

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA**

Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento

NATÁLIA DADARIO

**COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COM ADIÇÃO DE CASCA DE
AMENDOIM: UMA AVALIAÇÃO COM ALGORITMO DE SUPORTE À TOMADA
DE DECISÃO**

**TUPÃ
2024**

NATÁLIA DADARIO

**COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COM ADIÇÃO DE CASCA DE
AMENDOIM: UMA AVALIAÇÃO COM ALGORITMO DE SUPORTE À TOMADA
DE DECISÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Tupã, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de concentração: Agronegócio e Desenvolvimento

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Mario Mollo Neto

Coorientadores: Profa. Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel e Prof. Dr. Felipe André dos Santos

**TUPÃ
2024**

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Biblioteca e Documentação
da FCE – Unesp, Câmpus Tupã:

D121c Dadario, Natália.
 Combustível Derivado de Resíduos (CDR) com adição de casca de
 amendoim: uma avaliação com algoritmo de suporte à tomada de
 decisão / Natália Dadario. – Tupã: [s.n.], 2024.
 126 f. : il.

 Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) –
 Universidade Estadual Paulista UNESP – Faculdade de Ciências e
 Engenharia, 2024.

 Orientador: Mario Mollo Neto
 Coorientadora: Camila Pires Cremasco Gabriel
 Coorientador: Felipe André dos Santos

 1. Combustível Derivado de Resíduos. 2. Casca de Amendoim. 3.
 Geração de Energia. 4. Poder Calorífico. 5. Lógica *Fuzzy*. I. Título.
 II. Autor.

Fonte: Eliana Kátia Pupim, bibliotecária CRB 8 – 6202. Essa ficha não pode ser
modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Este estudo apresenta impacto de dimensão econômica, uma vez que ao prover o aproveitamento energético do Combustível Derivado de Resíduos (CDR), com ou sem adição de biomassa, é possível diminuir a despesa de matéria prima para geração de energia, visto que o Resíduo Sólido Urbano (RSU) não possui custo de aquisição e possui capacidade firme, ou seja, a garantia de disponibilidade de material ao longo de todo o ano. Além disto, tem impacto ambiental, pois quando o CDR possui boa qualidade, pode-se reduzir a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), já que não serão utilizados novos combustíveis fósseis para geração de energia. Por fim, a pesquisa possui impactos políticos e sociais, dado que os resultados proporcionarão aos administradores municipais uma alternativa quanto à destinação adequada dos RSU levando em consideração o interesse público.

Potential impact of this research

This study presents economic impacts, as it provides an opportunity for energy utilization of RDF, with or without the addition of biomass. This can lead to a reduction in raw material expenses for energy generation, especially considering that MSW (Municipal Solid Waste) does not have acquisition costs and offers a reliable supply throughout the year. Furthermore, it has environmental impacts since high-quality Residue Derived Fuel (RDF) can reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions, as new fossil fuels won't be used for energy generation. Lastly, the research has political and social impacts as well, as the results can provide municipal administrators with an alternative for proper MSW disposal while considering public interests. This can lead to better waste management policies and practices, contributing to the overall well-being of communities and the environment.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COM ADIÇÃO DE CASCA DE AMENDOIM: UMA AVALIAÇÃO COM ALGORITMO DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

AUTORA: NATÁLIA DADARIO

ORIENTADOR: MARIO MOLLO NETO

COORIENTADORA: CAMILA PIRES CREMASCO GABRIEL

COORIENTADOR: FELIPE ANDRÉ DOS SANTOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
MARIO MOLLO NETO
Data: 22/03/2024 09:24:13-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARIO MOLLO NETO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Documento assinado digitalmente
CELSO ANTONIO GOULART
Data: 21/03/2024 13:20:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. CELSO ANTONIO GOULART (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Documento assinado digitalmente
GUSTAVO FERREIRA DA SILVA
Data: 01/03/2024 16:20:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pesquisador Dr. GUSTAVO FERREIRA DA SILVA (Participação Virtual)

Pesquisador Pós-doutorado / Faculdade de Ciências Agrônômicas - FCA - UNESP - Botucatu/SP

Documento assinado digitalmente
BRUNO CÉSAR GÓES
Data: 18/03/2024 16:11:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. BRUNO CÉSAR GÓES (Participação Virtual)

Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção na Agropecuária / Universidade Jose do Rosario Vellano - UNIFENAS - Alfenas/MG

Profa. Dra. LETICIA SANCHES SILVA (Participação Virtual)

Docente do Ensino de Matemática / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFSP - Tupã/SP

Documento assinado digitalmente
LETICIA SANCHES SILVA
Data: 11/03/2024 10:15:15-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Tupã, 01 de março de 2024

Esta tese é dedicada à minha mãe, Ana Maria Cestari Dadario, que nunca mediu esforços para
que eu pudesse alcançar todos os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

À Deus que sempre foi meu porto seguro e nunca me deixou desistir diante de todas as dificuldades encontradas.

Aos meus pais, Ana e Wagner, por todo o suporte e amor incondicional.

Ao meu companheiro Diego, pela paciência, apoio e torcida para que finalizasse mais essa conquista.

Ao meu irmão, Guilherme, por todo o auxílio e incentivo ao longo desses quatro anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mário Mollo Neto, por toda orientação, conhecimento científico partilhado, ensinamentos humanos e, principalmente, pela amizade proporcionada por esta orientação.

Aos meus coorientadores, Profa. Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel e Prof. Dr. Felipe André dos Santos, pela contribuição e assistência ao longo da escrita da tese.

À banca de qualificação, Profa. Dra. Maria Cristina Rizk, Prof. Dr. Paulo Murinelli Pesoti, Profa. Dra. Letícia Sanches Silva e Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, pela leitura minuciosa, pelas contribuições e caminhos sugeridos na etapa de qualificação.

A banca de defesa, Prof. Dr. Celso Antonio Goulart, Prof. Dr. Bruno César Góes, Profa. Dra. Letícia Sanches Silva e Prof. Dr. Gustavo Ferreira da Silva agradeço ao tempo e os apontamentos valiosos.

A todo corpo docente do PGAD que auxiliou fortemente em minha formação.

A todos os técnicos, em especial ao amigo Fábio Fontolan, pelo convívio diário e por todo atendimento prestado ao longo desses anos no PGAD.

Aos meus chefes de Departamento e Coordenação de Curso, Profa. Dra. Giuliana Aparecida Santini Pigatto, Profa. Dra. Angélica Gois Morales, Profa. Dra. Andréa Rossi Scalco e Prof. Dr. Wagner Luiz Lourenzani, pela compreensão quanto às ausências para realização das pesquisas de campo.

Às agroindústrias do setor de amendoim do município de Tupã, por todo o auxílio na obtenção dos dados e fornecimento de amostras de casca de amendoim para análises.

À Yasmin S. Tadayozzi, técnica do Laboratório de Química, e ao Bruno E. S. Albino, técnico do Laboratório de Resíduos Sólidos e Reciclagem, ambos da FCE/UNESP – Tupã, pelo auxílio na obtenção das amostras para posteriores análises.

Ao Marcelo F. Matias, técnico de Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da FCA/UNESP – Botucatu, pela ajuda com as análises de poder calorífico.

À Profa. Dra. Rebeca Delatore Simões e ao Luís Fernando dos Santos, doutorando em Química pela FCT/UNESP - Presidente Prudente, pela assistência com as análises de teor de cloro e mercúrio.

Aos amigos acadêmicos: Elisângela Vaz, Willian Zanetti, Vinícius Palácio, Bruce, Vitor Bini, Amanda Negreti, Jéssica Pessoa, Nicoli Lázari, Monclar Nogueira, Vinícius Pantolfi e Karina Abreu, pelo convívio, amizade e parceria ao longo desses anos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – 88887.490160/2020-00 e 88887.699718/2022-00

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”
(Carl Jung)

DADARIO, Natália. **Combustível Derivado de Resíduos (CDR) com adição de casca de amendoim: uma avaliação com algoritmo de suporte à tomada de decisão**. 2024. 121 f. Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Tupã, 2024.

RESUMO

Embora o Brasil tenha avançado na gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), especialmente por meio da implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), o país ainda enfrenta muitos desafios para reduzir os impactos ambientais associados à gestão de resíduos. Um desses entraves é a superprodução de RSU no país. Uma possível alternativa, que elimina em grande parte seu volume e massa e dá uma disposição ambientalmente adequada, é a geração de um Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Este combustível é composto por RSU, que pode ou não ser associado a alguma biomassa, e é queimado para geração de energia. Entretanto, para que essa combustão seja adequada, é necessário que o CDR tenha qualidade energética e ambiental. Sendo assim, neste trabalho desenvolveu-se um modelo matemático classificador de CDR quanto a sua qualidade, utilizando lógica fuzzy, e baseado na NBR 16.849/2020 (ABNT, 2020), a fim de proporcionar auxílio quanto a tomada de decisão sobre a utilização deste composto, uma vez que esta técnica permite a conversão de dados imprecisos para uma forma numérica mais compreensível. Com base nos valores obtidos em laboratório do Poder Calorífico Inferior (PCI), teor de cloro e teor de mercúrio de cinco amostras, a partir de um calorímetro, um espectrômetro de absorção atômica e método de Fluorescência de Raios X, foi possível simular a resposta do modelo. Os resultados mostraram que o CDR formado somente por RSU não possui PCI adequado para queima, sendo assim faz-se necessário um pré-tratamento para secagem do material. Mesmo após a adição de casca de amendoim em diferentes proporções, a melhor classificação que o CDR chegou a ter foi ‘regular’, o que sugere que sem pré-tratamento para secagem do material, as amostras de CDR estudadas não são adequadas para uso em fornos e caldeiras. Como o cenário para a realidade brasileira é muito similar com o encontrado neste estudo, devido à proximidade da composição gravimétrica, possivelmente o uso de CDR no Brasil ainda não é viável sob o ponto de vista energético. Entretanto, acredita-se que estudos sob viabilidade econômica de secagem do material para essa destinação, sejam importantes a fim de se obter avanço na disposição final de RSU para a realidade brasileira, principalmente para grandes centros urbanos que carecem de área para aterramento.

Palavras-chave: Combustível Derivado de Resíduos. Casca de Amendoim. Geração de Energia. Poder Calorífico. Lógica Fuzzy.

DADARIO, Natália. **Refuse Derived Fuel (RDF) with the addition peanut shell: a decision support algorithm evaluation**. 2024. 121 f. Thesis (Doctor of Agribusiness and Development) – São Paulo State University (UNESP), School of Sciences and Engineering. Tupã, 2024.

ABSTRACT

Although Brazil has made progress in the management of Municipal Solid Waste (MSW), especially through the implementation of the National Solid Waste Policy (PNRS), Law No. 12,305 (BRAZIL, 2010), the country still faces many challenges in reducing the environmental impacts associated with waste management. One of these obstacles is the overproduction of USW in the country. One possible alternative, which largely reduces its volume and mass and provides environmentally appropriate disposal, is the generation of a Residue Derived Fuel (RDF). This fuel is composed of MSW, which may or may not be associated with biomass, and is burned for energy generation. However, for this combustion to be suitable, the RDF must have both energy and environmental quality. Therefore, in this study, a mathematical model was developed to classify RDF using fuzzy logic and based on its quality, following NBR 16,849/2020 (ABNT, 2020), in order to provide decision support regarding the use of this compound as this technique allows the conversion of imprecise data into a more understandable numerical form. Based on the laboratory values obtained for the Lower Heating Value (LHV), chlorine content, and mercury content of five samples, obtained from a calorimeter, an atomic absorption spectrometer, and X-ray Fluorescence method, respectively, it was possible to simulate the model's response. The results indicated that the RDF composed solely of MSW does not have a suitable LHV for combustion, therefore requiring a pre-treatment for material drying. Even after the addition of peanut shell in different proportions, the best classification that the RDF achieved was 'regular', which suggests that without a pre-treatment for material drying, the studied RDF samples are not suitable for use in furnaces and boilers. Since the scenario for the Brazilian reality is very similar to that found in this study, due to the proximity of the gravimetric composition, it is likely that the use of RDF in Brazil is still not viable from an energy perspective. However, it is believed that studies on the economic feasibility of material drying for this purpose are important to advance the final disposal of MSW for the Brazilian reality, especially for large urban centers that lack landfill space.

Keywords: Residue Derived Fuel. Peanut Shell. Energy Generation. Heating Value. *Fuzzy Logic*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem e à periculosidade	24
Figura 2 - Massa coletada de RSU por macrorregião (estimativa em milhões de t/ano e % em relação ao país, em 2021)	19
Figura 3 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil	20
Figura 4 - Fluxograma do processo de beneficiamento de amendoim	24
Figura 5 - Estimativa nacional de disponibilidade de amendoim para processamento	25
Figura 6 - Etapas do processo de fabricação do CDR	28
Figura 7 - Formatos existentes para CDR	30
Figura 8 - Gaseificador de grelhas móveis de Mafra/SC	36
Figura 9 - Principais marcos regulatórios para o aproveitamento energético de RSU no Brasil	43
Figura 10 - Principais marcos regulatórios para o aproveitamento energético de RSU no estado de São Paulo	44
Figura 11 - Localização da região da NAP em relação ao estado de São Paulo	45
Figura 12 - Município de Tupã compondo a região da NAP	46
Figura 13 - Região Administrativa de Marília	46
Figura 14 - Delimitação do EDR de Tupã.....	47
Figura 15 - Incidência de materiais recicláveis recuperáveis no município de Tupã.....	49
Figura 16 - Principais produtos agrícolas da NAP	51
Figura 17 - Produção de amendoim com casca no Estado de São Paulo em 2020 (mil toneladas).....	53
Figura 18 - Receita de exportação de amendoim gerada em 2020 pelo Estado de São Paulo	54
Figura 19 - Sistema de inferência <i>fuzzy</i>	56
Figura 20 - Exemplo de cálculo de centro de massa ou centro de gravidade.....	59
Figura 21 - Esquema da metodologia da pesquisa	61
Figura 22 - Sistema baseado em regras fuzzy para classificação do CDR.....	62
Figura 23 - Grau de pertinência para conjuntos fuzzy da variável de entrada PCI.	63
Figura 24 - Grau de pertinência para conjuntos fuzzy da variável de entrada teor de cloro ...	63
Figura 25 - Grau de pertinência para conjuntos fuzzy da variável de entrada teor de mercúrio	63
Figura 26 - Grau de pertinência para conjuntos fuzzy da variável de saída.....	64
Figura 27 - Estação de Transbordo Municipal	67
Figura 28 - Coleta das amostras	68
Figura 29 - Central de Laboratórios da FCE/UNESP	68
Figura 30 – Determinação da massa do material.....	69
Figura 31 - Trituração da casca de amendoim.....	69
Figura 32 - Homogeneização da amostra a partir do método de quarteamento	70
Figura 33 - Retirada de metais presentes no rejeito	71
Figura 34 - Trituração dos rejeitos	71
Figura 35 - Balança analítica para formação das amostras	72
Figura 36 - Balança de umidade à infravermelho para determinação de umidade	73
Figura 37 - Calorímetro para determinação de poder calorífico	73
Figura 38 - Estufa utilizada para diminuição da umidade.....	74
Figura 39 - Aparelho de Fluorescência de Raios X.....	75

