

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARIA ELIANA BARRETO DRUZIAN

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE**

Caçapava do Sul

2021

MARIA ELIANA BARRETO DRUZIAN

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE
ELETRICIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade
Federal do Pampa, como requisito parcial
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Mateus Guimarães da
Silva

Caçapava do Sul

2022

MARIA ELIANA BARRETO DRUZIAN

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 17 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mateus da Silva Guimarães
Orientador - UNIPAMPA

Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin
UNIPAMPA

Prof. Dr. Julio Cesar Mendes Soares
UFSM



Assinado eletronicamente por **MATEUS GUIMARAES DA SILVA, Coordenador de Planejamento, Desenvolvimento, Avaliação e Acreditação**, em 29/03/2022, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MATIAS FELTRIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/04/2022, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Julio Cesar Mendes Soares, Usuário Externo**, em 05/04/2022, às 09:25, 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 **0766820** e o código CRC **F1A2D8E6**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para a realização deste trabalho.

À minha família por todo amor, suporte, estímulo e compreensão pelos momentos abdicados por estar distante, em especial a minha mãe, ao meu esposo Carlos e meu filho Felipe, pelo carinho e incentivo.

A todos os colegas e amigos, com quem partilhei angústias e muitas alegrias durante esta jornada.

Ao Prof. Dr. Mateus Guimarães da Silva por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos professores, Prof. Dr. Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin e Prof. Dr. Julio Cesar Mendes Soares, por terem aceitado fazer parte deste trabalho e contribuir para o engrandecimento dele.

Aos demais professores, por todo o conhecimento compartilhado ao longo da minha vida acadêmica.

À Universidade Federal do Pampa, pela oportunidade.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza dos seus sonhos.”

(Eleanor Roosevelt)

RESUMO

Com uma vasta produção de arroz em destaque, o Brasil, gera conseqüentemente uma grande quantidade de subprodutos deste cereal, durante o processo de beneficiamento do arroz. Atualmente, o estado do Rio Grande do Sul produz aproximadamente 8,5 milhões de toneladas de arroz, conseqüentemente gerando 1,7 milhões de toneladas de casca de arroz. A utilização de resíduos sólidos agrícolas como a casca de arroz, o bagaço de cana-de-açúcar, e outros, tem sido utilizada como uma fonte de energia alternativa na geração de eletricidade. O presente trabalho apresenta uma proposta investigativa, para calcular as emissões dos gases de efeito estufa (GEEs), emitidos pela queima da casca de arroz, utilizada na termoelétrica Sepé Geração de Energia, para produção de energia, e comparar com os gases emitidos pela casca de arroz, considerando seu descarte e decomposição no meio ambiente. A metodologia utilizada foi a avaliação do ciclo de vida (ACV), definida pela ISO 14040, dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo do estudo, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação dos dados. A aplicação dessa metodologia possibilitou a identificação e quantificação de impactos ambientais de cada um dos destinos da casca de arroz, possibilitando comparar as emissões de GEEs entre os dois destinos dados a este subproduto proveniente do arroz.

Palavras-chave: Energia renovável, bioeletricidade, resíduo agroindustrial, biomassa, casca de arroz.

ABSTRACT

With a vast production of rice in the spotlight, Brazil consequently generates a large amount of by-products of this cereal, during the rice beneficiation process. Currently the state of Rio Grande do Sul produces approximately 8.5 million tons of rice, consequently generating 1.7 million tons of rice husk. The use of agricultural solid waste such as rice husk, sugarcane bagasse, and others, has been used as an alternative energy source in the generation of electricity. This paper presents an investigative proposal to calculate the emissions of Greenhouse Gases (GHGs), emitted by the burning of rice husks, used in the thermoelectric Sepé Geração de Energia, and compare with the gases emitted by rice husk, considering its disposal and decomposition in the environment. The methodology used was the life cycle assessment (LCA), defined by ISO 14040, divided into four phases: definition of the objective and scope of the study, inventory analysis, impact assessment and data interpretation. The application of this methodology made it possible to identify and quantify the environmental impacts of each of the rice husk destinations, making it possible to compare GHG emissions between the two destinations given to this rice by-product.

Keywords: Renewable energy, bioelectricity, agro-industrial waste, biomass, rice husk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de arroz nas regiões brasileiras.....	15
Figura 2 - Produção de arroz nas regiões do estado do Rio Grande do Sul, safra 2020/2021.	16
Figura 3 - Descarte de casca de arroz a céu aberto no município de São Sepé/RS.....	18
Figura 4 - Fases de uma ACV.....	22
Figura 5 - Mapa de localização da Usina Termoelétrica Sepé	24
Figura 6 - Descarga de casca de arroz na moega	26
Figura 7 - Etapas do funcionamento da Usina Termoelétrica.....	27
Figura 8 - Fluxograma das fronteiras do sistema de estudo	31
Figura 9 - Emissões de GEE no Sistema A.....	39
Figura 10 - Emissões GEE - Sistema B	44
Figura 11 - Emissões de GEE: Sistemas A e B.....	45
Figura 12 - Emissões GEE no período de 1 ano	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul.....	17
Tabela 2 - Gases Potencial de Aquecimento Global (GWP).....	20
Tabela 3 - Fatores de emissão para transporte rodoviário.....	32
Tabela 4 - Parâmetros recomendados IPCC (2006c)	35
Tabela 5 - Distância média de descarte da casca de arroz.....	36
Tabela 6 - Quantidade de entrada de biomassa e saída de cinza da Termoelétrica.....	36
Tabela 7 - Consumo de diesel no transporte da casca de arroz para descarte	37
Tabela 8 - Emissões de GEE no ciclo de vida da casca de arroz - Sistema A.....	38
Tabela 9 - Municípios fornecedores de casca de arroz.....	39
Tabela 10 - Consumo de diesel no transporte da casca de arroz para a Termoelétrica	40
Tabela 11 - Consumo de diesel no transporte da cinza para a Unidade Cal Mista	41
Tabela 12 - Consumo de energia interna da Termoelétrica	42
Tabela 13 - Emissões de GEE no ciclo de vida da casca de arroz - Sistema B.....	43
Tabela 14 - Emissões GEE durante um ano - sistema A	45
Tabela 15 - Emissões GEE durante um ano - sistema B	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1 CULTIVO DE ARROZ	15
4.3 AQUECIMENTO GLOBAL	18
4.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	21
4.5.1 <i>DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DE ESCOPO</i>	22
4.5.2 <i>ANÁLISE DO INVENTÁRIO</i>	22
4.5.3 <i>AVALIAÇÃO DE IMPACTO</i>	23
4.5.4 <i>INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA</i>	23
5 MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DA TERMOELETRICA SÃO SEPÉ	25
5.2 PESQUISA DOCUMENTAL	28
5.3 PESQUISA DE CAMPO	29
5.4 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO	29
5.5 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA CASCA DE ARROZ	32
5.5.1 <i>EMISSÕES DOS TRANSPORTES:</i>	32
5.5.2 <i>EMISSÕES DO CONSUMO DE ELETRICIDADE</i>	33
5.5.3 <i>EMISSÕES DA QUEIMA DA CASCA DE ARROZ NA TERMOELÉTRICA</i>	33
5.5.4 <i>EMISSÕES DA DECOMPOSIÇÃO DA CASCA DE ARROZ</i>	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1 INVENTÁRIO DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA A	35
6.1.1 <i>EMISSÕES DA DECOMPOSIÇÃO DA CASCA DE ARROZ</i>	35
6.1.2 <i>EMISSÕES PELO TRANSPORTE DA CASCA DE ARROZ PARA DESCARTE</i>	36
6.1.2 <i>AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CASCA DE ARROZ NO SISTEMA A</i>	38

6.2 INVENTÁRIO DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA B	39
6.2.1 <i>EMISSÕES DO TRANSPORTE DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA B</i>	39
6.2.2 <i>EMISSÕES DO TRANSPORTE DA CINZA DA CASCA DE ARROZ</i>	41
6.2.3 <i>EMISSÕES CONSUMO DE ENERGIA DA TERMOELÉTRICA</i>	42
6.2.4 <i>AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CASCA DE ARROZ NO SISTEMA B</i>	44
7 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais mais consumidos no mundo, considerado um dos principais alimentos da população mundial. A produção mundial de arroz é estimada em mais de 475 milhões de toneladas, sendo 11,7 milhões de toneladas produzidas no Brasil (CONAB, 2021).

Após a colheita e secagem, o arroz é armazenado com a casca, assim quando é realizado o beneficiamento dos grãos, toneladas de subprodutos são gerados anualmente, considerando-se que a casca representa 20% do peso do grão, o que representa uma expressiva quantidade, a qual geralmente, quando não há destino para aproveitamento, é disposta em lavouras, queimada ou transportada para aterros, causando impactos ambientais relevantes (ANTÓNIO *et al.*, 2018). Por possuir um alto teor de sílica e baixos teores nutritivos é inadequado seu uso na fabricação de rações para consumo animal (ALMEIDA, 2010).

A casca de arroz utilizada na alimentação de fomalhas com o objetivo da secagem do arroz nas próprias unidades de beneficiamento. Entretanto, mesmo assim existe um excedente muito alto deste subproduto para ser descartado anualmente, o que a longo prazo representa um grande problema, pois a casca de arroz tem tempo de decomposição de aproximadamente 5 anos (MAYER, 2006).

Há muitos anos o descarte total do excedente foi feito em campo aberto, leitos de rios, beira de estradas, e muitas vezes eliminados por queima, causando uma poluição bastante significativa e contribuindo para o aumento das taxas de emissões gases de efeito estufa (GEEs).

De acordo com Walter (2021), a destinação incorreta dos resíduos agroindustriais configura um grande problema ambiental. Uma solução é a utilização desse resíduo, casca de arroz, na geração de energia elétrica, como forma de amenizar esse problema.

A energia renovável gerada a partir de biomassa, bioeletricidade, utilizando a casca de arroz começou a ser comercializada no Brasil no ano de 2014 (TOLMASQUIM, 2016). De acordo com dados da Aneel (2021), no Rio Grande do Sul, atualmente, nove usinas termoelétricas operam com casca de arroz. A evolução desta

modalidade de geração de energia desencadeou interesse em avaliar as emissões dos GEEs envolvidos neste processo.

Neste sistema de geração de bioenergia, existem algumas desvantagens que serão analisadas neste estudo. Como a casca de arroz possui uma massa específica baixa, há uma necessidade de transportar muitas cargas de caminhões diárias para alimentar a termoelétrica, assim serão quantificados os gases emitidos pelo transporte da casca até a termoelétrica, também será quantificada as emissões de dióxido de carbono (CO₂) que ocorrem no processo de queima. Segundo Lajara (2011), a casca de arroz produz muita cinza, mas sua fumaça é pouco poluente, pois não possui enxofre.

