz
	Diesel - Plantação de Arroz	$8{,}64\times10^{-3}$	kg/kg arroz
	Diesel - Colheita de Arroz	$4{,}32\times10^{-3}$	kg/kg arroz
	Eletricidade, Bombeamento (50 CV)	$4{,}90\times10^{-6}$	kWh/kg arroz
	Eletricidade, Bombeamento (30 CV)	$2{,}94\times10^{-6}$	kWh/kg arroz
	Transporte de Fertilizantes	$2{,}66\times10^{-2}$	tkm/kg arroz
	Transporte de Herbicidas	$2{,}23\times10^{-2}$	tkm/kg arroz
	Diesel - Transporte	$1{,}92\times10^{-4}$	kg/kg arroz
Beneficiamento de Arroz	Madeira	$1{,}00\times10^{-3}$	m³/ha/kg arroz
	Transporte de Embalagens, Caminhão 3.5⁻⁷.5t	21,74	tkm/kg arroz
	Transporte para Processamento, Caminhão 16-32t	5,64	tkm/kg arroz
	Transporte para Secagem, Caminhão 7.5-16t	6,17	tkm/kg arroz
	Embalagens de 1kg (PEBD)	$3{,}89\times10^{-1}$	kg/kg arroz
	Embalagens de 5kg (PEBD)	$4{,}17\times10^{-1}$	kg/kg arroz
	Empilhadeira elétrica	706,0	J/kg arroz
	Arroz em Casca	1,54	kg/kg arroz

Fonte: Adaptado de Nunes et al. (2016).

Na etapa de cultivo apresentada na Tabela 4, os agrotóxicos utilizados foram Standak (concentração de 25%) como inseticida, glifosato (concentração de 48%) como herbicida e Vitavax (concentração de 40%) como fungicida. O consumo de óleo diesel nas máquinas agrícolas para preparo do solo foi de 80 L/ha, enquanto nas operações de colheita de arroz, foi de 40 L/ha (NUNES et al., 2016).

O processamento do arroz (arroz branco com cultivo mínimo) inclui o

descasque do grão, a separação do grão da casca e a etapa de pré-polimento (Tabela 4). A etapa de escoamento de grãos abrange o transporte da embalagem e o transporte até o beneficiamento. Após essas etapas, segue-se o beneficiamento parcial, no qual os fluxos de arroz são separados em arroz branco ou integral, gerando os seguintes coprodutos: grãos quebrados (3,5%), farelo de arroz (7,0%) e casca de arroz (24%), além do arroz branco (65,5%).

3.2.2. Transporte da Casca de Arroz

O transporte da biomassa até a usina termelétrica é realizado por uma empresa terceirizada, utilizando carretas equipadas com piso móvel para descarregamento da casca de arroz na moega. O caminhão parte da usina termelétrica vazio e retorna com a carga carregada na unidade de beneficiamento correspondente. Cada veículo tem capacidade para transportar 12 toneladas de casca de arroz e uma autonomia de 2,5 km/L. A casca de arroz é fornecida por unidades de beneficiamento localizadas em 12 cidades, com uma distância média total de transporte de aproximadamente 168 km. Dessa forma, o consumo médio de combustível por quilograma de casca transportada é de $4{,}51 \times 10^{-3}$ kg de diesel/kg de casca. Ao chegar na usina, as cargas são pesadas e encaminhadas para o descarregamento na moega. No Apêndice I, estão apresentadas as distâncias médias de transporte de biomassa assim como o consumo médio de óleo diesel.

3.2.3. Usina Termelétrica

A Usina Termelétrica São Sepé está localizada na cidade de São Sepé, centro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. É uma planta de geração de energia que utiliza a biomassa da casca de arroz como combustível, possui capacidade máxima de geração de energia de 8,0 MWh, produzindo 192,0 MW de energia bruta diariamente, sendo que a energia exportada total é de 163,2 MW. A tecnologia de queima é por grelha rotativa, podendo queimar cerca de 217 toneladas de casca de arroz diariamente.

3.2.4. Classificação da biomassa

Durante o descarregamento da biomassa na moega os portões são fechados para evitar fuga de material particulado para fora do ambiente. Dentro da moega há um sistema de exaustão que faz a sucção da poeira gerada no descarregamento. O material particulado succionado pelo sistema de exaustão passa por um filtro de mangas e o pó é coletado em bags para posterior destinação.

Após o descarregamento na moega, a casca de arroz é encaminhada através de roscas extratoras e elevadores metálicos simples até um patamar superior onde a biomassa desce por gravidade e passa por uma série de peneiras rotativas para a retenção de objetos indesejados que possam estar presentes junto a casca de arroz. A biomassa peneirada é encaminhada para dois elevadores e os resíduos são destinados posteriormente junto a outros resíduos.

3.2.5. Armazenamento da Biomassa

O armazenamento da biomassa de casca de arroz na usina termelétrica é realizado no armazém de biomassa, que consiste em um silo horizontal com capacidade de armazenar cerca de 870 toneladas de casca de arroz.

Após a etapa de classificação a biomassa é elevada através de elevadores metálicos, equipados com sistema de exaustão e filtragem (Filtro de Mangas), até o patamar superior do armazém. Nesse local há esteiras transportadoras responsáveis por transportar a casca de arroz dos elevadores até o armazém. Dentro do armazém há um sistema transportador Tripper responsável pelo recebimento, deslocamento e dosagem de biomassa, visando melhor eficiência do processo. Na Tabela 5 é descrito os parâmetros de armazenagem de combustível para a alimentação da caldeira e posterior geração de energia em carga máxima.

Tabela 5- Parâmetros de Controle de Recebimento de Biomassa.

Parâmetros	Valor médio	Unidade
Entrada de Biomassa	217,0	t/dia
Quantidade de Cargas	20	nº/dia
Peso médio por carga	10,85	t/carga
Consumo estimado de Biomassa	217,0	t/dia
Estoque estimado do armazém	870,0	t
Autonomia Armazém	96	Horas
Umidade da Biomassa	12	%

Fonte: Autor.

3.2.6. Alimentação da Caldeira

A biomassa armazenada é deslocada pelo silo horizontal através de roscas extratoras que transportam a casca de arroz até elevadores metálicos. Os elevadores elevam e depositam a biomassa em uma esteira transportadora que a encaminha até a caldeira para ser queimada. Esse sistema também possui sistema de exaustão e filtragem com filtro de mangas, com objetivo de retirar o pó do sistema, evitando embuchamento e emissão de material particulado.

3.2.7. Queima na Caldeira

A caldeira, da marca HBremer, modelo LIGNODYN - 40, foi projetada para queimar casca de arroz e possui capacidade de geração de vapor de 37.390 kg/h, com pressão de trabalho do vapor saturado de 45 Kgf/cm². A entrada de biomassa é realizada por silos dosadores com êmbolo, que controlam a vazão e garantem uma melhor distribuição do combustível. A tecnologia de combustão é composta por uma grelha rotativa (grelha móvel), onde ocorre a queima do combustível. Este sistema é formado por um conjunto de grelhas de avanço contínuo, construído em tubos de aço ASTM refrigerados a água, interligados à caldeira, dimensionada conforme a carga

térmica necessária para a queima do combustível de baixo teor de umidade.

As correntes das grelhas são movidas por rodas dentadas fixas a um eixo, acionado por uma catraca acoplada à extremidade do eixo. A grelha rotativa funciona de maneira automática, com alimentação controlada por sensores capacitivos e tempo pré-ajustado. O sistema também é dotado de um mecanismo de extração contínua de cinzas, composto por quatro roscas extratoras. As cinzas coletadas na grelha são transportadas por sistemas de transportadores (redler) e elevadores até seu armazenamento temporário em silos verticais.

A injeção de ar de combustão ocorre em duas etapas: distribuição de ar primário e secundário. O ar primário é injetado na parte inferior da grelha, dividido em zonas reguláveis, com ar aquecido de 25°C a aproximadamente 150°C ao longo de toda a extensão da grelha. O ar secundário é soprado na fornalha para garantir uma mistura intensiva e uma queima completa, sendo direcionado diretamente nas chamas por dutos com pressão de 350 mmca. Esse processo visa a queima completa dos voláteis. O teor de oxigênio nos gases de combustão é ajustado por meio de um sensor, mantendo-o entre 5% e 8%. Os gases gerados na combustão são transportados até a chaminé por um exaustor, passando por um precipitador multiclone e um filtro de mangas no caminho.

As cinzas voláteis retidas nos sistemas de filtragem são coletadas e transportadas pelos redlers até os elevadores, sendo armazenadas temporariamente, junto às cinzas da grelha rotativa, nos silos verticais para posterior destinação. O sistema de transporte de cinzas conta ainda com um filtro de mangas para o controle de material particulado. Na Tabela 6, são apresentadas as características do combustível para o qual a caldeira foi projetada.

Tabela 6 - Características do combustível (casca de arroz).

Tipo de Combustível	**Casca de Arroz**
Mistura Máxima	100%
Pci - kcal/kg	3.200,0 kcal/kg
Umidade	12%
Granulometria	5 x 10 x 10 mm
Peso Específico	130 kg/m³
Excesso de ar	45%
Consumo de combustível em Kg	9.170,2 kg/h
Consumo de combustível em m³	70,54 m³/h
Resíduos de Cinza	1.834,04 kg/h
Produção Nominal	37.390 kg.vapor/h
Carga térmica total da caldeira	28.344.709 Kcal/h

Fonte: Autor.

Os gases provenientes da caldeira, após atravessarem os sistemas de filtragem, são succionados por um exaustor que os conduz até a chaminé, onde são posteriormente liberados para a atmosfera. A Tabela 7 apresenta os resultados das medições dos gases emitidos pela chaminé, após a etapa de filtragem por mangas, conforme dados fornecidos pela empresa.

Tabela 7 - Emissões de gases do processo de queima de biomassa na caldeira.

Parâmetro	**Concentração**	**Unidade**	**Valores por Unid. Funcional (kg/kWh)**
Material Particulado	32,9	mg/Nm³	$3{,}73 \times 10^{-7}$
NOx	293,0	mg/Nm³	$1{,}63 \times 10^{-6}$
CO	67,0	mg/Nm³	$1{,}83 \times 10^{-7}$
CO_2	12%	%	$1{,}15 \times 10^{-2}$

Fonte: Autor.

3.2.8. Sistemas de Tratamento de Água e Efluentes

Os processos envolvidos na produção de vapor para a turbina passam por três sistemas de tratamento: Estação de Tratamento de Água (ETA), Sistema de Desmineralização (DESMI) e Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). A água bruta utilizada no tratamento é captada de um açude localizado a 1 km de distância do empreendimento e encaminhada para um tanque de armazenamento de água bruta.

A primeira etapa do processo é o tratamento da água bruta na Estação de Tratamento de Água (ETA). A ETA é composta por um tanque flocodecantador, filtro de areia clássico e tanque de efluentes. O sistema opera com um setpoint de vazão de 27 m³/h e uma produção média de 540 m³/dia de água tratada, considerando a carga de geração máxima. A água tratada é armazenada no tanque de armazenamento de água industrial, que é um blend da produção da ETA com a produção da ETE.

Todos os efluentes gerados na usina termelétrica são encaminhados para o Sistema de Tratamento de Efluentes (ETE). Esses efluentes provêm de diversos pontos, incluindo a ETA, DESMI, Torre de Resfriamento, Caldeira, Osmose Reversa, Moega/Armazém e o sistema de coleta e escoamento de água pluvial. Eles são temporariamente armazenados em uma lagoa pulmão. A geração total estimada de efluentes, durante a operação plena da planta, é de 170 m³/dia.

A ETE é composta por um sistema de clarificação, que inclui flocodecantador e filtro de areia, além de uma unidade de Osmose Reversa. A vazão total de tratamento, combinando esses dois sistemas, é de aproximadamente 10 m³/h, operando 17 horas por dia. Isso gera cerca de 170 m³/dia de efluente tratado, que é armazenado no tanque de água industrial para posterior reutilização nos processos. A ETE também conta com um sistema de adensamento de lodo e filtro prensa, que são responsáveis pela coleta e desidratação do lodo gerado nos sistemas de tratamento de água da planta. Em média, são gerados 150 litros de lodo prensado por batelada, o qual é destinado a um aterro industrial licenciado.

O Sistema de Tratamento de Água Desmineralizada (DESMI) é composto por filtro de areia, filtro de carvão ativado, leito misto (resinas catiônicas e aniônicas) e leito de polimento. Esse sistema recebe a água do blend formado pelo tratamento de

água e efluentes e tem como principal objetivo purificar a água ao máximo, por meio das trocas iônicas entre as resinas e o blend. Isso garante que a concentração de impurezas na água fique abaixo dos parâmetros necessários para o correto funcionamento da caldeira e turbina. Esse tratamento é essencial para evitar a formação de incrustações e corrosões nos equipamentos e tubulações, contribuindo para a longevidade dos sistemas. Com o tempo, as resinas nos leitos misto e polimento saturam e necessitam de regeneração, o que é feito por meio da aplicação de soluções ácidas e alcalinas.

3.2.9. Tratamento da Água da Caldeira

A alimentação de água na caldeira é realizada através do Sistema de Tratamento de Água Desmineralizada descrito no tópico anterior. A água desmineralizada é bombeada do tanque de armazenamento até o desaerador, um equipamento responsável pela remoção do oxigênio dissolvido na água da caldeira. No desaerador, também são dosados produtos químicos, como aditivos, cuja função é minimizar as condições que favorecem a corrosão e incrustação nas tubulações presentes tanto na caldeira quanto na turbina.

3.2.10. Sistema de Resfriamento de Vapor

Após a geração de vapor na caldeira e sua utilização para a geração de energia na turbina e gerador, é necessário que o vapor seja resfriado e condensado no condensador para posterior reutilização. Esse processo é essencial para economizar energia no sistema e reduzir a demanda por água tratada, diminuindo, assim, os custos operacionais. Para isso, o vapor precisa ser resfriado por outro fluido por meio de troca de calor.

A torre de resfriamento tem a função de dissipar o calor gerado, utilizando a água como fluido de resfriamento. A escolha da água se deve às suas propriedades físicas, como calor específico, viscosidade, condutibilidade térmica e densidade, além de ser facilmente disponível e atóxica.

A água entra na torre de resfriamento pela parte superior, sendo distribuída ao enchimento de contato por meio de bicos de distribuição. Simultaneamente, ventiladores instalados no topo da torre aspiram o ar do ambiente, fazendo com que ele entre em contato com a água, promovendo seu resfriamento, enquanto o ar quente é expulso para o exterior. A água resfriada que cai na bacia da torre é então encaminhada para o condensador, onde ocorre a troca de calor com o vapor proveniente da turbina. Esse processo aquece a água, que retorna à torre, reiniciando o ciclo.

A água perdida por evaporação é reposta com água proveniente do blend dos sistemas de tratamento de água e efluentes (ETA e ETE). As tubulações que conectam a torre de resfriamento ao condensador são feitas de material metálico, o que favorece uma melhor troca de calor. Para evitar problemas de corrosão e incrustações nesse sistema, é necessário adicionar aditivos químicos.

3.2.11. Produtos Químicos

Para realizar o tratamento de água e efluentes de todos os sistemas da usina termelétrica, é necessário utilizar produtos químicos específicos para cada tipo de tratamento. Entre os produtos empregados estão coagulantes, floculantes, corretores de pH, inibidores de corrosão, dispersantes, biocidas, ácidos, bases, entre outros. A lista detalhada dos produtos específicos utilizados nos tratamentos de água e efluentes pode ser consultada no Apêndice II.

3.2.12. Transporte e destinação final da cinza

Após a armazenagem da cinza da caldeira nos silos horizontais é necessário que se faça a destinação dos resíduos. A usina termelétrica possui licença ambiental para realizar a aplicação da cinza produzida em solo agrícola de propriedades rurais da cidade de São Sepé. O transporte é realizado por empresa terceirizada diariamente e o proprietário é responsável pela distribuição na propriedade. Na Tabela 8 estão as informações sobre a geração de resíduos de cinza

da casca de arroz.

Tabela 8 - Dados diários de geração de resíduos de cinza da casca de arroz.

Parâmetro	Valor	Unidade
Quantidade Gerada de Resíduo	43,4	t
Número Estimado de Viagens	9	un.
Distância Média	18,5	km
Consumo de Combustível	56,61	kg

Fonte: Autor.

Durante o período de entressafra, é comum que os produtores rurais recebam a cinza de casca de arroz (CCA), aplicando-a em conjunto com o calcário convencional, de acordo com as taxas de aplicação estabelecidas nas licenças ambientais e no Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2016).

Segundo Filho et al. (2020), a incorporação da CCA ao solo contribui para a correção da acidez, o aumento da disponibilidade de nutrientes e a melhoria das propriedades físicas do solo. Islabão et al. (2014) avaliaram a aplicação da CCA como corretivo da acidez do solo, em comparação ao calcário. Os resultados indicaram que a CCA apresenta uma reação mais rápida na elevação do pH do solo em relação ao calcário tradicional. No entanto, seu baixo Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) exige a aplicação de doses mais elevadas para alcançar efeitos equivalentes de neutralização da acidez.

3.2.13. Consumo interno de energia elétrica

A geração de energia elétrica de uma usina termelétrica depende da correta operação de uma série de equipamentos organizados na cadeia produtiva tais como, esteiras, roscas, elevadores, exaustores, bombas hidráulicas etc. Esses equipamentos são movidos por motores elétricos de diferentes dimensionamentos conforme a necessidade de cada setor. O consumo interno de energia elétrica é dado majoritariamente por esses motores elétricos, sendo que a sua eficiência afeta diretamente na quantidade de energia elétrica a ser exportada para o mercado de

energia. No Apêndice III é possível observar todos os equipamentos específicos e seus respectivos consumos de energia.

O Pátio de Biomassa apresenta sistemas de condução da biomassa que transportam a casca de arroz passando pela classificação, armazenamento e alimentação da caldeira que são movidos por motores elétricos. É composto basicamente por roscas extratoras, correias transportadoras, elevadores e filtros de manga.

Nos sistemas de tratamento de água e efluentes são utilizadas bombas centrífugas para bombeamento de água e efluentes, bombas dosadoras para dosagem de produtos químicos e misturadores de soluções químicas.

As Torres de Resfriamento apresentam bombas centrífugas de alta potência, para circulação de água no condensador com o objetivo de resfriar o vapor que passa pela turbina, e ventiladores para a retirada do ar quente de dentro das bacias.

A Caldeira é o sistema que apresenta maior quantidade de motores elétricos que movem diferentes equipamentos como roscas extratoras, bombas de água, exaustores, ventiladores de ar, sopradores de fuligem, entre outros.

Os equipamentos que fazem parte do sistema da turbina são compostos basicamente por bombas de água, onde as que mais consomem energia são as bombas de alimentação. Essas bombas encaminham água desmineralizada para o balão onde posteriormente é distribuída nas paredes de água (tubulações internas) dentro da caldeira, assim após a evaporação da água o vapor é enviado para a turbina, fazendo com que gire as palhetas e o eixo do gerador de energia.

3.3. Fabricação Experimental do Vidro com CCA

O vidro soda-cal é tradicionalmente composto por dióxido de silício (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO). Para obtenção de temperaturas de fusão mais baixas, bem como para a modificação das propriedades mecânicas e térmicas, pode-se adicionar óxido de boro (B_2O_3), resultando na formação dos vidros borossilicatos. O processo de produção do vidro soda-cal, utilizando como fontes de

sílica tanto a areia quanto a cinza da casca de arroz, apresentam-se de forma semelhante.

Considerando que os óxidos puros apresentam custos mais elevados e são geralmente obtidos pela decomposição térmica de carbonatos, é comum a utilização dos respectivos carbonatos como reagentes de partida. Durante o processo, o carbono presente nesses compostos é eliminado na forma de dióxido de carbono (CO_2). Além disso, observa-se também uma pequena eliminação de umidade, uma vez que os reagentes não passam por secagem prévia em estufa. Na Tabela 9, tem-se os materiais e respectivos teores utilizados na fabricação de 100 gramas de vidro soda-cal utilizando cinza da casca de arroz e areia.

Tabela 9 - Materiais utilizados na produção de vidro soda-cal.

Reagente	**Teor (%)**	**Matéria-prima**	**Quantidade (g)**
SiO2	70%	CCA	76,10
		Areia	70,00
Na2O	13%	Carbonato de sódio (Barrilha)	14,62
CaO	7%	Carbonato de cálcio (Calcário)	12,49
B2O3	10%	Bórax	27,47

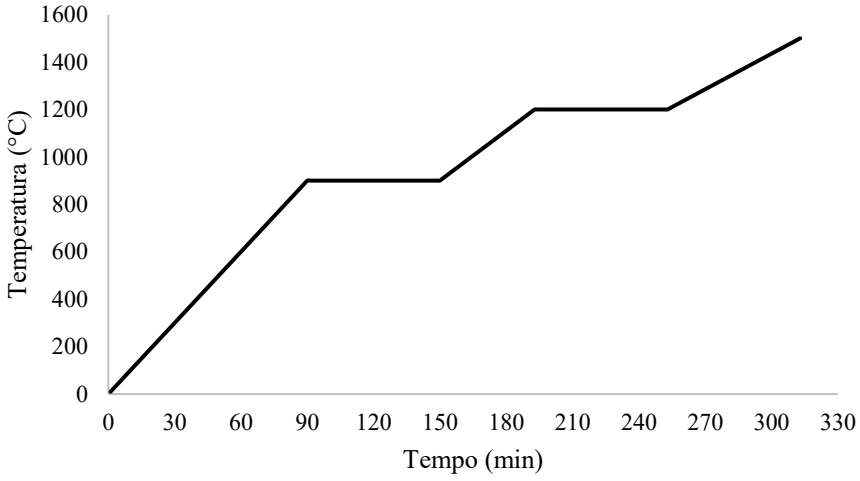
Fonte: Autor.