Figura 40 - Espectrômetro de absorção atômica dedicado para quantificação de mercúrio total em amostras sólidas.....	76
Figura 41 - Variação de PCI x classificação do CDR em 2D.	77
Figura 42 - Variação do teor de cloro x classificação do CDR em 2D.	77
Figura 43 - Variação do teor de mercúrio x classificação do CDR em 2D.	78
Figura 44 - Superfície de Classificação de CDR com base no PCI e teor de cloro em 3-D. ..	78
Figura 45 - Superfície de Classificação de CDR com base no PCI e teor de mercúrio em 3-D.	79
Figura 46 - Superfície de Classificação de CDR com base no teor de mercúrio e teor de cloro em 3-D.	79
Figura 47 - Gráfico de Intervalos de PCI (cal.g ⁻¹) – IC de 95% para a Média.....	83
Figura 48 - Método de inferência de Mamdani para A1, com PCI = 5.403,69 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 31,7409 x 10 ⁻⁶ mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,97.....	84
Figura 49 - Método de inferência de Mamdani para A2, com PCI = 1.962,35 kcal.kg ⁻¹ , CI = 29,6%, Hg = 0 mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,08999.	85
Figura 50 - Método de inferência de Mamdani para A2, com PCI = 1.962,35 kcal. kg ⁻¹ , CI = 29,6%, Hg = 31,7409 x 10 ⁻⁶ mg. kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,0814.....	87
Figura 51 - Método de inferência de Mamdani para A3, com PCI = 2.736,45 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 0 mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,65.	88
Figura 52 - Método de inferência de Mamdani para A3, com PCI = 2.736,45 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 31,7409 x 10 ⁻⁶ mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,65.	89
Figura 53 - Método de inferência de Mamdani para A4, com PCI = 3.287,14 kcal. kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 0 mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,65.	90
Figura 54 - Método de inferência de Mamdani para A4, com PCI = 3.287,14 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 31,7409 x 10 ⁻⁶ mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,65.	91
Figura 55 - Método de inferência de Mamdani para A5, com PCI = 3.962,26 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 0 mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,778.	92
Figura 56 - Método de inferência de Mamdani para A5, com PCI = 3.962,26 kcal.kg ⁻¹ , CI = 0%, Hg = 31,7409 x 10 ⁻⁶ mg.kg ⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,778.	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Viabilidade do processo de incineração de acordo com o PCI do RSU	22
Quadro 2 - Categorização do CDR conforme o formato	30
Quadro 3 - Classificação dos CDR's de acordo com características físico-químicas.....	30
Quadro 4 - Vantagens e desvantagens da incineração de RSU	34
Quadro 5 - Base de regras do sistema fuzzy para classificação de um CDR.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Disposição final de RSU no Brasil e regiões (t.ano ⁻¹ e %) em 2022.....	19
Tabela 2 - Composição dos RSU de acordo com a produtividade de um país.....	21
Tabela 3 - Valores de PCI para RSU	21
Tabela 4 - Limites para classificação dos RSUE.....	22
Tabela 5 - Propriedades da casca de amendoim	25
Tabela 6 - Critérios para utilização de CDR.....	29
Tabela 7 - Classificação europeia para CDR.....	31
Tabela 8 - Concentrações permitidas de metais pesados para CDR de alta qualidade conforme a classificação alemã RAL-GZ 724.....	31
Tabela 9 - Limites de emissões adotados pela União Europeia, EUA e Brasil	39
Tabela 10 - Característica do município de Tupã.....	48
Tabela 11 – Materiais recicláveis recuperados no município de Tupã no ano de 2021	49
Tabela 12 - Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR) e Índice de Qualidade de Estação de Transbordo (IQT) no município de Tupã.....	50
Tabela 13 - Produção das lavouras da NAP – 2002, 2006 e 2008 (toneladas).....	51
Tabela 14 - Área de produção e produtividade de amendoim na região da Tupã (2020 e 2021)	54
Tabela 15 - Produção de casca de amendoim no município de Tupã (2020 e 2021)	54
Tabela 16 - Demonstração do conjunto de regras para construção das funções de pertinência do modelo fuzzy.	57
Tabela 17 - Limites para classificação dos CDR.....	62
Tabela 18 - Definição do grau de pertinência das variáveis.....	62
Tabela 19 - Definição do grau de pertinência da variável de saída	64
Tabela 20 - Composição das amostras	72
Tabela 21 - Cenários hipotéticos para modelagem fuzzy	80
Tabela 22 - Teor de umidade e PCI das amostras de CDR do município de Tupã	81
Tabela 23 - Composição química das amostras de CDR do município de Tupã (%) a partir da análise por FRX.	82
Tabela 24 - Análises das amostras coletadas no município de Tupã.....	83
Tabela 25 - Resumo das classificações realizadas pela modelagem fuzzy	94

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EDR	Escritório de Desenvolvimento Rural
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FCA	Faculdade de Ciências Agrônomicas
FCE	Faculdade de Ciências e Engenharia
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
FRX	Fluorescência de Raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IQC	Índice de Qualidade de Usinas de Compostagem
IQR	Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos
IQT	Índice de Qualidade de Estação de Transbordo
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
NAP	Nova Alta Paulista
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PERS	Política Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo
PIB	Produto Interno Bruto
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
QFD	<i>Quality Function Development</i>
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSUE	Resíduo Sólido Urbano para fins Energéticos
SIMA	<i>Secretaria</i> de Infraestrutura e Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNESP	Universidade Estadual Paulista
URE	Unidade de Recuperação Energética
WtE	<i>Waste-to-Energy</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. Objetivo geral	20
2.2. Objetivos específicos.....	20
3. REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1. Resíduos sólidos	21
3.1.1. Resíduos sólidos urbanos.....	18
3.1.2. Resíduos industriais	23
3.1.2.1.	Casca de amendoim23
3.2. Combustível Derivado de Resíduos (CDR)	27
3.2.1. Classificação	30
3.2.2. Utilização	32
3.2.3. Marcos regulatórios para o tratamento térmico de resíduos	38
3.3. Área de estudo	45
3.3.1. Delimitação da área e aspectos de formação do município	45
3.3.2. Gestão de resíduos	48
3.3.3. O agronegócio da região	50
3.3.3.1.	Produção de amendoim52
3.4. Lógica <i>Fuzzy</i>.....	55
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	60
4.1. Realização da revisão bibliográfica sobre o tema proposto	61
4.2. Modelagem <i>fuzzy</i> para classificação de CDR.....	61
4.3. Cenários hipotéticos	66
4.4. Caracterização das amostras coletadas no município de Tupã	67
4.4.1. Coleta e preparo das amostras	67
4.4.2. Determinação de poder calorífico inferior.....	72
4.4.3. Determinação do teor de cloro.....	74
4.4.4. Determinação do teor de mercúrio	75
4.4.5. Análise de correlação entre umidade e PCI	76
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1. Modelagem <i>fuzzy</i> para classificação de CDR.....	77
5.2. Cenários hipotéticos	80
5.3. Amostras coletadas no município de Tupã	81

5.3.1. Poder calorífico.....	81
5.3.2. Teor de cloro.....	81
5.3.3. Teor de mercúrio.....	82
5.3.4. Análise de correlação entre umidade e PCI.....	83
5.4. Cenário com as amostras do município de Tupã.....	83
6. CONCLUSÃO.....	96
REFERÊNCIAS	98

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios globais é a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que tem aumentado ao longo dos últimos anos. Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU, 2018), em 2016 foram produzidos no mundo mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos. De acordo com a *International Solid Waste Association* (ISWA, 2018), em 14 anos haverá aumento de 70% na geração de resíduos no mundo, alcançando uma produção de 3,4 bilhões de toneladas por ano.

Os RSU são materiais oriundos das atividades domésticas de residências e da limpeza de vias públicas (BRASIL, 2010a), que não possui mais utilidade para aquela atividade, mas que ainda podem ser utilizados de outra maneira. Em economias emergentes, como o Brasil, China e Índia, o volume gerado de RSU tende a crescer mais drasticamente devido a rápida urbanização, crescimento populacional e desenvolvimento econômico (SARAIWA; SOUZA; VALLE, 2017). No Brasil, segundo dados oficiais do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), foram coletados mais de 65 milhões de toneladas de RSU nas áreas urbanas no ano de 2021 (BRASIL, 2023). No ano de 2022, a geração foi de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, correspondendo a 224 mil toneladas diárias (ABRELPE, 2023).

Apesar do Brasil ter avançado na gestão de RSU, principalmente com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), muitos ainda são os desafios do país para redução dos impactos ambientais relacionados ao gerenciamento de resíduos e os impactos sociais associados a ele, como por exemplo a inserção de catadores informais nas cooperativas e associações.

Um desses obstáculos é a disposição final inapropriada dos RSU que continua com um percentual alto na nação. Conforme dados oficiais do SNIS, no ano de 2021 foram dispostos 9,6 milhões de toneladas deste tipo de resíduo em lixões e 7,55 milhões de toneladas em aterros controlados (BRASIL, 2022a). Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2023) ratificam o alto percentual da destinação inapropriada dos RSU em lixões e aterros controlados. Segundo esta fonte, no ano de 2022, as disposições inadequadas ainda representaram juntas 39% das destinações finais do Brasil. Portanto, são necessários esforços para desenvolver esta última etapa da cadeia de resíduos, de forma a evitar danos ambientais e proteger a saúde da população (TISI, 2019).

Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2008) revelam que a cada 1 dólar investido em saneamento básico¹, no qual o manejo de resíduos se insere, há retorno de 4 a 5 dólares em despesas hospitalares. Assim, investir no gerenciamento de resíduos, significa melhorar a saúde da população e tornar mais eficiente a gestão dos recursos públicos.

Uma das alternativas que pode ser utilizada para o tratamento e disposição final dos RSU, é a transformação em Combustível Derivado de Resíduos (CDR) para o seu aproveitamento energético, em que a geração de energia pode ocorrer na forma de vapor, eletricidade ou na forma de aquecimento de água. A eletricidade é alimentada na rede e distribuída aos usuários finais; a água quente, dependendo da infraestrutura local, pode ser enviada para uma rede de aquecimento (ou resfriamento) para aquecer (ou resfriar) casas, hospitais, escritórios entre outros, e o vapor pode ser utilizado por uma indústria próxima em seus processos de produção (CEWEP, 2018).

Entretanto, para que a queima do resíduo aconteça de maneira viável, é necessário que o Poder Calorífico Inferior (PCI) do resíduo esteja acima de $2.390 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (ABNT, 2020). Segundo Jaramillo (2007), para países de produção média, como é o caso do Brasil, o PCI dos RSU é em torno de 1.100 à $1.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$, devido à alta umidade do composto.

Uma das soluções para o problema de umidade e consequente aumento de PCI é a incorporação de resíduos mais secos ao RSU como, por exemplo, a biomassa proveniente da produção agropecuária. A destinação destes resíduos também é um desafio visto que, há quantidades significativas de resíduos agroindustriais sendo descartados pelas indústrias.

Segundo dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2013), estima-se que a produção de resíduos agroindustriais seja da ordem de 1,3 bilhão de toneladas por ano em todo o mundo, sendo parte do desperdício oriundo do processamento ao longo da cadeia produtiva. Assim, uma das maneiras de reaproveitar esses subprodutos do processo produtivo é a geração de energia em fornos industriais das usinas, como o que acontece frequentemente com o bagaço da cana-de-açúcar.

Segundo Silva (2022), a biomassa proveniente de resíduos agroindustriais é uma alternativa aos combustíveis fósseis para serem utilizados para geração de energia. Dentre os inúmeros tipos de biomassa, a casca de amendoim chama atenção pelo seu alto PCI, conforme apontou o experimento de Braz (2014) com $13,24 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

¹ Considera-se saneamento básico os serviços de abastecimento de água, esgoto sanitário, drenagem de águas pluviais urbanas e manejo de resíduos (BRASIL, 2007b).

² $1 \text{ J} \approx 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ kcal}$, portanto, $13,24 \text{ MJ.kg}^{-1} \approx 3,2 \cdot 10^3 \text{ kcal.kg}^{-1}$

Além da vantagem energética deste material, cabe ressaltar a relevância do setor brasileiro de amendoim, especialmente nos municípios paulistas produtores. Na região de Tupã, localidade de estudo proposta nesta pesquisa, a produção desta oleaginosa se destaca devido as empresas processadoras do grão. Segundo dados da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2022a), no ano de 2020, a receita de exportação de amendoim do município representou 20,7% de todo o Estado de São Paulo.

A partir desta breve contextualização, essa pesquisa visa abranger dois tópicos: a necessidade de fazer a disposição ambientalmente adequada dos RSU de maneira a diminuir a área de aterramento desses resíduos bem como reaproveitar a casca de amendoim, subproduto de um processo produtivo. Para isto, é necessário entender como se dá à queima de um composto formado por RSU com adição de biomassa e a qualidade desse composto formado.

Assim, o trabalho buscou responder as seguintes questões: Como se dá o processo de geração de energia por meio de um CDR formado exclusivamente por RSU? É possível formar um CDR a partir da junção de RSU com biomassa, especialmente à casca de amendoim? Quais as variáveis a serem consideradas para classificá-lo quanto a sua qualidade? É possível gerar um modelo matemático classificador da qualidade de um CDR aplicável aos municípios brasileiros?

A partir destes questionamentos, foram elaborados os objetivos do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Desenvolver um algoritmo de suporte à tomada de decisão que classifique a qualidade de um CDR formado por rejeitos provenientes de RSU com ou sem adição de biomassa.

2.2. Objetivos específicos

- Efetuar uma revisão bibliográfica sobre CDR e a aplicação de biomassa, especialmente a casca do amendoim, como componente auxiliar de um combustível;
- Identificar as principais características para classificação de um CDR que servirão como variáveis de entrada do sistema;
- Gerar um modelo matemático, utilizando Lógica *Fuzzy*, que classifique o composto quanto a sua qualidade, dando suporte à tomada de decisão quanto ao seu uso;
- Aplicar o modelo ao município de Tupã para verificar a efetividade do método;

3. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo visa contextualizar os objetos de estudo desta pesquisa ao definir e classificar os diferentes tipos de resíduos existentes e estabelecer o panorama de geração e gerenciamento destes resíduos no Brasil. Além disto, apresenta tecnologias emergentes para o aproveitamento energético a partir de resíduos, revelando dados técnicos e marcos regulatórios que regem esta nova tecnologia. Retrata também a área de estudo desta tese, ao trazer particularidades do município analisado, e, por fim, traz o devido embasamento da Lógica Fuzzy que alicerça a metodologia do estudo.

3.1. Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são descritos pela Norma Brasileira (NBR) 10.004/2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como:

resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, de serviços de saúde, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p. 1).

Assim, a partir da definição da ABNT, entendia-se que o resíduo sólido era toda substância resultante de algum tipo de atividade. Mas, em 2010, a PNRS trouxe a distinção entre os termos rejeitos e resíduos. A legislação propôs que os resíduos são materiais que ainda são passíveis de algum tipo de utilização, podendo ser reutilizados como a sua mesma função, ou podendo ser destinados à reciclagem para entrar como um subproduto de uma outra cadeia produtiva, podem ainda seguir para a compostagem, no caso de resíduos orgânicos, dentre outras possíveis destinações. Já os rejeitos são os materiais que não podem ser mais reaproveitados “depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis” e que, portanto, devem ter uma disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a, p. 11).

Com relação a classificação dos resíduos sólidos, as mais utilizadas são as descritas pela NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004a) e pela PNRS (BRASIL, 2010a).

A primeira categoriza os resíduos em três classes, de acordo com os riscos potenciais de contaminação ao meio ambiente: Classe I (Perigosos), Classe II A (Não Perigosos e Não Inertes) e a Classe II B (Não Perigosos e Inertes). Os resíduos classe I são aqueles que de alguma forma apresentam algum grau de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou

patogenicidade, como por exemplo pode-se citar as pilhas, baterias, lâmpadas, aparelhos eletrônicos, resíduos hospitalares, dentre outros que possam apresentar uma das características citadas. Os resíduos classe II A são aqueles que apresentam biodegradabilidade, ou combustibilidade ou ainda solubilidade em água, como o papel, papelão, restos de alimentos, gesso, etc. Por fim, os resíduos classe II B são considerados os inertes e os não-combustíveis, como exemplo tem-se o vidro, latas de alumínio, dentre outros (ABNT, 2004a).