Nesse contexto, este estudo busca estimar as emissões de GEEs pelo do uso da casca de arroz em dois sistemas, sendo um para geração de energia na Termoelétrica Sepé Geração de Energia, localizada no município de São Sepé/RS, e o outro referente ao descarte da casca de arroz no meio ambiente, onde ocorrerá a decomposição. A metodologia utilizada neste estudo foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar os diferentes destinos da casca de arroz.

A necessidade de reduzir os impactos ambientais no mundo vem permitindo intensificar o reaproveitamento dos resíduos gerados nos processos produtivos, beneficiando assim a redução de custos e danos ambientais com o descarte. Assim, a utilização de matérias-primas renováveis na geração de energia elétrica é cada vez mais difundida mundialmente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar as emissões de GEE geradas pelo uso da casca de arroz como biomassa na geração de energia elétrica, da usina termoelétrica, localizada no município de São Sepé, RS, e comparar com as emissões de GEE decorrentes do descarte deste subproduto no meio ambiente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Calcular as emissões dos GEE gerados na utilização da casca de arroz como biomassa na geração de energia.
- Calcular as emissões dos GEE gerados na decomposição da casca de arroz descartada no meio ambiente.
- Avaliar os impactos ambientais gerados no ciclo de vida da casca de arroz.
- Identificar o potencial de mitigação das emissões entre os dois sistemas.

3 JUSTIFICATIVA

Até o momento, ainda não existem estudos publicados no Brasil sobre a avaliação do ciclo de vida da casca de arroz utilizada como biomassa na geração de energia elétrica, portanto existe uma janela de conhecimento a ser preenchida, justificando a importância desse trabalho.

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, de acordo com os dados do IRGA (2021), por exemplo, na safra de 2020 foi produzido 8,5 milhões de toneladas de arroz, que geram cerca de 1,6 milhões de toneladas de casca de arroz, um alto volume que precisa ter um destino adequado. Parte desta casca de arroz é um passivo ambiental nas regiões produtoras de arroz.

Este estudo ressalta a importância de estimar as emissões dos principais gases GEE na produção de eletricidade a partir da casca de arroz, com finalidade de garantir a segurança ambiental. As observações das emissões de GEE deste estudo de ACV é de grande relevância quando se busca avaliar o impacto ambiental de um mesmo produto com diferentes fins.

Com os dados obtidos neste estudo, possibilitará conhecer o perfil das emissões de GEE, gerados na Usina Termoelétrica, e, a partir do diagnóstico feito pelo inventário, propor estratégias e metas para que possibilitem mitigar essas emissões.

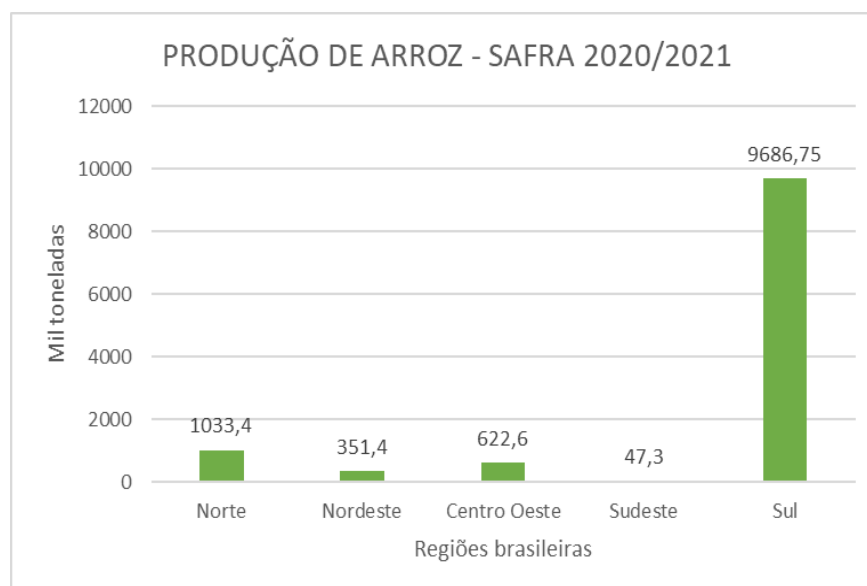
Entende-se que no Brasil ainda exista uma série de desafios para que se construa uma base de dados de ACV com as características das tecnologias brasileiras. Portanto, com os resultados obtidos, espera-se contribuir para a inclusão da ACV nas análises ambientais de sistemas de geração de eletricidade, mostrando como essa abordagem é relevante para um planejamento energético que busque mitigar as emissões de GEE.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CULTIVO DE ARROZ

O Brasil alcançou uma produção de 11,7 milhões de toneladas de arroz, de acordo com os dados do 10º Levantamento da safra de grãos 2020/21, divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB,2021). A produção de arroz, nas regiões brasileiras representadas pela Figura 1, correspondente a safra 2020/2021, apontam como destaque a alta produtividade na região Sul.

Figura 1- Produção de arroz nas regiões brasileiras



Fonte: Autora, dados CONAB (2021).

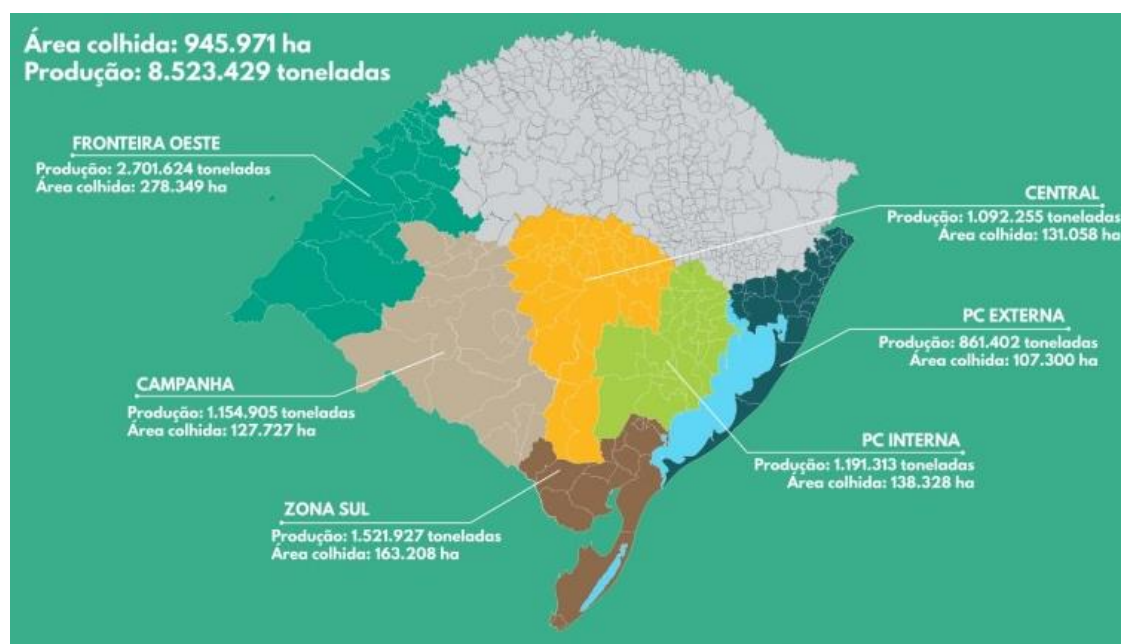
As condições climáticas favoráveis e uma geomorfologia regional que apresenta um bom comportamento para a construção de reservatórios de água, necessários para o plantio irrigado (BUENO e LEMOS, 2006), favorecem a alta produtividade de arroz na Região Sul.

O estado do Rio Grande do Sul se destaca por ser o maior produtor de arroz do Brasil, com uma produção de aproximadamente 70 % do total de arroz produzido no país, perfazendo uma área de plantio com aproximadamente 1,7 milhões de hectares (CONAB, 2021).

Segundo Miranda et al. (2016), a região da fronteira com a Argentina, região Central e a região Sul do Estado do RS são responsáveis pela maior parte da safra produzida, e nestas estão concentradas as indústrias de beneficiamento.

De acordo com os dados da Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado - SOSBAI (2018), o arroz é produzido em 129 municípios localizados na metade sul do Estado gaúcho. A representação da distribuição regional mais recente, com os dados de produção deste cereal por hectare é representada pela Figura 2. A produção média é de aproximadamente 9 toneladas cultivada em uma área de 1 hectare.

Figura 2 - Produção de arroz nas regiões do estado do Rio Grande do Sul, safra 2020/2021.



Fonte: Autora, adaptado de IRGA (2021).

O Instituto Riograndense do Arroz – IRGA (2021) fornece os dados das altas produtividades de arroz no Rio Grande do Sul, sabendo-se que as cascas de arroz representam 20% do total produzido, a estimativa da quantidade desse subproduto gerado no Estado gaúcho pode ser observada na Tabela 1, dados referentes as safras dos últimos quatro anos.

Tabela 1 - Produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul

Safra	Produção de arroz (mil toneladas)	Produção equivalente de Casca de arroz (20%) (mil toneladas)
Safra 2017/2018	8.440,74	1.688,15
Safra 2018/2019	7.241,45	1.448,29
Safra 2019/2020	8.523,43	1.704,69
Safra 2020/2021	8.523,46	1.704,70

Fonte: autora, dados IRGA (2021).

Diante desse cenário, no Rio Grande do Sul, a casca de arroz destaca-se entre os resíduos agrícolas mais abundantes. A sua utilização para geração de energia elétrica é uma alternativa econômica viável e considerada ecologicamente correta.

4.2 CASCA DE ARROZ

A casca de arroz é a camada mais externa do grão, é um dos subprodutos do arroz gerado durante o processo de beneficiamento deste cereal.

O beneficiamento dos grãos de arroz gera subprodutos como: farelo, quirera e a casca de arroz. Esses subprodutos são gerados em quantidades significativas e devem ser tratados e descartados de forma adequada (LORENZETT et al., 2012). O farelo e a quirera são facilmente vendidos para serem utilizados como ração animal, já a casca não é indicada para ser utilizada para essa finalidade, pois possui valores nutricionais muito baixos e elevado teor de sílica (GUIMARÃES; MALONCY; BATISTA, 2014).

Segundo Pandey, Soccol e Mitchell (2010), a casca de arroz é o principal subproduto, por seu maior volume, gerado durante o beneficiamento do arroz, representando 20% do peso deste cereal.

O principal destino do excedente da casca de arroz, onde não há centrais termelétricas, é a disposição em aterros sanitários, lavouras, fundo de rios, ocorrendo assim a sua decomposição gradual e lenta, embora seja um procedimento incorreto segundo a legislação ambiental (SILVA, 2018). Porém, atualmente ainda ocorrem casos

de descarte de casca de arroz a céu aberto, conforme exemplo da Figura 3, que ilustra fotos recentes, as margens da BR392, no município de São Sepé.

Figura 3 - Descarte de casca de arroz a céu aberto no município de São Sepé/RS



Fonte: Autora (2021).