Com base na análise da composição das matérias-primas empregadas, é possível estimar a quantidade de gases emitidos durante a etapa de fusão no processo de produção do vidro. Quando a cinza da casca de arroz foi utilizada como fonte alternativa de sílica, a emissão calculada correspondeu a 18,042 g de dióxido de carbono. No processo em que a areia foi empregada como fonte de sílica, a emissão estimada foi de 11,942 g de dióxido de carbono. Adicionalmente, independentemente da origem da sílica utilizada, verificou-se a liberação de 6,48 g de vapor de água, proveniente da decomposição do bórax. O rendimento do processo é

de aproximadamente 62,9% para o vidro produzido com cinza da casca de arroz. Para o vidro obtido a partir de areia, não se dispõe dessa informação específica; entretanto, dados anteriores, com formulações semelhantes, indicam rendimentos de 1–3% superiores.

A mistura dos reagentes sólidos foi inserida em forno mufla desligado, sendo submetida a uma rampa de aquecimento. Na Figura 6 é ilustrado um gráfico com a rampa de aquecimento utilizada na produção de vidro soda-cal.

Figura 6 - Rampa de aquecimento da mufla.



Fonte: Autor.

Após a fusão, o vidro obtido é submetido a um tratamento térmico em forno mufla, mantido entre 480 e 530 °C por 1 hora, com o objetivo de promover o alívio das tensões superficiais. A areia utilizada no processo foi fornecida por uma empresa fabricante de vidros, que obtém areia de uma mineradora localizada em Santa Catarina, Brasil, e apresenta, em sua caracterização química, 99,5 % de SiO_2 e 600 ppm de Fe_2O_3. O aquecimento dos materiais para a produção de vidro em laboratório é realizado em forno mufla da marca Fortelab, com potência de 5000 W e capacidade de atingir temperaturas de até 1600 °C.

4. METODOLOGIA

Para a condução da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) neste estudo, o trabalho foi estruturado em duas etapas distintas. A primeira etapa concentrou-se na análise do processo de geração de energia elétrica na Usina Termelétrica São Sepé, com o propósito de quantificar a pegada de carbono associada e identificar, ao longo do ciclo de vida, as etapas com maior contribuição para os impactos ambientais. A segunda etapa teve como foco a avaliação dos impactos ambientais decorrentes da produção de vidro soda-cal, empregando como fonte de sílica a cinza da casca de arroz proveniente da queima da casca de arroz na geração de energia, de modo a caracterizar os principais impactos ambientais relacionados a esse processo produtivo.

4.1. Materiais e Métodos para Avaliação do Ciclo de Vida da Usina a Casca de Arroz

Nesta primeira etapa foi elaborado um inventário do ciclo de vida da geração de energia a partir de casca de arroz baseados em dados primários obtidos da Usina Termelétrica de São Sepé. Posteriormente foi calculada a pegada carbono do Ciclo de Vida (ACV) da produção de energia elétrica com base na metodologia de avaliação do ciclo de vida.

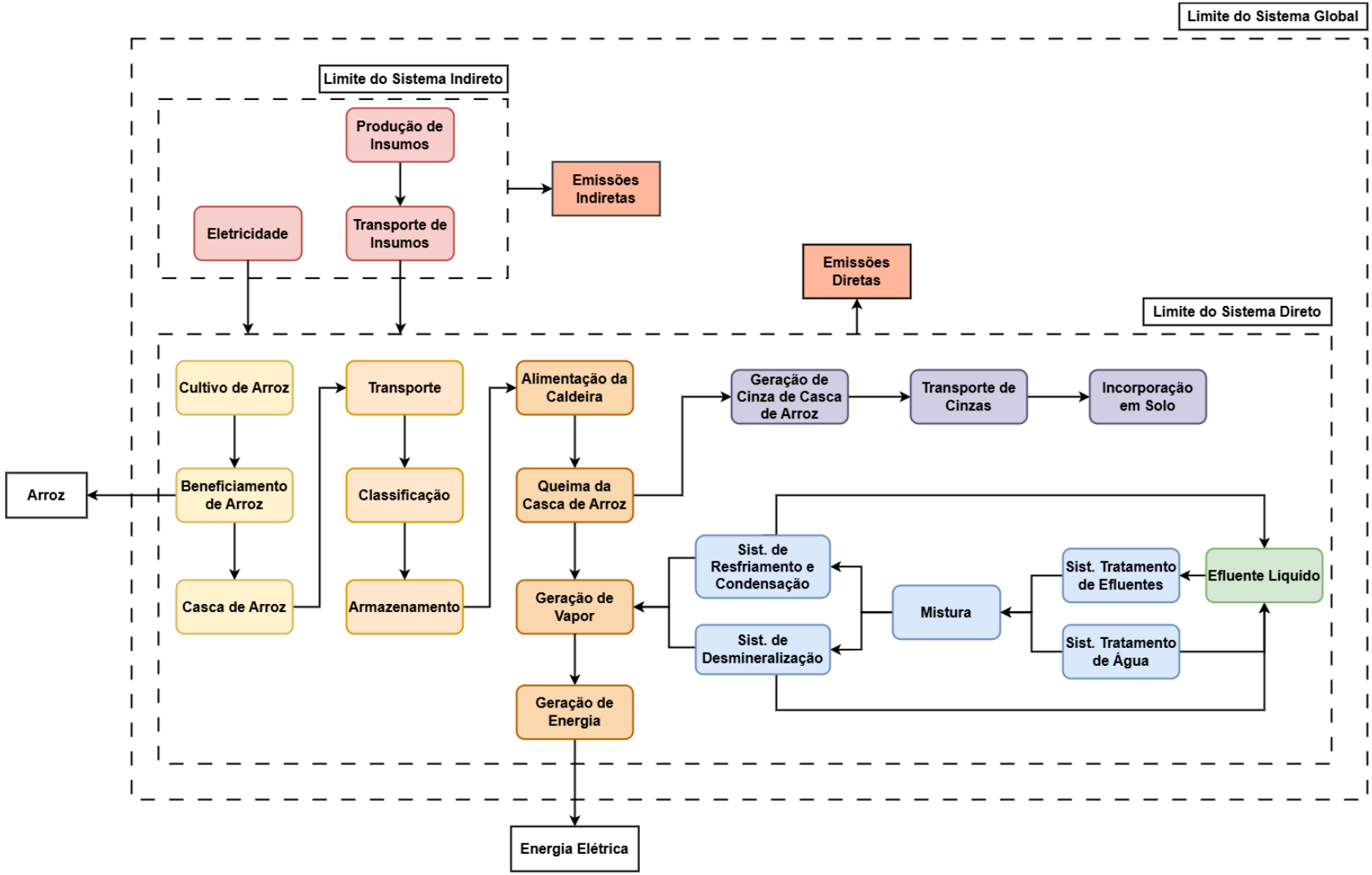
Para facilitar a análise dos resultados de forma precisa, foi utilizado o software OpenLCA, uma ferramenta de avaliação de ciclo de vida amplamente reconhecida, de código aberto e disponibilizada gratuitamente (OPENLCA, 2025). O banco de dados empregado foi o Ecoinvent 3.6v, que oferece uma vasta gama de conjuntos de dados sobre os impactos de produtos, além de fornecer uma variedade de métodos para a análise de impactos ambientais.

4.1.1. Unidade Funcional e Fronteiras do Sistema

A unidade funcional escolhida para este sistema é 1.0 kWh (um quilowatt hora) de energia gerada. Na Figura 7 é possível observar o fluxograma com as principais

etapas presentes neste estudo, considerando as emissões diretas e indiretas. A fronteira do estudo foi do berço ao portão de fábrica (cradle-to-gate), ou seja, estão presentes as etapas de cultivo e beneficiamento do arroz, transporte da casca e processo de geração de energia na usina termelétrica.

Figura 7 - Fluxograma das etapas e fronteiras do sistema.



Fonte: Autor.

4.1.2. Avaliação de Impactos

Para estimar os impactos ambientais da geração de energia a partir da queima de casca de arroz, foi utilizado a metodologia IPCC 2021, aplicada no software OpenLCA, utilizando o banco de dados Ecoinvent. O método IPCC 2021 foi desenvolvido com base no sexto relatório de avaliação (Assessment Report – AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o qual apresenta uma tabela atualizada das métricas de gases de efeito estufa (GEE) que podem ser usadas para calcular diferentes categorias de avaliação de impactos (OPENLCA, 2022). Dentro das categorias disponíveis, foram selecionadas aquelas relacionadas ao potencial de aquecimento global para 100 anos (GWP100), em que as emissões são calculadas em quilos de CO_2 equivalente (kg CO_2 eq).

4.1.3. Alocação de Impactos Ambientais

Como outros produtos são gerados na etapa de processamento do arroz além da casca como o arroz branco, arroz quebrado e o farelo de arroz, foi necessário alocar o impacto ambiental associado a casca de arroz (MAYER, 2009). A alocação foi baseada no valor econômico dos produtos, como fizeram outros autores em estudos de ACV relacionados à produção de arroz (COLTRO et al., 2017; DA SILVA, 2021).

4.2. Avaliação do Ciclo de Vida do Vidro Produzido a Partir da CCA

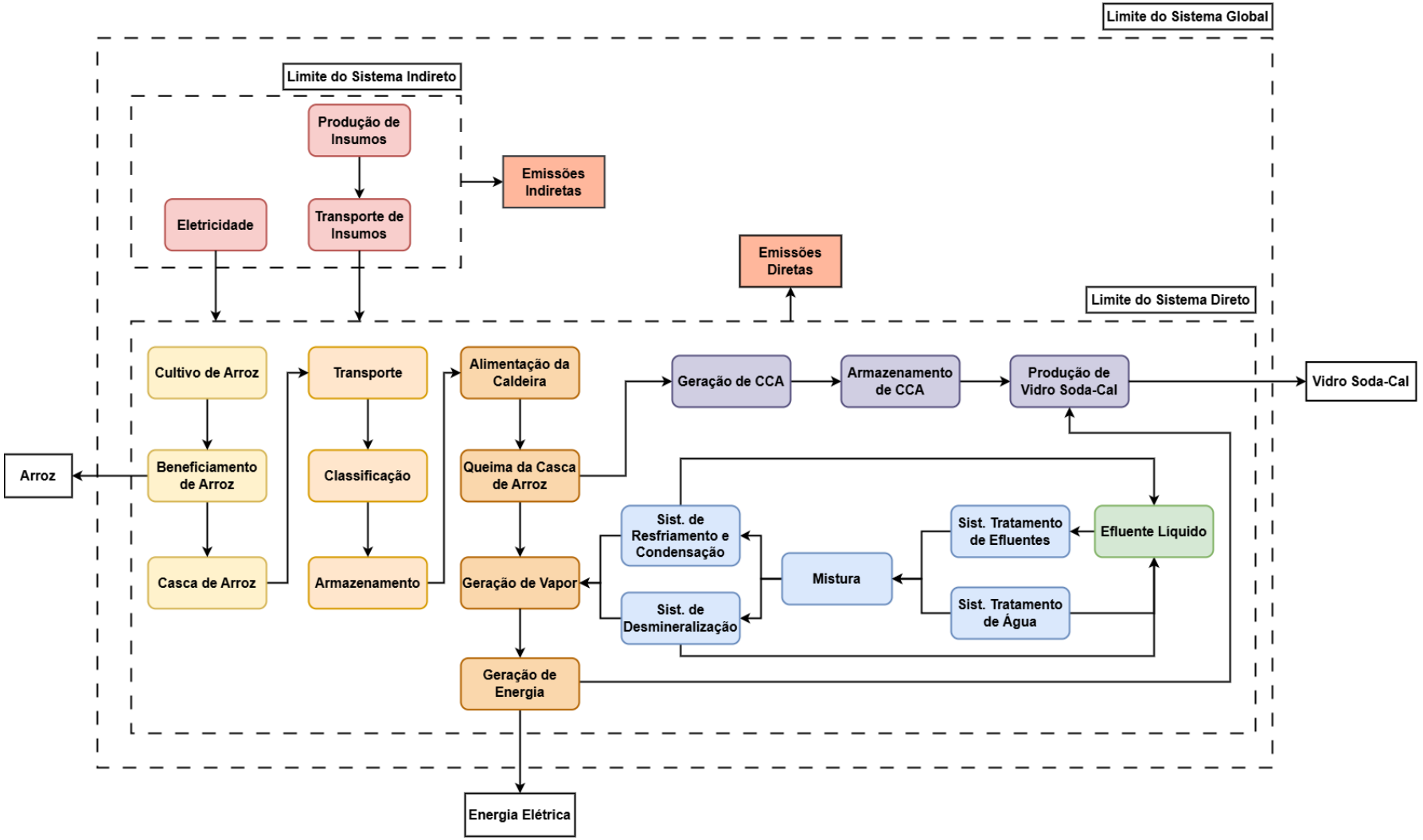
Nesta segunda etapa, foi desenvolvido o inventário do ciclo de vida referente à produção de vidro utilizando cinza da casca de arroz (CCA), proveniente do sistema de extração de cinzas da caldeira da usina termelétrica. Os impactos ambientais associados a esse processo foram quantificados por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a qual permite identificar, compilar e avaliar as

entradas e saídas do sistema, bem como os impactos potenciais decorrentes da produção. De forma análoga à primeira etapa do estudo, empregaram-se o software OpenLCA e o banco de dados Ecoinvent 3.6v para a realização da ACV, considerando, neste caso, a produção de vidro incorporando a CCA como insumo alternativo.

4.2.1. Unidade Funcional e Fronteira do Sistema

O cenário desta etapa é a produção de vidro soda-cal utilizando CCA em um sistema de produção integrado à Usina Termelétrica São Sepé. Na Figura 8 é exposto o fluxograma com as principais etapas do ciclo de vida da produção de vidro com CCA, considerando emissões diretas e indiretas. A fronteira escolhida também foi do berço ao portão de fábrica (cradle-to-gate), ou seja, são consideradas as etapas desde a extração das matérias primas até o produto final, pronto para comercialização. A unidade funcional escolhida para este estudo é 1,0 kg (um quilograma) de vidro soda-cal de CCA produzido.

Figura 8 - Fluxograma das etapas e fronteira do sistema da produção de vidro soda-cal utilizando CCA.



Fonte: Autor.

Para fim de comparação, foi realizada a ACV do cenário de produção de vidro soda-cal convencional levando em consideração os dados de uma empresa fabricante de vidro da região. A localização da empresa foi utilizada com objetivo de calcular os impactos do transporte de insumos.

4.2.2. Avaliação de Impactos Ambientais

Para a estimativa dos impactos ambientais associados à produção de vidro a partir da cinza da casca de arroz (CCA), adotou-se a metodologia ReCiPe 2016 Midpoint (H), implementada no software OpenLCA, com o suporte do banco de dados Ecoinvent 3.6v. O método ReCiPe 2016 Midpoint (H) contempla dezoito categorias de impacto, o que possibilita uma avaliação abrangente e detalhada da sustentabilidade de materiais, incluindo aqueles de natureza cerâmica. Ademais, a abordagem em nível de midpoint contribui para a compreensão do comportamento dos impactos ambientais ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida do processo produtivo, permitindo identificar de forma mais precisa os potenciais pontos críticos.

As categorias de impactos escolhidas neste estudo foram: Human carcinogenic toxicity (HCT), Freshwater ecotoxicity (FET), Marine ecotoxicity (MET), Fossil resource scarcity (FRS), Terrestrial ecotoxicity (TET), Freshwater eutrophication (FEU), Ozone formation, Terrestrial ecosystems (OFT), Ozone formation, Human health (OFH), Global warming (GWP) and Terrestrial acidification (TAC).

Para se ter uma melhor confiabilidade nos resultados, foi realizado uma simulação de Monte Carlo, diretamente no OpenLCA, com objetivo de medir o grau de incerteza dos valores obtidos para todas as categorias de impacto.

4.2.3. Alocação de Impactos Ambientais

Na produção de vidro com a utilização de CCA, considerou-se que a fonte de energia elétrica empregada é a mesma gerada pela usina termelétrica alimentada por casca de arroz. Dessa forma, os impactos associados ao insumo de eletricidade foram vinculados aos impactos provenientes da geração termelétrica com essa biomassa. Assim, adotou-se a alocação econômica para o processo de produção do vidro soda-cal com CCA, uma vez que o ciclo de vida da geração de energia resulta na obtenção de outros produtos além da eletricidade. A alocação foi realizada com base no valor econômico dos coprodutos, em conformidade com a metodologia adotada por outros autores em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) relacionados à cadeia produtiva do arroz (COLTRO et al., 2017; DA SILVA, 2021). No cenário de produção convencional, por outro lado, não se fez necessária a aplicação de alocação, visto que o processo não gera coprodutos.

4.2.4. Descrição do Sistema, Inventário e Dados Coletados

O inventário de dados do ciclo de vida da produção de vidro com CCA é baseado em dados coletados in situ, pesquisas bibliográficas e no banco de dados Ecoinvent 3.6v. A construção do inventário do cultivo, beneficiamento de arroz se baseou em dados secundários vindos da literatura. O inventário da produção de CCA a partir da geração de energia termelétrica, baseou-se em dados primários obtidos diretamente dos relatórios de operação, controle e monitoramento da Usina Termelétrica de São Sepé. Quanto a produção de vidro CCA e vidro convencional, os dados basearam na produção piloto em escala de laboratório.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultado da Avaliação do Ciclo de Vida da Usina a Casca de Arroz

5.1.1. Inventário de Insumos Químicos

A partir dos dados como horas de operação, vazão de tratamento e dosagens padrão, foi possível calcular a quantidade de insumos químicos utilizados nos sistemas de tratamento de água e efluentes, e assim, relacionar os resultados com a unidade funcional de interesse. Na Tabela 10 expõe-se o inventário de insumos químicos da usina termelétrica.

Tabela 10 - Inventário de insumos químicos utilizados nos tratamentos de água e efluentes da usina termelétrica.

Unidade	Insumo	Valor	Unidade
ETA	Policloreto de Alumínio e Sulfato de Alumínio	$2{,}08 \times 10^{-4}$	kg/kWh
	Hidróxido de Sódio	$7{,}81 \times 10^{-5}$	kg/kWh
	Polímero	$2{,}60 \times 10^{-6}$	kg/kWh
	Hipoclorito de Sódio	$1{,}56 \times 10^{-4}$	kg/kWh
ETE	Policloreto de Alumínio	$3{,}12 \times 10^{-4}$	kg/kWh
	Polímero	$1{,}56 \times 10^{-6}$	kg/kWh
Osmose Reversa	Ácido Cítrico P.A.	$6{,}93 \times 10^{-7}$	kg/kWh
	Hidróxido de Sódio	$1{,}72 \times 10^{-7}$	kg/kWh
	Glicol;2,2-dibromo-3 nitrilopropionamide; Brometo de sódio	$4{,}32 \times 10^{-7}$	kg/kWh
	Cloreto de Sódio	$1{,}30 \times 10^{-5}$	kg/kWh
Sistema de Desmineralização	Ácido Clorídrico	$1{,}67 \times 10^{-4}$	kg/kWh
	Hidróxido de Sódio	$3{,}90 \times 10^{-4}$	kg/kWh
Torre de Resfriamento	Ácido Fosfórico	$2{,}08 \times 10^{-5}$	kg/kWh
	Polímero de Ácido Carboxílico; Ácido Maléico	$2{,}08 \times 10^{-5}$	kg/kWh
	Ácido Tricloroisocianurico	$2{,}50 \times 10^{-5}$	kg/kWh
Caldeira/turbina	Carbohidrazida	$2{,}60 \times 10^{-5}$	kg/kWh
	Hidróxido de Amônio	$9{,}37 \times 10^{-6}$	kg/kWh
	Polímero não especificado	$9{,}37 \times 10^{-6}$	kg/kWh

Fonte: Autor.

Considerando os produtos químicos utilizada por quilowatt-hora (kWh) na produção de água de processo, observa-se que os insumos com maior consumo estão associados, principalmente, às etapas de tratamento de água e de efluentes brutos. Destacam-se, o coagulante e o biocida à base de cloro, bem como as soluções ácida e alcalina empregadas na etapa de desmineralização. O coagulante e o biocida desempenham papéis fundamentais na clarificação da água e dos efluentes brutos, realizados nas Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Efluentes (ETE). Já o ácido clorídrico e o hidróxido de sódio são utilizados no processo de regeneração das resinas catiônicas e aniônicas, quando saturadas, no sistema de desmineralização.

5.1.2. Inventário de insumos energéticos

O inventário de insumos energéticos da usina termelétrica foi construído com base no consumo interno de energia de todos os equipamentos alimentados por energia elétrica durante a operação da planta. Na Tabela 11 estão listados os sistemas,

principais equipamentos e o seu respectivo consumo.

Tabela 11 - Inventário de insumos energéticos considerando as principais unidades e equipamentos da termelétrica.