A classificação realizada pela PNRS, leva em consideração também a origem desse material:

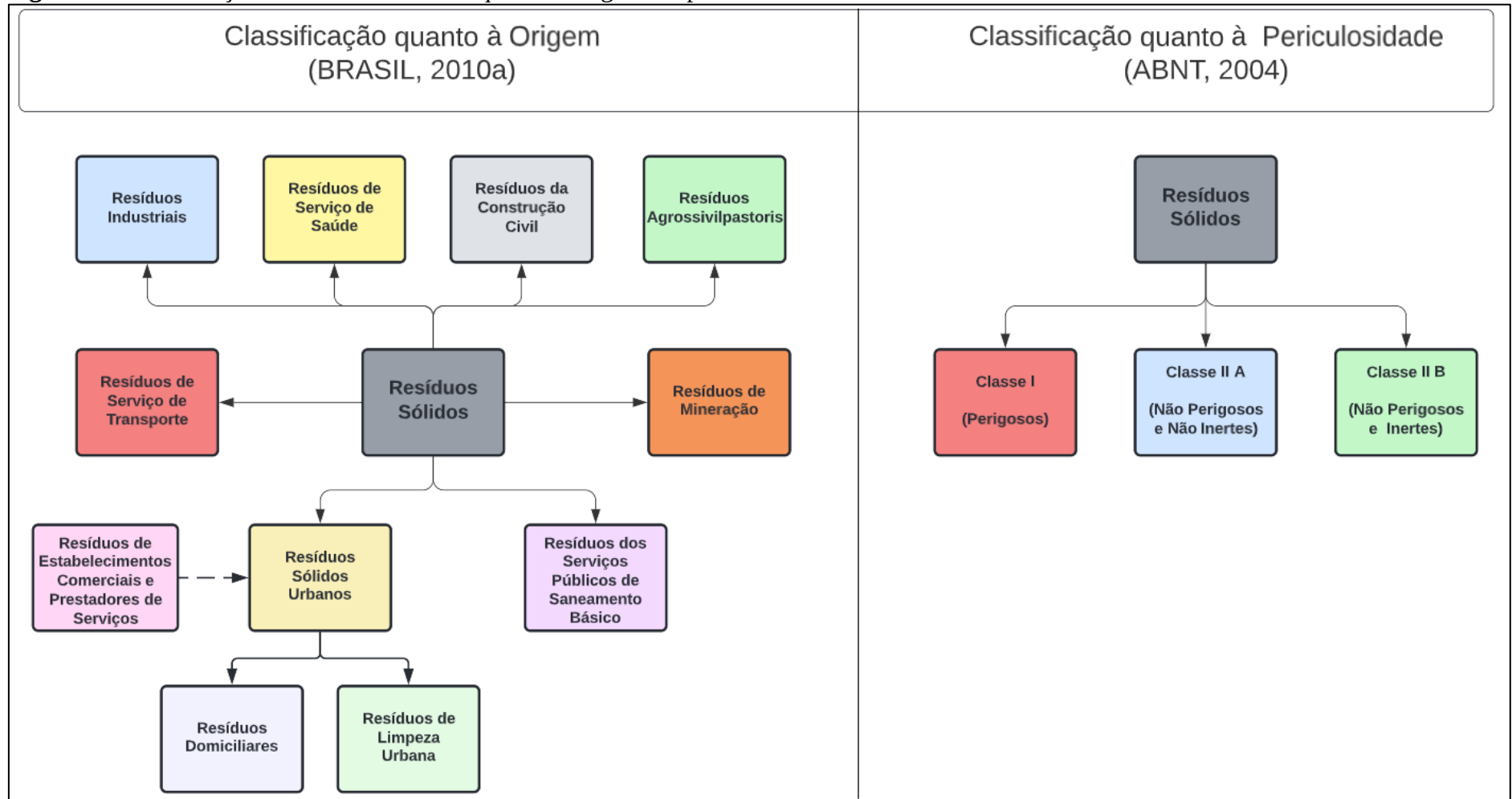
- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama³ e do SNVS⁴;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (BRASIL, 2010a, Art. 13, I).

A Figura 1 sintetiza ambas as classificações mencionadas acima.

Cabe ressaltar pela Figura 1, que os resíduos domiciliares e os de limpeza urbana compõem os resíduos sólidos urbanos. Além disso, os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços também estão interligados aos resíduos sólidos urbanos porque esses, segundo Schalch *et al.* (2019), podem ser considerados resíduos domiciliares pelo poder público municipal, desde que sejam caracterizados como não perigosos.

³ SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente.

⁴ SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária.

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem e à periculosidade

Fonte: Elaborado pela autora com base em Brasil (2010a) e ABNT (2004a)

Para esta pesquisa utilizou-se dois tipos de resíduos como objeto de estudo: os resíduos sólidos urbanos e a casca de amendoim, sendo esta última classificada, especificadamente neste caso, como um resíduo industrial, já que é um resíduo resultante do processo industrial. Essas categorizações seguiram a classificação da PNRS que categoriza os resíduos sólidos quanto à origem.

3.1.1. Resíduos sólidos urbanos

Conforme mencionado no tópico anterior, os RSU, de acordo com a PNRS (BRASIL, 2010a) são aqueles cuja composição inclui tanto os resíduos domiciliares quanto os resíduos de limpeza urbana.

Durante o ano de 2020, a geração de RSU no Brasil, assim como em todo mundo, foi influenciada pela pandemia da COVID-19, pois com o isolamento social as dinâmicas sociais sofreram alterações, como por exemplo o aumento do delivery que fez com que as pessoas passassem a consumir alimentos mais dentro de suas residências e com isso mais embalagens, ao invés do consumo em restaurantes. Dessa forma, a geração dos resíduos domiciliares aumentou (ABRELPE, 2021).

Segundo dados oficiais do SNIS, a massa de RSU coletada nas áreas urbanas do Brasil no ano de 2021 foi de 65,63 milhões de toneladas.ano⁻¹, sendo que a massa média per capita variou de acordo com as regiões, sendo a maior taxa de 1,22 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, no Nordeste, e a menor taxa de 0,81 kg. hab⁻¹.dia⁻¹, no Sul do país. A Figura 2 ilustra a massa coletada de RSU de acordo com a macrorregião (BRASIL, 2023a).

Como pode-se observar pela Figura 2, a região Sudeste apresenta a maior porcentagem de massa coletada de RSU em relação as outras regiões e isso está relacionado ao fato da região apresentar o maior número de habitantes do país.

Com relação à disposição final desses resíduos para o ano de 2022, a disposição adequada (aterros sanitários) foi de 61% (46.412.091 t/ano), enquanto a inadequada (lixões e aterros controlados) correspondeu a 39% (29.706.226 t/ano) (ABRELPE, 2023). A Tabela 1 apresenta a disposição final de RSU por regiões no ano de 2022.

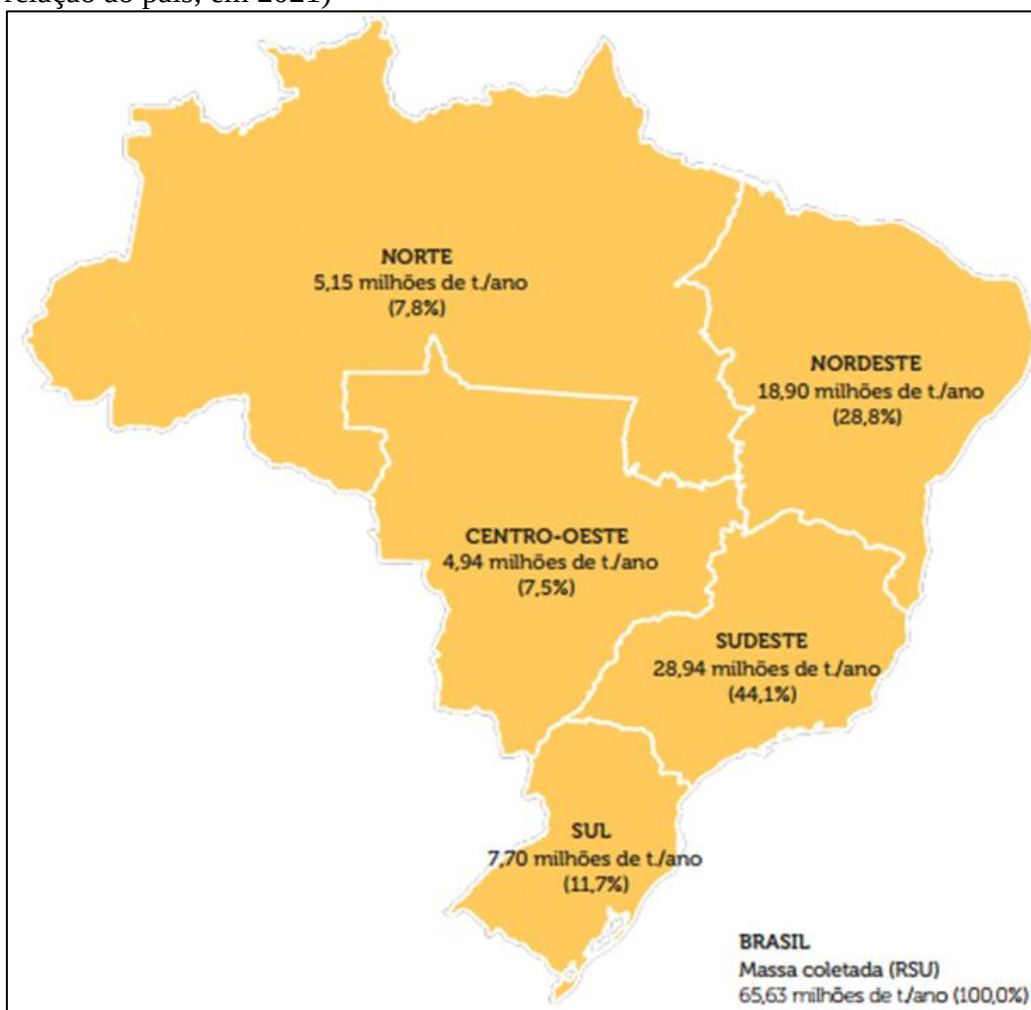
Devido ao fato da disposição em aterros sanitários não ser um processo de baixo custo, é comum que municípios vizinhos se aliem para formar consórcios intermunicipais para manejar seus resíduos. De acordo com Brasil (2023b), no ano de 2021 houve 1.093 municípios em todo Brasil que se integraram para formar 226 consórcios públicos⁵ intermunicipais de manejo de RSU.

A parcela de resíduos dispostos de maneira incorreta, conforme apresentado pela Tabela 1, ainda é significativa e, portanto, merece atenção do poder público, uma vez que os resíduos destinados de maneira inadequada acarretam além de danos ambientais, prejuízos à saúde

⁵ “Consórcio público: pessoa jurídica formada exclusivamente por entes da Federação, na forma da Lei nº 11. 107, de 2005, para estabelecer relações de cooperação federativa, inclusive a realização de objetivos de interesse comum, constituída como Associação pública, com personalidade jurídica de direito público e natureza autárquica, ou como pessoa jurídica de direito privado sem fins econômicos” (BRASIL, 2007b, inciso I).

pública, pois a cada dólar investido em saneamento básico, incluindo a gestão de resíduos, gera um retorno de 4 a 5 dólares em custos hospitalares (OMS, 2008). Assim, investir no gerenciamento de resíduos, significa melhorar a saúde da população e tornar mais eficiente a gestão dos recursos públicos.

Figura 2 - Massa coletada de RSU por macrorregião (estimativa em milhões de t/ano e % em relação ao país, em 2021)



Fonte: BRASIL (2023a, p. 47)

Tabela 1 - Disposição final de RSU no Brasil e regiões (t.ano⁻¹ e %) em 2022

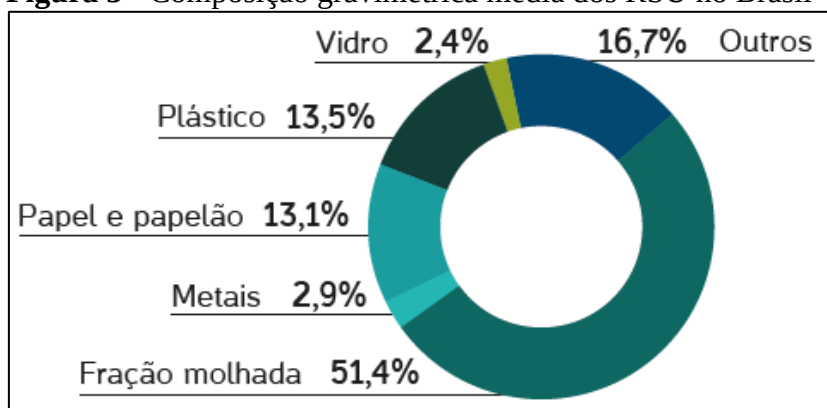
Região	Disposição Adequada		Disposição Inadequada	
	t.ano ⁻¹	%	t.ano ⁻¹	%
Norte	1.870.470	36,6	3.240.105	63,4
Nordeste	6.214.527	37,2	10.491.191	62,8
Centro-Oeste	2.532.762	43,5	3.288.281	56,5
Sudeste	29.773.638	74,3	10.298.552	25,7
Sul	6.020.694	71,6	2.388.097	28,4
Brasil	46.412.091	61,0	29.706.226	39,0

Fonte: ABRELPE (2023, p. 27)

Entretanto, a destinação ambientalmente adequada de resíduos não é algo simples e que pode ser replicado em todos os municípios, já que a composição gravimétrica⁶ dos RSU varia de acordo com a localidade. Assim, é necessário levar em conta as especificidades do resíduo de cada local para propor um sistema que possa ser a solução para a destinação final dos RSU.

A Figura 3 ilustra a composição gravimétrica média dos RSU no Brasil.

Figura 3 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil



Fonte: CEMPRE (2020)

Conforme identificado pela Figura 3, o resíduo orgânico, também conhecido por fração molhada, é o principal componente dos RSU no Brasil, pois representam 51,4%. Os demais resíduos passíveis de serem reciclados representam juntos 31,9%, sendo compostos principalmente por vidros (2,4%), metais (2,9%), papel e papelão (13,1%), e plástico (13,5%). Os resíduos que aparecem como “outros” são compostos por rejeitos, que são constituídos basicamente de materiais sanitários e recicláveis contaminados, e outros materiais não identificados.

No caso da destinação de resíduos por conversão termoquímica, além da composição gravimétrica, outras características são importantes, como o teor de umidade e o poder calorífico dos RSU. Quanto maior o teor de umidade do resíduo, maior será a dificuldade da queima, consequentemente, menor o poder calorífico do material.

O poder calorífico pode ser entendido como a quantidade de calor liberada, em um regime permanente, quando um material é completamente queimado (ÇENGEL; BOLES; CÁZARES, 2006). Ele pode ser subdividido em Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). O primeiro é aquele, segundo Briane e Doat (1985), no qual a combustão ocorre a um volume constante e a água formada durante o processo de combustão é condensada, sendo recuperado o calor desta evaporação. Já o segundo pode ser entendido como

⁶ Composição gravimétrica dos resíduos é a classificação dos mesmos de acordo com os tipos de materiais descartados e suas quantidades identificadas.

a energia verdadeiramente obtida por unidade de massa, após descontar as perdas por evaporação de água (JARA, 1989), por isso esta variável é a mais indicada para medir a quantidade útil de energia compreendida no resíduo para a conversão termoquímica.

Demirbas (2007) *apud* Torres e Lange (2022), com base nos estudos de Kathiravale *et al.* (2003) e Usón *et al.* (2003), conseguiram relacionar essas duas variáveis, por meio da Equação 1.

$$PCI = PCS - 2,535 (9H + U) \quad (1)$$

Em que considerou:

PCI: Poder calorífico inferior, em base úmida [MJ.kg^{-1}]

PCS: Poder calorífico superior, em base seca [MJ.kg^{-1}]

U: Teor de umidade absoluto [kg.kg^{-1}]

H: Teor de hidrogênio, em peso [kg.kg^{-1}]

Jaramillo (2007) faz uma comparação da composição gravimétrica, umidade, densidade e PCI dos RSU em relação à produtividade industrial de um país (Tabela 2). Na Tabela 3 são apresentados valores de PCI de RSU, de acordo com os seus componentes.