O descarte inadequado da casca de arroz contribui para o agravamento dos problemas ambientais devido a sua degradação ser muito lenta, dessa forma uma alternativa sustentável é o uso dessa biomassa tanto para a geração de energia elétrica (VALE et al., 2014).

4.3 AQUECIMENTO GLOBAL

O aquecimento global consiste na elevação da temperatura média da terra provocada pelo aumento da concentração dos GEE e tem contribuído progressivamente para as mudanças climáticas, gerando cada vez mais preocupação com o meio ambiente. O acúmulo das altas concentrações dos GEE na atmosfera é considerado um dos problemas climáticos mais graves enfrentados pelo mundo (CHUENWONG, SAJJAKULNUKIT, CHIARAKORN, 2019).

Quando ocorre um aumento de concentração de gases na atmosfera, o efeito estufa fica mais intenso e, portanto, fica mais difícil o calor ir para o espaço. Essa diferença ocasiona o aquecimento da atmosfera, elevando a temperatura da Terra e causando mudanças climáticas.

O Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), publicou que a influência humana no sistema climático é evidente e as recentes emissões antropogênicas de gases de efeito estufa são as mais altas da história (IPCC, 2014).

A preocupação com o aumento de temperaturas médias no planeta é um tema mundial, alvo de discussões políticas, ambientais, sociais e econômicas, pois os impactos causados por essa elevação de temperaturas médias, podem provocar fortes ondas de calor sem precedentes, ciclones e estiagens prolongadas como consequências da mudança climática (IPCC, 2014).

O IPCC, sinaliza diversos cenários relacionando as consequências que o aumento da temperatura até o ano de 2100 pode desencadear no planeta. O melhor cenário prevê um aumento entre 0,3°C e 1,7°C, enquanto o pior cenário, o aumento da temperatura podendo estar entre 2,6°C e 4,8°C, ocasionando o aumento dos níveis dos oceanos, podendo causar danos irreparáveis a biodiversidade terrestre (IPCC SR1.5, 2018).

Os principais gases de efeito estufa responsáveis pelo aquecimento global são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que são emitidos por atividades naturais e antropogênicas.

Como o CO₂ é o principal GEE por ser o mais abundante, ele é utilizado como referência para quantificar o potencial de aquecimento dos outros gases. Logo, o gás CH₄ e o N₂O precisam ser equiparados ao CO₂ para se chegar a uma unidade comum, denominada dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq). Isso ocorre porque o CO₂ é o gás com maior concentração em relação aos demais GEE e, para isso, usa-se o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* - GWP) num horizonte de 100 anos, conforme dados na Tabela 2. Observando que quanto maior for o GWP, maior será a contribuição para o aquecimento global (IPCC, 2013).

Tabela 2 - Gases Potencial de Aquecimento Global (GWP).

GÁS	WGP
CO ₂	1
CH ₄	28
N ₂ O	265

Fonte: Adaptado do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (2013).

Nos processos relacionados a agricultura, o metano (CH₄) pode ser gerado de diversas formas: na decomposição orgânica, queima de combustíveis fósseis, aquecimento de biomassa anaeróbica etc. É o segundo gás com potencial mais agravante do aquecimento global, conforme informado na tabela 2.

O óxido nitroso (N₂O) resulta de diversas atividades, inclusive as atividades de práticas agrícolas, é o terceiro gás e o mais agravante para o aquecimento global, dentre os citados anteriormente.

4.4 BIOMASSA, E GERAÇÃO DE ENERGIA ELETRICA EM UMA TERMOELETRICA

Uma das alternativas para mitigar as emissões de GEE e os impactos ambientais, é reduzir o uso dos combustíveis fósseis, como por exemplo: gasolina, diesel, carvão nos processos de combustão. Nesse sentido a utilização das biomassas disponíveis surgem como uma alternativa para obtenção de energia elétrica (VITALI et al., 2013). Mas é importante identificar as propriedades físicas e a composição química dos resíduos agrícolas, a fim de selecionar a tecnologia adequada para a obtenção de energia (QUISPE et al., 2019).

A utilização das biomassas, como casca de arroz, palha de trigo, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros, como fonte de energias renováveis, tem sido alvo de elaborados estudos, com o objetivo de mitigar o uso de combustíveis fósseis (QUISPE et al., 2019).

Em outros países, onde há uma grande produção de arroz, como na Tailândia por exemplo, a principal utilização da casca de arroz é para gerar eletricidade, um

estudo utilizando a metodologia de ACV, comparou a utilização da casca de arroz para gerar energia elétrica com a sua utilização para gerar etanol celulósico e ficou comprovado que entre estas duas opções de utilização deste resíduo, a mais ecológica é a do uso da casca de arroz para fins energéticos (PRASSARA-A; GRANT, 2011).

A combustão de forma controlada da casca de arroz em usinas emite monóxido de carbono e materiais particulados, com baixos níveis de poluentes. Enquanto a combustão inadequada, a céu aberto, produz muitos poluentes, tais como, fumaça, gases ácidos, compostos orgânicos voláteis e materiais particulados, os quais podem vir a causar problemas a saúde humana (MARTÍNEZ et al., 2011).

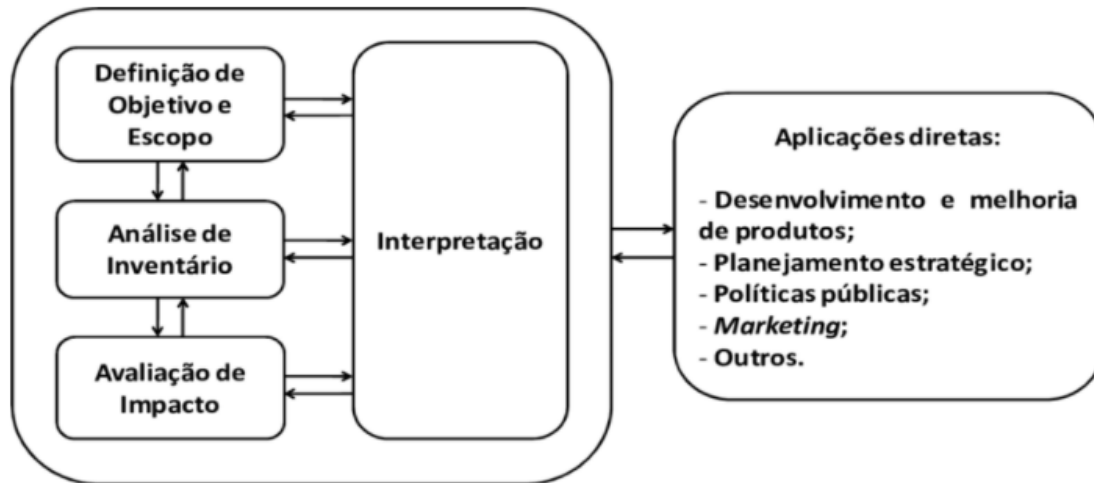
Na termoelétrica a casca de arroz é queimada na fornalha para produzir calor que é usado para aquecer a água da caldeira que gera vapor. Esse vapor, com uma alta pressão e temperatura, aciona as pás de uma turbina que está conectada a um gerador de eletricidade. A eletricidade gerada é transmitida para a rede de energia elétrica e, também usada na própria usina. O vapor excessivo liberado da turbina é então condensado em água, que passa a ser reciclada na caldeira (CHUNGSANGUNSIT, GHEEWALA, PATUMSAWAD, 2009).

4.5 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido apontada como uma das metodologias de avaliação de impactos ambientais mais aceitas internacionalmente, podendo ser aplicada a qualquer atividade, processo ou produto, inclusive aqueles no âmbito da construção civil (CABEZA et al., 2014; CHAU et al., 2015).

ACV é uma ferramenta indispensável de gestão ambiental usada para avaliar os aspectos ambientais e os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida do produto. A avaliação de ACV é dividida em quatro fases: definição do objetivo e escopo do estudo; inventário do ciclo de vida; avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação dos resultados. Conforme ilustra a figura 4:

Figura 4 - Fases de uma ACV



Fonte: Autora, (2021). Modificado de ABNT (2009b).

Dependendo dos objetivos, pode-se adotar estratégias para simplificar o processo. Quando é necessário comparar duas opções de processos de produção, focando apenas nas diferenças entre eles e nos aspectos convenientes, a ACV pode ser mais simples (JONH, 2010).

4.5.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DE ESCOPO

Nesta fase são definidas as fronteiras do estudo (temporal e geográfica), a quem os resultados se destinam, os critérios de qualidade e as categorias de impactos ambientais consideradas. Porém, as definições de fronteiras podem ser alteradas, pois um estudo que utiliza a metodologia ACV é um método interativo, podendo sempre ser revisado o planejamento inicial, quando for necessário (KHAN, SADIQ, VEITCH, 2004).

4.5.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

A fase de análise do inventário consiste nos procedimentos de coleta, tratamento e alocação dos dados. Elaborando um fluxograma contendo informações bem definidas de todos os processos e/ou atividade que serão realizados, levantamento de todos os

dados de entradas e saídas que em seguida serão compilados e calculados, e após serão relacionados com a unidade funcional já definida.

O objetivo desta fase é quantificar todos os fluxos, pertencentes aos limites definidos no sistema, envolvidos durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (JOHN, 2010).

4.5.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO

A avaliação do impacto do ciclo de vida, basicamente é um processo qualitativo e quantitativo de compreensão e avaliação da relevância e significado dos impactos ambientais de um determinado produto ou serviço, identificados na análise do inventário do ciclo de vida (ISO 14040).

Após coletados os dados referentes às entradas e saídas dos fluxos primários estes são transformados em indicadores dos possíveis impactos. Os resultados conferidos nessa fase devem ser vistos como potenciais indicadores ambientais e não como previsões reais de efeitos ambientais.

4.5.4 INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A interpretação consiste em identificar e analisar os resultados obtidos nas fases de inventário e da avaliação de impacto de acordo com o objetivo e o escopo que foram anteriormente definidos para o estudo (CHEHEBE, 1997).