Unidade/Etapa	Principais Equipamentos	Consumo Diário (kWh)	Percentual (%)
ETA e DESMI	Bombas Centrífugas (1,10 - 9,20kW) Bombas dosadoras (0,18kW) Misturadores (0,37kW)	434,64	1,35
ETE e Osmose Reversa	Bombas Centrífugas (1,10 – 7,36kW) Bombas dosadoras (0,04kW) Misturador (0,55kW)	270,24	0,84
Torre de Resfriamento	Bombas centrífugas (2,20 – 110,4kW) Ventiladores (14,72 - 55,2 kW)	8902,66	27,58
Pátio de Biomassa	Elevadores metálicos (5,52 – 7,36) Filtro mangas (0,736 – 1,47kW) Válvulas rotativas (3,68kW) Roscas extratoras (9,2 – 29,44kW) Roscas extratoras (9,2 – 29,44kW) Peneiras rotativas (14,72kW)	4433,66	13,73
Caldeira	Bombas centrífugas (5,52kW) Roscas dosadoras de combustível (2,21kW) Exaustor de gases (220,8kW) Ventiladores primário e secundário (55,20kW) Rosca extratora de cinzas (1,10kW) Sopradores de fuligem (0,74kW)	9720,19	30,11
Turbina	Bombas Centrífugas (0,74 – 110kW) Bomba de óleo auxiliar (22,08kW) Compressores de ar comprimido (55,20kW)	8519,95	26,39
Total		32281,34	100

Fonte: Autor.

A operação plena da usina termelétrica resulta em uma produção diária de 192,0 MWh de energia elétrica. Com base nos dados do inventário, verifica-se que aproximadamente 16,81% dessa geração é destinada ao consumo interno dos equipamentos da planta, enquanto o restante é exportado para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Dentre os sistemas internos, destaca-se a caldeira como o principal responsável pelo consumo de energia elétrica, devido à presença de motores de

elevada demanda energética, os quais, em sua maioria, operam de forma contínua (24 horas por dia) durante os períodos de plena atividade da usina.

5.1.3. Inventário de Transporte de Insumos e Resíduos

Para o inventário de transportes foram considerados somente aqueles que possuem maior periodicidade operacional, como o transporte de biomassa e da cinza de casca de arroz. Na Tabela 12 é exposto o inventário de transporte considerando o consumo de combustíveis.

Tabela 12 - Inventário de transportes relacionados ao transporte de biomassa e cinzas da termelétrica.

Entradas	Valor	Unidade
Transporte de biomassa (caminhão 7,5 – 16,0 ton.)	$1,0x10^{-3}$	tkm/kWh
Óleo diesel (transporte de biomassa)	$4,7x10^{-1}$	kg/kWh
Transporte/frete de cinza de casca de arroz (caminhão 7,5 – 16,0 ton.)	$4,23x10^{-3}$	tkm/kWh
Óleo diesel (transporte de cinzas)	$1,38x10^{-2}$	kg/kWh

Fonte: Autor.

5.1.4. Alocação de impactos ambientais

De acordo com a norma ABNT ISO 14044 (2009), alocação é o particionamento dos fluxos de entrada ou saída de um processo entre o produto em estudo e outros produtos relacionados. Em sistemas multiprodutos, a aplicação de procedimentos de alocação é essencial para distribuir adequadamente os fluxos de materiais, energia e emissões ambientais entre os produtos. (TRINDADE, 2020).

Para realizar a avaliação de ciclo de vida foi necessário realizar a alocação econômica dos impactos. Para isso foi inserido o valor do custo/receita para o software reconhecer a contribuição de cada um dos produtos no impacto ambiental calculado das emissões de GEE. Na Tabela 13 estão os valores de cada produto produzido dentro da fronteira do sistema.

Tabela 13 - Levantamento econômico dos produtos do ciclo de vida.

Produtos/Insumos	Valor	Unidade
Arroz Branco	0,414	USD/kg
Farelo	0,145	USD/kg
Quirera	0,271	USD/kg
Casca de arroz	0,017	USD/kg
Arroz em Casca	0,244	USD/kg

Fonte: Planeta Arroz (2025).

5.1.5. Emissões de GEE do ciclo de vida

O modelo do ciclo de vida do presente estudo foi organizado em diferentes etapas para discriminar a contribuição de gases de efeito estufa de cada setor e avaliar qual atividade apresenta maior impacto. Para isso, foram criados fluxos com os produtos mencionados na Tabela 13 e os processos (*processes*) necessários para a sua produção. Todas as entradas e saídas foram inseridas conforme o inventário, levando em consideração que os valores de massa e os custos/receitas foram relacionados à unidade funcional.

A inserção das entradas foi realizada utilizando os processos presentes no banco de dados Ecoinvent. Embora a maioria das entradas do inventário esteja disponível neste banco de dados, alguns insumos químicos, como o sequestrante de oxigênio (carbohidrazida) e o biocida (Glicol; 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide; Brometo de sódio), ainda não estavam presentes na versão 3.6 do Ecoinvent.

O "Product System" reuniu todos os fluxos e processos do ciclo de vida, organizados conforme o fluxograma do processo (Figura 8). Dessa forma, foi possível calcular os impactos associados ao aquecimento global (GWP). Na Tabela 14 é apresentada as emissões de gases de efeito estufa de cada etapa do processo e das suas respectivas fontes, cujo somatório alcançou o valor igual $3{,}60 \times 10^{-2}$ kg CO_2 eq/kWh.

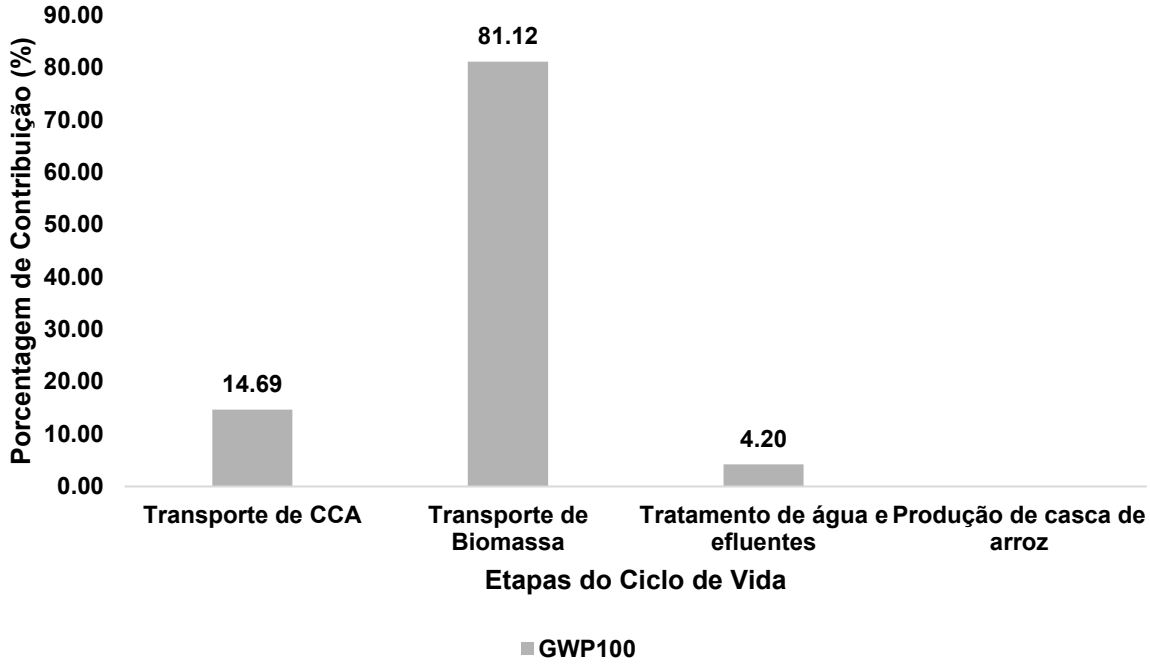
Tabela 14 - Pegada carbono do ciclo de vida da geração de energia a partir de casca de arroz.

Etapa	Fonte	Global Warming Potential (GWP100)
		kg CO_2 eq/kWh
Cultivo do arroz e beneficiamento do arroz	-	ND
Transporte de Biomassa	Combustível para Caminhão (Diesel)	$2{,}92 \times 10^{-2}$
	Transporte/Frete Caminhão 7.5-16 tons	$3{,}69 \times 10^{-6}$
Tratamento de Água e Efluentes	Hidróxido de Sódio	$6{,}10 \times 10^{-4}$
	Hipoclorito de Sódio	$4{,}10 \times 10^{-4}$
	Policloreto de Alumínio	$3{,}70 \times 10^{-4}$
	Ácido Clorídrico	$8{,}22 \times 10^{-5}$
	Ácido Fosfórico	$2{,}88 \times 10^{-5}$
	Ácido Tricloro isocianúrico	$5{,}38 \times 10^{-6}$
	Ácido Cítrico	$4{,}33 \times 10^{-6}$
	Cloreto de Sódio	$1{,}17 \times 10^{-6}$
Transporte e Destinação de Cinza	Combustível para caminhão (Diesel)	$1{,}16 \times 10^{-3}$
	Transporte/frente caminhão 7.5-16 tons	$4{,}13 \times 10^{-3}$
Total		$\mathbf{3{,}60 \times 10^{-2}}$

Fonte: Autor.

A partir dos resultados dos cálculos, observa-se quais são os processos e fluxos que tem maior contribuição para as emissões dentro do ciclo de vida. Na Figura 9 apresenta-se um gráfico demonstrando o comportamento dos processos em relação a emissão de GEE's. Pode-se observar que o transporte de biomassa e de resíduos é o que mais impacta na emissão de poluentes, contribuindo com 81,12% das emissões do ciclo de vida. A quantidade de viagens, distância, volume específico dos resíduos e a eficiência dos veículos de carga no consumo de combustíveis podem influenciar diretamente nestes resultados. Neste caso, a queima de combustível (diesel) pela frota veículos o maior responsável pela pegada carbono.

Figura 9 - Comparativo de contribuições para emissão de GEE's.



Fonte: Autor.

Segundo Shen et al. (2015), a baixa densidade energética da biomassa lignocelulósica torna o custo de transporte um fator especialmente sensível à viabilidade econômica da localização das usinas, bem como à escala operacional adotada, conforme apontado em diversos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Dessa forma, para otimizar a eficiência de empreendimentos baseados nesse tipo de biomassa, torna-se imprescindível realizar análises estratégicas que considerem o local de instalação da planta, o tipo de caminhão utilizado, bem como a capacidade das carretas empregadas no transporte. Essas decisões influenciam diretamente tanto os custos logísticos quanto as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à operação. No caso desta usina termelétrica, a escolha pela instalação na região central do estado do Rio Grande do Sul revelou-se acertada, tendo em vista a concentração de empresas beneficiadoras de arroz num raio de até 243 km, o que favorece o suprimento logístico da biomassa.

No que se refere ao transporte das cinzas de casca de arroz (CCA), destinadas à aplicação em propriedades agrícolas como condicionador de solo, a empresa priorizou áreas situadas nas proximidades da planta, com uma distância média de

18,5 km. Essa estratégia visa a minimização dos custos e da pegada carbono.

A etapa de tratamento de água e efluentes, por sua vez, configura-se como uma atividade contínua durante a geração de energia, dada a necessidade de vapor no funcionamento das caldeiras e turbinas. Os impactos ambientais associados a esse processo foram estimados com base na produção dos insumos químicos utilizados no tratamento. Ressalta-se que a energia elétrica demandada por equipamentos, como motores de bombas centrífugas, não foi contabilizada como fonte externa, pois é gerada internamente pela própria usina a partir da queima da casca de arroz.

Ainda analisando os dados da Tabela 14, em relação ao cultivo e beneficiamento do arroz, não foram atribuídas emissões de GEE à produção da casca, uma vez que, conforme os critérios de alocação econômica aplicados, a carga ambiental recai predominantemente sobre os produtos de maior valor comercial. A casca, por possuir valor econômico reduzido, tem sua participação marginal nas emissões totais, conforme demonstrado na Tabela 13. Além disso, as emissões provenientes da combustão da casca de arroz não são consideradas na contabilidade de GEE, dado que, segundo os princípios do ciclo biogênico do carbono, o CO_2 liberado durante a queima é posteriormente reabsorvido pelas culturas seguintes, caracterizando-se, assim, como uma fonte renovável de energia.

Quanto à incorporação da CCA ao solo agrícola, não foi possível estimar as emissões de GEE associadas a essa prática devido à escassez de dados específicos na literatura e à ausência de inventários robustos sobre o tema.

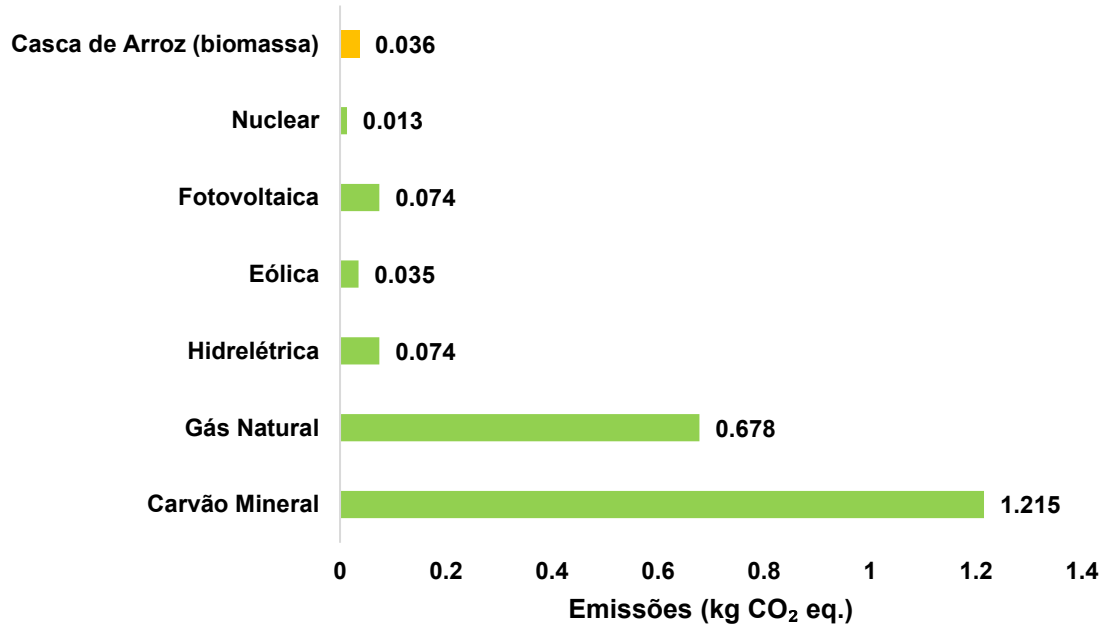
Por fim, embora a energia elétrica consumida pela planta seja oriunda do próprio sistema de geração da usina e, portanto, não configure consumo externo foi realizada uma simulação no software OpenLCA, na qual se incluiu, como entrada, o consumo de energia elétrica dos equipamentos, conforme inventário descrito na Tabela 11. Os resultados indicaram que, caso essa energia fosse proveniente de fonte externa, representaria cerca de 72,5% das emissões totais do sistema, correspondendo a aproximadamente 0,1254 kg CO_2 equivalente (GWP100), o que reforça a vantagem ambiental do modelo adotado pela usina de São Sepé.

5.1.6. Comparação das Emissões de GEE's com Outros Combustíveis

A pegada de carbono encontrada nesse estudo com resultados obtidos em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicados a outras tecnologias de geração de energia elétrica.

Nesse sentido, Guidi et al. (2023) reuniram dados de pegada de carbono provenientes de diversas fontes, abrangendo diferentes matrizes energéticas. A Figura 10 apresenta um gráfico comparativo entre as emissões associadas à geração de energia a partir da casca de arroz e aquelas provenientes de outras tecnologias. Os resultados demonstram que a geração de energia utilizando casca de arroz apresenta emissões significativamente menores de gases de efeito estufa (GEE) em relação às fontes convencionais e não renováveis, como o carvão mineral e o gás natural, reforçando seu potencial como alternativa energética de menor impacto ambiental.

Figura 10 - Comparação entre as emissões em diferentes tecnologias de geração de energia.

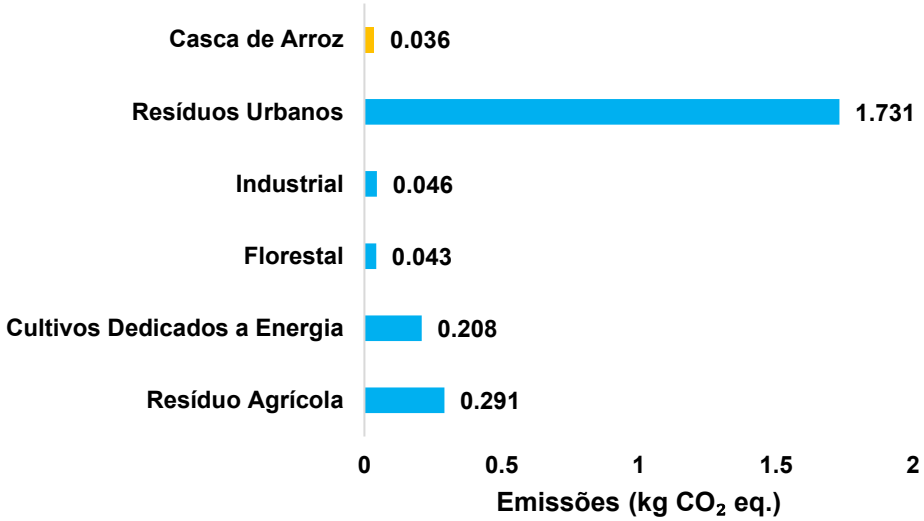


Fonte: Adaptado de Guidi et al. (2023).

De modo semelhante, Kadiyala et al. (2016) compilaram valores de emissões

de CO_2 equivalente provenientes de plantas de geração de energia, com base em diferentes estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), especificamente voltados para usinas termelétricas alimentadas por biomassa. A Figura 11 ilustra um gráfico comparativo entre as emissões da usina analisada, que utiliza casca de arroz como fonte energética, e a média de emissões de outras usinas movidas por diferentes tipos de biomassa. Os dados indicam que, quando comparada à média das plantas que utilizam resíduos agrícolas, a usina movida à casca de arroz apresenta menores emissões de CO_2 equivalente por unidade de energia gerada (kWh), evidenciando sua maior eficiência ambiental no contexto da geração termelétrica com biomassa.

Figura 11 - Gráfico comparativo das emissões da geração de energia entre variedades de biomassa.



Fonte: Adaptado de Kadiyala et al. (2016).

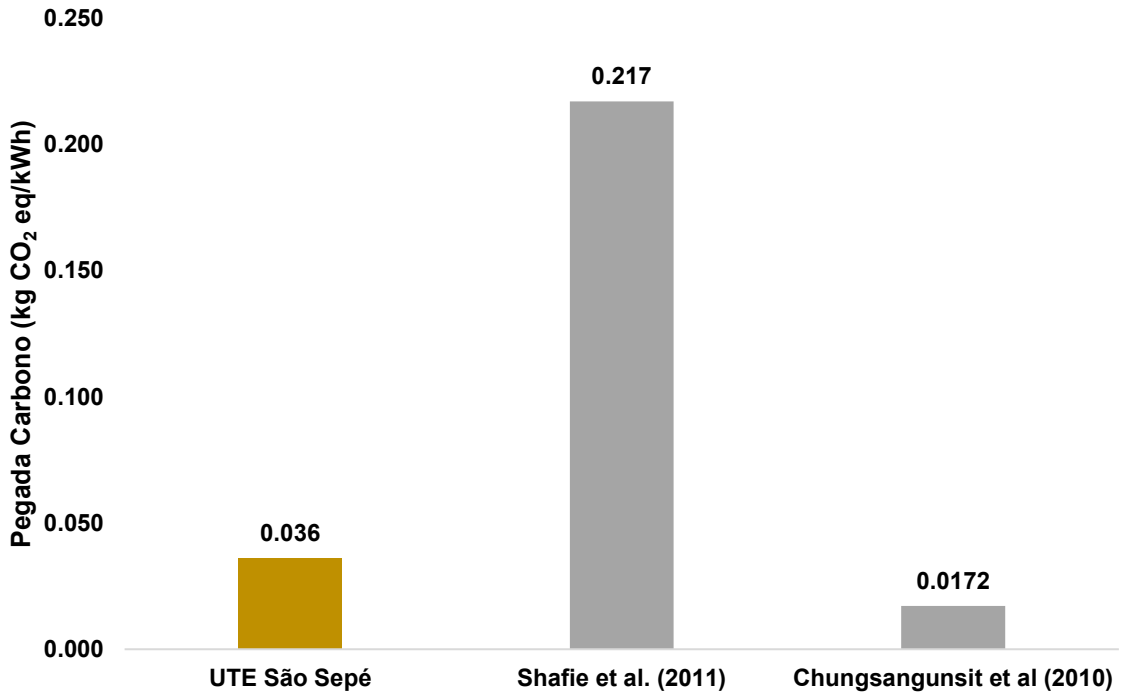
Na literatura há poucos estudos focados na avaliação de ciclo de vida da geração de energia elétrica a base de casca de arroz de plantas termelétricas em operação. Muitos autores realizaram estudos de viabilidade ambiental da implantação de tecnologias de geração elétrica utilizando a biomassa da casca de arroz (SHAFIE et al., 2011; QUISPE et al., 2019; CHUNGSANGUNSIT et al., 2010; UNREAN et al., 2018; THENGANE et al., 2020). Apesar disso, há poucos estudos que definam um valor absoluto de pegada carbono em kg CO_2 eq/kWh.