Tabela 2 - Composição dos RSU de acordo com a produtividade de um país

Composição (% base úmida)	Produção Baixa	Países Produção Média	Industrializados
Vegetais e material putrescível	40 a 85	20 a 65	20 a 50
Papel	1 a 10	15 a 40	15 a 40
Plásticos	1 a 5	2 a 6	2 a 10
Metais	1 a 5	1 a 5	3 a 13
Vidros	1 a 10	1 a 10	4 a 10
Couro e pneus	1 a 5	1 a 5	2 a 10
Inertes (cinzas, terra e areia)	1 a 40	1 a 30	1 a 20
Outras características	Produção Baixa	Produção Média	Industrializados
Umidade (%)	40 a 80	40 a 60	20 a 30
Densidade (kg/m^3)	250 a 500	170 a 330	100 a 170
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	800 a 1.100	1.100 a 1.300	1.500 a 2.700

Fonte: Adaptado de Jaramillo (2007, p. 7)

Tabela 3 - Valores de PCI para RSU

Material	Plásticos	Borrach a	Couro	Têxteis	Madeira	Alimentos	Papel
PCI (kcal.kg^{-1})	6.301	6.780	3.629	3.478	2.520	1.311	4.033

Fonte: Brasil (2014, p. 25)

Pela Tabela 2, percebe-se que quanto mais industrializado é um país, maior será o poder calorífico de seus resíduos e menor será sua umidade. Isso se deve à diminuição da fração úmida do resíduo e o aumento da fração seca, uma vez que a população passa a consumir mais produtos industrializados que contém maior parcela de materiais inorgânicos. Já a Tabela 3 ratifica que resíduos predominantemente orgânicos apresentam o menor poder calorífico.

Para o tratamento térmico de resíduos com recuperação energética, deve-se levar em conta o PCI, a fim de verificar a viabilidade do processo. O Quadro 1 mostra a viabilidade do processo de incineração com base no PCI do RSU.

Quadro 1 - Viabilidade do processo de incineração de acordo com o PCI do RSU

Valor do PCI	Viabilidade	Justificativa
PCI < 1.675 kcal/kg	Não é tecnicamente viável	Além de dificuldades técnicas, exige ainda a adição de combustível auxiliar.
1.675 kcal/kg < PCI < 2.000 kcal/kg	Parcialmente viável	É necessário um pré-tratamento do combustível para elevar o seu poder calorífico.
PCI > 2.000 kcal/kg	Viável tecnicamente	Usinas <i>mass burning</i> podem gerar de 450 à 700 kWh/ t de RSU.

Fonte: Adaptado de Brasil (2008, p. 28)

Além da característica do PCI, a NBR 16.849/2020 (ABNT, 2020) considera importante a determinação do teor de cloro e de mercúrio para classificar os Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos (RSUE)⁷, conforme mostrado na Tabela 4, visto que a exposição a esses compostos causa efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente.

Os organoclorados, compostos extremamente perigosos, apresentam um grande risco à vida humana devido a casos de intoxicação e contaminação ambiental (SILVA, GARRIDO; 2021). As dioxinas e os furanos são exemplos de organoclorados cancerígenos para seres humanos que podem ser liberados no processo de queima em incineradores. No caso do mercúrio, os efeitos podem ser carcinogênicos, mutagênicos e teratogênicos, devido a combinação do mercúrio com grupos sulfidríla de aminoácidos, responsáveis pela formação de proteínas do corpo (SEGANTINI 1996).

Tabela 4 - Limites para classificação dos RSUE

Característica de classificação				
Unidade	Medida Estatística	Classes		
PCI (base seca)		P1	P2	P3
kcal.kg ⁻¹	Limite inferior da média (P ≥ 95%)	PCI ≥ 4.750	4.750 > PCI ≥ 3.580	3.580 > PCI ≥ 2.390
Teor de cloro		C1	C2	C3
%	Limite superior da média (P ≥ 95%)	Cl ≤ 0,5	0,5 < Cl ≤ 1,5	1,5 < Cl ≤ 3,0
Teor de mercúrio		H1	H2	H3
mg. kg ⁻¹	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	Hg _{p80} ≤ 0,2	0,2 < Hg _{p80} ≤ 0,5	0,5 < Hg _{p80} ≤ 1

Fonte: ABNT (2020)

Segundo apontado pela Tabela 4, para ser considerado um RSUE, o material deve ter no mínimo um PCI ≥ 2.390 kcal kg⁻¹, base seca, e apresentar concentração de cloro ≤ 3,0 % e de mercúrio ≤ 1,0 mg.kg⁻¹.

⁷ **Resíduo Sólido Urbano para fins Energéticos (RSUE):** “resíduos sólidos urbanos, com ou sem incorporação de outros resíduos sólidos, resíduos agrossilvipastoris ou resíduos classe II – Não perigosos elegíveis, utilizados em processos de recuperação energética de maneira controlada” (ABNT, 2020, p. 6).

Para geração do modelo matemático proposto neste trabalho, utilizar-se-á essas três variáveis indicadas pela ABNT (2020): PCI, teor de cloro e teor de mercúrio.

A seguir é apresentado a definição de resíduos industriais e, em seguida, são enfatizados dados sobre a geração e características do resíduo industrial a ser estudado nesta pesquisa.

3.1.2. Resíduos industriais

Os resíduos industriais são aqueles gerados a partir de processos produtivos ou instalações industriais, sendo o gerador desse resíduo o responsável por destiná-lo de forma ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a).

Assim como os demais tipos de resíduos, esses também podem ser classificados de acordo com a sua periculosidade: Classe I (Perigosos), Classe II A (Não Perigosos e Não Inertes) e a Classe II B (Não Perigosos e Inertes) (ABNT, 2004a).

Como existem diversos tipos de indústrias e uma infinidade de tipos de resíduos advindos das mesmas, é incabível tentar enumerar e descrever cada tipo de resíduo industrial. Dessa forma, esse tópico focará no resíduo industrial que é o objeto de estudo desta pesquisa: a casca de amendoim. A seguir são apresentados dados de produção desse resíduo, bem como suas características físico-químicas.

3.1.2.1. Casca de amendoim

A casca de amendoim, um dos objetos de estudo deste trabalho, é proveniente do processo industrial de beneficiamento do grão de amendoim realizado em indústrias alimentícias, por isso é classificada, neste caso, como um resíduo industrial. Em Tupã, localidade de estudo proposta neste trabalho, a produção desta oleaginosa se destaca devido às empresas processadoras do grão existentes no local.

A Figura 4 apresenta um fluxograma geral do processo de beneficiamento de amendoim, em que é possível visualizar que após o processo de Pré-limpeza 2, especificadamente após a peneira vibratória, o grão já sai sem a casca para a comercialização. Assim, a casca de amendoim passa a ser um resíduo deste processo produtivo. É importante destacar que a Figura 4 ilustra um esquema geral, que pode sofrer variações dependendo do processo produtivo de cada indústria.

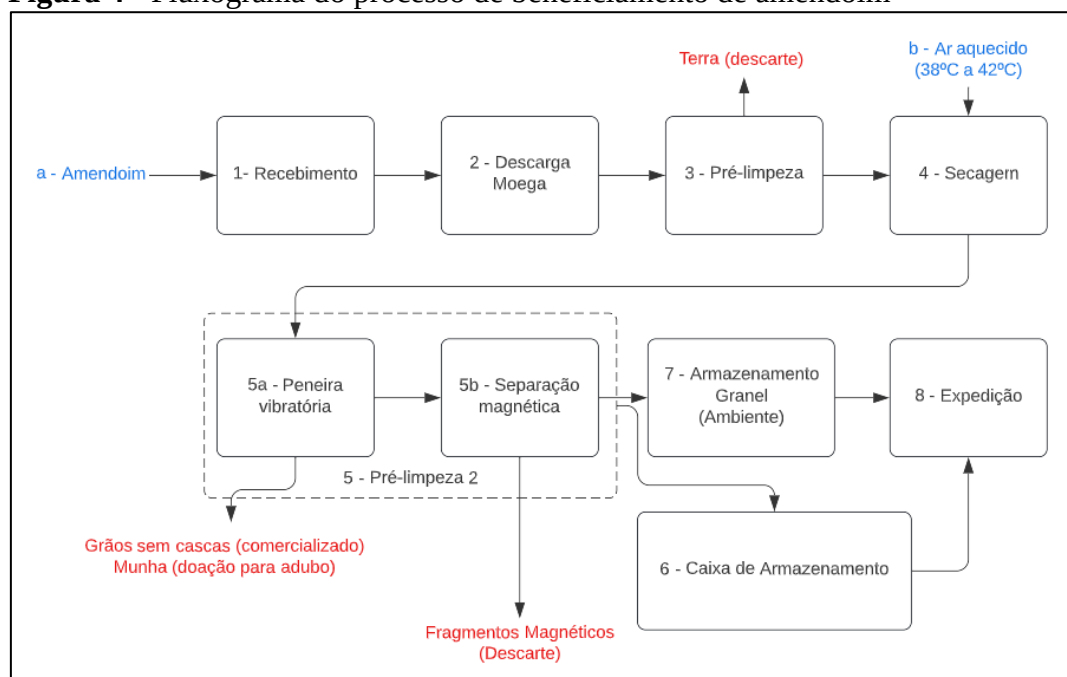
De acordo com a estimativa realizada pela Fiesp (2022a), no ano de 2020 foram geradas 134 mil toneladas de casca de amendoim proveniente do beneficiamento do grão (Figura 5).

A principal destinação desse resíduo é a venda para a cadeia de aves (FIESP, 2022a), em que esse resíduo é utilizado principalmente como cama de frangos. Outra utilização desse

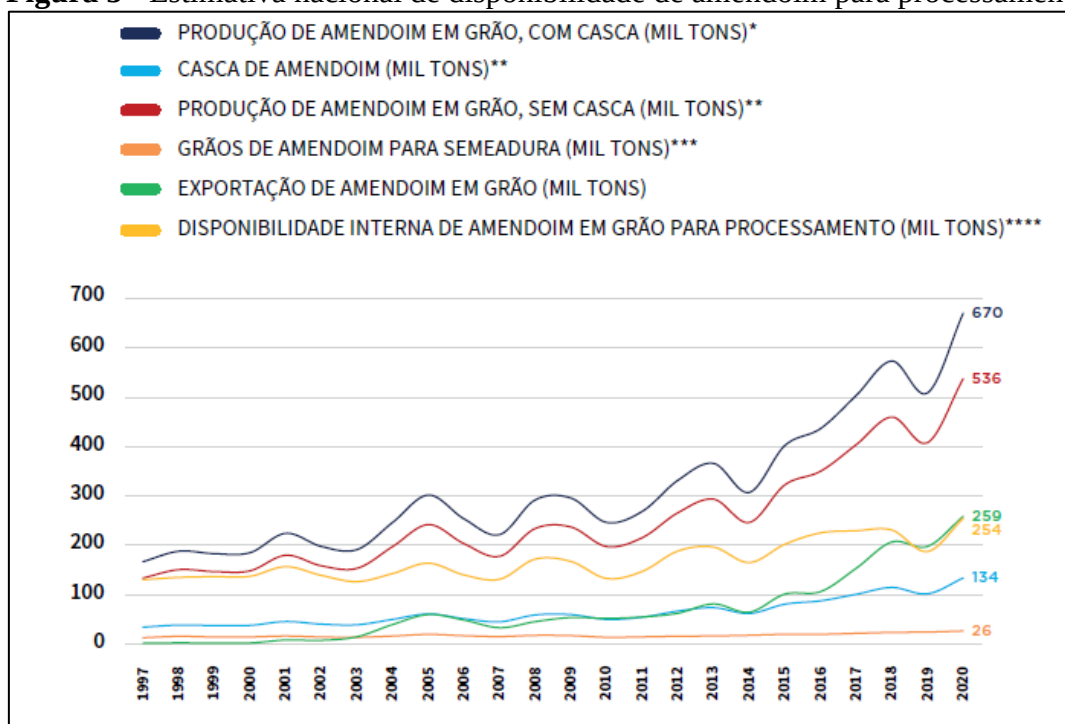
resíduo é como biomassa, em que o mesmo serve como um combustível auxiliar no processo de queima para geração de energia, sendo utilizado principalmente em caldeiras industriais.

O aproveitamento da casca de amendoim como combustível adicional de biomassa é bastante realizado devido as suas propriedades físico-químicas, seu poder de queima (potencial calorífico) e a sua disponibilidade, especialmente em regiões produtoras de amendoim no estado de São Paulo. Além disto, a casca de amendoim ao ser destinada para a produção de energia, pode ser comercializada com maior valor agregado.

Figura 4 - Fluxograma do processo de beneficiamento de amendoim



Fonte: Bandeira (2018)

Figura 5 - Estimativa nacional de disponibilidade de amendoim para processamento

Fonte: Fiesp (2022a)

* Considerou os dados de produção do IEA-SAASP (para SP) e da PAM e LSPA do IBGE (para os demais Estados do Brasil);

** Estimou o volume de casca de amendoim e de amendoim em grão aplicando um fator médio de 80/20 sobre a produção de amendoim com casca;

*** Estimou o volume de grão de amendoim destinado à semeadura adotando um fator médio de 150 kg por hectare plantado;

**** Estimou a disponibilidade interna do grão para processamento com base na diferença da produção de amendoim em grão menos o volume destinado à semeadura e para exportação, somando o volume do grão importado;

A Tabela 5 apresenta algumas propriedades deste material, obtidas por meio da literatura.

Tabela 5 - Propriedades da casca de amendoim

Propriedades	Casca de Amendoim
Fórmula Química	$\text{CH}_{2,13}\text{N}_{0,04}\text{S}_{0,005}\text{O}_{0,51}$
C (%)*	41,52
H (%)*	7,43
N (%)*	2,11
S (%)*	0,60
O (%)*	27,96
CF (%)*	$21,45 \pm 0,24$
MV (%)*	$57,96 \pm 0,49$
Umidade (%)	$7,46 \pm 0,27$
Cinzas (%)	$12,90 \pm 0,58$
Entalpia do processo de combustão entre 150 e 550°C (°C.min.mg ⁻¹)	12,34
PCI (MJ. kg ⁻¹) *	13,24

Fonte: Adaptado de García *et al.* (2012) e Braz (2014)

*C = carbono / H = hidrogênio / N = nitrogênio / S = enxofre / O = oxigênio / CF = carbono fixo / MV = material orgânico volátil / PCI = poder calorífico inferior

Segundo Braz (2014), o PCI é a medida mais eficaz de energia disponível em um combustível, visto que os gases de combustão nas caldeiras não são resfriados, portanto, a água presente na forma de vapor não é condensada e consequentemente o calor latente⁸ de vaporização da água não é recuperado. Ao comparar o PCI dos RSU (Tabela 2) com o da casca de amendoim (Tabela 5), observa-se o PCI dos RSU (em países com produção média, como é o caso do Brasil) apresenta valor médio de $1200 \text{ kcal.kg}^{-1}$, equivalente⁹ a $5,02 \text{ MJ.kg}^{-1}$, enquanto a casca de amendoim apresenta um valor de $13,24 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Assim, conclui-se que o poder calorífico do amendoim é maior que o dobro dos RSU, dando indícios que esse material pode ser um bom agregado ao CDR proposto neste estudo.

Outro fator que se pode comparar é a umidade do material. Enquanto a variação de umidade na casca de amendoim é da ordem de $7,46, \pm 0,27 \%$ (Tabela 5), a umidade presente nos RSU em países com produção média varia de 40 à 60% (Tabela 2). A umidade é, portanto, mais um indicativo que a casca de amendoim pode ser um bom componente ao CDR para geração de energia.