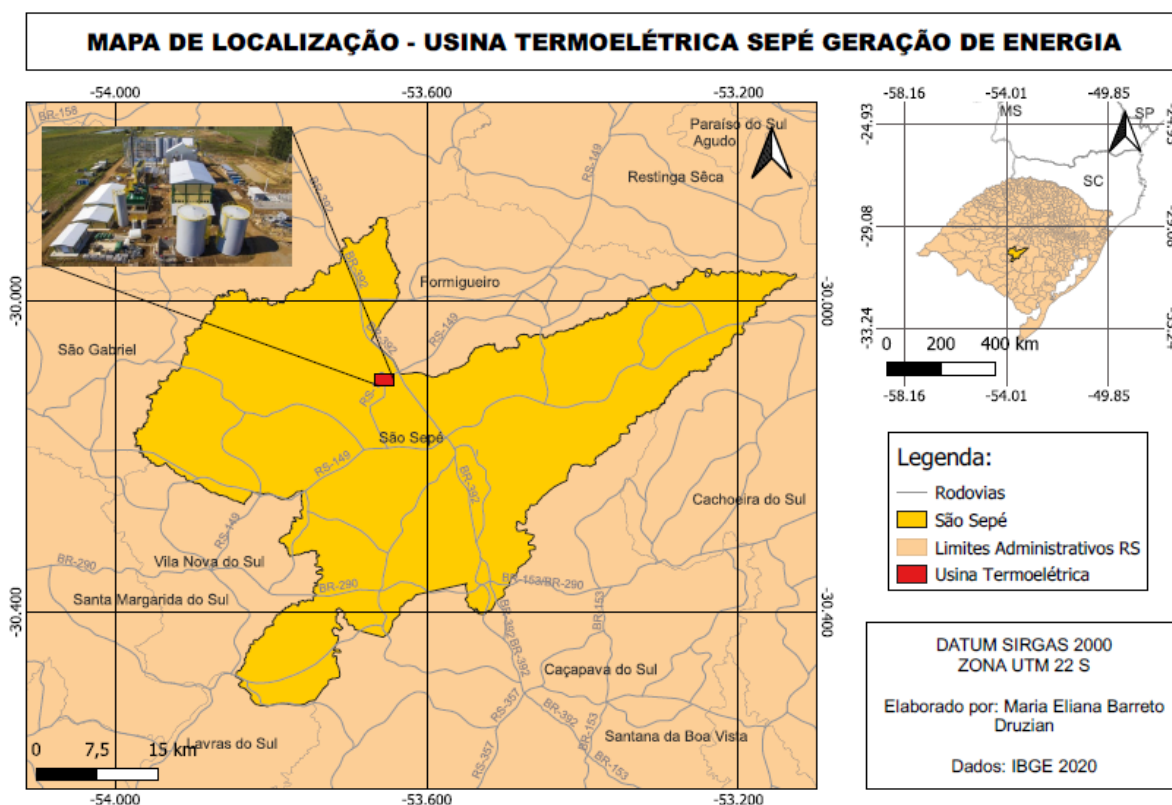
Nesta fase são identificadas as questões significativas do estudo, checando sua integridade e analisando a consistência dos resultados obtidos, possibilitando assim definir conclusões, limitações e recomendações ao estudo. A interpretação de dados não ocorre somente na fase final do processo e sim durante todo o processo.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está concentrada na região central do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo áreas de descarte da casca de arroz a céu aberto e a Usina Termoeletrica Sepé Geração de Energia, que opera com uma potência de 8MW com capacidade de gerar 56 milhões de KW/h/ano a partir da queima da casca de arroz.

A Usina Termoeletrica Sepé Geração de Energia está localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, a 266 km quilômetros da capital, Porto Alegre. O acesso rodoviário pode ser feito através da BR-290 e BR-392. O terreno é situado na RS-149, em zona rural, distante 2 km do entroncamento com a BR-392, e a 12 km do núcleo urbano de São Sepé (Figura 5).

Figura 5 - Mapa de localização da Usina Termoeletrica Sepé



Fonte: Autora, (2021).

5.1 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE FUNCIONAMENTO DA TERMOELETRICA SÃO SEPÉ

A Usina Termoelétrica São Sepé, em operação desde 2018, produz energia elétrica a partir da queima da casca de arroz. Durante esse processo são gerados quatro tipos de efluentes líquidos e um resíduo sólido, os líquidos são:

- da estação de tratamento de água (ETA);
- da desmineralizadora;
- da purga da torre de resfriamento;
- da caldeira.

Todos estes líquidos acima são destinados para uma lagoa de tratamento onde é usado o processo de osmose reversa, devido à alta condutividade dos efluentes.

O resíduo sólido é a cinza, gerado da queima da casca de arroz.

Na termoelétrica, o ciclo (casca/cinza/ar) é descrito da seguinte forma: casca de arroz chega na usina carregada em caminhões, inicialmente é pesada, e descarregada dentro da moega (Figura 6), onde passa por uma peneira para retirar materiais indesejados, como pedras por exemplo, em seguida é enviada para o armazenamento. A casca após armazenada é transferida para alimentar a caldeira, onde a queima ocorre por um sistema de grelha. Nesse processo a cinza produzida pela queima, juntamente com o ar, passa pelo filtro multiciclone e depois pelo filtro manga, onde o ar é eliminado pela chaminé e a cinza vai para o armazenamento, que posteriormente será destinada para industrialização de cal mista no município de Caçapava do Sul/RS.

Figura 6 - Descarga de casca de arroz na moega

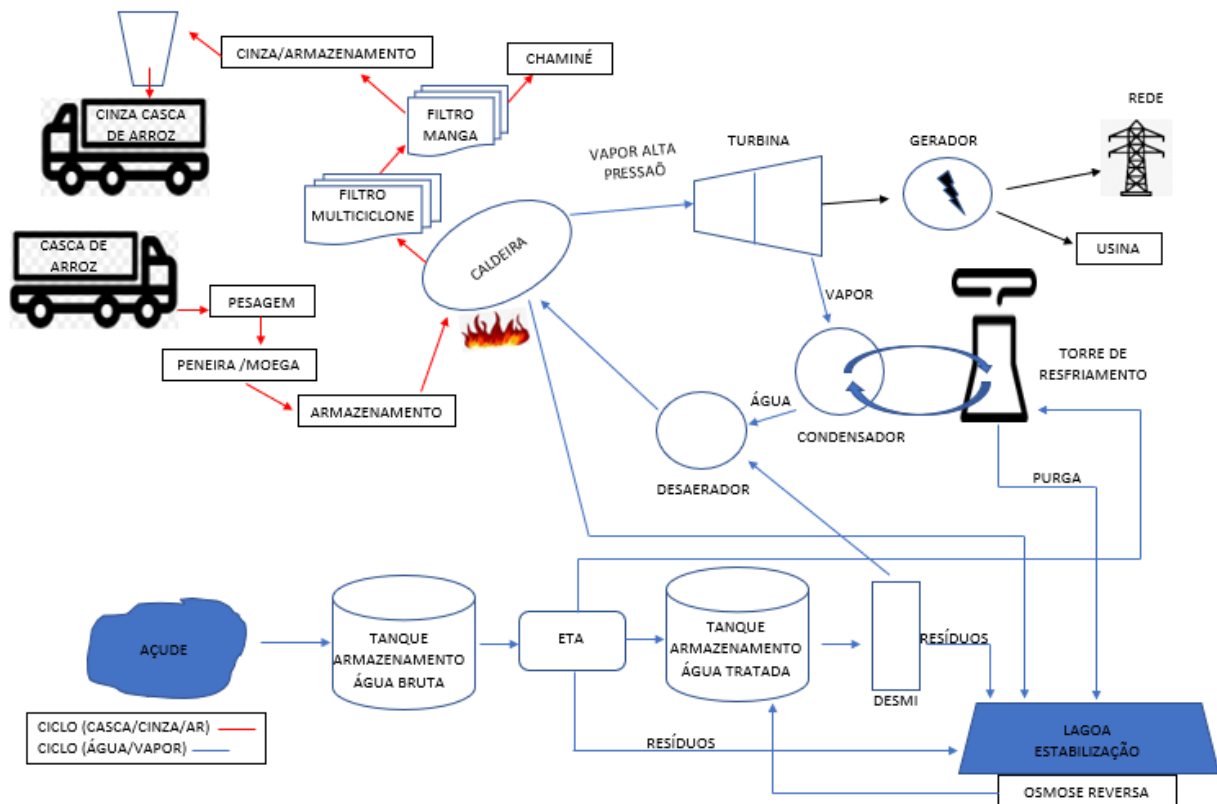


Fonte: Autora (2021).

A descrição das etapas do ciclo (ÁGUA/VAPOR) é detalhada dessa forma: a água utilizada na usina é retirada de um açude e levada para um tanque de armazenamento de água bruta, saindo deste tanque, passará por uma estação de tratamento de água (ETA) e após, é armazenada em um tanque de água tratada. Na sequência, a água segue para a desmineralizadora (DESMI) onde ocorre um processo de extração de minerais, metais pesados e íons da água. Passando dessa fase, é encaminhada para o desaerador para retirar os gases dissolvidos no líquido e então vai para a caldeira, onde será aquecida pela queima da biomassa, gerando vapor em alta pressão. Esse vapor passa pela turbina e aciona o gerador, produzindo então a energia elétrica. A água no estado de vapor que passa pela turbina é encaminhada para o condensador (trocador de calor), onde voltará para o estado líquido e retorna para o

desaerador e após para a caldeira, repetindo o ciclo. A torre de resfriamento serve para resfriar o vapor que sai da turbina, transformando o vapor em líquido. A Figura 7, ilustra as principais etapas descritas e envolvidas no processo de geração de energia elétrica.

Figura 7 - Etapas do funcionamento da Usina Termoelétrica



Fonte: Autora (2021).

Neste trabalho foram investigadas as principais emissões dos GEEs emitidas pela casca de arroz, quando utilizada como biomassa para geração de energia na termoelétrica citada anteriormente, e comparar com as emissões que essa mesma quantidade de casca de arroz gera, quando descartada no meio ambiente. As etapas e os processos de ambos os sistemas foram analisados detalhadamente, de acordo com os dados e informações levantadas para a elaboração do inventário do ciclo de vida.

Foram coletados dados referentes ao processo de operação de combustão e insumos utilizados na Usina, com informações que nortearam este estudo.

A metodologia utilizada é a Avaliação de Ciclo de Vida, define a estrutura da ACV em quatro fases: definição do escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A aplicação dessa metodologia possibilita a identificação e quantificação de impactos ambientais de cada um dos destinos da casca de arroz, possibilitando compilar e avaliar *inputs* e *outputs* do sistema.

Foram utilizados os fatores de emissões estabelecidos pelo IPCC e de outros trabalhos que se adequaram as condições locais, para estimar as emissões diretas e indiretas da utilização da casca de arroz. A pegada carbono ou o indicador de impacto do aquecimento global, equação (1), é estimado pela metodologia e fatores de caracterização (Global Warming Potential, GWP) determinados pelo IPCC (2014). Neste estudo são analisados os seguintes GEE, o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) num horizonte de 100 anos (GWP-100).

$$E_{GEE} = \sum GWP_j \cdot m_j \quad (1)$$

Onde,

E_{GEE} = é a emissão dos GEE (kg CO₂ eq);

GWP_j é o fator de caracterização do GEE (kg CO₂/kg GEE)

m_j é a quantidade do GEE (kg).

Os cálculos referentes ao inventário e avaliação dos impactos foram feitos no *software* Microsoft Excel.