Chungsangunsit et al. (2010), analisou os impactos ambientais da produção de energia elétrica a partir da combustão da casca de arroz aplicando ACV em uma planta piloto de 10 MW na Tailândia. Os resultados mostraram que em geral a usina a casca de arroz apresentou menores impactos ambientais em comparação com as usinas convencionais. A pegada carbono calculada neste estudo foi de 0,0172 kg CO2 eq/kWh. Segundo o autor, o transporte da casca de arroz pode contribuir de 50,12% a 56,35% com a pegada carbono a depender da distância de transporte.

Shafie et al. (2011), avaliou o desempenho ambiental do potencial energético com CA em moinhos na Malásia utilizando ACV. Os dados foram coletados diretamente dos moinhos e de um banco de dados do software SimaPro. Os resultados mostraram uma pegada carbono de 0,217 kg CO_2 eq/kWh. Neste estudo, o autor cita a influência do transporte que podem contribuir mais do que 60% com as emissões de gases do efeito estufa.

Na Figura 12 tem-se a comparação entre a pegada carbono calculada neste estudo com a literatura citada.

Figura 12 - Comparação da Pegada de Carbono na Geração de Eletricidade a partir da Casca de Arroz segundo Diferentes Estudos de ACV.



Fonte: Adaptado de Shafie et al. (2011); Chungsangunsit et al. (2010).

Como observado nos resultados, no presente estudo da UTE São Sepé obteve-se uma pegada de carbono de 0,036 kg CO_2 eq/kWh para a geração de eletricidade a partir da casca de arroz. A Avaliação de Ciclo de Vida foi elaborada com base em dados primários detalhados, obtidos diretamente na operação da usina, complementados por dados secundários do banco Ecoinvent 3.6, considerando uma fronteira “do berço ao portão” que abrange o cultivo e beneficiamento do arroz, o transporte da biomassa e das cinzas, a operação da usina, o tratamento de água e efluentes e o uso de insumos químicos, com aplicação de alocação econômica entre os coprodutos. A utilização de fatores de emissão atualizados pelo IPCC 2021, aliada à inclusão de processos auxiliares e à contabilização das emissões oriundas das distâncias médias de transporte, resultou em um valor inferior ao reportado por Shafie et al. (2011), que obtiveram 0,217 kg CO_2 eq/kWh a partir de um inventário menos abrangente, com menores distâncias de transporte e exclusão de algumas etapas de apoio, utilizando fatores de emissão anteriores ao IPCC 2021.

Já Chungsangunsit et al. (2010) apresentaram 0,0172 kg CO_2 eq/kWh, em função de uma fronteira de sistema bastante restrita, focada apenas na combustão e transporte imediato da biomassa, com distâncias curtas e provável exclusão das etapas agrícolas e de beneficiamento, além do uso de dados e fatores de emissão menos recentes. Essas diferenças confirmam que a abrangência do escopo, a qualidade e a origem dos dados, bem como as premissas metodológicas adotadas, exercem influência decisiva sobre os resultados obtidos e devem ser devidamente explicitadas para permitir comparações consistentes entre estudos.

No detalhamento das contribuições por etapa, observa-se que o transporte da biomassa permanece como a principal fonte de emissões, seguido pelo transporte e destinação da cinza, que responde por cerca de 10% do total, etapa não contabilizada em alguns estudos comparativos e que ajuda a explicar as diferenças encontradas. As emissões provenientes da operação da caldeira e do uso de insumos químicos são reduzidas (< 10%), enquanto as etapas de cultivo e beneficiamento apresentam participação residual, em consonância com os achados de Chungsangunsit et al. (2010). Esses resultados reforçam que, mesmo com uma pegada de carbono global reduzida, as oportunidades de mitigação estão concentradas na cadeia logística,

destacando-se medidas como a otimização das rotas, o uso de modais mais eficientes e o aproveitamento local das cinzas.

5.2. Resultados da Avaliação do Ciclo de Vida do Vidro Produzido Pela Cinza da Casca de Arroz

5.2.1. Inventário de dados

O levantamento de dados para a construção do inventário de ciclo de vida (ICV) foi realizado através da relação entre a quantidade de insumos é necessária para a produção da unidade funcional. Para isto os dados de entradas e saídas foram calculados em relação a produção experimental de 1,0kg de vidro soda-cal produzido tanto na forma convencional, utilizando areia como fonte de sílica, quanto na produção com CCA.

Para este estudo, foi necessário considerar todos os sistemas envolvidos na geração da cinza da casca de arroz (CCA). O processo inicia-se com o cultivo e beneficiamento do arroz, cujos subprodutos incluem a casca, posteriormente transportada até a usina termelétrica. Nessa etapa, a biomassa é armazenada e destinada à queima em caldeira, resultando simultaneamente na produção de energia elétrica e na formação da CCA. A Tabela 15 apresenta o inventário que contempla os fluxos de entrada e saída associados a esse sistema, representando a base para o cenário de produção de vidro soda-cal com CCA. A análise desse inventário é fundamental para compreender os principais fluxos de materiais e energia relacionados tanto à geração elétrica quanto à obtenção da CCA, que será posteriormente utilizada como insumo alternativo na formulação do vidro. Ressalta-se que os inputs referentes ao transporte da cinza e ao consumo de diesel não foram considerados, uma vez que o resíduo seria integralmente aproveitado no processo de fabricação do vidro soda-cal.

Tabela 15 - Inventário da Geração de CCA e energia elétrica na Usina Termelétrica São Sepé.

Etapas	Inputs/Outputs	Valor	Unidade
Tratamento de Água Industrial	Policloreto de Alumínio + Sulfato de Alumínio	$6{,}66 \times 10^{-4}$	kg/kg glass
	Hidróxido de Sódio	$1{,}49 \times 10^{-3}$	kg/kg glass
	Polímero - Floculante	$1{,}32 \times 10^{-5}$	kg/kg glass
	Hipoclorito de Sódio	$5{,}08 \times 10^{-4}$	kg/kg glass
	Ácido Cítrico P.A.	$2{,}20 \times 10^{-6}$	kg/kg glass
	Glicol; 2,2-dibromo-3-nitrilpropionamide;Brometo de Sódio	$1{,}37 \times 10^{-6}$	kg/kg glass
	Cloreto de Sódio	$4{,}13 \times 10^{-5}$	kg/kg glass
	Ácido Clorídrico	$5{,}39 \times 10^{-4}$	kg/kg glass
	Ácido Fosfórico	$6{,}60 \times 10^{-5}$	kg/kg glass
	Polímero de Ácido Carboxílico; Ácido Maléico	$6{,}60 \times 10^{-5}$	kg/kg glass
	Ácido Tricloroisocianúrico	$7{,}93 \times 10^{-5}$	kg/kg glass
	Eletricidade Bombas Centrífugas/Motores	$1{,}71 \times 10^{-1}$	kWh/kg glass
Transporte e Armazenamento de Biomassa	Transporte Engenhos-Usina Termelétrica	$3{,}17 \times 10^{-3}$	tkm/kg glass
	Diesel - Caminhão 7.5-16 tons	1,49	kg/kg glass
	Eletricidade (motores e sensores)	$6{,}35 \times 10^{-2}$	kWh/kg glass
Caldeira e Turbina	Casca de Arroz	3,81	kg/kg glass
	Eletricidade (motores e sensores)	$2{,}86 \times 10^{-1}$	kWh/kg glass
Gerador	Energia Elétrica	3,17	kWh/kg glass
Extração e Armazenamento de Cinzas	Cinza da Casca de Arroz	$7{,}62 \times 10^{-1}$	kg/kg glass
Emissões da Chaminé	Dióxido de Carbono CO_2	$3{,}65 \times 10^{-2}$	kg/kg glass
	Óxido de Nitrogênio Nox	$5{,}17 \times 10^{-6}$	kg/kg glass
	Material Particulado	$5{,}81 \times 10^{-7}$	kg/kg glass
	Monóxido de Carbono CO	$1{,}18 \times 10^{-6}$	kg/kg glass

Fonte: Autor.

A Tabela 16 apresenta-se o inventário de ciclo de vida do cenário de produção experimental do vidro soda-cal produzido com CCA como fonte alternativa de sílica. A apresentação desse inventário permite comparar diretamente os fluxos de entrada, incluindo reagentes químicos, eletricidade e combustíveis, com os fluxos de saída, especialmente as emissões atmosféricas. A análise crítica desses dados é fundamental para avaliar em que medida a substituição da areia por CCA altera a intensidade de consumo de recursos e o perfil de emissões do processo produtivo.

Tabela 16 - Inventário da produção de Vidro Soda-Cal com CCA.

	Insumo/Produto	**Valor**	**Unidade**
Inputs	SiO_2 (Cinza)	0,761	kg/kg glass
	Na_2CO_3	0,146	kg/kg glass
	$CaCO_3$	0,125	kg/kg glass
	B_2O_3	0,275	kg/kg glass
	Transporte $CaCO_3$	0,008	tkm/kg glass
	Transporte Na_2CO_3	0,042	tkm/kg glass
	Transporte B_2O_3	0,075	tkm/kg glass
	Combustível	0,018	kg/kg glass
	Eletricidade	46,08	kWh/kg glass
Outputs	CO_2	0,180	kg/kg glass
	H_2O	0,065	kg/kg glass

Fonte: Autor.

O inventário do vidro convencional, apresentado na Tabela 17, estabelece a base de comparação com o cenário alternativo. Por meio dele, é possível identificar quais insumos se destacam em termos de consumo e emissões quando a areia é utilizada como fonte principal de sílica. A confrontação desses resultados com o inventário do vidro CCA é indispensável para quantificar ganhos e perdas ambientais, bem como para verificar se a substituição proposta representa de fato uma alternativa mais sustentável.

Tabela 17 - Inventário da produção de vidro soda-cal convencional.

	Produto	**Valor**	**Unidade**
Inputs	SiO_2 (areia)	0,700	kg/kg glass
	Na_2CO_3	0,146	kg/kg glass
	$CaCO_3$	0,125	kg/kg glass
	B_2O_3	0,275	kg/kg glass
	Eletricidade	46,08	kWh/kg glass
	Transporte $CaCO_3$	0,020	tkm/kg glass
	Transporte Na_2CO_3	0,007	tkm/kg glass
	Transporte B_2O_3	0,014	tkm/kg glass
	Transporte de Areia	0,428	tkm/kg glass
	Combustível	0,066	kg/kg glass
Outputs	CO_2	0,119	kg/kg glass
	H_2O	0,065	kg/kg glass

Fonte: Autor.

Embora os insumos utilizados na produção de vidro soda-cal sejam equivalentes nos dois cenários avaliados, algumas diferenças se evidenciam nos

inventários. No caso do vidro produzido com CCA, não há necessidade de transporte específico ou consumo adicional de combustível para o insumo fonte de sílica, uma vez que se considera a possibilidade de integração entre a planta de produção de vidro e o sistema de geração de energia elétrica e obtenção da CCA. Por outro lado, no cenário do vidro convencional, as distâncias de transporte dos reagentes (barrilha, carbonato de cálcio e bórax) diferem em relação ao primeiro cenário em função da localização das unidades produtivas. Essa variação nas distâncias de suprimento impacta diretamente os valores de transporte e, consequentemente, o consumo de combustíveis reportados no inventário do ciclo de vida.

5.2.2. Alocação de Impactos

Segundo a norma ABNT ISO 14044 (2009), a alocação corresponde à divisão dos fluxos de entrada ou saída de um processo entre o produto principal avaliado e os demais produtos associados. Em situações de sistemas multiprodutos, torna-se indispensável aplicar procedimentos de alocação, a fim de distribuir de maneira apropriada os fluxos de materiais, energia e emissões ambientais entre todos os produtos gerados (TRINDADE, 2020).

Para a condução da ACV referente à produção de vidro com CCA, tornou-se necessário aplicar o procedimento de alocação com base em critérios econômicos. Nesse contexto, os valores de receita ou custo de mercado dos produtos gerados ao longo do ciclo de vida foram inseridos no software, de modo a possibilitar a identificação da contribuição relativa de cada produto. A Tabela 18 apresenta a relação entre os produtos do ciclo de vida e seus respectivos valores de mercado.

Tabela 18 - Levantamento econômico dos produtos do ciclo de vida.

Produtos/Insumos	Valor	Unidade
Arroz Branco	0,414	USD/kg
Farelo	0,145	USD/kg
Quirera	0,271	USD/kg
Casca de arroz	0,017	USD/kg
Arroz em Casca	0,244	USD/kg
Energia Elétrica (Termelétrica)	**0,038**	**USD/kWh**
Cinza de Casca de Arroz	**0,000**	**USD/kg**

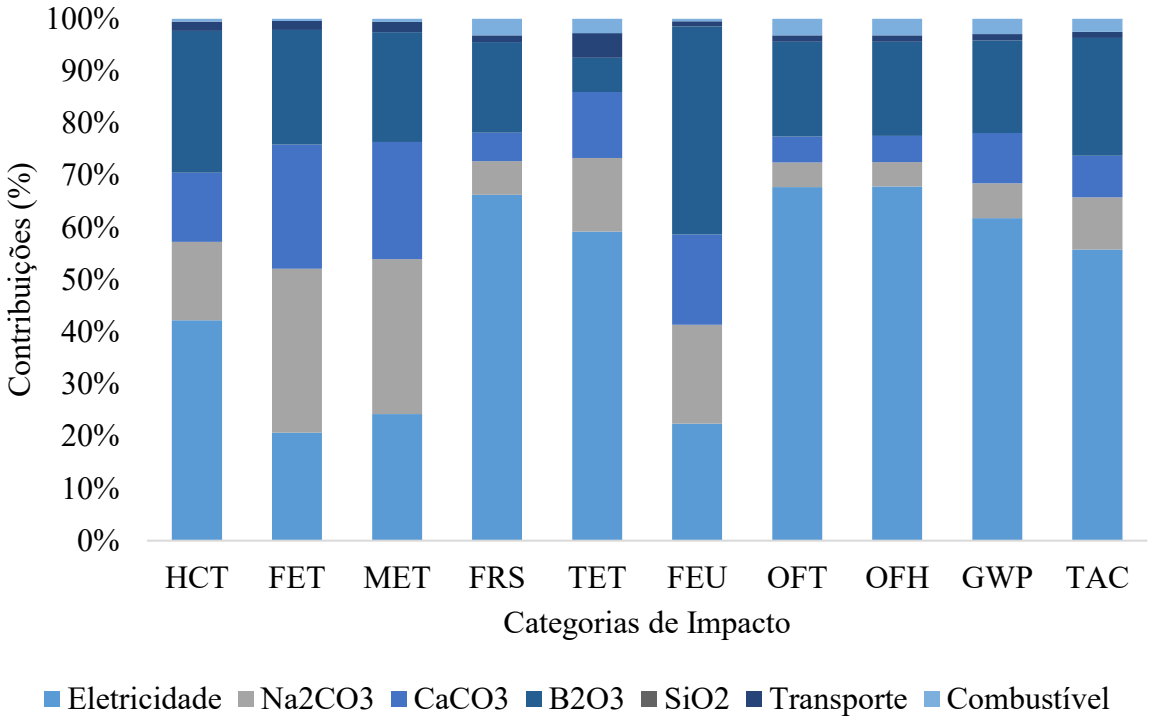
Fonte: Planeta Arroz (2025); Autor.

O valor da energia elétrica comercializada em leilão pela termelétrica foi fornecido pela própria empresa, enquanto o valor da CCA não foi atribuído, por se tratar de um resíduo gerado durante a produção de energia. Conforme Yuan et al. (2024), por ser um resíduo, a cinza da casca de arroz não possui valor comercial, tornando-se um recurso altamente vantajoso para reduzir o custo de produção de materiais cerâmicos quando utilizada, mesmo que parcialmente, como substituto de matérias-primas convencionais.

5.2.3. Resultados do Cenário de Produção de Vidro Soda-cal com CCA

Na Figura 13 é apresentado um gráfico que ilustra como os diferentes insumos empregados na fabricação do vidro com CCA contribuem para cada categoria de impacto ambiental considerada. Essa visualização é relevante porque permite identificar os pontos críticos do processo, ou seja, quais matérias-primas ou fluxos energéticos concentram maior responsabilidade pelos impactos totais. A análise desses resultados auxilia na proposição de melhorias, seja pela substituição de insumos específicos ou pela otimização de etapas do processo. Os valores obtidos para cada input são mostrados de forma mais detalhada no apêndice IV.

Figura 13 - Comparação das contribuições dos inputs da produção de vidro soda-cal com CCA em cada categoria de impacto.



Fonte: Autor.

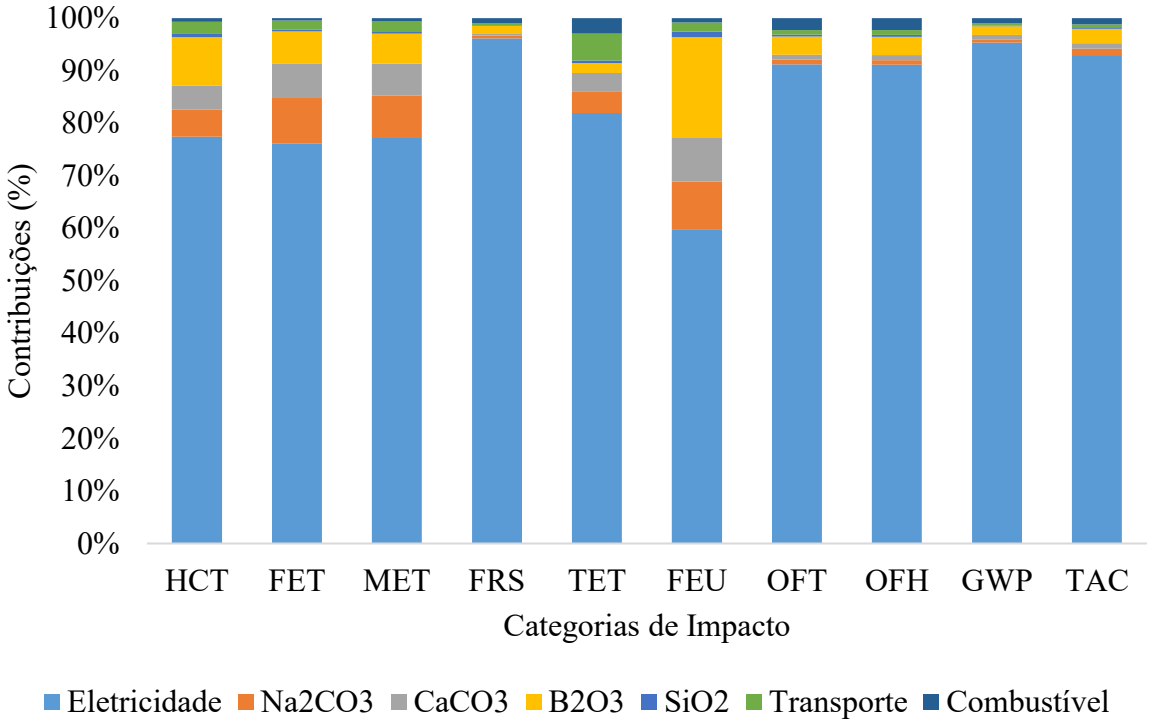
Observa-se que a eletricidade é o insumo que mais contribui para os impactos ambientais no ciclo de vida da produção de vidro soda-cal com CCA. A eletricidade utilizada provém da usina termelétrica, incorporando os impactos associados ao cultivo e processamento do arroz, ao transporte da biomassa e à combustão na caldeira. Outros insumos relevantes em termos de impacto incluem a barrilha (Na_2CO_3), o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o bórax (B_2O_3), os quais refletem os impactos decorrentes da extração mineral e do processamento.

Por outro lado, a sílica (SiO_2) proveniente da CCA gerada na usina termelétrica não apresenta impactos ambientais adicionais, uma vez que se trata de um resíduo do processo de geração de energia. Adicionalmente, o transporte e o consumo de combustíveis fósseis são reduzidos, devido à ausência da necessidade de transportar a CCA até a planta de produção de vidro soda-cal.

5.2.4. Resultados do Cenário de Produção de Vidro Soda-cal Convencional

No caso do vidro convencional, o gráfico da Figura 14 revela o perfil de contribuição dos insumos em cada categoria de impacto. Essa análise possibilita observar o peso relativo da extração e transporte da areia, além de outros reagentes, no desempenho ambiental do sistema. Ao comparar este resultado com o cenário alternativo, torna-se possível verificar em quais categorias a substituição por CCA gera benefícios e em quais ela acarreta novas pressões ambientais.

Figura 14 - Comparação das contribuições dos inputs da produção de vidro soda-cal convencional em cada categoria de impacto.



Fonte: Autor.