De acordo com o estudo de Dourado *et al.* (2017), quanto mais alto o teor de hidrogênio e carbono e mais baixo o teor de oxigênio dos resíduos lignocelulósicos, mais ideal é o resíduo para a produção de bioenergia. Assim, os autores constataram em seu estudo que a casca de amendoim e a casca de macaúba obtiveram melhor qualidade para a geração de bioenergia do que aos resíduos de pinhão manso e mamona. Os autores destacam ainda que o poder calorífico superior desses dois materiais de destaque, apresentaram valores próximos às biomassas comumente utilizadas na geração de energia.

No estudo de Silva *et al.* (2020a), ao comparar alguns resíduos (casca do amendoim, caroço do cajá, palha de milho verde, semente de acerola, vagem do feijão de corda, casca de tamarindo, casca do maracujá e casca do cupuaçu) com o bagaço de cana, os autores constataram que todas as biomassas estudadas possuem propriedades combustíveis compatíveis ao do bagaço de cana, principal responsável pelo fornecimento de energia do Brasil. Além disto, a secagem solar das biomassas estudadas mostrou-se eficiente para a redução da umidade, resultado esse muito importante, pois o maior gasto das indústrias que utilizam a biomassa é com a etapa de secagem do material.

No tópico a seguir, será apresentado a definição e as características para que um resíduo possa ser considerado um CDR. Além disso, será realçado as possíveis classificações quanto

⁸ Calor latente - quantidade de calor que a água absorve no processo (BRAZ, 2014).

⁹ $1 \text{ kcal} = 4.184 \text{ J}$.

ao seu formato e quanto as características físico-químicas do material. Por fim, será apontado algumas possíveis utilizações deste combustível.

3.2. Combustível Derivado de Resíduos (CDR)

O CDR surgiu como uma alternativa de substituição dos combustíveis fósseis tradicionais para a fabricação de cimento e para a produção de energia elétrica (PIAIA, 2021), visando também dar uma destinação aos resíduos sólidos que servem como insumo desse processo.

O CDR, em geral, é formado pelos rejeitos remanescentes da coleta seletiva de resíduos, em que são retiradas as frações recicláveis dos RSU. Entretanto, segundo a normativa europeia CEN 15359 (CEN, 2011), além dos resíduos pós reciclagem, este combustível pode ser produzido por qualquer outro tipo de resíduo não perigoso como resíduos industriais, resíduos comerciais, resíduos de construção e demolição, etc.

Assim, o CDR pode ser descrito como um combustível sólido constituído de resíduos não perigosos utilizados para recuperação energética em estabelecimentos de incineração e co-incineração, correspondendo à classificação prevista pela normativa europeia CEN 15359 de 2011 (CEN, 2011).

Este combustível deve possuir alto poder calorífico, sendo composto principalmente por plástico, papel, têxteis, borracha, papelão, embalagens diversas, madeiras e restos de matéria orgânica, sendo isentos de materiais clorados. Segundo Brás *et al.* (2017), o CDR ao possuir em sua composição compostos biogênicos, eleva o poder calorífico do combustível e auxilia a redução de emissões de CO₂.

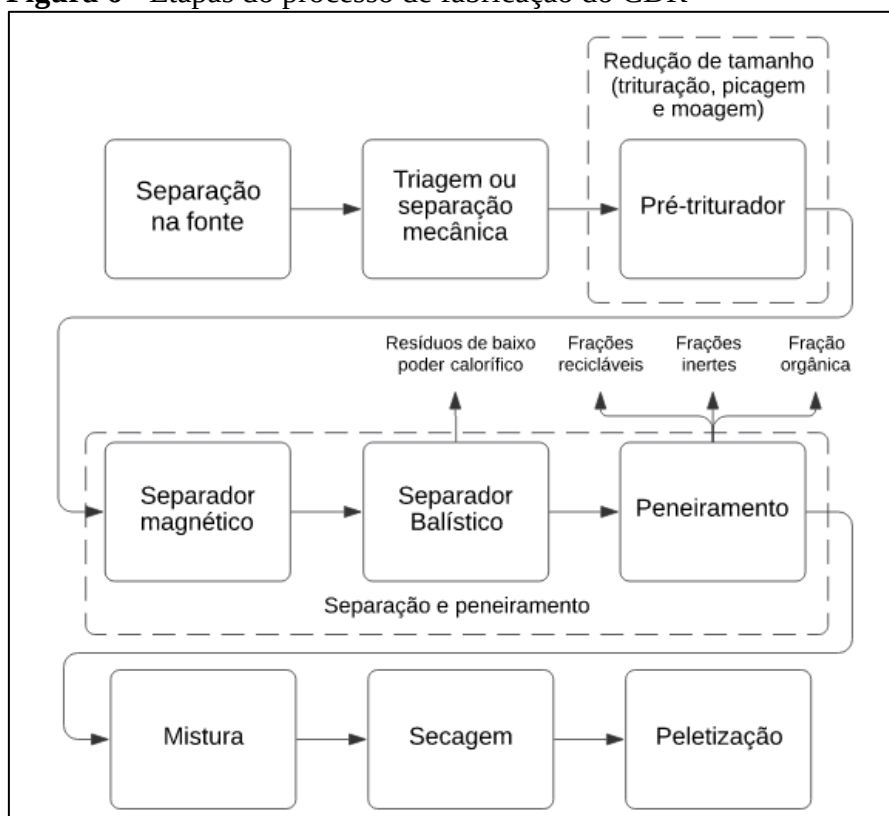
Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento (AESBE, 2020), a Votorantim Cimentos conseguiu reduzir a emissão de gás carbônico em 14,7 mil toneladas, em 2019, utilizando 75 mil toneladas de CDR em sua produção de cimento na cidade de Salto de Pirapora (SP). Conforme ainda a mesma fonte, essa iniciativa tem potencial para reduzir 500 mil toneladas de emissões de gás carbônico anualmente.

Na literatura, principalmente da União Europeia trata-se de dois tipos de combustíveis advindos de resíduos: o *Recovery Derived Fuels (RDF)* – Combustíveis Derivados de Resíduos e o *Solid Recovered Fuels (SRF)* - Combustíveis Sólidos Recuperados. A principal diferença entre eles é que o primeiro não é produzido de forma padronizada, apesar de apresentar alto poder calorífico e baixo teor de cloro; enquanto o segundo é gerado conforme a norma europeia CEN 15359 de 2011 (CEN, 2011), que estabelece e classifica este tipo de combustível de acordo com o seu poder calorífico, cloro e mercúrio, além de ser feito a partir de resíduos não perigosos.

Apesar de no Brasil não haver essa distinção, o CDR está mais relacionado ao SRF, tendo em vista que, para sua utilização no país é necessário a padronização do poder calorífico, cloro e mercúrio (PIAIA, 2021).

Várias etapas são necessárias para a produção do CDR, a Figura 6 ilustra as etapas de fabricação do CDR proposto por Kara (2012).

Figura 6 - Etapas do processo de fabricação do CDR



Fonte: Elaborado pela autora com base em Kara (2012)

Pela Figura 6, observa-se que no processo de produção do CDR é importante a eliminação da fração não combustível, a redução da granulometria das partículas, a homogeneização do material, a redução da umidade e, por fim, sua peletização, transformando-o em briquetes ou *pellets*.

Assim, o CDR se torna um combustível com qualidade superior ao próprio RSU, devido a sua composição física e química mais uniforme, quantidade reduzida de material não-combustível, exigência de menos oxigênio para a combustão, maior facilidade de armazenamento, manuseio e transporte, bem como a emissão de menos poluentes quando queimados (NITHIKUL, 2007; SAMPAIO, 2014). No estudo de Rahman *et al.* (2015), os autores encontraram que o poder calorífico do RSU bruto foi de 8-11 MJ.kg⁻¹, enquanto do CDR foi de 15-20 MJ.kg⁻¹, ratificando que o uso do CDR como uma alternativa de energia é mais adequado do que a utilização do RSU bruto.

No estado de São Paulo a Resolução da *Secretaria* de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA) nº 47 (SÃO PAULO, 2020a) traz as diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de CDR, sendo que os critérios de utilização de CDRs levam em consideração o PCI, cloro e temperatura do composto, conforme apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios para utilização de CDR

Tipologia de fontes	Poder Calorífico Inferior – PCI (kcal.kg ⁻¹ , base seca) *	Cloro (% , base seca)	Temperatura (°C)
Caldeiras industriais a biomassa entre 50 e 100 t/h de vapor	≥ 2.300	≤ 0,3	≥ 500° C***
Caldeiras industriais a biomassa > 100 t/h de vapor	≥ 2.300	≤ 0,6	≥ 550° C
Fornos de produção de clínquer	≥ 2.775	≤ 1,0	NA
Pirólise	≥ 2.300	NA	≥ 400° C***
Gaseificação	≥ 2.300	NA	≥ 750° C***
URE	NA	NA	≥ 850° C***
Fornos industriais com uso de biomassa e sem contato com a matéria-prima	**	≤ 0,6	≥ 500° C***

Fonte: São Paulo (2020a)

(NA) não aplicável

(*) PCI avaliado caso a caso, devendo ser superior ao PCI da biomassa utilizada como combustível convencional.

(**) PCI do CDR deverá ser igual ou superior ao combustível convencional normalmente utilizado, devendo comprovar que há redução de consumo do combustível convencional.

(***) temperatura medida no interior da câmara de combustão ou outro ponto equivalente.

Segundo Rodrigues *et al.* (2017), a quantidade e a qualidade do resíduo é o que determina o potencial de utilização dos mesmos como matéria-prima. Os autores citam além da disponibilidade como condicionante para o aproveitamento energético, as características físico-químicas, como: umidade, densidade, poder calorífico, tamanho da partícula, toxicidade, quantidade de sólidos voláteis, relação carbono/nitrogênio, carbono total e quantidade de inertes.

Dentre as vantagens do CDR pode-se citar a capacidade energética firme, ou seja, a disponibilidade constante ao longo de todo ano de matéria-prima para geração de energia, advinda principalmente do RSU. Além de um material amplamente disponível, o mesmo não tem custo de aquisição, visto que é considerado um material de descarte, tornando-se assim, ainda mais atrativo. Além dessas benesses, segundo Reza *et al.* (2013) e Brás *et al.* (2017), pode-se citar a vantagem da substituição dos combustíveis fósseis convencionais por um combustível mais limpo, que pode reduzir a emissão de dióxido de carbono e de GEE.

Na sequência é apresentado a classificação do CDR, bem como sua possível utilização.

3.2.1. Classificação

Os CDRs podem ser categorizados de acordo com o seu formato, conforme apontado pelo Quadro 2.

Quadro 2 - Categorização do CDR conforme o formato

Classificação	Formato
<i>Fluff</i>	Material solto, de baixa densidade.
<i>Pellets</i>	Cubo, disco ou cilindro com diâmetro ou seu equivalente de dimensão inferior à 25 mm.
<i>Briquette</i>	Bloco ou cilindro com diâmetro ou seu equivalente de dimensão superior à 25 mm.

Fonte: Adaptado de Dias e Costa (2006)¹⁰

O *fluff* é composto de material solto e de baixa densidade, que tem como característica ser facilmente transportado pelo ar, portanto é necessário um local adequado para seu armazenamento. Já os *pellets* e *briquettes* tem formatos mais bem definidos e por serem moldados por materiais compactados, possuem maior densidade, dificultando o arraste das partículas pelo vento. A Figura 7 apresenta os formatos mencionados.

Figura 7 - Formatos existentes para CDR



Fonte: Adaptado de Dias e Costa (2006)

Reza *et al.* (2013) em seu trabalho expõe a classificação dos CDR's em sete classes de acordo com a Sociedade Americana de Testes e Materiais, *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2004), em que são levadas em consideração as características físico-químicas do composto, especificadamente o poder calorífico, cloro e mercúrio (Quadro 3).

Quadro 3 - Classificação dos CDR's de acordo com características físico-químicas

Classificação	Descrição
CDR-1	Resíduos utilizados na forma de descarte; Poder calorífico inferior maior que 25 MJ.kg ⁻¹ ; Teor de cloro menor que 0,2%; teor de mercúrio menor que 0,04 mg.MJ ⁻¹ .
CDR-2	Também chamado de RDF grosso, são os resíduos processados para granulometria grossa com ou sem separação de metais ferrosos, de modo que 95% em peso passe por uma malha quadrada de 6 polegadas; Poder calorífico líquido maior que 20 MJ.kg ⁻¹ ; Teor de cloro menor que 0,6%; teor de mercúrio menor que 0,06 mg.MJ ⁻¹ .

¹⁰ Classificação baseada em CEN (2006a)

CDR-3	Também chamado de CDR <i>Fluff</i> , são os resíduos processados para separar vidro, metal e materiais inorgânicos, posteriormente triturados de modo que 95% em peso passe através de malha quadrada de 2 polegadas; Poder calorífico líquido maior que 15 MJ.kg ⁻¹ ; Teor de cloro menor que 1,0%; teor de mercúrio menor que 0,16 mg.MJ ⁻¹ .
CDR-4	Também chamado de CDR em pó, são os resíduos combustíveis transformados em pó, de modo que 95%, em peso, passem através de uma malha 10 (0,035 polegadas); Poder calorífico líquido maior que 10 MJ.kg ⁻¹ ; Teor de cloro menor que 1,5%; teor de mercúrio menor que 0,30 mg.MJ ⁻¹ .
CDR-5	Também chamado de CDR densificado, são os resíduos combustíveis comprimidos sob a forma de <i>pellets</i> (peça arredondada e comprimida), <i>slugs</i> (peças alongadas e geralmente arredondadas), cubetas ou briquetes; Poder calorífico líquido maior que 3 MJ.kg ⁻¹ ; Teor de cloro menor que 3,0%; teor de mercúrio menor que 1,0 mg.MJ ⁻¹ .
CDR-6	São os resíduos combustíveis transformados em combustíveis líquidos.
CDR-7	São os resíduos combustíveis transformados em combustíveis gasosos.

Fonte: Adaptado de Reza *et al.* (2013, p. 113) ¹¹

Já a norma CEN (2006), segundo Rodrigues *et al.* (2017), estabelece 5 classes de qualidade para o CDR (Tabela 7), que serve como indicativo para o mercado na precificação e comercialização dos mesmos.

Tabela 7- Classificação europeia para CDR

Propriedade	Unidade	Medida Estatística	1	2	3	4	6
Poder calorífico	MJ.kg ⁻¹	Média	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cloro (Cl)	% m/m (peso seco)	Média	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Mercúrio (Hg)	mg.MJ ⁻¹	Mediana	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
		80%	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,0

Fonte: Rodrigues *et al.* (2017, p. 69) adaptado de CEN (2006)

Entretanto, apesar do indicativo de qualidade da CEN (2006), os países membro da comunidade europeia podem adotar especificações mais restritivas. A norma alemã, por exemplo, além das características propostas pela CEN (2006) leva também em consideração as concentrações de metais pesados, conforme aponta a Tabela 8.

Tabela 8 - Concentrações permitidas de metais pesados para CDR de alta qualidade conforme a classificação alemã RAL-GZ 724

Parâmetro	Unidade	Valor Médio
Cádmio	mg.kg ⁻¹	4,0
Mercúrio	mg.kg ⁻¹	0,6
Tálio	mg.kg ⁻¹	1,0
Arsênio	mg.kg ⁻¹	5,0
Cobalto	mg.kg ⁻¹	6,0
Níquel	mg.kg ⁻¹	80,0
Selênio	mg.kg ⁻¹	3,0

¹¹ Classificação baseada na norma americana ASTM E856-83 (*Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel*) e valores de poder calorífico, cloro e mercúrio foram retiradas da página da *European Recovered Fuel Organisation – ERFO*.