As principais etapas desenvolvidas neste trabalho compreendem as seguintes fases:

- Definição do escopo (cenários) e fronteira do estudo;
- Inventário do ciclo de vida da casca de arroz utilizada como biomassa na termoelétrica;
- Inventário do ciclo de vida da casca de arroz decomposta a céu aberto;
- Estimativa das emissões dos dois sistemas;
- Análise e comparação dos dois sistemas;

5.2 PESQUISA DOCUMENTAL

A revisão da literatura é a parte mais importante deste estudo científico, pois consiste no levantamento de material que contribui para encontrar soluções do tema estudado. Essa etapa consiste na busca de documentos, relatórios, normas técnicas, planos, registros, artigos e banco de dados de ACV que forneçam subsídios para elaboração do inventário dos *inputs* e *outputs* durante o ciclo de vida da casca do arroz.

5.3 PESQUISA DE CAMPO

Foram realizadas pesquisas de campo na Usina Termoelétrica de São Sepé/RS e nas beneficiadoras de arroz, com o objetivo de analisar detalhes do sistema e levantar dados primários e informações necessárias para a elaboração do inventário do ciclo de vida.

5.4 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo deste estudo é estimar as emissões de GEE decorrentes do uso da casca de arroz na geração de energia em uma termoelétrica e calcular as emissões evitadas pela mesma quantidade de casca descartada no meio ambiente. Para atingir este objetivo, a avaliação do ciclo de vida (ACV) é utilizada para avaliar os impactos ambientais associados as emissões de GEE aos diferentes destinos de uso da casca de arroz.

A fronteira do sistema do estudo ACV é mostrado na Figura 8. Neste esquema são apresentados os dois sistemas que serão estudados:

Sistema A: Decomposição da casca de arros a céu aberto. Este sistema é composto pelas etapas de transporte e descarte da casca.

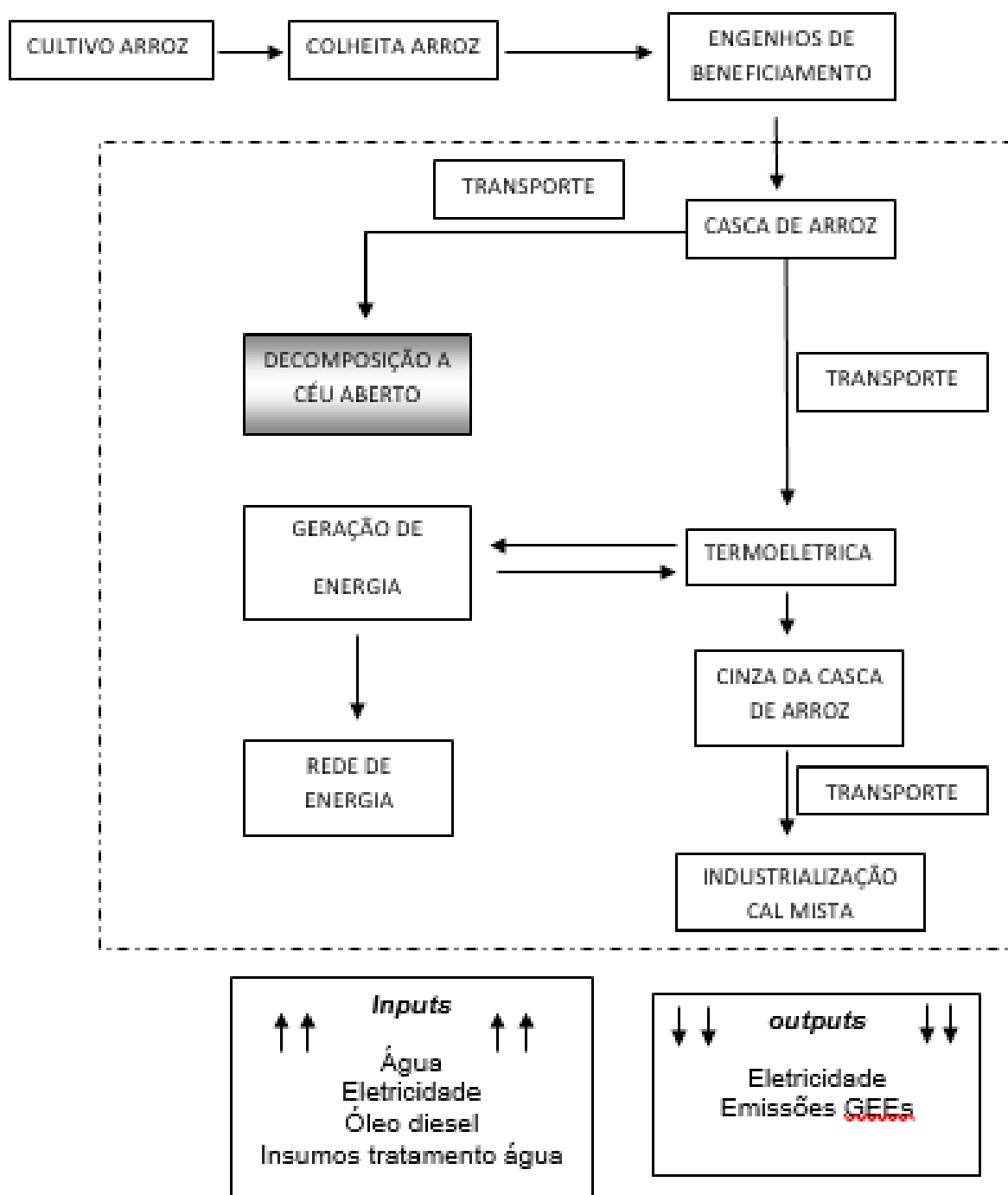
Sistema B: Utilização da casca de arroz para produção de energia elétrica. Este sistema é composto pelo transporte da casca, armazenamento da casca, geração de eletricidade, transporte da cinza.

O uso de casca de arroz como combustível nas unidades de beneficiamento é excluído da fronteira do estudo, pois é considerado parte da produção de arroz. Embora

os impactos ambientais causados pela produção de arroz sejam considerados significativos, eles não influenciam nos diferentes processos de destinação final da casca de arroz (PRASARA-A e GRANT, 2010).

Logo, as fronteiras desta pesquisa abrangem o transporte da casca de arroz, de todas as unidades de beneficiamentos que fornecem casca de arroz para a termoelétrica, por um período de um ano. As emissões do transporte das cinzas geradas até o seu destino também serão quantificadas. As emissões dos GEE pelo transporte da casca de arroz das unidades de beneficiamento até os locais de descarte, serão calculadas, considerando uma distância média, baseada em dados fornecidos por algumas beneficiadoras. As emissões de GEE da construção da usina também é excluída do limite da fronteira, pois sua vida útil é muito grande, portanto, sua contribuição para a emissão de GEE é relativamente pequena. A unidade funcional utilizada neste estudo será de 1 quilograma de casca de arroz.

Figura 8 - Fluxograma das fronteiras do sistema de estudo



Fonte: Autora (2021)

5.5 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA CASCA DE ARROZ

O transporte da casca de arroz das unidades de beneficiamento até a usina termoelétrica, demanda de um consumo elevado de óleo diesel. Para estimar a quantidade consumida pelos caminhões, será estabelecida uma média da distância entre as unidades de beneficiamento e a Usina termoelétrica.

5.5.1 EMISSÕES DOS TRANSPORTES:

As estimativas de emissões de GEE associadas ao consumo de óleo diesel pelo transporte da carga da casca de arroz em caminhões foram estimadas, a partir da equação (2). Os fatores de emissão padrão para os gases CH₄, N₂O e CO₂, recomendados de acordo com a metodologia do IPCC (2006a), são demonstrados na Tabela 3. O consumo de diesel dos caminhões utilizados no transporte será igual a 0,0306 kg/t.km (XIAO et al., 2009).

$$E = \Sigma (fuel_i \cdot EF_i) \quad (2)$$

Onde:

E = emissões de GEE (Kg)

$fuel_i$ = é o tipo de combustível *i* consumido

EF_i = é o fator de emissão do tipo de combustível *i* (kg GEE/Kg)

Tabela 3 - Fatores de emissão para transporte rodoviário.

GEE	Padrão (Kg GEE/Kg diesel)
CO ₂	3,10
CH ₄	1,73 x 10 ⁻⁴
N ₂ O	1,20 x 10 ⁻³

Fonte: IPCC (2006).

Para a determinar do indicador da etapa de transporte da casca de arroz, foi considerado o consumo de combustível do caminhão vazio, partindo da unidade de

beneficiamento com a carga de casca de arroz até o provável local de descarte, e seu retorno vazio, como mostrado na Equação 4.

$$Cv = Cc.(Carga+Pc).d + Cc.Pc.d \quad (4)$$

Onde:

Cv é consumo de combustível por viagem (L);

Cc corresponde ao consumo específico de combustível no transporte pelo caminhão (L/t.km),

$Carga$ é a carga transportada (t),

d é a distância do local de carregamento até o local de descarte (km)

Pc é o peso do caminhão vazio (t).

5.5.2 EMISSÕES DO CONSUMO DE ELETRICIDADE

Para determinar a quantidade de gases procedentes do consumo de eletricidade, utilizou-se o fator de emissão da matriz de energia elétrica inserida no sistema interligado brasileiro igual a 125 kg CO₂eq/MWh, sugerido por Miranda (2012), a utilização desse indicador se deve pelo fato do Brasil ter a matriz elétrica predominantemente de fontes renováveis.

5.5.3 EMISSÕES DA QUEIMA DA CASCA DE ARROZ NA TERMOELÉTRICA

As emissões de GEEs que ocorrem no processo da queima da casca de arroz, dependem da tecnologia de combustão. Na termoelétrica de São Sepé, o sistema de queima é feito pelo sistema de grelha refrigerada, dotadas de um sistema de controle de combustão com injeção eletrônica de combustível.

De acordo com o IPCC (2006), CO₂ liberado pela queima da casca de arroz é contado como neutro porque é assumido que o CO₂ emitido será praticamente todo reabsorvido durante a próxima fase de crescimento do arroz.

5.5.4 EMISSÕES DA DECOMPOSIÇÃO DA CASCA DE ARROZ

A disposição da casca de arroz em aterros sanitários ou no solo, emite gases oriundos da sua decomposição. As emissões de CH₄ da decomposição da casca serão calculadas, equação (3), conforme recomendado pelo IPCC (2006,c).

$$BE_{CH_4,y} = GPW_{CH_4} \cdot \varphi \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^{y-1} \cdot \sum_j \cdot W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj(y-x)} \cdot (1 - e^{kj})$$

(3)

Onde,

$BE_{CH_4,y}$ = é a quantidade de emissões de metano pela decomposição da biomassa pelo período y (kg CO₂eq),

GPW_{CH_4} = é o potencial de aquecimento global do metano (28 kg CO₂/kg CH₄),

φ = é o fator de correção devido às incertezas do modelo no ano y ,

OX = é fator de oxidação do metano no local em que está disposto,

F = é a fração volumétrica de metano no gás gerado na decomposição,

DOC_f = é a fração do carbono orgânico degradável que se decompõe em condições anaeróbicas (-),

MCF = é fator de correção do metano para decomposição aeróbica,

x : número de anos em que os resíduos estão depositados, estendendo-se do primeiro ano ($x=1$) para o ano y ($x=y$), sendo y um período consecutivo de 12 meses;

$W_{j,x}$ é a quantidade da biomassa j depositadas no ano x (kg),

DOC_j = corresponde a fração de carbono orgânico degradável (fração mássica) da biomassa j ,

kj = é a taxa de decaimento da biomassa j (1/ano),

j = corresponde ao tipo de resíduo/biomassa e y é o período para o qual as emissões de metano são calculadas (ano).