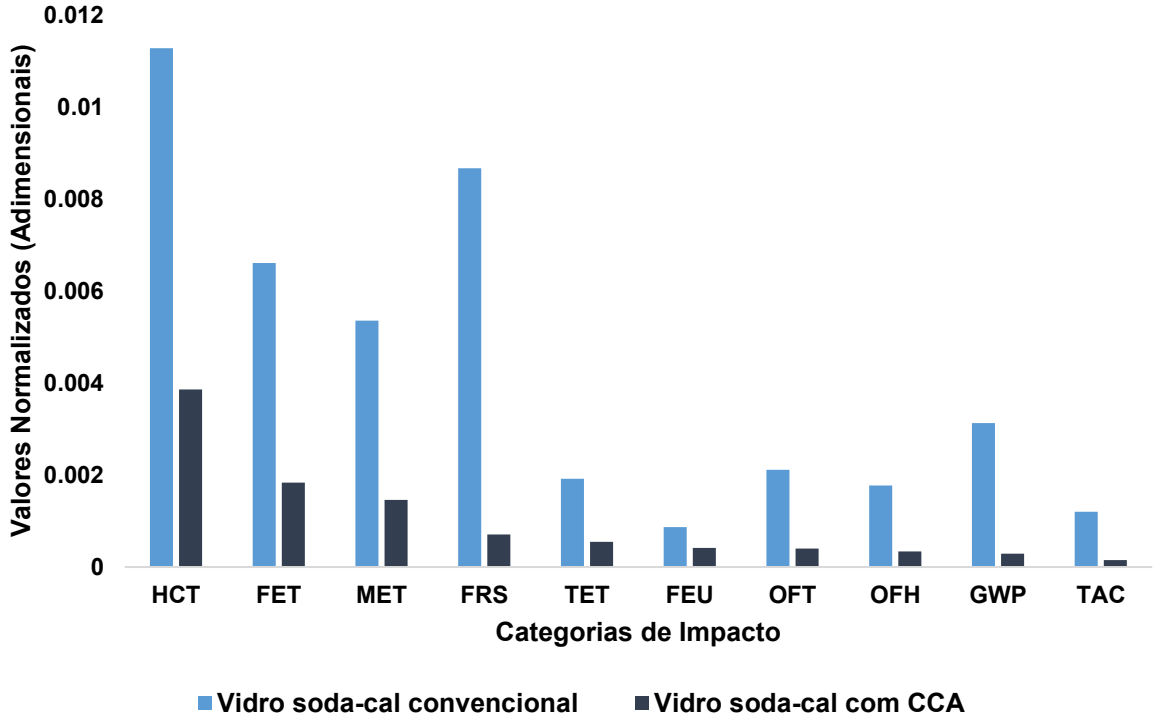
Observa-se que a eletricidade apresenta uma contribuição predominante em todas as categorias de impacto, representando mais de 50 % da participação total. Os dados referentes à eletricidade foram obtidos do banco de dados Ecoinvent, considerando a geração de energia na região Sul do Brasil, proveniente principalmente de fontes presentes na matriz energética local, como as hidrelétricas. O gráfico de contribuições está baseado nos resultados obtidos pelo ACV expostos no Apêndice IV.

5.2.5. Comparação entre os Cenários

A comparação entre os cenários normalizados permite uma avaliação integrada, evidenciando de forma padronizada quais categorias de impacto apresentam maior relevância em cada alternativa. Esse gráfico é fundamental para interpretar não apenas os valores absolutos dos inventários, mas também o peso relativo dos impactos no contexto do ciclo de vida. Dessa forma, é possível identificar de maneira mais clara os trade-offs ambientais associados ao uso da CCA, fortalecendo a análise comparativa entre os dois sistemas produtivos.

Para realizar a comparação dos resultados entre os dois cenários, os resultados foram normalizados com a ferramenta de normalização e ponderação. Segundo Crenna et al. (2019), a normalização em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma etapa opcional que permite interpretar os resultados caracterizados em termos de relevância ambiental relativa. Por meio da normalização, os impactos absolutos de um produto ou sistema são convertidos em contribuições relativas em comparação com uma situação de referência, como outro produto, região, país ou o mundo inteiro. Os fatores de normalização geralmente combinam inventários regionais e globais de emissões e uso de recursos, incluindo estimativas de fluxos elementares ausentes, e são calculados usando métodos e modelos de avaliação de impactos. Na Figura 15 tem-se os resultados de ACV para os dois cenários propostos.

Figura 15 - Gráfico comparativo entre os cenários com dados normalizados.



Fonte: Autor.

A partir do gráfico, observa-se que, em todas as categorias de impacto, o vidro convencional apresenta valores normalizados superiores aos do vidro com CCA. As categorias HCT e FRS destacam-se por apresentarem os maiores valores para o vidro convencional, sendo também aquelas em que a diferença em relação ao vidro com CCA é mais expressiva. As categorias FET e MET também evidenciam reduções significativas entre os dois cenários. Por outro lado, as categorias FEU, OFH e TAC apresentaram diferenças menos acentuadas, indicando que a substituição por CCA possui impacto mais limitado nesses casos.

De modo geral, a incorporação de CCA na produção de vidro soda-cal promove redução da carga ambiental em praticamente todas as categorias de impacto analisadas, com destaque para os efeitos relacionados à toxicidade humana e à ecotoxicidade em água doce. Esses resultados reforçam o potencial da CCA como alternativa sustentável para a fabricação de vidro.

5.2.6. Simulação de Monte Carlo

Para a avaliação dos dados obtidos na análise de ciclo de vida (ACV) dos cenários propostos, foi realizada a simulação de Monte Carlo para cada situação investigada. Com o objetivo de ampliar a confiabilidade da análise, foram conduzidas 10.000 simulações para todas as categorias de impacto. A aplicação desse procedimento probabilístico aumenta a robustez dos resultados, ao incorporar a variabilidade dos dados e reduzir as incertezas associadas às entradas do inventário. Dessa forma, a análise possibilita verificar se as diferenças entre os cenários são estatisticamente consistentes, assegurando que os benefícios e limitações da substituição da areia pela cinza da casca de arroz (CCA) não decorrem de flutuações pontuais, mas refletem tendências robustas do sistema produtivo avaliado. Os resultados obtidos pela simulação de Monte Carlo no OpenLCA estão expostos nos Apêndices V e VI.

Os resultados demonstraram que o vidro soda-cal convencional apresentou desvios padrão inferiores a 1% do valor médio em todas as categorias de impacto, evidenciando baixa variabilidade e alta confiabilidade estatística. Em contrapartida, o vidro produzido com CCA exibiu maior dispersão em algumas categorias, em especial em Terrestrial ecotoxicity (TET), cujo desvio padrão foi de 6,43, com valores variando entre 4,1 e 115,7 kg 1,4-DCB. Esse comportamento sugere que as etapas agrícolas do cultivo do arroz e da geração de energia elétrica a partir da biomassa introduzem maior incerteza ou sensibilidade aos parâmetros do inventário.

Apesar dessa variabilidade, a análise probabilística revelou sobreposição mínima entre os intervalos de confiança (percentis 5%–95%) dos dois cenários, indicando que as diferenças observadas são estatisticamente significativas e não podem ser atribuídas ao acaso.

Na comparação direta entre os cenários, os ganhos ambientais advindos da substituição da areia pela CCA foram expressivos. Em aquecimento global (GWP), o vidro convencional apresentou impacto médio de aproximadamente 25,0 kg CO_2 eq/kg, enquanto o vidro com CCA atingiu apenas 2,3 kg CO_2 eq/kg, representando uma redução de cerca de 90%. Em relação à escassez de recursos fósseis (FRS), os resultados foram igualmente relevantes: 8,5 kg óleo eq/kg no vidro convencional contra 0,7 kg óleo eq/kg no vidro CCA, correspondendo a uma diminuição de 92%.

Nas categorias de impacto associadas à saúde humana, observou-se que a toxicidade carcinogênica (HCT) foi reduzida de 0,116 kg 1,4-DCB eq/kg (vidro convencional) para 0,039 kg 1,4-DCB eq/kg (vidro CCA), o que equivale a uma redução de 66%. Já nas categorias de ecotoxicidade aquática, tanto em água doce (FET) quanto em ambiente marinho (MET), os impactos do vidro CCA foram de três a quatro vezes inferiores em relação ao vidro tradicional.

Por outro lado, em categorias como acidificação terrestre (TAC) e eutrofização em água doce (FEU), os benefícios foram mais modestos, situando-se entre 20% e 40%, embora ainda relevantes no contexto ambiental. No caso de TET, apesar da maior variabilidade estatística, a média obtida para o vidro CCA (10,3 kg 1,4-DCB eq/kg) permaneceu substancialmente inferior à do vidro convencional (29,5 kg 1,4-DCB eq/kg), reforçando a consistência da tendência de redução de impactos.

De forma geral, os resultados confirmam que a utilização de CCA como matéria-prima secundária na produção de vidro soda-cal representa uma alternativa ambientalmente consistente. Os maiores benefícios concentram-se em categorias críticas, como mudanças climáticas, escassez de recursos fósseis e toxicidade humana, diretamente relacionadas à eliminação da necessidade de extração mineral da areia e ao aproveitamento de um resíduo sem valor econômico.

Assim, a simulação de Monte Carlo evidencia que a rota produtiva baseada na incorporação de CCA não apenas oferece vantagens ambientais robustas e estatisticamente confiáveis, mas também se mostra alinhada aos princípios da economia circular, ao transformar um passivo ambiental em insumo de valor agregado para a indústria vidreira.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os inventários de dados obtidos por meio do levantamento realizado na Usina Termelétrica São Sepé constituíram uma base sólida e tecnicamente fundamentada para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da geração de energia elétrica a partir da casca de arroz. Os dados coletados refletem, de maneira fidedigna, as condições operacionais da unidade, que utiliza a biomassa como fonte energética renovável. As variáveis relevantes ao processo foram sistematicamente mensuradas e monitoradas, incluindo o consumo interno de energia elétrica, o uso de insumos químicos, o transporte da biomassa e de resíduos, bem como o consumo de combustíveis fósseis.

A análise dos impactos ambientais permitiu identificar as etapas com maior contribuição para a pegada de carbono, destacando-se o transporte da biomassa e da cinza da casca de arroz (ambas influenciadas pelo consumo de óleo diesel) e o tratamento de água e efluentes, associados à produção e ao uso de insumos químicos. Ainda assim, o processo de geração de energia elétrica apresentou desempenho ambiental favorável, uma vez que promove a conversão de um passivo ambiental (casca de arroz) em uma fonte de energia renovável e de menor impacto. A elaboração do inventário de dados possibilitou a execução da ACV da geração de energia a partir da biomassa, permitindo sua comparação com outras fontes energéticas e reforçando a importância desse tipo de estudo como ferramenta estratégica para o avanço das pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida, especialmente no contexto das energias renováveis.

Complementarmente, a incorporação da cinza da casca de arroz (CCA) como substituto parcial da sílica convencional na produção de vidro soda-cal revelou benefícios ambientais significativos quando analisada sob a perspectiva da ACV. Os resultados demonstraram reduções expressivas nas emissões de gases de efeito estufa, no consumo de energia e na extração de recursos naturais não renováveis. A análise de contribuição indicou o consumo energético na etapa de fusão como o principal ponto crítico (*hotspot*) do processo, evidenciando a necessidade de estratégias voltadas à eficiência energética. Ainda assim, a utilização da CCA mostrou-se uma alternativa promissora para mitigar impactos, sobretudo no indicador de pegada de carbono e na eficiência no uso de recursos.

Sob o ponto de vista científico, este estudo avança o conhecimento na interface entre resíduos agroindustriais e processos industriais de alta demanda energética, ao demonstrar o potencial de valorização de subprodutos agrícolas em um setor de elevado impacto ambiental, como o vidreiro. Do ponto de vista prático, os resultados oferecem subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas e para a adoção de práticas industriais voltadas à descarbonização e à economia circular, evidenciando que a substituição parcial de matérias-primas convencionais por resíduos agroindustriais pode reduzir significativamente os impactos ambientais sem comprometer a qualidade do produto final.

Entretanto, algumas limitações devem ser reconhecidas. A análise foi conduzida sob a abordagem *cradle-to-gate*, não abrangendo as etapas de uso e fim de vida do vidro, que poderiam fornecer uma compreensão mais ampla dos impactos e benefícios ao longo de todo o ciclo de vida. Além disso, a inexistência de plantas industriais que utilizem CCA em larga escala impôs a necessidade de uso de dados experimentais e de simulações, que, embora consistentes, ainda demandam validações empíricas em contexto industrial.

Em síntese, os resultados obtidos confirmam que a utilização da casca de arroz e de sua cinza constitui uma estratégia ambientalmente vantajosa, alinhada aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A rota integrada de aproveitamento energético e de aplicação da CCA na indústria do vidro representa um exemplo concreto de simbiose industrial e de uso eficiente de recursos, com potencial para reduzir impactos ambientais, promover a valorização de resíduos e fortalecer a transição para modelos produtivos mais sustentáveis. Este estudo, portanto, fornece uma base científica consistente e orientações práticas que podem subsidiar decisões estratégicas em nível industrial e de políticas públicas, contribuindo de forma efetiva para a construção de sistemas produtivos mais circulares, resilientes e ambientalmente responsáveis.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental — **Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão ambiental — **Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ALAZEMI, M. F. F. S.; ABDULLAH, M. N.; MUSTAPHA, F.; ARIFFIN, M. K. A.; SUPENI, E. E**. Effect of rice husk ash addition on the physical properties of soda-lime-silica glass for building glass and window panel.** Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES), v. 15, n. 1, p. 7771-7780, mar. 2021. Disponível em: https://journal.ump.edu.my/jmes/article/download/2969/1261/21740 . Acesso em: 08 ago. 2025.

ALMEIDA, F. L.; ANDRADE, C. R.; LOPES, M. T. **Partial substitution of Portland cement with rice husk ash: mechanical and environmental performance analysis**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, n. 2, p. e2022-0505, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0505. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rmat/a/QdCYzX3wrpM9hz3VjCq6XfG/?lang=en . Acesso em: 5 out. 2025.

ALMEIDA, S. R. **Pirólise rápida de casca de arroz: estudo de parâmetros e caracterização de produtos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Brasil supera a marca de 210 GW instalados**. 07 maio 2025. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/brasil-supera-a-marca-de-210-gw-instalados . Acesso em: 20 jul. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL: **Base de dados de empreendimentos de geração.** Brasília: ANEEL, 2025. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel/resource/11ec447d-698d-4ab8-977f-b424d5deee6a . Acesso em: 20 jul. 2025.

ARRANZ, José Ignacio; MIRANDA, María Teresa; MONTERO, Irene; SEPÚLVEDA, Francisco José. **Thermal Study and Emission Characteristics of Rice Husk Using TG-MS**. Materials, [S.l.], v. 14, n. 20, p. 6203, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/20/6203 . Acesso em: 7 out. 2025.

ARAÚJO, Daniel Féo Castro de. **The dynamics of renewable energies in the Brazilian energy matrix in the 21st century.** Revista Cerrados, v. 21, n. 01, p. 399-429, 2023. DOI: 10.46551/rc24482692202316. Disponível em: https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/6189 . Acesso em: 08 ago. 2025.

BALOPI, Babusi; MOYO, Mahluli; GORIMBO, Joshua; LIU, Xinying. **Biomass-to-electricity conversion technologies: a review. Waste Disposal & Sustainable Energy**, Cham, v. 7, p. 323–351, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s42768-025-00226-5 . Acesso em: 26 ago. 2025.

BEIDAGHY DIZAJI, H.; ZENG, T.; HÖLZIG, H.; BAUER, J.; KLÖß, G.; ENKE, D. **Ash transformation mechanism during combustion of rice husk and rice straw**. Fuel, v. 307, p. 121768, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121604.

BERKIN, G. **Heat absorbing glass from rice husk ash for a sustainable environment.** WIT Transactions on Ecology and the Environment, v. 109, p. 521-527, 2008.

BEZERRA, I. M.; SOUZA, J.; CARVALHO, J.; NEVES, G. A. **Aplicação da cinza da**

casca do arroz em argamassas de assentamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, p. 639-645, 2011.

BLOMBERG, Tom; TRIPATHI, Tripurari; KARPPINEN, Maarit. **New chemical mechanism explaining the breakdown of protective oxides on high temperature steels in biomass combustion and gasification plants**. RSC Advances, [S.l.], v. 9, n. 18, p. 10034–10048, 2019. Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ra/c9ra00582j . Acesso em: 7 out. 2025.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. **Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil**. Interciencia, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.

CARCEA, Marina. **Value of Wholegrain Rice in a Healthy Human Nutrition**. Agriculture, Basel, v. 11, n. 8, p. 720, 2021. DOI: 10.3390/agriculture11080720. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agriculture11080720 . Acesso em: 07 out. 2025.

CASTELLANI, V.; SALA, S. **Sustainability assessment of products: towards an LCA-based framework for the circular economy**. Sustainability, v. 11, n. 23, p. 6366, 2019. DOI: 10.3390/su11236366. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/23/6366. Acesso em: 5 out. 2025.

CHEN, T.; LIN, Y.; WANG, J. **Circular utilization of rice husk ash in low-carbon materials: a review.** Processes, v. 10, n. 9, p. 1872, 2022. DOI: 10.3390/pr10091872. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/10/9/1872. Acesso em: 5 out. 2025.

CHUNGSANGUNSIT, T.; GHEEWALA, S. H.; PATUMSAWAD, S. **Emission assessment of rice husk combustion for power production.** World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 53, p. 1070-1075, 2010.

COLANGELO, S. **Reducing the environmental footprint of glass manufacturing.** International Journal of Applied Glass Science, 2023. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/383654813_Reducing_the_environmental_footprint_of_glass_manufacturing . Acesso em: 28 set. 2025.

COLTRO, L. et al. **Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems**. Journal of Cleaner Production, v. 153, p. 491-505, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – Conab. **A cultura do arroz**. Brasília: Conab, 2015. 180 p. ISBN 978-85-62223-06-8. Disponível em: https://biblioteca.conab.gov.br/phl82/pdf/2015_Cultura_do_arroz.pdf . Acesso em: 02 dez. 2024.

COSTA, A. K.; et al. **Quantification and use of rice husk in decentralized electricity generation in Rio Grande do Sul State, Brazil**. Brazilian Archives of Biology and Technology / Clean Technologies & Environmental Policy (related output), 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/j/babt/a/Fm9sYT53jWgCBVP8JfkFkvt/?lang=en . Acesso em: 07 nov. 2025.

CQFS-RS/SC – COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

CRENNA, E.; SECCHI, M.; BENINI, L.; SALA, S. **Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 24, n. 10, p. 1851-1877, 2019.

CRERAL – Cooperativa Regional de Eletrificação Rural do Alto Uruguai Ltda. **Usina Termelétrica São Sepé**. Disponível em: https://www.creral.com.br/geracao-e-desenvolvimento/usinas/termeletrica-sao-sepe. Acesso em: 6 out. 2025.

DA SILVA, M. G. et al. **Greenhouse gas emissions of rice straw-to-methanol chain**

in Southern Brazil. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 3, p. 105202, 2021.

DINIZ, Juraci; CARDOSO, André de L.; STAHL, João Arthur; VILLETTI, Marcos Antonio; MARTINS, Ayrton F. **Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise**. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 25–32, 2004. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/9674 . Acesso em: 7 out. 2025.

DOMENE, Semíramis Martins Álvares; GHEDINI, Natália Simonian Rodrigues Valente. **Importância nutricional do arroz e do feijão**. In: FERREIRA, Lígia Amparo da Silva (Org.). Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 158-174. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134413/1/cap8-2021.pdf . Acesso em: 7 out. 2025.

EBERLE, Annika; HEATH, Garvin A.; NICHOLSON, Scott; CARPENTER, Alberta. **Systematic Review of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Electricity.** Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL), Sept. 2017. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68474.pdf . Acesso em: 08 ago. 2025.

FATHURAHMAN, R.; SURJOSATYO, A. **Utilization of rice husks as a fuel for gasification – A review.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1034, p. 012065, 2022. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1034/1/012065. Acesso em: 5 out. 2025.

FERREIRA, T.; PAIVA, J. M.; PINHO, C. **The Experimental Analysis of Biochar Combustion in a Traveling Grate Furnace.** Fire, v. 7, n. 4, p. 118, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/fire7040118 . Acesso em: 6 out. 2025.

FERNANDES, I. J.; CALHEIRO, D.; SÁNCHEZ, F. A. L.; CAMACHO, A. L. D.; ROCHA, T. L. A. de C.; MORAES, C. A. M.; SOUSA, V. C. de. **Characterization of silica**

produced from rice husk ash: Comparison of purification and processing methods. Materials Research, v. 20, supl. 2, p. 512–518, 2017. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-1043.

FERNANDO, Sarah; GUNASEKARA, Chamila; LAW, David W.; NASVI, M. C. M.; SETUNGE, Sujeeva; DISSANAYAKE, Ranjith. **Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete**. Journal of Environmental Management, v. 295, p. 113140, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113140. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34198175/ . Acesso em: 08 ago. 2025.

FREITAS, Jogério Evangelista de. **Uso de cinza da casca de arroz na estabilização de solos para uso em pavimento rodoviário**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/32778 . Acesso em: 7 out. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Food Outlook – Biannual Report on Global Food Markets – June 2025**. Rome: FAO, 2025. DOI: 10.4060/cd5655en. Disponível em: https://www.fao.org/ccp/ccp-75-and-intersessionals/ccp-intersessional-2/food-outlook---biannual-report-on-global-food-markets---june-2025/en . Acesso em: 07 out. 2025.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. **The circular economy – A new sustainability paradigm?** Journal of Cleaner Production, v. 143, p. 757–768, 2017.

GLOBAL ENVIRONMENT CENTRE (GEC). **CDM Feasibility Study for Biomass-based Power Generation by Utilization of Rice Husks — Thailand**. Osaka, Japan, 2010.
Disponível em (relatório PDF): https://gec.jp/eng/cdm-fs/2010/201012IDI_eThailand_rep.pdf . Acesso em: 07 ago. 2025.