Telúrio	mg.kg ⁻¹	3,0
Antimônio	mg.kg ⁻¹	50,0
Chumbo	mg.kg ⁻¹	190,0
Cromo	mg.kg ⁻¹	125,0
Cobre	mg.kg ⁻¹	400,0
Manganês	mg.kg ⁻¹	250,0
Vanádio	mg.kg ⁻¹	10,0
Estanho	mg.kg ⁻¹	30,0

Fonte: Rodrigues *et al.* (2017, p. 70) adaptado de BGS (2008)

Nota: As concentrações de metais pesados são válidas para resíduos com um poder calorífico líquido (PCL) = 16 MJ.kg⁻¹. Para PCL mais baixos, as concentrações devem ser reduzidas proporcionalmente.

De forma geral, as normas de qualidade para o CDR não costumam ter grandes variações. Assim, podem servir como base para países em desenvolvimento que vislumbrem a produção deste combustível (RODRIGUES *et al.*, 2017).

Na sequência são apresentadas as possíveis utilizações do CDR.

3.2.2. Utilização

O CDR pode ser utilizado como fonte de energia para várias alternativas, como na pirólise, na gaseificação, na incineração (também conhecida como tecnologia *mass burning*), em fornos de produção de clínquer e em caldeiras industriais.

As três primeiras alternativas são processos de recuperação energética muito similares, que se diferem principalmente devido a quantidade de oxigênio presente no meio reacional. A incineração opera com excesso de oxigênio, enquanto na gaseificação a combustão ocorre de maneira parcial, ou seja, com déficit de oxigênio e a pirólise com ausência total do mesmo (PISANI JÚNIOR, 2019).

A forma mais utilizada do processo de combustão é a oxidação completa (*mass burning*), isto é, a queima dos RSU em fornos projetados (THEMELIS *et al.*, 2013). Dados do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) ratificam a predominância da técnica ao apontarem que 90% das usinas *Waste-to-Energy* (WtE) do mundo são do tipo combustão *mass burning* com grelha móvel, pois esse é o método com melhor custo-benefício atualmente.

O Quadro 4 resume as principais vantagens e desvantagens do processo de incineração de RSU.

As outras tecnologias de tratamento, como gaseificação e pirólise, ainda são muito insipientes no mundo por se tratar de tecnologias complexas. A primeira, por exemplo, necessita de um pré-tratamento de secagem dos RSU (ABRELPE; PLASTIVIDA, 2012) e a segunda precisa de uma fonte externa de energia (THEMELIS *et al.*, 2013). Esses custos adicionais diminuem sua competitividade frente a tecnologia de *mass burning*. Entretanto, apesar da inviabilidade financeira destas técnicas para muitos contextos, muitos avanços têm sido feitos

com relação a essas novas tecnologias de tratamento térmico, principalmente no Japão, que tem sido o líder mundial em desenvolvimento e aplicação desses tratamentos não tradicionais, com mais de 100 plantas desses processos relativamente novos (TISI, 2019).

No Brasil, existe no município de Mafra, em Santa Catarina, um gaseificador de grelhas móveis que pode atender até 4 mil residências com uma geração de energia de até 2 MW. O projeto teve investimento de 40 milhões de reais e é uma parceria entre o governo federal, a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e a empresa que gerencia o aterro de Mafra/SC (SOBRINHO, 2020; RBS TV, 2017). De acordo com o estudo de Lopes (2014), 90% dos resíduos analisados nesta região são passíveis de serem gaseificados, pois demonstraram grande potencial energético (PCI médio de 7.948 kJ.kg^{-1}) e a emissão de dioxinas e furanos esteve dentro do limite aceitável pela legislação. A Figura 8 mostra o gaseificador existente no município.

Outra maneira de utilização de CDR é em fornos da indústria cimenteira. Segundo Madlool *et al.* (2011) a indústria cimenteira utiliza aproximadamente 12% a 15% de toda a energia do setor industrial global. Ummatin *et al.* (2019, p. 1) afirmam ainda que “a indústria do cimento geralmente requer carvão tanto quanto a metade do cimento produzido”.

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens da incineração de RSU

Vantagens	Desvantagens
• Os custos são menores quando comparados a outras tecnologias WtE (THEMELIS <i>et al.</i>, 2013) e tecnologia mais confiável para geração de eletricidade por meio da queima em massa sem pré-tratamento de RSU (CARNEIRO; GOMES, 2019). • Possibilitam processar vários tipos de resíduos (THEMELIS <i>et al.</i>, 2013). • Redução de volume e massa em 90% e 75%, respectivamente, sem longos períodos de residência (JIMENEZ <i>et al.</i>, 2017; NORDI <i>et al.</i>, 2017; LINO; ISMAIL, 2017; 2018; PIN <i>et al.</i>, 2018; PISANI JÚNIOR, 2019; COLVERO <i>et al.</i>, 2020). • Existe enorme experiência e <i>know-how</i> internacional em face do grande número de plantas em operação (THEMELIS <i>et al.</i>, 2013); • Pode ser incinerado no local (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Triagem opcional de materiais não combustíveis na entrada ou na saída da câmara primária (PISANI JÚNIOR, 2019). • Eliminação de microrganismos patógenos (LINO; ISMAIL, 2017; 2018; PISANI JÚNIOR, 2019; COLVERO <i>et al.</i>, 2020). • Baixo nível de incertezas após a sua implementação (THEMELIS <i>et al.</i>, 2013). • Operação contínua que potencializa ganhos de escala (PISANI JÚNIOR, 2019). • Aproveitamento energético, sobretudo quando o resíduo (como recebido) possuir poder calorífico inferior (PCI) acima de 8000 kJ/kg (1911 kcal/kg) (FEAM, 2012; THEMELIS <i>et al.</i>, 2016), que pode ser utilizado na forma de aquecimento de água ou transformado em eletricidade (LINO; ISMAIL, 2017; 2018).	• Não viável para plantas de pequeno porte (CARNEIRO; GOMES, 2019). • Altos custos de capital da planta (JIMENEZ <i>et al.</i>, 2017; NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Alto custo de operação e gerenciamento para que limites não sejam excedidos (temperaturas das câmaras primária ou secundária, carga de poluentes para os equipamentos de limpeza de gases) (PIN <i>et al.</i>, 2018; SANTOS <i>et al.</i>, 2019; PISANI JÚNIOR, 2019). • Viabilidade da planta condicionada à capacidade de processamento, normalmente acima de 6.250 kg/h para RSU (FEAM, 2012; PISANI JÚNIOR, 2019). • Necessidade de pessoal qualificado (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Nem todos os materiais são combustíveis (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Os RSU têm baixo teor de energia e alta umidade, ou seja, possuem relativamente um baixo poder calorífico inferior (PCI), especialmente em países em desenvolvimento (CARNEIRO; GOMES, 2019). • Necessidade de homogeneização e caracterização criteriosa dos resíduos a serem alimentados na planta (PISANI JÚNIOR, 2019). • Necessidade de combustível adicional para iniciar e, às vezes, sustentar a combustão (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • A combustão de resíduos resulta na formação de poluentes atmosféricos (material particulado, SO₂, HCl, HF, NO_x, CO, dioxinas, furanos, etc) que necessitam de tratamento para atender à legislação ambiental (PISANI JÚNIOR, 2019) e na produção de partículas sólidas e resíduos ricos em metais (SANTOS <i>et al.</i>, 2019).

• Energia elétrica pode ser vendida para a rede (JIMENEZ <i>et al.</i>, 2017; COLVERO <i>et al.</i>, 2020). • Maior aproveitamento energético que a outros tratamentos (SILVA <i>et al.</i>, 2020b), inclusive quando comparado com os aterros sanitários com geração de energia (PISANI JÚNIOR, 2019). • As cinzas são estéreis (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Menor área requerida quando comparada com a destinação em aterros (JIMENEZ <i>et al.</i>, 2017; NORDI <i>et al.</i>, 2017; PISANI JÚNIOR, 2019). • Aumento da vida útil dos aterros (pois receberiam apenas as cinzas) (DALMO <i>et al.</i>, 2019). • A incineração controlada apresenta menos impacto ambiental que os aterros (SANTOS <i>et al.</i>, 2019), pois possui menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) quando comparados aos aterros (CARNEIRO; GOMES, 2019; COLVERO <i>et al.</i>, 2020). • O custo do processo pode ser compensado com a venda da energia gerada (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Finalização das emissões de poluentes atmosféricos e da produção de rejeitos com o término da operação (PISANI JÚNIOR, 2019). • A quantidade de resíduos secundários, como escória vitrificada, é reduzida (JIMENEZ <i>et al.</i>, 2017).	• Necessidade de rigoroso controle ambiental das emissões gasosas (SILVA <i>et al.</i>, 2020b; SANTOS <i>et al.</i>, 2019) e das cinzas, por serem consideradas resíduos sólidos perigosos (PIN <i>et al.</i>, 2018). • Custos relativamente elevados para o tratamento de resíduos perigosos com baixos poderes caloríficos (PISANI JÚNIOR, 2019). • Necessidade de resfriamento abrupto dos gases de combustão na saída da câmara secundária para minimizar a formação de dioxinas e furanos (PISANI JÚNIOR, 2019). • Os resíduos da limpeza de gases de combustão podem contaminar o ambiente se não forem tratados adequadamente (NORDI <i>et al.</i>, 2017). • Percepção negativa do público influenciada fortemente pela emissão de poluentes (THEMELIS <i>et al.</i>, 2013; SOUZA <i>et al.</i>, 2019). • Algumas instalações de incineração sofrem alta perda de ignição, devido ao alto excesso de ar necessário para obter um desgaste aceitável (TRINDADE <i>et al.</i>, 2018). • Baixa eficiência induzida pelo alto consumo interno de energia causada pelo manuseio de resíduos (TRINDADE <i>et al.</i>, 2018). • A queima de RSU gera gases ácidos que exigem cuidadoso controle de combustão para conter a corrosão da caldeira e diminuir os custos de manutenção (CARNEIRO; GOMES, 2019).
--	--

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 8 - Gaseificador de grelhas móveis de Mafra/SC



Fonte: RBS TV (2017)

Sendo assim, devido a necessidade de grande quantidade de energia para a produção de clínquer, o CDR é uma opção para substituição de combustíveis fósseis, como gás natural, carvão, petcock e óleo de petróleo, de forma a minimizar as emissões de GEE para a atmosfera e desviar os resíduos dos aterros, contribuindo assim, para a proteção do meio ambiente (HASHEM *et al.*, 2019; SAKRI *et al.*, 2021).

De acordo com Sarc *et al.* (2019), o uso de CDR em fornos de produção de clínquer tem sido praticado em muitos países desde o início dos anos 1970, e as taxas atuais de substituição de CDR são de 75% na Áustria, 65% na Alemanha, 44% em outros países europeus (UE), 16% nos Estados Unidos e 13% no Canadá.

É importante mencionar que a organização financeira para o uso do CDR pode gerar desacordos. Muitas vezes, os governos locais querem ganhar dinheiro vendendo os resíduos para a indústria cimenteira, em contrapartida, as fábricas querem receber pela utilização do CDR em seus fornos, gerando problemas de comunicação e desavenças (GIZ, 2020).

No trabalho de Ummatin *et al.* (2019), que analisou qualitativamente o padrão de qualidade do CDR na Indonésia e o processo de produção do mesmo, por meio do método *Quality Function Development (QFD)*, foi possível concluir que algumas variáveis afetam a qualidade do combustível, dentre elas: teor de umidade e poder calorífico, que os autores relacionaram-nas como influenciadoras no aspecto de preço do processo de fabricação dos CDRs, tamanho e teor de cinzas, que estariam mais conectados ao aspecto técnico do processo e particulados e mercúrio, associados ao aspecto ambiental.

No artigo de Sakri *et al.* (2021), que trata sobre o uso potencial de produção e utilização de CDR de RSU para utilização como combustível substituto em fornos de cimento na Argélia,

o CDR analisado pelos autores apresentou alto poder calorífico, baixa umidade e teor de cloro e metais pesados aceitáveis perante a legislação do país e dentro dos limites estabelecidos por alguns países europeus, o que tornou uma opção de tratamento adequada para o manejo de RSU para a cidade. Além disso, ficou comprovado que quando adicionado 15% de CDR ao combustível usado em fornos de cimento, há economia de 31,3 milhões de $\text{Nm}^3.\text{ano}^{-1}$ em gás natural e 0,3 Mt.h^{-1} em emissões de dióxido de carbono. Segundo os autores, o fato de o CDR ser mais econômico e ambientalmente mais benéfico do que os combustíveis fósseis, são os principais fatores que o torna mais interessante para as fábricas de cimento.

Já no estudo de Paramita, Hartono e Soesilo (2018), o que chama a atenção é o aspecto social que os autores levaram em consideração ao examinar o potencial do CDR como combustível alternativo na indústria de cimento em países em desenvolvimento, tendo como estudo de caso a cidade de Cilacap, na Indonésia. O estudo conclui, dentre outros aspectos, a resistência entre os catadores de se organizarem de forma estruturada e a relutância de realizarem parcerias, uma vez que os mesmos apresentaram preocupação com o fato de seus meios de subsistência estarem ameaçados com a produção de CDR.

Uma outra destinação para os CDR pode ser as caldeiras industriais. Há grande necessidade de geração de vapor para os processos de transformação industrial em todos os setores, como por exemplo, na siderurgia, na mineração, na metalurgia, na indústria de alimentos, na indústria petroquímica, na de papel e celulose, dentre outras (SAMPAIO, 2014). Para isso, são utilizadas caldeiras industriais movidas a vapor, que podem ser entendidas como “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refreradores e similares” (BRASIL, 2018b, p. 3).

Conforme apontado, as caldeiras a vapor podem ser movidas a qualquer fonte de energia. Segundo Sampaio (2014), os combustíveis industriais mais usados são o carvão, a turfa, o xisto (lignita) e a biomassa, que sofrem o processo de combustão em equipamentos como grelhas, leitos fluidizados e queimadores.

Entretanto, alguns testes estão sendo realizados para utilização de CDR em caldeiras industriais, visando dar uma destinação final aos RSU, bem como utilizar um combustível que tenha disponibilidade durante o ano todo.

Gundim (2022) em seu estudo analisou a aplicação de CDR para otimização do uso de palha de cana e casca de eucalipto para geração de energia térmica em processos de alimentação de caldeiras e, constatou que a mistura de CDR com essas biomassas levou a um combustível

de melhor qualidade, pois o mesmo apresentou-se mais homogêneo, com maior PCS, menor umidade e maior facilidade de armazenamento, transporte e manuseio.

Na pesquisa de Peters *et al.* (2020), os autores realizaram três composições de biomassas: linhito com CDR, linhito misturado com a palha de diversos cereais (cevada, trigo, centeio, aveia) e linhito puro e comprovaram que na combustão de palha e CDR não houve efeito negativo na estabilidade hidrodinâmica.

No trabalho de Sampaio (2014), a autora analisou a queima em uma caldeira de bagaço de cana-de-açúcar com CDR e detectou que a quantidade ideal de CDR para seu estudo de caso, uma caldeira de 60 MW, seria de 30% da composição, entretanto, devido a problemas ambientais e de corrosão, a taxa ideal passou a ser de 10%. É importante chamar atenção que neste estudo, conseguiu-se comprovar que o CDR pode ser sim acrescentado à queima convencional de uma caldeira de bagaço de cana-de-açúcar, no entanto, deve-se atentar para a proporção deste composto, pois o excesso de CDR pode aumentar o nível de cloro, que impacta diretamente na corrosão e integridade da caldeira. Além disto, uma quantidade maior de CDR pode influenciar a emissão de gases, e então apresentar elementos ou níveis de substâncias que estejam fora dos parâmetros que a legislação permite.

A seguir serão apresentadas as legislações que disciplinam o tratamento térmico de resíduos no Brasil e no Estado de São Paulo.