Para calcular a estimativa de potencial de geração de metano utilizou-se o método de decaimento de 1ª ordem recomendado pelo IPCC (IPCC, 2006,c). Para a realização do cálculo utilizou-se valores da tabela 5, recomendados pelo (IPCC,2006,b).

Na Tabela 4, tem-se os parâmetros recomendados para o modelo de decomposição da biomassa, conforme o IPCC (2006c).

Tabela 4 - Parâmetros recomendados IPCC (2006c)

Parâmetro	Valor
φ	0,9
OX	0
F	0,5
MCF	0,4
DOC_j	49
k_j	0,03

Fonte: IPCC (2006b).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente item contém os resultados e discussões, em dois sistemas, A e B. O sistema A corresponde ao inventário de entradas, saídas e emissões da casca de arroz disposta no meio ambiente e, o sistema B aborda as entradas, saídas e emissões calculadas a partir da utilização da casca de arroz como biomassa na geração de energia.

6.1 INVENTÁRIO DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA A

6.1.1 EMISSÕES DA DECOMPOSIÇÃO DA CASCA DE ARROZ

$$BE_{CH_4,y} = GPW_{CH_4} \cdot \varphi \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^{y-1} \sum_j \cdot W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-kj(y-x)} \cdot (1 - e^{kj})$$

$$BE_{CH_4,y} = 28 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0) \cdot \frac{16}{12} \cdot 0,5 \cdot 0,49 \cdot 0,5 \cdot \sum_{x=1}^{y-1} \sum_j \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot e^{-0,03(1-1)} \cdot (1 - e^{0,03})$$

$$BE_{CH_4,y} = 28 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0) \cdot \frac{16}{12} \cdot 0,5 \cdot 0,49 \cdot 0,5 \cdot \sum_{x=1}^{y-1} \sum_j \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot e^0 \cdot 0,03$$

$$BE_{CH_4,y} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ (kgCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg casca)}$$

6.1.2 EMISSÕES PELO TRANSPORTE DA CASCA DE ARROZ PARA DESCARTE

Para o cálculo da emissão de GEE geradas a partir do transporte da casca de arroz das unidades de beneficiamento para descarte, foi realizada uma pesquisa, conforme dados da Tabela 5, para estimar uma média de quilômetros percorridos até o possível ponto de descarte.

Tabela 5 - Distância média de descarte da casca de arroz

Cidade	Unidade de beneficiamento	Km
São Sepé	Arrozeira Sepense	15
São Sepé	Coop. Triticola Sepeense	15
Santa Maria	Marzari Alimentos	12
Formigueiro	Cotrisel	17
Cachoeira do Sul	Irmão Trevisan	16
Média		15

Fonte: Autora 2021 (Dados fornecidos pelas unidades de beneficiamento)

A quantidade de casca de arroz computada neste estudo para a análise do ciclo de vida, corresponde ao total recebido na Usina Termoelétrica Sepé, por um período de 1 ano, referente aos meses de novembro de 2020 a outubro de 2021, os dados, dispostos na Tabela 6, foram fornecidos pela Usina referida.

Tabela 6 - Quantidade de entrada de biomassa e saída de cinza da Termoelétrica

Mês/ano	Entrada de casca de arroz (tonelada)	Saída de Cinza (tonelada)
Nov/2020	4.416,12	772,82
Dez/2020	4.267,53	746,82
Jan/2021	4.503,58	788,12
Fev/2021	4.948,03	865,91

Mar/2021	3.419,77	581,36
Abr/2021	4.226,44	739,63
Mai/2021	3.964,30	693,75
Jun/2021	5.005,84	876,02
Jul/2021	5.952,54	1.041,69
Ago/2021	5.947,07	1.040,73
Set/2021	4.066,55	711,65
Out/2021	4.539,92	794,49
TOTAL	55.257,69	9.652,99

Fonte: Autora 2021 (Dados fornecidos pela Usina Termoelétrica Sepé).

De acordo com os dados, um total de 55.257,69 toneladas de casca de arroz foram recebidos pela usina no período de 1 ano. Para o cálculo das emissões relativas ao transporte da casca para descarte no meio ambiente, considera-se um trajeto médio de 15Km, conforme cálculo apresentado na Tabela 6.

O indicador Consumo médio do transporte da casca (kg diesel/tonelada) encontrado é $1,55 \times 10^{-3}$. Os resultados do consumo de combustível e o número de viagens são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo de diesel no transporte da casca de arroz para descarte

Mês/ano	Km	Km	Casca (t)	Cv (kg diesel)	Nº de viagem	Consumo (Kg diesel)
Nov/20	15,00	5.850	4.416,12	17,54	390	$6,84 \times 10^3$
Dez/20	15,00	5.850	4.267,53	17,54	377	$6,61 \times 10^3$
Jan/21	15,00	5.850	4.503,58	17,54	397	$6,96 \times 10^3$
Fev/21	15,00	5.850	4.948,03	17,54	437	$7,67 \times 10^3$
Mar/21	15,00	5.850	3.419,77	17,54	302	$5,30 \times 10^3$
Abr/21	15,00	5.850	4.226,44	17,54	370	$6,49 \times 10^3$
Mai/21	15,00	5.850	3.964,30	17,54	350	$6,14 \times 10^3$
Jun/21	15,00	5.850	5.005,84	17,54	442	$7,75 \times 10^3$
Jul/21	15,00	5.850	5.952,54	17,54	525	$9,21 \times 10^3$
Ago/21	15,00	5.850	5.947,07	17,54	517	$9,07 \times 10^3$
Set/21	15,00	5.850	4.066,55	17,54	350	$6,14 \times 10^3$
Out/21	15,00	5.850	4.539,92	17,54	416	$7,30 \times 10^3$

Total	15,00	70.200	55.257,69	210,52	4873	8,55 x 10⁴
Consumo médio do transporte da casca (kg diesel/tonelada)						1,55 x 10⁻³

Fonte: Autora 2021.

Para o cálculo da estimativa das emissões de GEE, utilizou-se a Equação 1, e os fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 3).

$$E = \Sigma (fuel_i \cdot EF_i) \quad (2)$$

$$E = \Sigma (1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1) + (1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 28) + (1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 265)$$

$$E = 5,30 \cdot 10^{-3} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg casca}$$

6.1.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CASCA DE ARROZ NO SISTEMA A

As emissões estimadas pelo descarte da casca de arroz no meio ambiente são apresentadas na Tabela 8, correspondente a unidade funcional de 1 quilograma de casca de arroz.

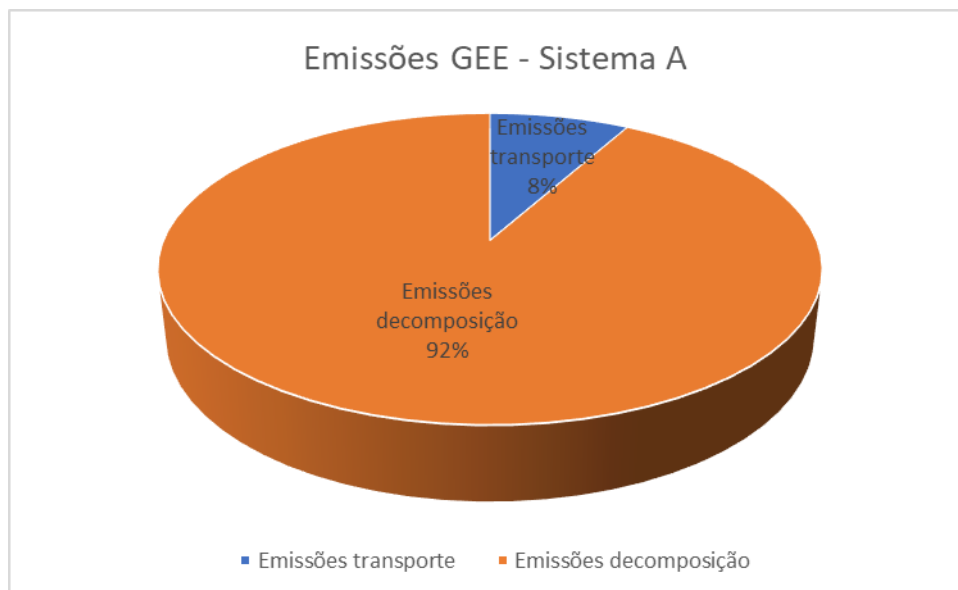
Tabela 8 - Emissões de GEE no ciclo de vida da casca de arroz - Sistema A

Etapa	Emissões (kg CO ₂ eq/kg casca)
Transporte da casca	5,3 x 10 ⁻³
Emissões da decomposição da casca	6,0 x 10 ⁻²
Total	6,53 x 10⁻²

Fonte: Autora 2022.

Neste sistema, a decomposição da casca de arroz é responsável por 92% das emissões de GEE, e 8% correspondem as emissões pelo transporte, conforme representação na Figura 9.

Figura 9 - Emissões de GEE no Sistema A



Fonte: Autora 2022.

Cabe ressaltar que a casca de arroz depositada no meio ambiente, leva aproximadamente cinco anos para se degradar, logo a emissão de metano ocorrerá durante todo o processo de decomposição.

6.2 INVENTÁRIO DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA B

6.2.1 EMISSÕES DO TRANSPORTE DA CASCA DE ARROZ – SISTEMA B

De acordo com os dados fornecidos pela Usina Termoelétrica Sepé, a casca de arroz recebida vem de vários municípios do Rio grande do Sul, conforme mostra a Tabela 9, com suas respectivas distâncias da Usina Termoelétrica Sepé.

Tabela 9 - Municípios fornecedores de casca de arroz

Município	Distância do município até a Usina (Km)
São Sepé	12
Formigueiro	20
Restinga Seca	46

São Pedro	89
Vila Nova do Sul	55
Caçapava do Sul	55
Santa Margarida do Sul	66
São Gabriel	93
Santa Maria	52
Cachoeira do Sul	137
São Borja	343
Pelotas	248

Fonte: Autora 2021 (Dados fornecidos pela Usina Termoelétrica Sepé).

Para o cálculo das emissões relativas ao transporte da casca de arroz para a Usina, considera-se os dados de quilometragem das cargas de casca que chegam na usina, fornecidos pela própria empresa, conforme na Tabela 10.