GONÇALVES, Jaderson; da SILVA, Gustavo; LIMA, Liandra; MORGADO, Daniella; NALIN, Marcelo; ARMAS, Luis E. G.; VALSECCHI, Chiara; MENEZES, Jacson W. **Production of transparent soda-lime glass from rice husk containing iron and manganese impurities.** Ceramics, v. 3, n. 4, p. 494–506, 2020.

GOWLLA, Jyothsna; SALAM, Bahurudeen Abdul; SAHU, Prasanta Kumar. **Cleaner bioenergy production from rice husk biomass: a global review.** Sustainable Environment Research, 2025. Disponível em: https://sustainenvironres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42834-025-00248-y . Acesso em: 2 ago. 2025.

GU, S. **Utilizing Life Cycle Assessment to Optimize Processes and Supply Chains for Rice-Husk-Derived Silica: comparative scenarios.** Processes (ou similar — MDPI), 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/13/2/483 . Acesso em: 08 ago. 2025.

GUIDI, G.; VIOLANTE, A. C.; DE IULIIS, S. **Environmental impact of electricity generation technologies: A comparison between conventional, nuclear, and renewable technologies.** Energies, v. 16, n. 23, p. 7847, 2023.

HOQUE, Md. Emdadul; RASHID, Fazlur; AZIZ, Muhammad. **Gasification and power generation characteristics of rice husk, sawdust, and coconut shell using a fixed-bed downdraft gasifier.** Sustainability, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 2027, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su13042027 . Acesso em: 7 out. 2025.

HOSSAIN, S. K. S.; ISLAM, M. S.; AHMED, S.; SARKER, M. Z. I.; ISLAM, M. S.; HOSSAIN, M. A.; HOSSAIN, M. A. **Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in cement and concrete: A review.** Cogent Engineering, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 1539210, 2018. DOI: 10.1080/21870764.2018.1539210. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21870764.2018.1539210 . Acesso em: 7 out. 2025.

HUANG, X.; ZHOU, Y.; YANG, Q. **Silica from rice husk ash as reinforcing filler in natural rubber and thermoplastic composites: a sustainable approach**. Polymers, v. 13, n. 15, p. 2495, 2021. DOI: 10.3390/polym13152495. Disponível em:

https://www.mdpi.com/2073-4360/13/15/2495. Acesso em: 5 out. 2025.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, n. 2, p. 138-147, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Coal 2022: **Analysis and Forecast to 2028**. Paris: OECD/IEA, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO_2 Emissions from Fuel Combustion – Highlights 2022.** Paris: IEA, 2022. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/830802cc-4bd6-44a0-bcc1-3a33928d6d7c/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights_2022.pdf . Acesso em: 5 out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6).** Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/ . Acesso em: 5 out. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2022.** Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-power-generation-costs-in-2022 . Acesso em: 5 out. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023. Acesso em: 5 out. 2025.

ISLABÃO, G. O. et al. **Cinza de casca de arroz como corretivo da acidez do solo.**

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 3, p. 934–941, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000300026.

ISWARA, A. et al. **A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment Using Different Software Programs.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 506, p. 012002, 2020. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/506/1/012002. Acesso em: 5 out. 2025.

JAGNADE, Priti; PANWAR, Narayan Lal**. Kinetic and Thermogravimetric Analysis of Rice Husk and Its Derived Biochar**. LIAN-NanoBioLetters, v. 13, n. 2, p. 86, 2024. DOI: 10.33263/LIANBS132.086.

JAHIRUL, M. I.; RASUL, M. G.; CHOWDHURY, A. A.; ASHWATH, N. **Biofuels production through biomass pyrolysis: a technological review**. Energies, Basel, v. 5, n. 12, p. 4952-5001, 2012. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/4952 . Acesso em: 26 ago. 2025.

KADIYALA, A.; KOMMALAPATI, R.; HUQUE, Z. **Evaluation of the life cycle greenhouse gas emissions from different biomass feedstock electricity generation systems.** Sustainability, v. 8, n. 11, p. 1181, 2016.

KIM, J.; ZHANG, X.; LEE, H. **Comparative life cycle assessment of rice husk-based electricity generation systems in Asia.** Energies, v. 15, n. 22, p. 8570, 2022. DOI: 10.3390/en15228570. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8570. Acesso em: 5 out. 2025.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. **Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions**. Resources, Conservation and Recycling, v. 127, p. 221–232, 2018.

LOPES, A. de M.; LOPES, M. F. de L. **Aspectos qualitativos e nutricionais do arroz**. In: LOPES, Altevir de Matos (org.). Tecnologias para a produção de arroz no Sudeste

do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2008. p. 105-110.

LOPES, Emanoelli R.; MEDINA, Aline L.; RIBEIRO, Anderson S.; BRANDALISE, João N.; NUNES, Adriane M. **Caracterização elementar da casca de arroz e suas cinzas por MIP OES após decomposição ácida com sistema de refluxo**. Química Nova, São Paulo, v. 40, n. 9, p. 1009-1017, 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/8RZtCcqqg93rXGCcVq6Rbdr/ . Acesso em: 7 out. 2025.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio 2023-2024 a 2033-2034**. Brasília: MAPA, 2024.

MARÇAL, J. M. M. et al. **Characterization of rice husk ash glass produced at low temperature as a sustainable alternative for the glass industry.** International Journal of Environmental Science and Technology, p. 1-14, 2025.

MAYER, F. D. **Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termoelétrica: avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional sobre Mudança do Clima e compromissos do Brasil no Acordo de Paris. Brasília, 2023.** Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/clima . Acesso em: 08 ago. 2025.

MOUTIK, Badr; SUMMERSCALES, John; GRAHAM-JONES, Jasper; PEMBERTON, Richard. **Life Cycle Assessment Research Trends and Implications: a Bibliometric Analysis.** Sustainability, v. 15, n. 18, p. 13408, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/18/13408 . Acesso em: 9 ago. 2025.

NUNES, Flávia Aparecida; SEFERIN, Marcus; MACIEL, Vinícius Gonçalves; FLÔRES, Simone Hickmann; AYUB, Marco Antônio Záchia. **Life cycle greenhouse gas emissions from rice production systems in Brazil: A comparison between**

minimal tillage and organic farming. Journal of Cleaner Production, v. 139, p. 799-809, 2016.

OPENLCA NEXUS. IPCC 2021 AR6 **Impact Assessment Method**. 2022. Acesso em: 27 mar. 2024.

OPENLCA NEXUS. **Sobre o OpenLCA**. 2025. Disponível em: https://www.openlca.org/about/ . Acesso em: 02 abr. 2025.

OPENLCA. **ReCiPe 2016 Midpoint (H) Method – Description and Characterization Factors.** GreenDelta, 2023. Disponível em: https://nexus.openlca.org/database/methods/recipe-2016 . Acesso em: 5 out. 2025.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. **Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation.** CERNE, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237–246, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cerne/a/CY478JQ7bpBT36MwW7CGCgj/ . Acesso em: 7 out. 2025.

PEREA-MORENO, Miguel Ángel**. Biomass as renewable energy: worldwide research trends.** Sustainability, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 863, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/863 . Acesso em: 7 out. 2025.

PEREIRA, José Almeida. **Cultura do arroz no Brasil: subsídios para a sua história.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002. 226 p. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/64533/1/Livro-Cultura-do-arroz-no-Brasil.pdf . Acesso em: 07 out. 2025.

PIYATHISSA, S. D. S. et al. **Introducing a novel rice husk combustion technology for maximizing energy and amorphous silica production using a prototype hybrid rice husk burner to minimize environmental impacts and health risk**. Energies, v. 16, n. 3, p. 1120, 2023.

PLANETA ARROZ. **Cotação Nacional**. 2025. Disponível em: https://planetaarroz.com.br/cotacao-nacional/ . Acesso em: 1 jun. 2025.

PRASARA-A, J.; et al. **Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes**. 2009. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/15615014.pdf . Acesso em: 07 nov. 2024.

QUISPE, I.; NAVIA, R.; KAHHAT, R. **Life cycle assessment of rice husk as an energy source: a Peruvian case study.** Journal of Cleaner Production, 2019.

RADENAHMAD, Nikdalila; REZA, Md Sumon; ABU BAKAR, Muhammad Saifullah; AZAD, Abul K. **Thermochemical characterization of rice husk (Oryza sativa Linn) for power generation**. ASEAN Journal of Chemical Engineering, [S.l.], v. 20, n. 2, p. 184–193, 2020. Disponível em: https://jurnal.ugm.ac.id/AJChE/article/view/59267 . Acesso em: 7 out. 2025.

RAMASUBRAMANIAN, B.; RAMAKRISHNA, S**. What's next for the Sustainable Development Goals? Synergy and trade-offs in affordable and clean energy (SDG 7).** Sustainable Earth Reviews, v. 6, art. 17, 2023. Disponível em: https://sustainableearthreviews.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42055-023-00069-0 . Acesso em: 08 ago. 2025.

RAO, Krishna C.; NATARAJAN, Hari; DOSHI, Kamalesh. **Decentralized electricity generation using rice husk biomass: potential and strategies.** Ageconsearch, 2023. Disponível em: https://ageconsearch.umn.edu/record/305565/files/H048642.pdf . Acesso em: 2 ago. 2025.

REZENDE, Bianca Xavier. **Estudo da viabilidade da utilização de biomassa para geração de energia elétrica.** 2018. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, João Monlevade, 2018. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/836/1/MONOGRAFIA_EstudoV

iabilidadeUtiliza%C3%A7%C3%A3o.pdf . Acesso em: 7 out. 2025.

ROCHA, Emilly da. **Torrefação de casca de arroz com micro-ondas.** 2018. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/193406/001091509.pdf?sequence=1&isAllowed=y . Acesso em: 02 dez. 2024.

SANTOS, Guilherme Henrique Fávero; DO NASCIMENTO, Raphael Santos; ALVES, Geziele Mucio. **Biomassa como energia renovável no Brasil**. Uningá Review, v. 29, n. 2, p. 06–13, 2017. Disponível em: https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966 . Acesso em: 20 ago. 2024.

SATBAEV, B.; YEFREMOVA, S.; ZHARMENOV, A.; KABLANBEKOV, A.; YERMISHIN, S.; SHALABAEV, N.; SATBAEV, A.; KHEN, V. **Rice husk research: from environmental pollutant to a promising source of organo-mineral raw materials**. Materials, v. 14, n. 15, p. 4119, 2021. DOI: 10.3390/ma14154119.

SHAFIE, S. M.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; RISMANCHI, B. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation from rice husk in Malaysia.** Energy Procedia, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211043815/pdf . Acesso em: 07 nov. 2024.

SHEN, Jianfeng; ZHU, Shuguang; LIU, Xinzhi; et al. **Measurement of heating value of rice husk by using oxygen bomb calorimeter with benzoic acid as combustion adjuvant.** Energy Procedia, v. 17, p. 208-213, 2012.

SHEN, Xinhua; KOMMALAPATI, Raghava R.; HUQUE, Ziaul. **The comparative life cycle assessment of power generation from lignocellulosic biomass.** Sustainability, v. 7, n. 10, p. 12974-12987, 2015.

SONG, N. V.; NGUYEN, H. T.; NGUYEN, T. T.; et al. **Development of Rice Husk Power Plants Based on Clean Development Mechanism: A Case Study in Mekong**

River Delta, Vietnam. Sustainability, v. 13, n. 12, p. 6950, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6950 . Acesso em: 07 nov. 2025.

TAM, D. T. M.; LINH, B. P. **Application of rice husk waste in water remediation in Vietnam: a review.** European Journal of Materials Science and Engineering, v. 8, n. 3, p. 115–127, 2023. DOI: 10.36868/ejmse.2023.08.03.115. Acesso em: 01 dez. 2024.

TASHIMA, M. M.; SOUSA, L. C.; AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; MELGES, J. L. P.; BERNABEU, J. J. **Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil.** Holos Environment, v. 11, n. 1, p. 81–89, 2011. Disponível em: https://cea-unesp.org.br/holos/article/view/5435 . Acesso em: 01 dez. 2024.

THENGANE, S. K.; BUREK, J.; KUNG, K. S.; GHONIEM, A. F.; SANCHEZ, D. L. **Life cycle assessment of rice husk torrefaction and prospects for decentralized facilities at rice mills**. Journal of Cleaner Production, v. 275, art. 123177, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123177.

TRINDADE, Aline Bhering. **Análise comparativa de diferentes metodologias de alocação na ACV por meio de métodos tradicionais e métodos termoeconômicos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2342/3/Disserta%C3%A7%C3%A3o_2021063.pdf . Acesso em: 7 out. 2025.

TURCONI, Roberto; BOLDRIN, Alessio; ASTRUP, Thomas. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 28, p. 555-565, 2013. (Fonte de revisão para diversas tecnologias) Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004563 . Acesso em: 08 ago. 2025.

UDDIN, Moslem; MO, Huadong; DONG, Daoyi; ELSAWAH, Sondoss; ZHU, Jianguo; GUERRERO, Josep M. Microgrids: **A review, outstanding issues and future trends.**

Energy Strategy Reviews, v. 49, p. 101127, 2023. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101127. Disponível em: https://vbn.aau.dk/files/546385539/1-s2.0-S2211467X23000779-main.pdf . Acesso em: 08 ago. 2025.

UEASIN, N.; LIAO, S.-Y.; WONGCHAI, A. **The technical efficiency of rice husk power generation in Thailand: comparing Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis.** Energy Procedia, v. 75, p. 2757–2763, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.518. Disponível em (PDF): https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215012862/pdf?md5=a77c577961a5e5b3289e7996324e8603&pid=1-s2.0-S1876610215012862-main.pdf . Acesso em: 07 ago. 2025.

UNFCCC. **Paris Agreement. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.** Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf . Acesso em: 08 ago. 2025.

UNFCCC. **Brazil – Updated Nationally Determined Contribution (NDC).** 2022. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf . Acesso em: 08 ago. 2025.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York, 2015. Disponível em: https://sdgs.un.org/2030agenda . Acesso em: 08 ago. 2025.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Annual Report 2022.** Nova Iorque: UNDP, 2023. Disponível em: https://www.undp.org/publications/undp-annual-report-2022 . Acesso em: 08 ago. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Waste Management Outlook.** Nairobi, 2020. Disponível em: https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.** Paris: UNEP, 2020. Disponível em: https://www.lifecycleinitiative.org/resources/guidelines-for-social-lca-of-products . Acesso em: 5 out. 2025.

UNREAN, P.; et al. **Comparative techno-economic assessment and environmental impacts of rice husk-to-fuel conversion technologies.** Energy, [S.l.], v. 151, p. 581–593, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.068. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218304676 . Acesso em: 7 out. 2025.

VALSECCHI, C.; CAGLIOTI, L.; BIANCHI, F.; DI DOMENICO, M. **Use of rice husk ash in soda-lime glass production: A sustainable approach**. Journal of Cleaner Production, [S.l.], v. 312, p. 127734, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127734. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621012785 . Acesso em: 7 out. 2025.

WHITAKER, Michael; HEATH, Garvin A.; O'DONOUGHUE, Patrick; VORUM, Martin. **Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization**. Journal of Industrial Ecology, v. 16 (Supplement 1), p. S53-S72, Apr. 2012. Disponível em: https://documents.dps.ny.gov/public/Common/ViewDoc.aspx?DocRefId=%7BFF920EDE-1911-42E3-9FFA-FED0E01CCB56%7D . Acesso em: 08 ago. 2025.

WIDANKA, S.; FONSECA, T.; MARTINS, F. **Life cycle assessment of biomass-based power generation: global trends and regional implications.** Renewable Energy, v. 212, p. 1223–1237, 2023. DOI: 10.1016/j.renene.2023.07.018.

YEFREMOVA, Svetlana; KABLANBEKOV, Askhat; SATBAEV, Baimakhan; ZHARMENOV, Abdurassul. **Rice Husk-Based Adsorbents for Removal of Metals from Aqueous Solutions.** Materials, v. 16, 7353, 2023.

YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K. **Grate-firing of biomass for heat and power production**. Progress in Energy and Combustion Science, [S.l.], v. 34, p. 725–754, 2008. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.08.002. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000676 . Acesso em: 7 out. 2025.

YUAN, Q.; et al. **Life cycle assessment of ceramic tiles manufactured using industrial waste fly ash.** Journal of Building Engineering, [S.l.], v. 97, p. 110775, 2024. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.110775. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224001964 . Acesso em: 7 out. 2025.

ZHANG, Feng; HOU, Xiuqin; XUE, Xingchang; REN, Jiyun; DENG, Lei. **Release characteristics of potassium during biomass combustion**. Energies, [S.l.], v. 16, n. 10, p. 4107, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/10/4107 . Acesso em: 7 out. 2025.

ZHOU, A. et al. **Numerical study of biomass grate boiler with coupled time-dependent fuel bed model and CFD based freeboard model**. Energy & Fuels, v. 32, p. 7159–7171, 2018. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.8b01823 . Acesso em: 6 out. 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE I - DADOS DE TRANSPORTE DAS BENEFICIADORAS DE ARROZ

Dados de Transporte das Beneficiadoras de Arroz						
Nome Referência	**Cidade**	**Coordenadas (Lat |Long)**		**Distância (km)**	**Distância total de transporte (km)**	**Consumo de Combustível/Diesel (litros)**
Arroz Fighera	Santa Maria	-29,701085	-53,656219	60,5	121	**48,4**
Arrozeira Sepeense – un. Formigueiro	Formigueiro	-29,981475	-53,501936	23,2	46,4	**18,56**
Arrozeira Sepeense – un. São Sepé	São Sepé	-30,164191	-53,573397	13,4	26,8	**10,72**
Cereais Peger	Mata	-29,570439	-54,477971	124	248	**99,2**
Cotrisel Formigueiro	Formigueiro	-30,005323	-53,504392	19,8	39,6	**15,84**
Cotrisel Restinga seca	Restinga Seca	-29,816078	-53,367164	47,4	94,8	**37,92**
Cotrisel São Pedro do Sul	São Pedro do Sul	-29,63466	-54,196517	87,1	174,2	**69,68**
Cotrisel São Sepé	São Sepé	-30,160012	-53,559594	14,8	29,6	**11,84**
Cotrisel Vila Nova do sul	Vila Nova do Sul	-30,336085	-53,89321	46,4	92,8	**37,12**
Cotrisul	Caçapava do Sul	-30,530425	-53,498976	56,9	113,8	**45,52**
F. dotto	São João do Polêsine	-29,662383	-53,519556	78,3	156,6	**62,64**
Moinho Sepeense	São Sepé	-30,175253	-53,569915	14,7	29,4	**11,76**
Pagliarin	São Pedro do Sul	-29,633953	-54,221102	89,7	179,4	**71,76**
Urbano	São Gabriel	-30,333572	-54,347776	94,1	188,2	**75,28**
Imexsul	Santa Margarida do Sul	-30,346677	-54,110727	69,4	138,8	**55,52**
Josapar	Pelotas	-31,648214	-52,33816	243	486	**194,4**
Portal	Rosário do Sul	-30,24117	-54,929329	155	310	**124**
Arrozeira Pelotas	Pelotas	-31,703054	-52,339043	243	486	**194,4**
Médias:				**82,26**	**164,52**	**65,81**

APÊNDICE II – PRODUTOS QUÍMICOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

Produtos Químicos de Processo				
Descrição	**Composição Química**	**Teor (%)**	**Destino**	**Finalidade**
KLARAID IC1040P	Sulfato de alumínio	1,0 – 2,5	ETA / ETE	Coagulante utilizado no tratamento de águas industriais.
	Policloreto de Alumínio	60 - 80		
KLARAID IC1176L	Policloreto de Alumínio	10,0 - 20,0		Coagulante utilizado no tratamento de efluentes industriais.
POLYFLOC AP1100P	Uréia	1,0 – 2,5		Polímero utilizado no tratamento de águas e efluentes industriais.
HIPOCLORITO DE SODIO	Hipoclorito de Sódio	14		Controle de matéria orgânica no tratamento de água industrial.
	Hidróxido de Sódio	1		
	Cloreto de Sódio	14		
OPTISPERSE ADJ5050	Hidróxido de Sódio	40 - 60	DESMI / ETA	Utilizado no processo de regeneração do sistema de desmineralização e para ajuste de pH no tratamento de água industrial.
ÁCIDO MURIÁTICO	Ácido Clorídrico	30 - 38	DESMI	Utilizado no processo de regeneração do sistema de desmineralização.
GENGARD GN 8020	Polímero de Ácido Carboxílico	10,0 - 20,0	Torre de Resfriamento	Agente de controle de depósitos na água de resfriamento.
	Ácido Maléico	0,1 - 1,0		
GENGARD GN 7300	Ácido Fosfórico	60,0 - 80,0		Inibidor de corrosão.
SPECTRUS OX1277	Hipoclorito de Cálcio	60,0 - 80,0		Biocida usado para o controle de matéria orgânica.
	Hidróxido de Cálcio	2,5 - 10,0		
	Cloreto de Cálcio	1,0 – 2,5		
FOAMTROL AF2051	Benzeno, derivs. alquil mono-C10-13-, resíduos distn.	10,0 - 20,0		Antiespumante.
	Hexileno glicol	1,0 – 2,5		
CORTROL OS5607	Carbohydrazide	2,5 - 10,0	Caldeira	Sequestrante de oxigênio dissolvido.
STEAMATE NA1321L	Hidróxido de Amônio	30,0 - 40,0		Ajuste de pH para tratamento de vapor condensado.
SOLUS AP24	Não especificado (Misturas)	-		Tratamento interno de incrustações na caldeira.
HYPERSPERSE MDC714	Não especificado (Misturas)	-	Osmose Reversa	Controle de depósitos na membrana.
BETZDEARBORN DCL30	Bisulfito de sódio	20 -40		Agente de declorinização
BIOMATE MBC2881	Glicol	60 - 80		Biocida para controle de matéria orgânica.
	2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide	20 - 40		
	Brometo de sódio	2,5 - 10		
Ácido Cítrico P.A	Ácido Cítrico	99		Limpador de membranas de osmose reversa (limpeza ácida).