3.2.3. Marcos regulatórios para o tratamento térmico de resíduos

O mais expressivo instrumento legal que ampara a gestão integrada de resíduos sólidos, bem como o seu gerenciamento é a PNRS, que foi instituída por meio da Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010a). A Lei inclui, entre as formas de destinação ambientalmente adequada, a recuperação e o aproveitamento energético, desde que exista comprovadamente viabilidade técnica e ambiental, incluindo o monitoramento da emissão de gases aprovado pelo órgão ambiental.

No mesmo ano de criação da PNRS, o Decreto nº 7.404 (BRASIL, 2010b) foi aprovado para regular a PNRS, devido a necessidade de se ter uma legislação que disciplinasse a gestão de resíduos no país. Neste Decreto, os artigos 36 e 37 deixam claro que a recuperação energética de resíduos deve obedecer às normas dos órgãos competentes e ser disciplinada conjuntamente pelo Ministério do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades.

Entretanto, antes mesmo da PNRS e seu decreto estarem em vigor para disciplinarem a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, em 1997, foi criada a Política Energética

Nacional, instituída pela Lei nº 9.478 (BRASIL, 1997), que teve como um de seus anseios o uso de fontes de energia alternativas, que inclui a recuperação energética de RSU.

Em 1999, foi inserida a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 264 (BRASIL, 1999, p. 1), que tratou sobre o “licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos”. Na sequência, em 2002, a Resolução CONAMA nº 316 (BRASIL, 2002) veio disciplinar os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. É importante salientar que a Resolução trouxe em seu texto a importância do tratamento térmico ser precedido pela implementação de um programa de segregação prévio para fins de reciclagem ou reaproveitamento. No entanto, essa Resolução exige índices menos rigorosos, quando comparado a normas internacionais, para as emissões de gases decorrentes da incineração de resíduos para o licenciamento e operação de usinas WtE.

A Tabela 9, proposta por Lino e Ismail (2017), faz uma comparação entre os limites de emissão de vários poluentes estabelecidos pela União Europeia, EUA e o Brasil.

Tabela 9 - Limites de emissões adotados pela União Europeia, EUA e Brasil

Tipo de Poluente	Limite/UE¹	Limite/EUA²	Limite/Brasil³
Dioxinas e Furanos	0,1 ng.Nm ⁻³	0,13 ng.Nm ⁻³	0,50 ng.Nm ⁻³
Material Particulado	10 mg.Nm ⁻³	20 mg.Nm ⁻³	70 mg.Nm ⁻³
Substâncias orgânicas no estado de vapor e gás	10 mg.Nm ⁻³	-	-
Cloreto de Hidrogênio (HCl)	10 mg.Nm ⁻³	29 mg.Nm ⁻³	80 mg.Nm ⁻³
Ácido Fluorídrico (HF)	1 mg.Nm ⁻³	-	5 mg.Nm ⁻³
Dióxido de enxofre (SO ₂)	50 mg.Nm ⁻³	85 mg.Nm ⁻³	280 mg.Nm ⁻³
Monóxido de nitrogênio (NO)	200 mg.Nm ⁻³	305 mg.Nm ⁻³	560 mg.Nm ⁻³
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)			

Fonte: Traduzido e adaptado de Lino e Ismail (2017)

¹ Diretiva 2000/1976/CE

² 40 CFR 60

³ Limites de emissão de acordo com a resolução CONAMA nº 316/2002 (BRASIL, 2002).

Pela Tabela 9, nota-se que a legislação brasileira é menos restritiva com relação a emissões de gases decorrentes da incineração de resíduos, quando comparada a dos EUA e da União Europeia, sendo assim é necessário a revisão da norma brasileira, já que no Brasil há incentivos para a implantação de usinas WtE, principalmente em regiões metropolitanas. Dessa forma, índices menos rigorosos podem causar problemas de saúde pública, bem como reflexos ao meio ambiente.

Com o aumento ao longo dos anos da poluição atmosférica, fruto da ascensão da economia brasileira na década de 2000, houve a necessidade de estabelecer limites de emissões de poluentes. Sendo assim foi criada em 2006 a Resolução CONAMA nº 382 (BRASIL, 2006), e em 2011 a Resolução CONAMA nº 436 (BRASIL, 2011) que delimitam limites máximos de emissões atmosféricas referentes às fontes fixas. O que as diferenciam é a data de licença de

instalação, pois a Resolução CONAMA nº 436 traz as fontes instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.

Outro marco importante foi a criação, em 2007, da Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007a). Essa legislação ratificou que a coleta e destinação ambientalmente adequada de resíduos sólidos bem como a drenagem urbana também são atividades de saneamento básico, além das atividades triviais de coleta e tratamento de esgoto e tratamento e distribuição de água potável.

Do ponto de vista ambiental, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), Lei nº 12.187 (BRASIL, 2009) trouxe importante contribuição para área, pois ao propor o desenvolvimento de tecnologias que minimizem a emissão de GEE, a incineração com recuperação de energia pode ser enquadrada nesta categoria, pois diminui a emissão direta de gás metano para a atmosfera, devido ao tratamento dos gases feitos previamente.

No ano seguinte, o Decreto nº 7.390 (BRASIL, 2010c) foi aprovado com vistas a disciplinar a PNMC, que foi posteriormente revogado pelo Decreto nº 9.578 (BRASIL, 2018). Sua principal contribuição à temática, foi determinar a linha de base das emissões de GEE para 2020.

Já no ano de 2019, foi criada a Portaria Interministerial nº 274 (BRASIL, 2019) para regularizar a recuperação energética (tratamento térmico) específica para os RSU, ou seja, a implantação e operação de usinas WtE. Entretanto, segundo Tisi (2019), a portaria não disciplinou o assunto com a mesma abrangência das Diretivas Europeias.

A ABNT criou no ano de 2020 a NBR nº 16.849 (ABNT, 2020) que estabelece os requisitos para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos classe II - Não perigosos. Essa norma surge com uma importância muito grande para que a recuperação energética dos RSU seja realizada de maneira racional, com tecnologias apropriadas e com promoção de práticas seguras.

Ainda no mesmo ano, foi instituído o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020a), que estimulou a prestação de serviços junto à iniciativa privada para superar o déficit no setor de saneamento e universalizar os serviços. Apesar da premissa da universalização dos serviços ser verdadeira e importante, há, por outro lado, críticas com relação à privatização do serviço, principalmente com relação ao aumento da tarifa com o fim do subsídio cruzado, o qual o prejuízo em municípios pequenos é custeado pelo lucro das áreas mais populosas.

Além disso, a Resolução CONAMA nº 499 também de 2020 (BRASIL, 2020b) tratou sobre o licenciamento para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, que já estava

regulamentado pela Resolução CONAMA nº 264 (BRASIL, 1999). Segundo Santos *et al.* (2020), a Resolução de 2020 não atualiza a de 1999, mas sim a retrocede, uma vez que retira diversos dispositivos que garantiam um pouco mais de segurança ambiental.

Por fim, os últimos marcos, ambos do ano de 2022, foram o Decreto nº 10.936 (BRASIL, 2022b), que instituiu uma nova regulamentação para a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Decreto nº 11.043 (BRASIL, 2022c), que regulamentou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que prevê as estratégias, diretrizes e metas para o setor, no âmbito de 20 anos.

A Figura 9 ilustra a linha do tempo com os principais marcos mencionados do aproveitamento energético dos RSU no Brasil.

No estado de São Paulo existem também alguns instrumentos legais referentes a temática. Em 1992, foi criada a Política Estadual de Saneamento Básico, Lei nº 7.750 (SÃO PAULO, 1992) que tinha por objetivo disciplinar os serviços de saneamento do estado de São Paulo, desde o planejamento até as ações a serem adotadas. Nesta Política, os municípios ficaram responsáveis por gerenciar as instalações e os serviços de saneamento municipais, dentre eles a disposição final de resíduos.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), no ano de 2003, criou a Norma Técnica P4-263 a fim de instaurar os procedimentos para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer (SÃO PAULO, 2003). Desta forma, esse regulamento assegurou uma outra forma de disposição final para resíduos também considerada ambientalmente adequada dentro dos critérios estabelecidos pela Norma.

Em 2006, foi instituída a Política Estadual de Resíduos Sólidos de São Paulo (PERS), Lei nº 12.300 (SÃO PAULO, 2006), que dentre as disposições instituídas, merece destaque o planejamento integrado e compartilhado da gestão de resíduos e o incentivo à implementação, bem como à pesquisa, de tecnologias limpas nos processos de tratamento e disposição final de RSU.

Outro instrumento importante foi a criação da Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), Lei nº 13.798 (SÃO PAULO, 2009a), que dentre as suas finalidades está a incorporação de uma parcela maior de fontes renováveis na matriz energética.

No ano seguinte, o Decreto nº 55.947 (SÃO PAULO, 2010) regulamentou a PEMC. Sua principal colaboração ao tema foi o estabelecimento do aproveitamento energético de resíduos como forma de enfrentar os efeitos das mudanças climáticas.

Em 2009 foi criada a Resolução SMA nº 79 (SÃO PAULO, 2009b), que se espelhou nas práticas regulatórias da Diretiva 2000/76/CE (UNIÃO EUROPEIA, 2000), a fim de dispor

sobre a fiscalização das emissões de poluentes originárias da combustão de RSU. Já em 2013, novos padrões de qualidade do ar foram estabelecidos pelo Decreto Estadual nº 59.113 (SÃO PAULO, 2013) e aqueles poluentes que não foram considerados nesta legislação, serão objeto de regulação com base em recomendações da OMS.

Cabe ainda destacar duas Decisões de Diretoria da CETESB que são marcos regulatórios das Unidades de Recuperação Energética (UREs). A primeira, a Decisão de Diretoria CETESB nº 326, de 2014, dispõe sobre os critérios para a verificação do atendimento dos limites de emissão dos parâmetros estabelecidos pela Resolução SMA/SP nº 79, de 2009, para o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em UREs (SÃO PAULO, 2014). E a segunda, a Decisão de Diretoria CETESB nº 034, de 2015, dispõe sobre exigências técnicas para Avaliação de Risco à Saúde Humana por exposição a emissões atmosféricas não intencionais de dioxinas e furanos que condiciona a emissão de licença ambiental prévia de UREs (SÃO PAULO, 2015).

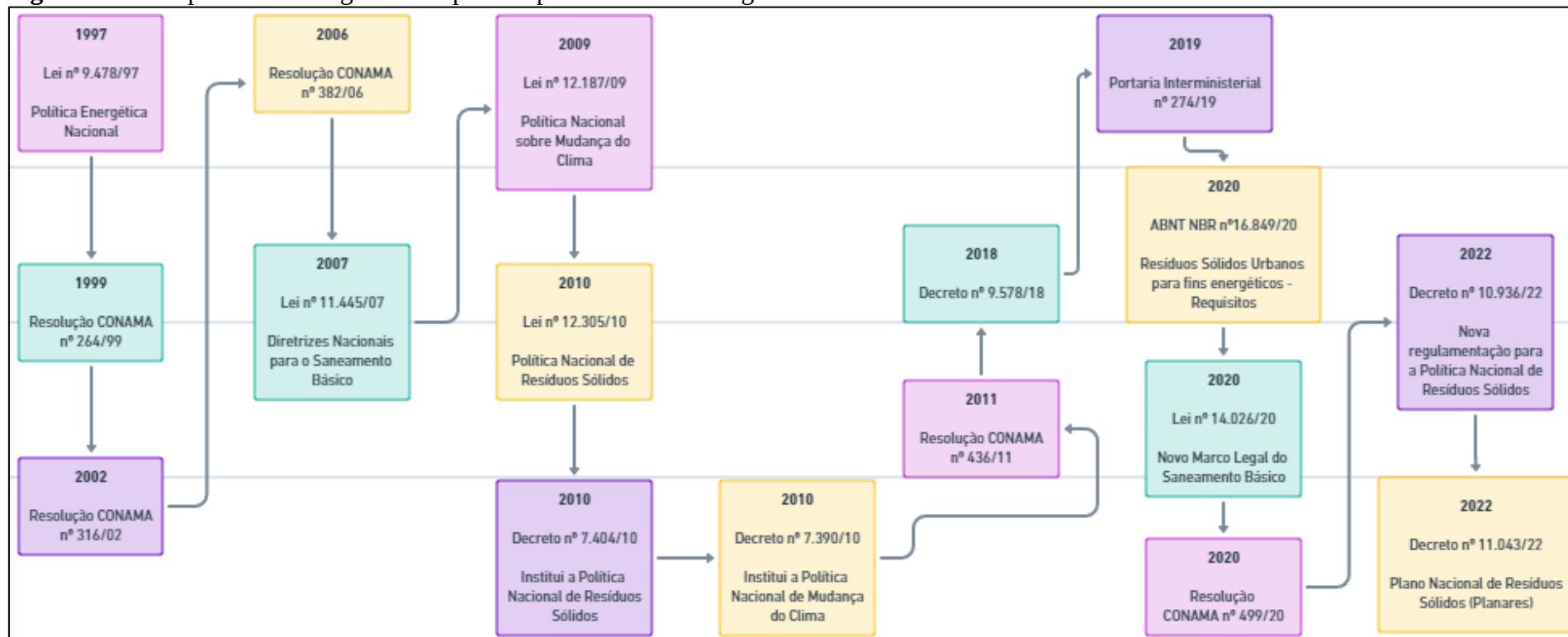
A Resolução SIMA nº 38 de 31 de maio de 2017, estabeleceu “diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos – CDRU em Fornos de Produção de Clínquer” (SÃO PAULO, 2017, p. 1). Cabe destacar que esta foi a primeira legislação do país a tratar sobre o processamento de CDR para a produção de clínquer a partir de RSU.

Por fim, a Resolução SIMA nº 47, de 06 de agosto de 2020 trouxe “diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR” (SÃO PAULO, 2020a, p. 1).

A Figura 10 apresenta um resumo dos principais marcos regulatórios mencionados acima para o estado de São Paulo, com base em uma linha do tempo.