O indicador Consumo médio do transporte da casca (kg diesel/tonelada) encontrado é $6,02 \times 10^{-3}$. Os resultados do consumo de combustível e o número de viagens são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Consumo de diesel no transporte da casca de arroz para a Termoelétrica

Mês/ano	Média distância (Km)	Km/mês	Casca (ton)	Cv (kg diesel)	Nº de viagem	Consumo (kg diesel)
Nov/20	65,77	51.300	4.416,12	76,92	390	$3,00 \times 10^4$
Dez/20	79,38	59.849	4.267,53	92,83	377	$3,50 \times 10^4$
Jan/21	64,19	50.969	4.503,58	75,08	397	$2,98 \times 10^4$
Fev/21	49,49	43.252	4.948,03	57,88	437	$2,53 \times 10^4$
Mar/21	62,76	37.907	3.419,77	73,40	302	$2,22 \times 10^4$
Abr/21	77,17	57.103	4.226,44	90,25	370	$3,34 \times 10^4$
Mai/21	62,19	43.532	3.964,30	72,73	350	$2,55 \times 10^4$
Jun/21	54,99	48.611	5.005,84	64,31	442	$2,84 \times 10^4$

Jul/21	44,03	46.233	5.952,54	51,50	525	2,70 x 10 ⁴
Ago/21	45,42	46.960	5.947,07	53,12	517	2,75 x 10 ⁴
Set/21	64,46	45.122	4.066,55	75,39	350	2,64 x 10 ⁴
Out/21	45,28	37.673	4.539,92	52,96	416	2,20 x 10 ⁴
Total	59,59	568.511	55.257,69	836,37	4873	3,32 x 10⁵
Consumo médio do transporte da casca (kg diesel/kg)						6,02 x 10⁻³

Fonte: Autora 2022.

Para o cálculo da estimativa das emissões de GEE, utilizou-se a Equação 1, e os fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 3).

$$E = \Sigma (fuel_i \cdot EF_i) \quad (2)$$

$$E = \Sigma (6,02 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1) + (60,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 28) + (6,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 265)$$

$$E = 2,06 \cdot 10^{-2} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg casca}$$

6.2.2 EMISSÕES DO TRANSPORTE DA CINZA DA CASCA DE ARROZ

Para o cálculo das emissões relativas ao transporte da cinza, originada pelo processo de queima da casca de arroz na Usina, considera-se os dados de quilometragem fornecidos pela própria empresa, conforme na Tabela 11, de acordo com a empresa, toda cinza originada na usina é enviada para a Unidade de Cal mista localizada no município de Caçapava do Sul/RS, a uma distância de 61Km.

O indicador Consumo médio do transporte da casca (kg diesel/tonelada) encontrado é 1,02x10⁻². Os resultados do consumo de combustível e o número de viagens são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumo de diesel no transporte da cinza para a Unidade Cal Mista

Mês/ano	Média distância (Km)	Km	Cinza (ton)	Cv (kg diesel)	Nº de viagem	Consumo (Kg diesel)
Nov/20	61,00	13.420	772,82	71,34	110	7,85 x 10 ³

Dez/20	61,00	12.932	746,82	71,34	106	7,56 x 10 ³
Jan/21	61,00	13.664	788,12	71,34	112	7,99 x 10 ³
Fev/21	61,00	15.128	865,91	71,34	124	8,85 x 10 ³
Mar/21	61,00	10.126	581,36	71,34	83	5,92 x 10 ³
Abr/21	61,00	12.810	739,63	71,34	105	7,49 x 10 ³
Mai/21	61,00	12.078	693,75	71,34	99	7,06 x 10 ³
Jun/21	61,00	15.250	876,02	71,34	125	8,92 x 10 ³
Jul/21	61,00	18.178	1.041,69	71,34	149	1,06 x 10 ⁴
Ago/21	61,00	18.178	1.040,73	71,34	149	1,06 x 10 ⁴
Set/21	61,00	12.444	711,65	71,34	102	7,28 x 10 ³
Out/21	61,00	13.786	794,49	71,34	113	8,06 x 10 ³
Total	61,00	14.000	9.652,99	856,11	1377	9,82 x 10⁴
Consumo médio do transporte da cinza (kg diesel/kgcinza)						1,02 x 10⁻²

Fonte: Autora 2022 (Dados fornecidos pela Usina Termoelétrica Sepé).

Para o cálculo da estimativa das emissões de GEE, utilizou-se a Equação 1, e os fatores de emissão para transporte rodoviário recomendados pelo IPCC (Tabela 3).

$$E = \Sigma (fuel_i \cdot EF_i) \quad (2)$$

$$E = \Sigma (1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 3,1) + (1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 28) + (1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 265)$$

$$E = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ kgCO}_{2eq} / \text{Kg casca}$$

6.2.3 EMISSÕES CONSUMO DE ENERGIA DA TERMOELÉTRICA

Os dados referentes ao consumo de energia elétrica foram fornecidos pela Usina termoelétrica Sepé, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Consumo de energia interna da Termoelétrica

Mês/ano	Consumo de energia (MW)	Consumo de energia (MW/h)
---------	----------------------------	------------------------------

Nov/2020	0,56	13,44
Dez/2020	0,47	11,28
Jan/2021	0,57	13,68
Fev/2021	0,7	16,8
Mar/2021	0,55	13,2
Abr/2021	0,44	10,56
Mai/2021	0,54	12,96
Jun/2021	0,51	12,24
Jul/2021	0,52	12,48
Ago/2021	0,68	16,32
Set/2021	0,54	12,96
Out/2021	0,52	12,48
Média	0,55	13,2

Fonte: Autora 2022 (Dados fornecidos pela Usina Termoelétrica Sepé).

$$E = 0,125 \cdot 0,0132 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg casca}$$

$$E = 1,65 \cdot 10^{-3} \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{Kg casca}$$

O consumo de energia elétrica corresponde ao percentual de menor contribuição nas emissões totais, enquanto o transporte representa a maior fonte de emissão de GEE no sistema B.

As emissões ligadas a utilização da casca de arroz como biomassa na geração de eletricidade são apresentadas na Tabela 13.

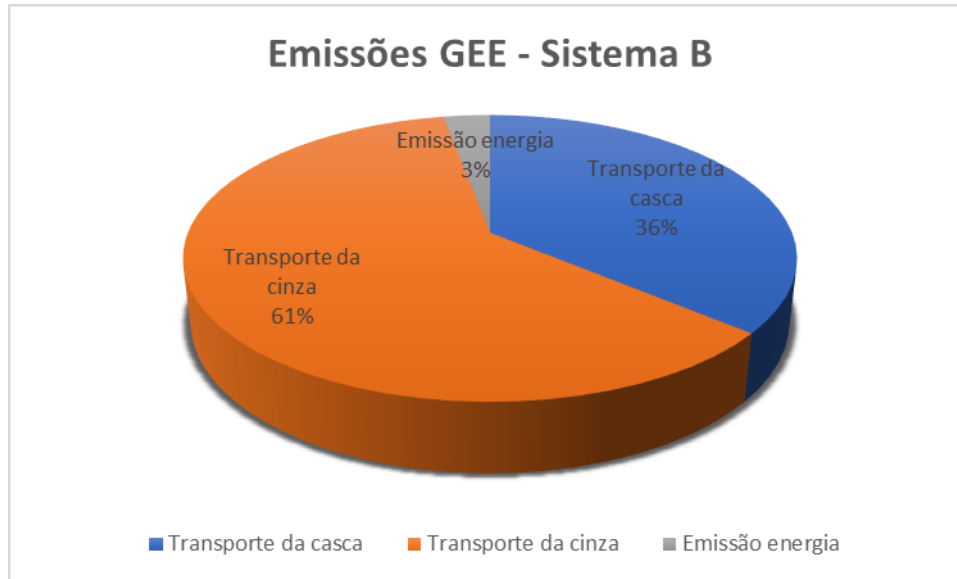
Tabela 13 - Emissões de GEE no ciclo de vida da casca de arroz - Sistema B

Etapa	Emissões (kg CO ₂ eq/kg casca)
Transporte da casca	2,06 x 10 ⁻²
Transporte da cinza	3,48 x 10 ⁻²
Consumo de energia elétrica	1,65 x 10 ⁻³
Total	5,71 x 10⁻²

Fonte: Autora 2022.

Na Figura 10 são mostradas as parcelas percentuais das emissões totais no Sistema B.

Figura 10 - Emissões GEE - Sistema B



Fonte: Autora 2022.

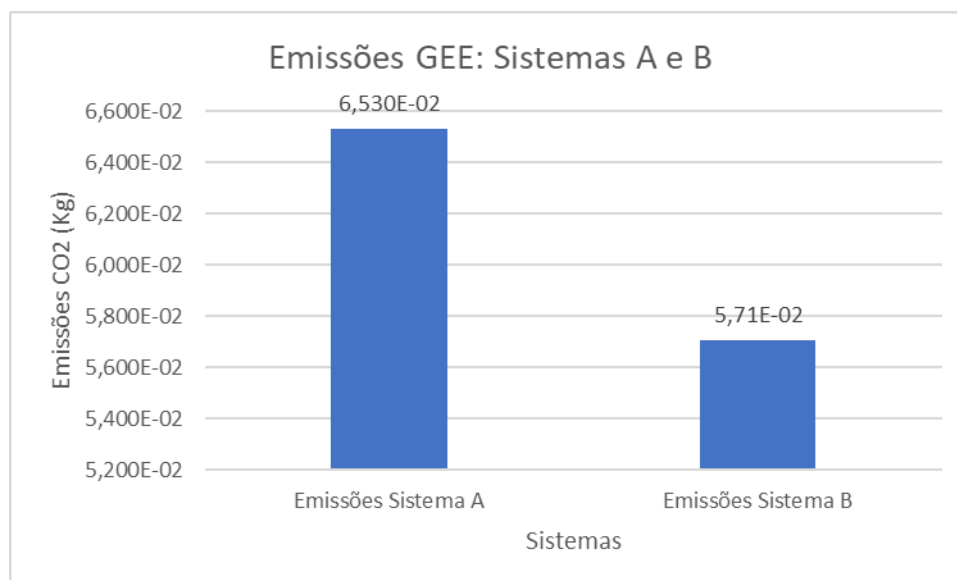
Avaliando a Figura 10, verifica-se que as emissões no transporte da cinza são maiores em relação ao transporte da casca, esse fato justifica-se em função da diferença do peso da carga transportada, a carga média da casca de arroz é de aproximadamente 11,5t, enquanto a carga média transportada de cinza é de 7t consequentemente exige um número maior de viagens.

6.2.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CASCA DE ARROZ NO SISTEMA B

Avaliando a Figura 11, fica claro que os benefícios ambientais são evidentes no sistema B, diferente do encontrado para o sistema A, considerando as emissões geradas para um quilograma de casca, definida como unidade funcional deste estudo.