APÊNDICE III – LISTA DE EQUIPAMENTOS.

Lista de Equipamentos da Estação de Tratamento de Água			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo diário (KWh)**	**kg/KWh**
Bomba 01 de alimentação de Água bruta	7,36	73,60	83,17
Bomba 02 de alimentação de Água bruta	7,36	73,60	83,17
Bomba de transferência Água TQ-04 p/TQ-02	5,52	55,20	62,38
Bomba de transferência Água TQ-04 p/TQ-02	5,52	55,20	62,38
Bomba de reposição Água da Torre/Adiab./Desmi	9,20	9,20	10,40
Bomba de reposição Água da Torre/Adiab./Desmi	9,20	9,20	10,40
Motor ja contemplado no CCM-02 com tag M-109	5,52	66,24	74,85
Motor ja contemplado no CCM-02 com tag M-110	5,52	66,24	74,85
Bomba de transferência Água Desmi TQ-05 p/ TQ-03	1,47	1,96	2,21
Bomba de transferência Água Desmi TQ-05 p/ TQ-03	1,47	1,96	2,21
Bomba Centrífugas INOX 304 Alim. da DESMI	2,21	2,94	3,32
Bomba Centrífugas INOX 304 Alim. da DESMI	2,21	2,94	3,32
Misturador Tanque produtos Quimicos TQ-01	0,37	0,18	0,21
Misturador Tanque produtos Quimicos TQ-02	0,37	0,18	0,21
Misturador Tanque produtos Quimicos TQ-03	0,37	0,18	0,21
Bomba dosadora do TQ-01	0,18	3,68	4,16
Bomba dosadora do TQ-02	0,18	3,68	4,16
Bomba dosadora do TQ-03	0,18	3,68	4,16
Bomba dosadora do TQ-04	0,18	3,68	4,16
Bomba 01 para água potável	1,10	1,10	1,25
Bomba 02 para água potável	1,10	0,00	0,00
Total		**434,64**	**491,15**

Lista de Equipamentos da Estação de Tratamento de Efluentes			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo kWh**	**Kg/KWh**
Bomba de recalque da lagoa (tanque pulmão)	5,52	99,36	112,28
Bomba transferência para tanque de equalização	0,74	5,89	6,65
Bomba transferência para tanque de equalização	0,74	0,00	0,00
Bomba de alimentação da floco-decantador	1,10	0,00	0,00
Bomba transferência lodo	0,74	1,47	1,66
Bomba dosadora de hidróxido de cálcio	0,37	0,00	0,00
Misturador rápido para coagulante	0,37	0,00	0,00
Misturador lento para polímero	0,55	0,14	0,16
Misturador rápido para hidróxido de cálcio	0,37	0,00	0,00
Bomba dosadora de coagulante	0,04	0,79	0,89
Bomba dosadora de polímero	0,04	0,79	0,89
Bomba de retrolavagem e recalque ETE	2,21	39,74	44,91
Bomba de recalque para TQ2308 e TQ2309	1,10	18,77	21,21
Bomba de recalque para a Osmose Reversa	2,94	29,44	33,27
Bomba de osmose reversa	7,36	73,60	83,17
Bomba dosadora de metabissulfito	0,11	0,00	0,00
Bomba dosadora de anti-incrustante	0,11	0,00	0,00
Filtro prensa (bomba cilindro hidráulico)	1,47	0,25	0,28
Total		**270,24**	**305,38**

Lista de Equipamentos do Pátio de Biomassa			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo diário (KWh)**	**Kg/KWh**
Rosca extratora tipo calha RT-01	9,2	110,40	124,75
Rosca extratora tipo calha RT-02	9,2	110,40	124,75
Rosca extratora tipo calha RT-03	9,2	110,40	124,75
Rosca extratora tipo calha RT-04	9,2	110,40	124,75
Elevador metálico duplo EL-06	7,36	44,16	49,90
Elevador metálico duplo EL-07	7,36	44,16	49,90
Filtro de mangas pulse jet 01 – Extrator FM-08	1,104	13,25	14,97
Filtro de mangas pulse jet 01 – Válvula FM-08	0,736	8,83	9,98
Exaustor de baixa pressão do filtro pulse jet 01 -VE-09	55,2	662,40	748,51
Painel de comando da solenóide filtro pulse jet 01 FM-08	0,368	4,42	4,99
Transportador de arraste – RD-10	7,36	88,32	99,80
Peneira rotativa PN-15	14,72	176,64	199,60
Peneira rotativa PN-16	14,72	176,64	199,60
Peneira rotativa PN-17	14,72	176,64	199,60
Peneira rotativa PN-18	14,72	176,64	199,60
Correia transportadora 01 TC-19	4,416	52,99	59,88
Elevador metálico duplo EL-25	5,52	33,12	37,43
Elevador metálico duplo EL-24	5,52	33,12	37,43
Filtro de mangas pulse jet 02 – Extrator FM-23	0,736	8,83	9,98
Filtro de mangas pulse jet 02 – Válvula FM-23	0,736	8,83	9,98
Painel de comando da solenóide filtro pulse jet 02 FM-23	0,368	4,42	4,99
Exaustor de baixa pressão do filtro pulse jet 02 VE-21	29,44	353,28	399,21
Elevador metálico simples EL-26	2,944	17,66	19,96
Elevador metálico simples EL-27	2,944	17,66	19,96
Correia transportadora TC-28	3,68	88,32	99,80
Filtro de mangas pulse jet 03 – Extrator FM-29	0,736	17,66	19,96
Filtro de mangas pulse jet 03 – Válvula FM-29	0,736	17,66	19,96
Painel de comando da solenóide filtro pulse jet 03 FM-29	0,368	4,42	4,99
Exaustor de baixa pressão do filtro pulse jet 03 VE-30	11,04	264,96	299,40
Silo horizontal – transportador com tripper TC-32	14,72	176,64	199,60
Silo Horizontal – Carro tripper	2,208	26,50	29,94
Silo Horizontal – Rosca extratora RT- 33	29,44	353,28	399,21
Silo Horizontal – Rosca extratora RT-34	29,44	353,28	399,21
Silo Horizontal – Unidade hidráulica RT-33	1,472	17,66	19,96
Silo Horizontal – Unidade hidráulica RT-34	1,472	17,66	19,96
Silo Horizontal – Transportador extração TC-35	11,04	132,48	149,70
Microfiltro média pressão para tripper FM-36	4,416	52,99	59,88
Microfiltro média pressão para tripper FM-36	7,36	88,32	99,80
Painel de comando da solenóide filtro pulse jet 04 FM-36	0,736	8,83	9,98
Correia transportadora TC-37	5,52	66,24	74,85
Válvula Rotativa Dosadora 01 – A – Peneira Rotativa VR-11	3,68	44,16	49,90
Válvula Rotativa Dosadora 01 – B – Peneira Rotativa VR-12	3,68	44,16	49,90
Válvula Rotativa Dosadora 01 – C – Peneira Rotativa VR-13	3,68	44,16	49,90
Válvula Rotativa Dosadora 01 – D – Peneira Rotativa VR-14	3,68	44,16	49,90
Minifiltro PulseJet FM-39	1,472	17,66	19,96
Painel de comando da solenóide filtro pulse jet 05 FM-39	0,736	8,83	9,98
Total		**4433,66**	**5010,04**

Lista de Equipamentos da Caldeira			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo diário (KWh)**	**Kg/KWh**
Bomba de reposição de água 01	5,52	66,24	74,85
Bomba de reposição de água 02	5,52	66,24	74,85
Reserva	7,36	0,00	0,00
Reserva	7,36	0,00	0,00
Rosca Dosadora de Combustível 01	2,21	52,99	59,88
Rosca Dosadora de Combustível 02	2,21	52,99	59,88
Rosca Dosadora de Combustível 03	2,21	52,99	59,88
Rosca Dosadora de Combustível 04	2,21	52,99	59,88
Rosca Dosadora de Combustível 05	2,21	52,99	59,88
Rosca Dosadora de Combustível 06	2,21	52,99	59,88
Mexedor de combustível 01 - Conj. Alim. Esquerdo	0,37	8,83	9,98
Mexedor de combustível 02 - Conj. Alim. Direito	0,37	8,83	9,98
Distribuidor de Combustível - Rosca esquerda	2,21	52,99	59,88
Distribuidor de Combustível - Rosca direita	2,21	52,99	59,88
Exaustor de Tiragem de Gases	220,80	5299,20	5988,10
Soprador de fulígem 01 Superaquecedor II	0,74	0,07	0,07
Soprador de fulígem 02 Superaquecedor I	0,74	0,07	0,07
Soprador de fulígem 03 do Evaporizador	0,74	0,07	0,07
Soprador de fulígem do Economizador - Superior	0,24	0,02	0,02
Soprador de fulígem do Economizador - Inferior	0,24	0,02	0,02
Rosca Extratora de Cinzas do Filtro 01	1,10	26,50	29,94
Rosca Extratora de Cinzas do Filtro 02	1,10	26,50	29,94
Rosca Extratora de Cinzas do Filtro 03	1,10	26,50	29,94
Rosca Extratora de Cinzas do Filtro 04	1,10	26,50	29,94
Rosca Transportadora de Cinzas 01 do Filtro	2,21	52,99	59,88
Rosca Transportadora de Cinzas 02 do Filtro	2,21	52,99	59,88
Ventilador de Ar Primário	55,20	1324,80	1497,02
Ventilador de Ar Secundário	55,20	1324,80	1497,02
Rosca Extratora de Cinzas 01 da Grelha	1,47	35,33	39,92
Rosca Extratora de Cinzas 02 da Grelha	1,47	35,33	39,92
Rosca Extratora de Cinzas 03 da Grelha	2,21	52,99	59,88
Rosca Coletora de Cinzas da Grelha	1,47	35,33	39,92
Rosca Transportadora de Cinzas da Grelha	2,21	52,99	59,88
Válvula Dupla Comporta 01 Cinzas da Fornalha	0,18	4,42	4,99
Válvula Dupla Comporta 02 Cinzas da Fornalha	0,18	4,42	4,99
Válvula Dupla Comporta 03 Cinzas da Fornalha	0,18	4,42	4,99
Mexedor de Cinzas da Grelha Rotativa	0,74	17,66	19,96
Rosca extratora de cinzas 1 do filtro de mangas	2,21	52,99	59,88
Rosca extratora de cinzas 2 do filtro de mangas	2,21	52,99	59,88
Válvula rotativa de cinzas do filtro de mangas	1,10	26,50	29,94
Transportador de Arraste 01	1,47	35,33	39,92
Transportador de Arraste 02	2,21	52,99	59,88
Transportador de Arraste 03	1,47	35,33	39,92
Elevador Metálico Simples	2,94	70,66	79,84
Transportador de Arraste 04	2,21	52,99	59,88
Extrator de Fundo vibratório – 1.0	0,74	17,66	19,96
Extrator de Fundo vibratório – 1.1	0,74	17,66	19,96
Extrator de Fundo vibratório – 2.0	0,74	17,66	19,96
Extrator de Fundo vibratório – 2.1	0,74	17,66	19,96
Extrator de Fundo vibratório – 3.0	0,74	17,66	19,96
Extrator de Fundo vibratório – 3.1	0,74	17,66	19,96
Exaustor de Baixa pressão	9,20	220,80	249,50
Filtro de mangas pulse jet	0,74	17,66	19,96
Quadro eletrônico do filtro de mangas pulse jet	0,75	18,00	20,34
Total		**9720,19**	**10983,82**

Lista de Equipamentos Torre de Resfriamento			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo diário (KWh)**	**Kg/KWh**
Bomba 01 da torre de resfriamento (reserva)	110,4	0,00	0
Bomba 02 da torre de resfriamento	110,4	2649,60	2994,05
Bomba 03 da torre de resfriamento	110,4	2649,60	2994,05
Ventilador da Torre 01	55,2	1324,80	1497,02
Ventilador da Torre 02	55,2	1324,80	1497,02
Ventilador Adiabático 01	14,72	353,28	399,206
Bomba de recirculação Adiabático 01	2,944	70,66	79,8413
Ventilador Adiabático 02	14,72	353,28	399,206
Bomba de recirculação Adiabático 02	2,944	70,66	79,8413
Bomba de água Sistema de Selo Turbina 01	2,208	52,99	59,881
Bomba de água Sistema de Selo Turbina 02	2,208	52,99	59,881
Total		**8902,66**	**10060**

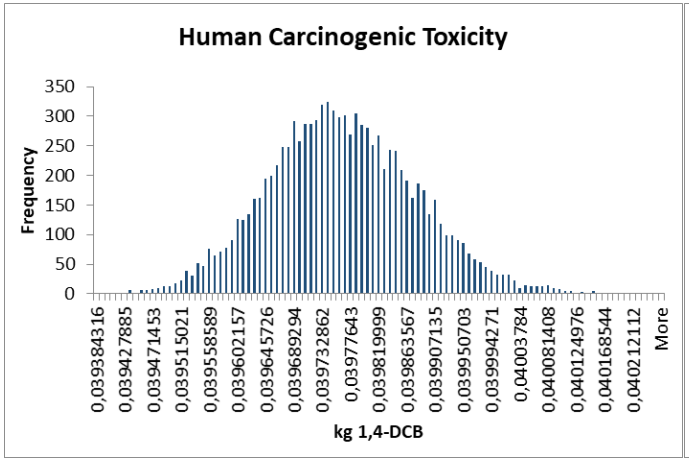
Lista de Equipamentos Turbina			
Descrição	**Potência (kW)**	**Consumo diário (KWh)**	**Kg/KWh**
Bomba de óleo auxiliar - Turbina	22,08	0,00	0,00
Exaustor de névoa - Turbina	1,10	26,50	29,94
Bomba de drenagem -Turbina	0,74	0,00	0,00
Giro lento - Turbina	9,20	0,00	0,00
Exaustor carenagem acústica - Turbina	0,55	13,25	14,97
Exaustor carenagem acústica - Turbina	0,55	13,25	14,97
Exaustor carenagem acústica - Turbina	0,55	13,25	14,97
Exaustor carenagem acústica - Turbina	0,55	13,25	14,97
Bomba de elevação do rotor - Turbina	5,52	0,00	0,00
Bomba de condensado - Condensador Turbina	14,72	176,64	199,60
Bomba de condensado - Condensador Turbina	14,72	176,64	199,60
Bomba de alimentação de água - Caldeira	110,40	2649,60	2994,05
Bomba de alimentação de água - Caldeira	110,40	2649,60	2994,05
Bomba de produto químico 01 - Caldeira	0,37	8,83	9,98
Mexedor de produto químico 01 - Caldeira	0,24	0,02	0,03
Bomba de produto químico 02 - Caldeira	0,18	4,42	4,99
Mexedor de produto químico 02 - Caldeira	0,24	0,02	0,03
Bomba de produto químico 03 - Caldeira	0,18	4,42	4,99
Mexedor de produto químico 03 - Caldeira	0,24	0,02	0,03
Bomba de refrigeração 01 válvula - Caldeira	0,55	13,25	14,97
Bomba de refrigeração 02 válvula - Caldeira	0,55	13,25	14,97
Bomba da unidade hidráulica da Grelha - Caldeira	3,68	88,32	99,80
Ventilação da unidade hidráulica da Grelha - Caldeira	0,24	5,83	6,59
Compressor ar comprimido 01	55,20	1324,80	1497,02
Compressor ar comprimido 02	55,20	1324,80	1497,02
Ponte rolante	14,72	0,00	0,00
Gerador de Emergência	700,00	0,00	0,00
Total		**8519,95**	**9627,54**

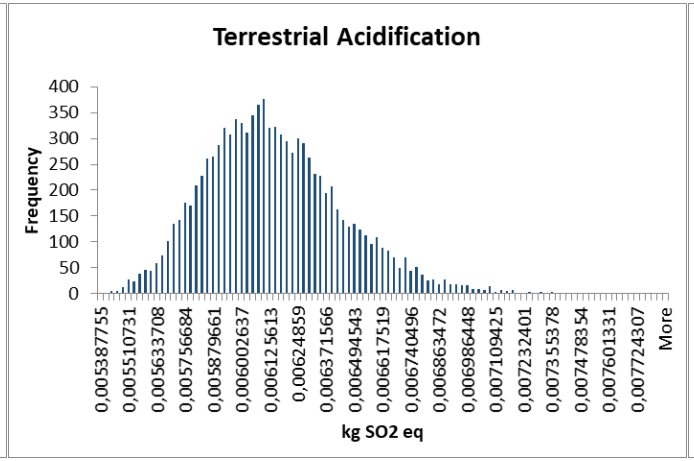
APÊNDICE IV – CONTRIBUIÇÕES DOS INSUMOS PARA O ACV

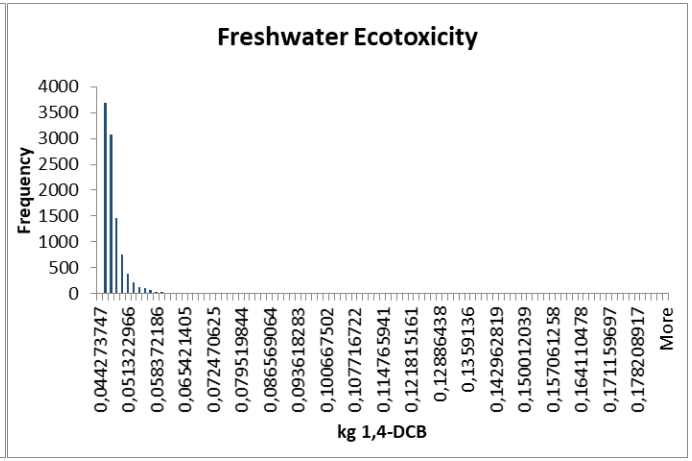
Contributions of Inputs in Soda-Lime Glass Production with RHA									
Impact category	**ID**	**Unit**	**Electricity**	**Na2CO3**	**CaCO3**	**B2O3**	**SiO2**	**Transport**	**Fuel**
Human carcinogenic toxicity	HCT	kg 1,4-DCB	1,68E-02	5,97E-03	5,27E-03	1,08E-02	0,00E+00	7,20E-04	2,10E-04
Freshwater ecotoxicity	FET	kg 1,4-DCB	9,54E-03	1,45E-02	1,10E-02	1,01E-02	0,00E+00	7,90E-04	1,90E-04
Marine ecotoxicity	MET	kg 1,4-DCB	1,53E-02	1,88E-02	1,42E-02	1,33E-02	0,00E+00	1,25E-03	3,90E-04
Fossil resource scarcity	FRS	kg oil eq	4,61E-01	4,46E-02	3,82E-02	1,21E-01	0,00E+00	9,33E-03	2,19E-02
Terrestrial ecotoxicity	TET	kg 1,4-DCB	4,94E+00	1,18E+00	1,05E+00	5,44E-01	0,00E+00	3,95E-01	2,30E-01
Freshwater eutrophication	FEU	kg P eq	6,08E-05	5,13E-05	4,69E-05	1,10E-04	0,00E+00	2,69E-06	1,23E-06
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	OFT	kg NOx eq	4,79E-03	3,30E-04	3,50E-04	1,28E-03	0,00E+00	8,81E-05	2,20E-04
Ozone formation, Human health	OFH	kg NOx eq	4,74E-03	3,30E-04	3,50E-04	1,26E-03	0,00E+00	8,58E-05	2,20E-04
Global warming	GWP	kg CO2 eq	1,42E+00	1,54E-01	2,21E-01	4,08E-01	0,00E+00	2,81E-02	6,68E-02
Terrestrial acidification	TAC	kg SO2 eq	3,41E-03	6,10E-04	4,90E-04	1,38E-03	0,00E+00	7,10E-05	1,50E-04