Percebe-se que a utilização da casca de arroz como biomassa na geração de energia é uma forma de mitigação de emissões de GEE.

Figura 11 - Emissões de GEE: Sistemas A e B



Fonte: Autora 2022.

Calculando as emissões de GEE, para o sistema A, geradas no período de um ano, de novembro de 2020 a outubro de 2021, considerando o total de casca de arroz recebido pela usina, 55.257,69 toneladas, tem-se os seguintes resultados, apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Emissões GEE durante um ano - sistema A

Etapa	Emissões (kg CO2eq)
Transporte da casca	$2,93 \times 10^5$
Emissões da decomposição da casca	$3,32 \times 10^6$
Total	$3,59 \times 10^6$

Fonte: Autora 2022.

Para o sistema B, a tabela 15 apresenta os seguintes cálculos de emissões de GEE durante o período de novembro de 2020 a outubro de 2021, compreendendo um ano.

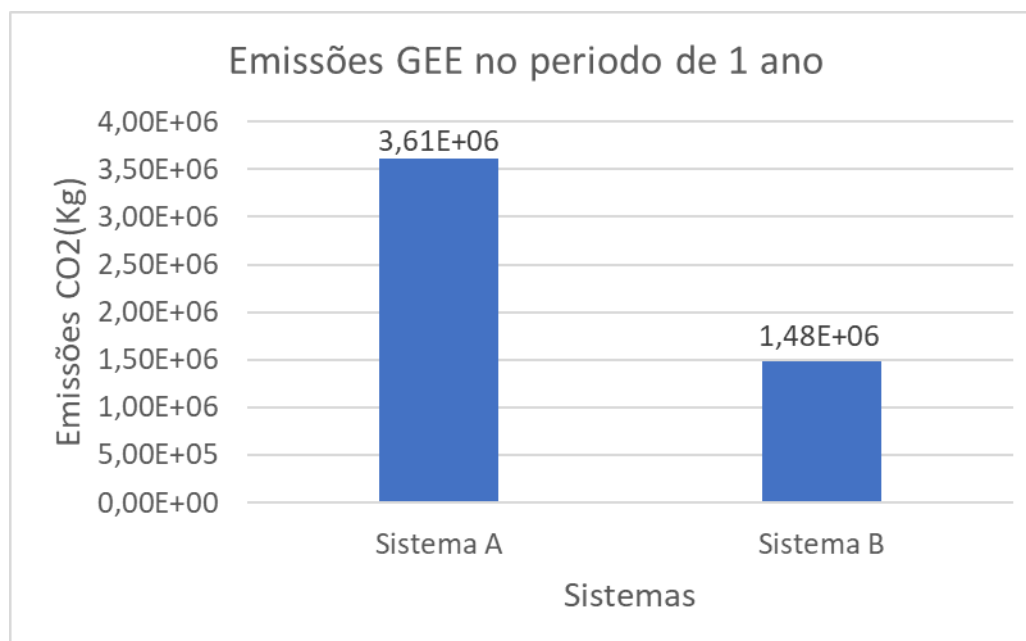
Tabela 15 - Emissões GEE durante um ano - sistema B

Etapa	Emissões (kg CO₂eq)
Transporte da casca	$1,14 \times 10^6$
Transporte da cinza	$3,36 \times 10^5$
Consumo de energia elétrica	$1,98 \times 10^{-2}$
Total	$1,48 \times 10^6$

Fonte: Autora 2022.

Os resultados totais das emissões de GEE em ambos os sistemas podem ser comparados, observando a Figura 12.

Figura 12 - Emissões GEE no período de 1 ano



Fonte: Autora 2022.

O somatório das emissões estimadas no sistema B apresentado na Tabela 15 alcançaram o montante de $1,48 \times 10^6$ kg CO_{2eq}/kg de casca, e considerando as emissões evitadas do sistema A igual a $3,59 \times 10^6$ kg CO_{2eq} /kg casca, as emissões dos processos envolvidos no sistema B foram completamente anuladas, sendo que restaram ainda o *crédito* de $2,13 \times 10^6$ kg CO_{2eq}. Isso significa que os benefícios

ambientais da utilização da casca de arroz para a geração de energia elétrica são evidentes.

7 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados mostraram coerência com os dados reportados na literatura. O valor referente a emissão evitada pela não decomposição da biomassa são bastante significativos, considerando assim que o uso da casca de arroz para a geração de energia elétrica mostra-se como uma alternativa viável economicamente e ambientalmente.

O transporte da casca de arroz para a usina, bem como o transporte da cinza para o destino final tem efeito significativo no potencial de aquecimento global apenas em distâncias de transporte muito longas. Um plano de logística de transporte e a implantação de outras usinas podem contribuir para a mitigação dessa etapa.

Portanto, a produção de bioeletricidade baseada na casca de arroz é uma alternativa promissora e proporciona um destino ambientalmente correto para esse resíduo.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) mostrou-se uma importante ferramentas para compreender os impactos ambientais, permitindo identificar os processos que contribuem de forma mais significativa para emissões de GEE provocados da casca de arroz, ao longo do seu ciclo de vida, oferecendo suporte para tomada de decisões ambientalmente adequadas.

Como resultado deste estudo, verificou-se que as emissões de gases de efeito estufa no processo de geração de energia a partir da queima de casca de arroz, tem menor impacto do que as emissões geradas pela casca disposta no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044: Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações.** Rio de Janeiro: 2009b.

ALMEIDA, Rodrigues Suelen. **Pirólise rápida da casca de arroz: estudo de parâmetros e caracterização de produtos.** Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais). Programa de Pós graduação em Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto alegre. RS. 2010.

ALVES, I. M. **Avaliação energética e ambiental do ciclo de vida de um sistema de abastecimento de água.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Curso Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

ANTÓNIO, J. *et al.* **Application of rice husk in the development of new composite boards. Construction And Building Materials.** [s.l.], v.176, p.432-439, 2018.

BUENO, A. C. S.; LEMOS, C. A. S. **Levantamento da fertilizadade do solo cultivado com o arroz irrigado no município de Uruguaiana.** In: Revista da FZVA, V. 13, nº 1, Uruguaiana, 2006.

CABEZA, L. F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394–416, 2014.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. **A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings.** Elsevier, Applied Energy, v. 143, p. 395-413, 2015.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000.** Rio de Janeiro: Qualitymark: CNI, 1997.

CHUENWONG, K.; SAJJAKULNUKIT, B.; CHIARAKORN, S. **GHG emission projection and mitigation potential for ceramic tableware industry in Thailand.** Mitig Adapt Strateg Glob Change, v. 24, p. 19–434, 2019.

CHUNGSANGUNSIT, T.; GHEEWALA, S.H.; PATUMSAWAD, S. Emission Assessment of Rice Husk Combustion for Power Production. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, v. 3, p. 185-190, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 8, safra 2020/21, n. 10 décimo primeiro levantamento, agosto. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GUIMARÃES, C. O.; MALONCY, M. L.; BATISTA, S. Obtenção De Bio-Óleo a Partir Da Casca De Arroz. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 12, n. 2, p. 159– 166, 2014.

IPCC Report. 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 2: Energy - chapter 3: Mobile Combustion. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006a.

IPCC Report. 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 5: Waste - chapter 3: solid waste disposal. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006b.

IPCC, 2013 Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

IPCC, 2014 Mudanças Climáticas 2014: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Equipe de Redação Central, RK Pachauri e LA Meyer (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 151 pp, 2014.

IPCC SR 1.5, 2018 Global Warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Summary for Policymakers. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 01 ago. 2021.

IRGA. Instituto Riograndense do Arroz. **Boletim de resultados**. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/boletim-de-resultados>. Acesso em: 2 ago. 2021.

JOHN, V. M. **Materiais de construção e o meio ambiente**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 2010. p. 97-122.

KHAN, F. L.; SADIQ, R.; VEITCH, B. Life cycle index (LinX): a new indexing procedure for desing and decision-making. **Journal of Cleaner Producion**. Vol. 12, o. 56-76, 2004.

LAJARA, T. T. **Análise de Viabilidade Técnica da Utilização de Cinzas de Casca de Arroz na Fabricação de Porcelanas**, 2011. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36911/000793128.pdf?sequence>. Acesso em: 3 ago. 2021.

LORENZETT et al. (2012) **Gestão de resíduos e indústria de processamento de arroz** Industrial Management Magazine, v. 8. 2012, p. 219-232.

MARTÍNEZ, et al. Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash. **Energy**. v. 36, p. 3846-3854. 2011.

MAYER, Flávio Dias; HOFFMANN, Ronaldo; RUPPENTHAL, Janis E. **Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNESP, 13. Bauru, SP. Anais eletrônicos. Bauru: UNESP, 2006. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/124.pdf. Acesso em: 10 ago. 2021.

MIRANDA, M. M. **Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Ciência da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MIRANDA, S. H. G. *et al.* A cadeia agroindustrial orizícola do Rio Grande do Sul. **Revista Análise Econômica**, Porto Alegre, v. 34, n. 76, p. 75-96, set., 2016.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; MITCHELL, D. New developments in solid state fermentation: lbioprocesses and products. **Process Biochemistry**. v. 35, p. 1153–1169. 2000.

PRASARA-A, J.; GRANT, T. Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, 493-502, 2011.

QUISPE, I.; NAVIA, R.; KAHHAT, R. Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. **Journal of Cleaner Production** 209: 1235–1244, 2019.

SILVA, M. G. **Avaliação do ciclo de vida do metanol produzido pela cogaseificação do carvão mineral e biomassa residual do arroz**. Campinas, SP: 2018.

SOSBAI. SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. Arroz Irrigado - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. **XXIX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, p. 205, 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia termelétrica: Gás Natural, Carvão, Nuclear**. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VALE, C. S. A. *et al.* IX Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria. **Estimativa da eficiência de queima de casca de arroz durante o processo de sua combustão industrial.** São Paulo, 2014.

VALE, C. S. A. *et al.* IX congresso brasileiro de análise térmica e calorimetria. **Estimativa da eficiência de queima de casca de arroz durante o processo de sua combustão industrial.** São Paulo, 2014.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol.** Dissertação (Mestrado em Engenharia, área Engenharia Química) – Curso de Pós-graduação em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

VITALI, F., *et al.* **Agricultural waste as household fuel: Techno-economic assessment of a new rice-husk cookstove for developing countries.** *Waste Management*. v. 33, n. 12, p. 2762–2770, 2013.

WALTER, J. P.; ROSSATO, M. V.; DE FREITAS, L. A. **Parâmetros operacionais da implantação de uma central de geração termoeétrica à biomassa.** *Anais do Congresso Brasileiro de Custos - ABC*, [S. l.], Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/753>. Acesso em: 3 ago. 2021.

XIAO, J. *et al.* Integrated analysis of energy, economic, and environmental performance of biomethanol from rice straw in China. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, 2009.