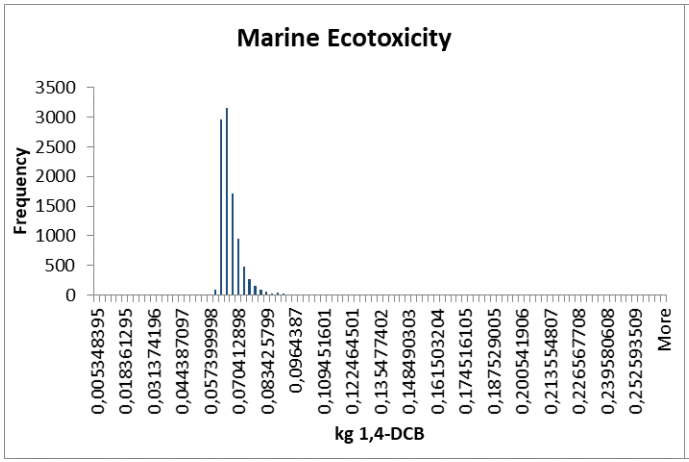
Contributions of Inputs in Conventional Soda-Lime Glass Production									
Impact category	**ID**	**Unit**	**Electricity**	**Na2CO3**	**CaCO3**	**B2O3**	**SiO2**	**Transport**	**Fuel**
Human carcinogenic toxicity	HCT	kg 1,4-DCB	9,00E-02	5,97E-03	5,27E-03	1,08E-02	6,70E-04	2,71E-03	7,90E-04
Freshwater ecotoxicity	FET	kg 1,4-DCB	1,27E-01	1,45E-02	1,10E-02	1,01E-02	5,00E-04	2,97E-03	7,00E-04
Marine ecotoxicity	MET	kg 1,4-DCB	1,80E-01	1,88E-02	1,42E-02	1,33E-02	7,50E-04	4,69E-03	1,45E-03
Fossil resource scarcity	FRS	kg oil eq	8,17E+00	4,46E-02	3,82E-02	1,21E-01	7,31E-03	3,51E-02	8,23E-02
Terrestrial ecotoxicity	TET	kg 1,4-DCB	2,39E+01	1,18E+00	1,05E+00	5,44E-01	1,58E-01	1,49E+00	8,64E-01
Freshwater eutrophication	FEU	kg P eq	3,40E-04	5,13E-05	4,69E-05	1,10E-04	5,79E-06	1,01E-05	4,61E-06
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	OFT	kg NOx eq	3,42E-02	3,30E-04	3,50E-04	1,28E-03	1,40E-04	3,30E-04	8,40E-04
Ozone formation, Human health	OFH	kg NOx eq	3,33E-02	3,30E-04	3,50E-04	1,26E-03	1,40E-04	3,20E-04	8,30E-04
Global warming	GWP	kg CO2 eq	2,38E+01	1,54E-01	2,21E-01	4,08E-01	2,99E-02	1,06E-01	2,51E-01
Terrestrial acidification	TAC	kg SO2 eq	4,59E-02	6,10E-04	4,90E-04	1,38E-03	1,50E-04	2,70E-04	5,70E-04

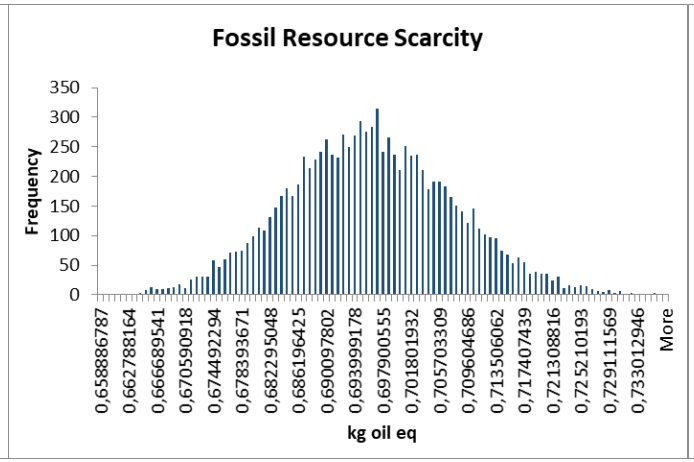
APÊNDICE V – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA O ACV DO VIDRO SODA-CAL COM CCA

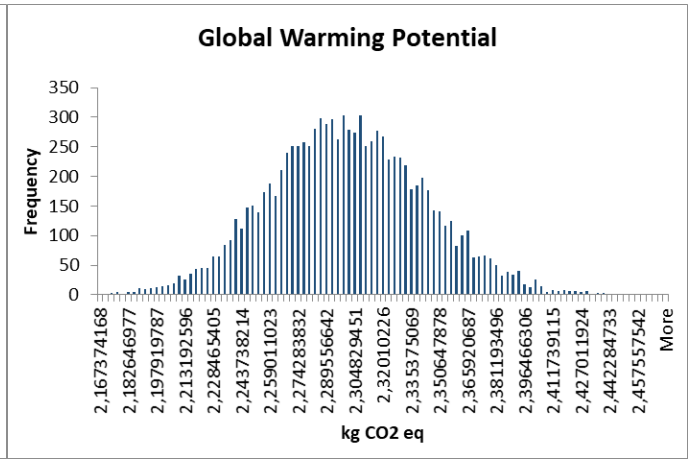


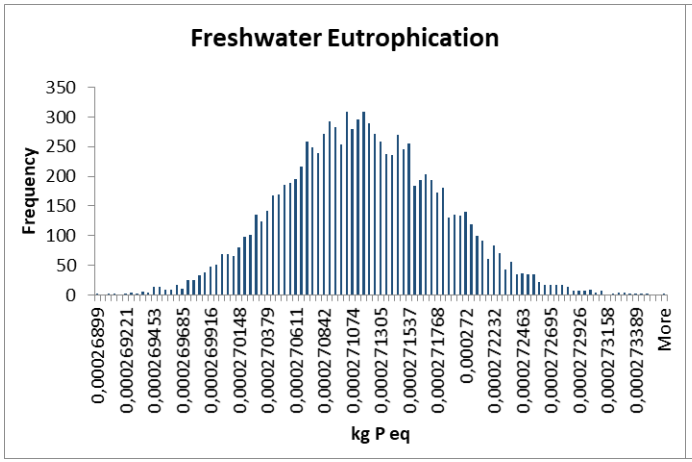


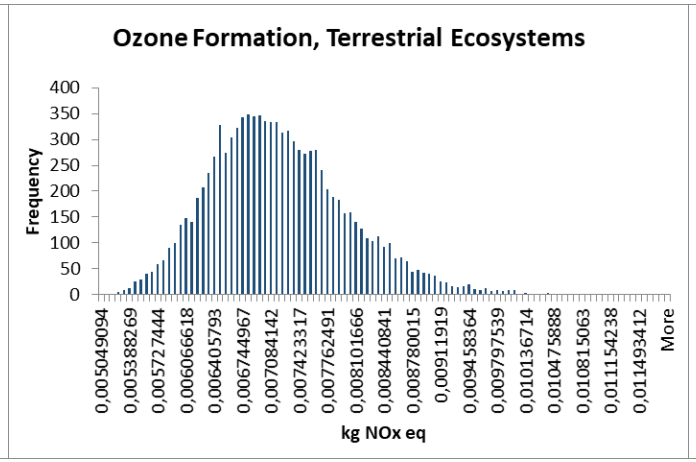


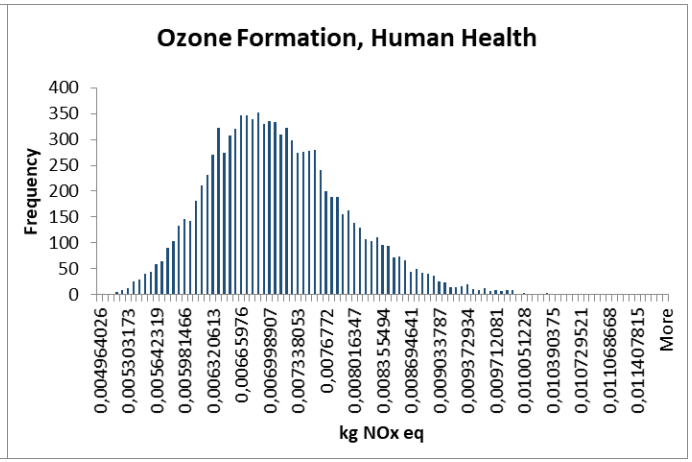


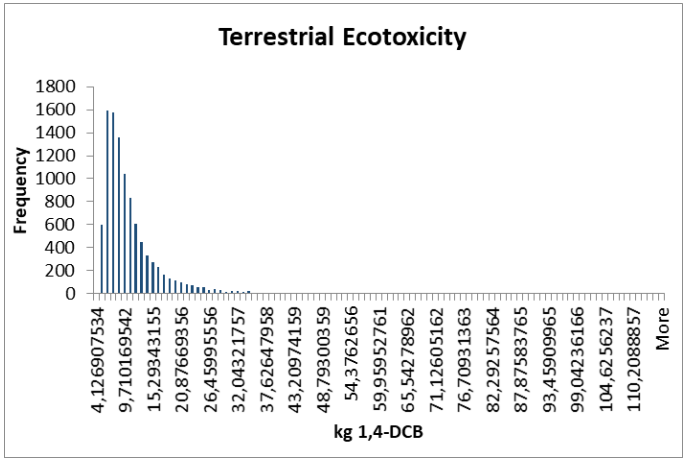





Freshwater Eutrophication
Frequency
kg P eq
More

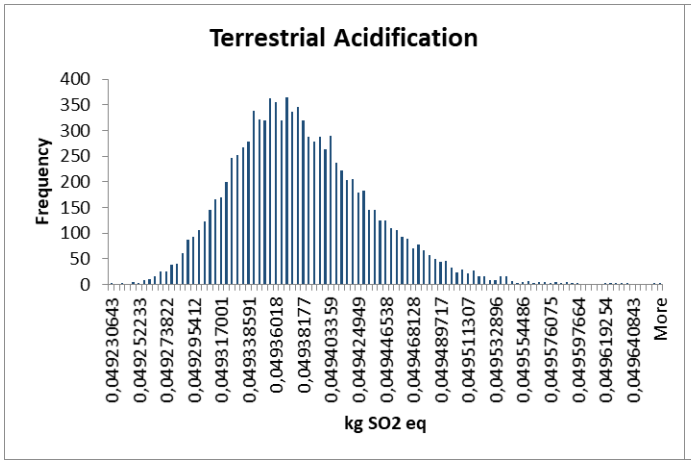

Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems
Frequency
kg NOx eq
More

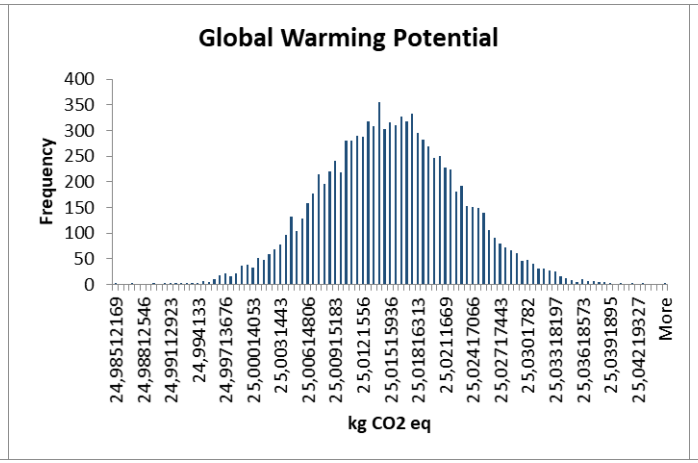

Ozone Formation, Human Health
Frequency
kg NOx eq
More

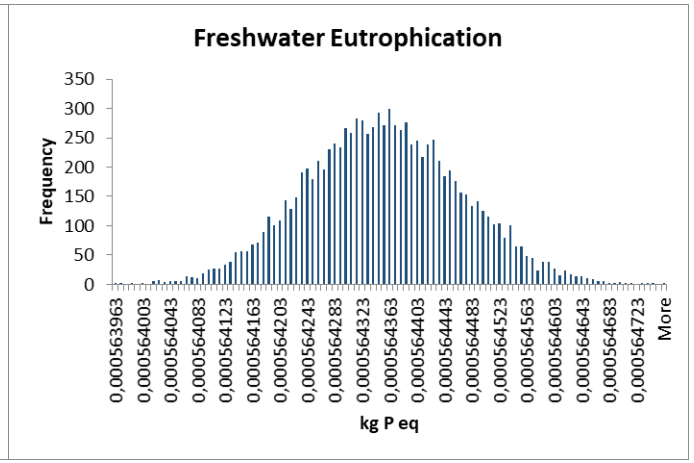

Terrestrial Ecotoxicity
Frequency
kg 1,4-DCB
More

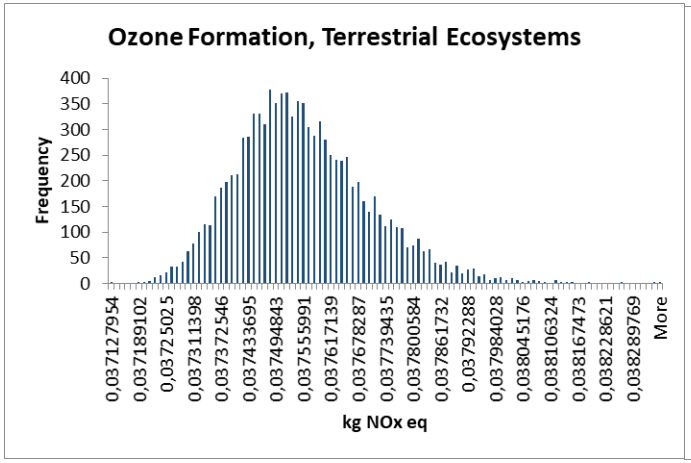
Monte Carlo Simulation Results for RHA Soda-lime Glass								
Impact category	**Unit**	**Mean**	**Standard deviation**	**Minimum**	**Maximum**	**Median**	**5% Percentile**	**95% Percentile**
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,065410	0,005348	0,059188	0,265606	0,064056	0,060663	0,074660
Global warming	kg CO2 eq	2,299315	0,041837	2,167374	2,472830	2,298248	2,232528	2,370311
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,000271	0,000001	0,000269	0,000274	0,000271	0,000270	0,000272
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,007150	0,000828	0,005049	0,011833	0,007068	0,005941	0,008629
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,007065	0,000828	0,004964	0,011747	0,006983	0,005856	0,008543
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	10,350199	6,437900	4,126908	115,792148	8,463375	5,155412	22,019430
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,695812	0,011437	0,658887	0,736914	0,695549	0,677357	0,714963
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,047056	0,003250	0,044274	0,185258	0,046170	0,044718	0,052278
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,006132	0,000300	0,005388	0,007847	0,006101	0,005693	0,006672
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,039760	0,000114	0,039384	0,040256	0,039755	0,039578	0,039951

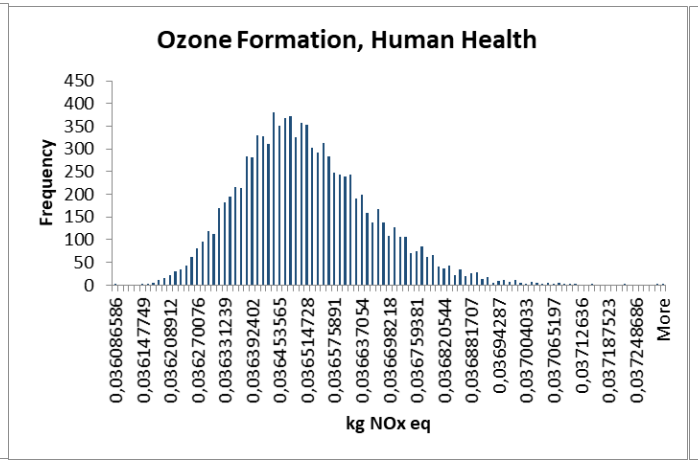
APÊNDICE VI – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO PARA O ACV DO VIDRO SODA-CAL CONVENCIONAL

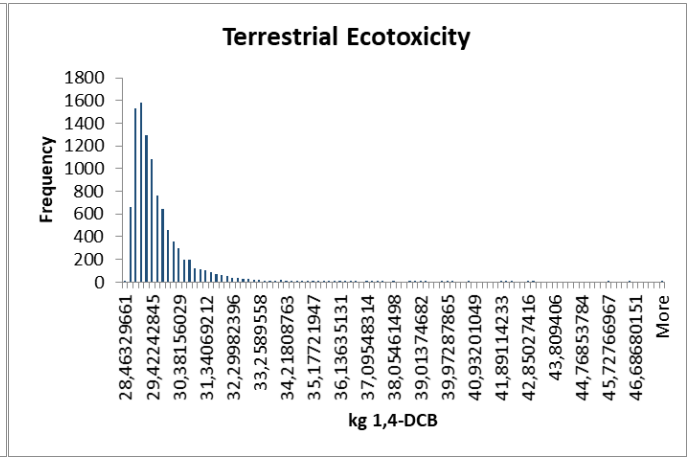


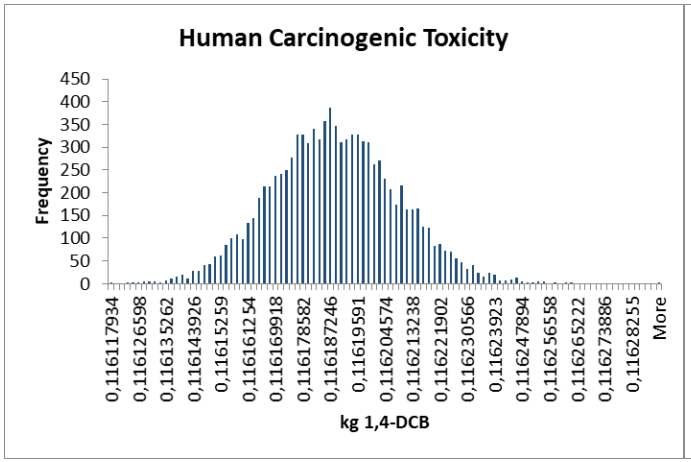


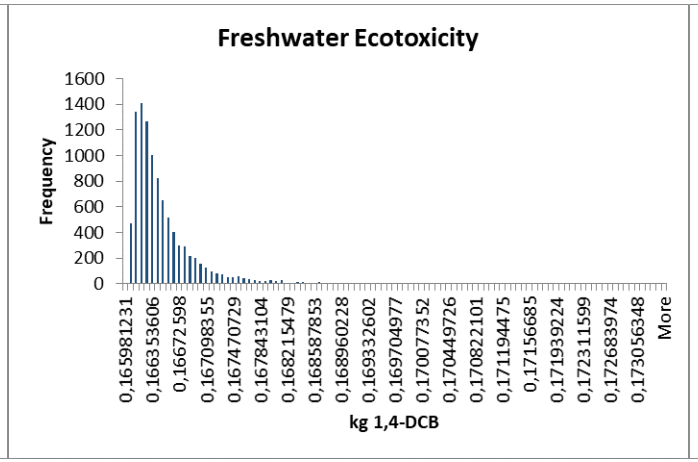


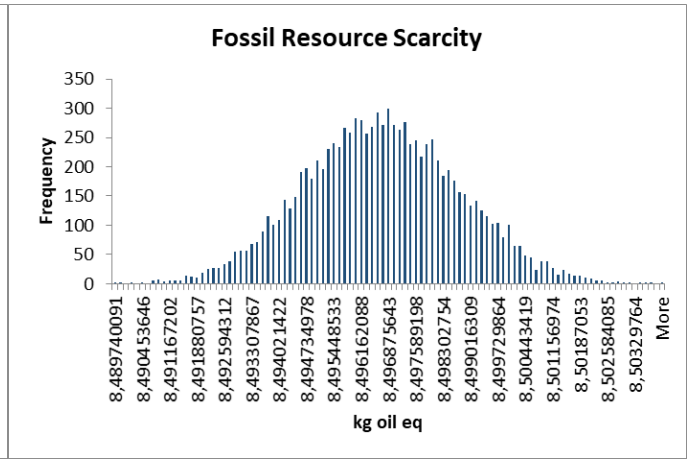


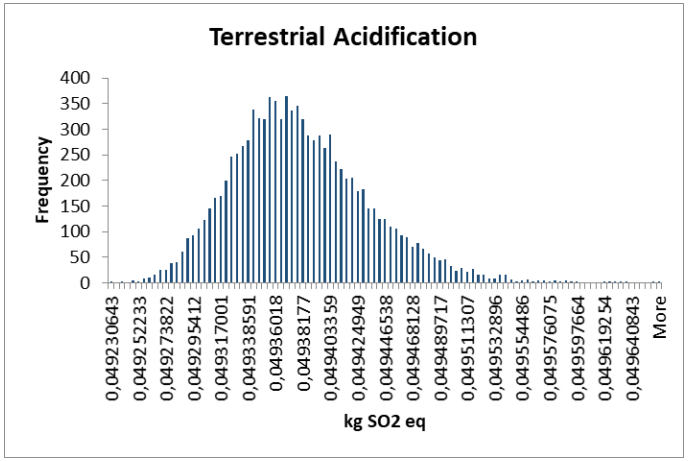





Human Carcinogenic Toxicity
Frequency
kg 1,4-DCB
More


Freshwater Ecotoxicity
Frequency
kg 1,4-DCB
More


Fossil Resource Scarcity
Frequency
kg oil eq
More


Terrestrial Acidification
Frequency
kg SO2 eq
More

Monte Carlo Simulation Results for Conventional Soda-lime Glass								
Impact category	**Unit**	**Mean**	**Standard deviation**	**Minimum**	**Maximum**	**Median**	**5% Percentile**	**95% Percentile**
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,233196	0,000865	0,232089	0,242637	0,232965	0,232356	0,234796
Global warming	kg CO2 eq	25,014945	0,007434	24,985122	25,045197	25,014877	25,002934	25,027385
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,000564	0,000000	0,000564	0,000565	0,000564	0,000564	0,000565
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,037549	0,000147	0,037128	0,038351	0,037533	0,037333	0,037813
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,036508	0,000147	0,036087	0,037310	0,036492	0,036292	0,036772
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	29,547959	1,165144	28,463297	47,645933	29,221245	28,631630	31,533943
Fossil resource scarcity	kg oil eq	8,496632	0,002022	8,489740	8,504011	8,496601	8,493347	8,499977
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,166466	0,000503	0,165981	0,173429	0,166314	0,166058	0,167387
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,049378	0,000054	0,049231	0,049662	0,049372	0,049299	0,049474
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,116188	0,000020	0,116118	0,116291	0,116187	0,116156	0,116221