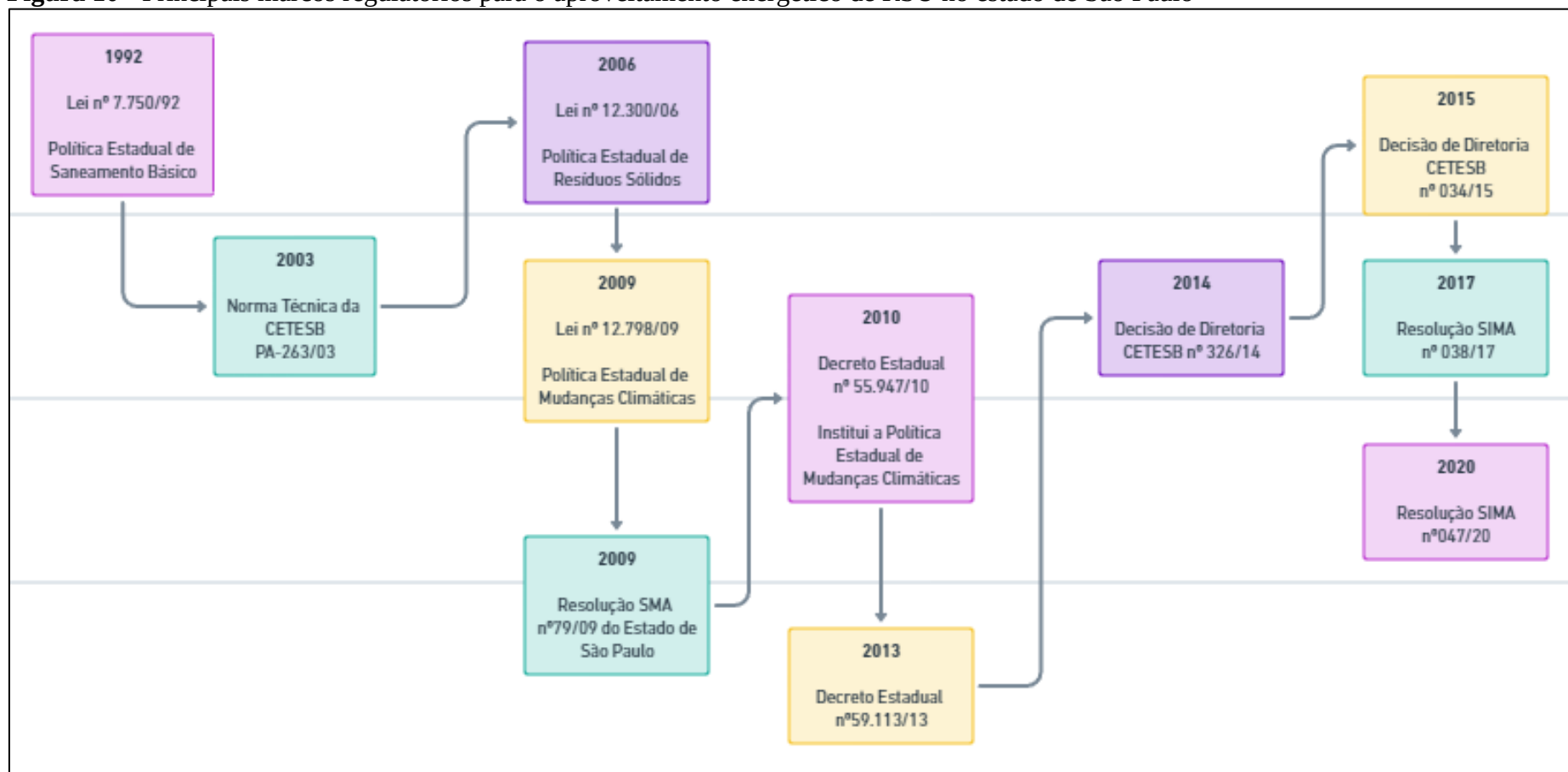
Deve-se enfatizar que o aproveitamento energético de RSU não está limitado à apenas esses instrumentos apontados, o propósito aqui foi indicar alguns marcos que são importantes para um primeiro contato com a temática.

Figura 9 - Principais marcos regulatórios para o aproveitamento energético de RSU no Brasil



Fonte: Elaborado pela autora com base em Brasil (1997; 1999; 2002; 2006; 2007; 2009; 2010a; 2010b; 2010c; 2011; 2018a; 2019; 2020a, 2020b) e ABNT (2020).

Figura 10 - Principais marcos regulatórios para o aproveitamento energético de RSU no estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora com base em São Paulo (1992; 2003; 2006; 2009a; 2009b; 2010; 2013; 2014; 2015; 2017; 2020).

3.3. Área de estudo

Este tópico tem por finalidade apresentar as características do município de Tupã, a fim de esclarecer sua localização e peculiaridades, principalmente no que concerne a gestão de resíduos e a produção de amendoim.

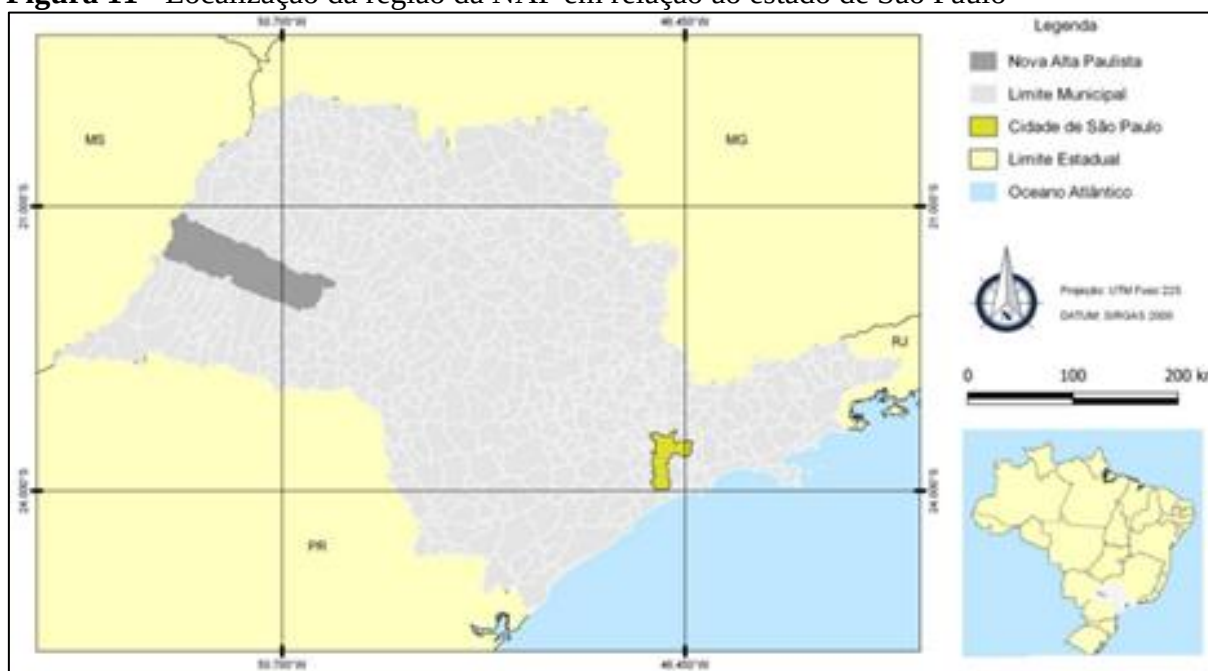
3.3.1. Delimitação da área e aspectos de formação do município

Tupã é um município localizado na Nova Alta Paulista (NAP), cuja região está localizada à noroeste do Estado de São Paulo (Figura 11), delimitada ao norte pelo rio Aguapeí, a leste pelos municípios de Herculândia e Queiroz, ao sul pelo rio do Peixe e a oeste pelo rio Paraná (Figura 12).

Quanto à região administrativa, Tupã pertence a região de Marília, conforme apontado pela Figura 13. Já com relação ao Escritório de Desenvolvimento Rural (EDR) de Tupã, o mesmo se encontra circundado pelos EDR's de Dracena, Andradina, Araçatuba, Lins, Marília, Assis e Presidente Prudente, conforme mostrado na Figura 14.

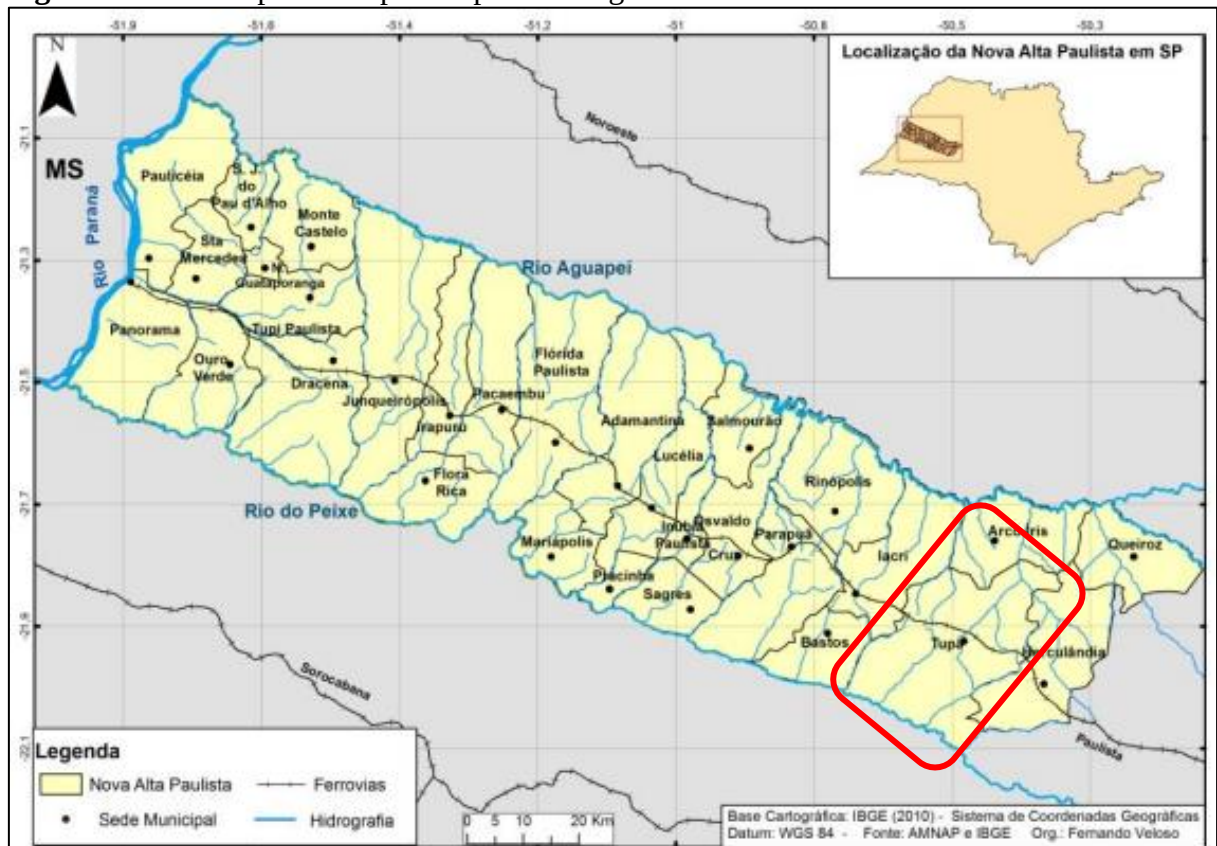
Os primeiros habitantes do município de Tupã foram os povos indígenas, especificadamente a etnia Kaingang, que chegaram no Bairro Ponte Alta, localizado à 24 quilômetros do município, na década de 1920. Em 1964, a etnia Krenak, remanescentes da etnia Botocudos, chegaram a Aldeia Vanuíre, pois foram expulsos da região do Vale do Rio Doce, em Minas Gerais, e, então, incorporados ao território Vanuíre pelo Serviço de Proteção aos Índios (SPI) (MONTES *et al.*, 2004).

Figura 11 - Localização da região da NAP em relação ao estado de São Paulo



Fonte: Souza e Leite (2021)

Figura 12 - Município de Tupã compoendo a região da NAP



Fonte: Veloso (2017)

Figura 13 - Região Administrativa de Marília



Fonte: SPBR (2023)

produção de café, algodão, amendoim, banana, cana de açúcar, arroz, mandioca, feijão, laranja, milho e outras pequenas culturas (MONTES *et al.*, 2004). De acordo com Souza e Leite (2021) o cultivo do café e a construção da estrada de ferro, foram fatores decisivos para a expansão da região. Vale destacar que a região que Tupã se inclui, a NAP, foi a última a ser colonizada no estado de São Paulo.

Atualmente, a cidade continua por possuir a agricultura e a pecuária como suporte da economia local, sendo que a cultura que têm se destacado ao longo dos anos é a do amendoim. Segundo Tupã (2023), o município é o maior produtor de amendoim do Estado e um dos maiores do Brasil.

A Tabela 10 sintetiza a principal característica do município com base no portal Cidades do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

Tabela 10 - Característica do município de Tupã

Município	Área de Unidade Territorial (2022) [Km ²]	População Estimada (2021) [pessoas]	Densidade Demográfica (2010) [hab.Km ⁻²]	PIB per capita (2020) [R\$]	IDHM (2010)	Esgotamento Sanitário Adequado (2010) [%]
Tupã	627,986	65.615	100,99	31.059,21	0,771	97,4

Fonte: Elaborado pela autora com base em IBGE (2023)

A seguir será apresentada a gestão de resíduos, objeto de estudo desta pesquisa, realizada pelo município em questão.

3.3.2. Gestão de resíduos

De acordo com a série histórica do SNIS (BRASIL, 2022d), a geração de RSU no município de Tupã em 2021 foi de 42.690,90 toneladas.ano⁻¹ para uma população de 62.983 habitantes.

Ainda de acordo com a mesma fonte (BRASIL, 2022d), o município analisado possui coleta seletiva de resíduos, sendo que a quantidade total de materiais recolhidos foi de 2.681,10 toneladas.ano⁻¹ no ano de 2021. Entretanto, apesar de todo o material recolhido, apenas parte é realmente recuperada e o restante que não pode ser reaproveitado se torna rejeito e segue para o aterro sanitário. A Tabela 11, registra a quantidade de material reciclável recuperado e a Figura 15 aponta a incidência desses materiais no município.

O município de Tupã possui Plano Municipal de Saneamento Básico, elaborado nos termos estabelecidos na Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007a), sendo aprovado pela Lei Municipal nº 4.345, de 14 de fevereiro de 2008 (TUPÃ, 2008). Além disso, o município possui Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) estabelecido pelo Decreto

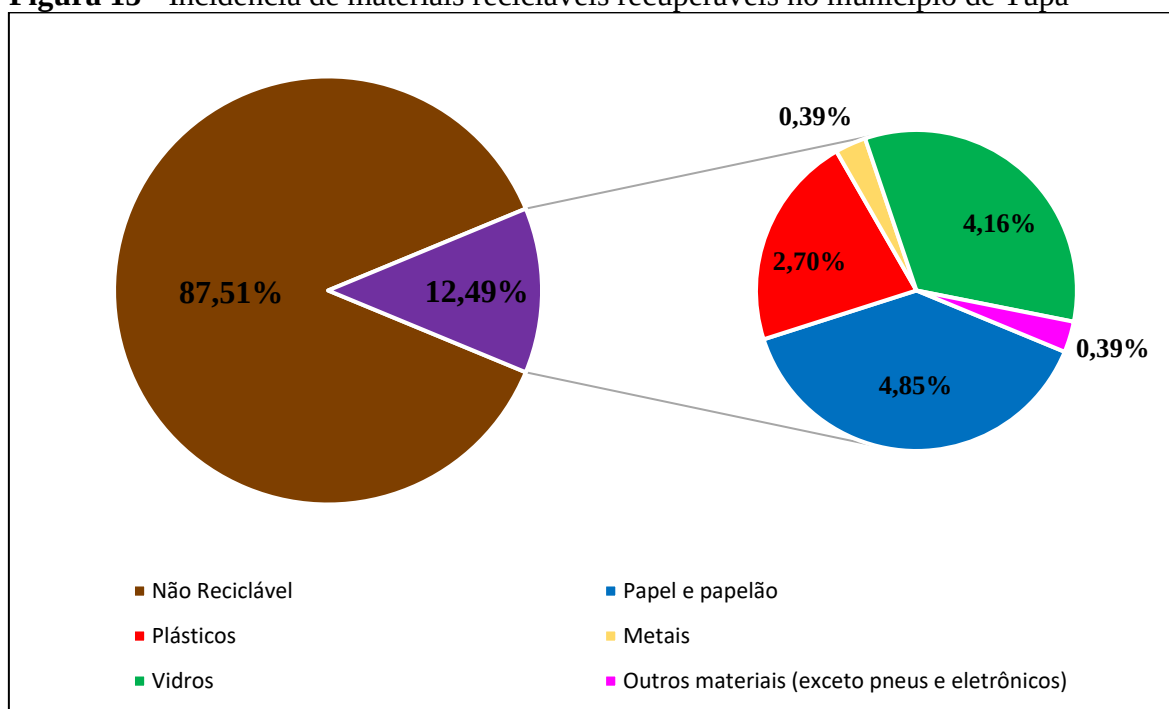
Municipal nº 6.823, de 22 de dezembro de 2011 (TUPÃ, 2011), conforme prevê a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Tabela 11 – Materiais recicláveis recuperados no município de Tupã no ano de 2021

Materiais Recicláveis Recuperados	Quantidade (t.ano⁻¹)
Papel e papelão	185,3
Plásticos	103
Metais	15
Vidros	158,8
Outros materiais (exceto pneus e eletrônicos)	14,8
Total	476,9

Fonte: Elaborado pela autora com base em BRASIL (2022d)

Figura 15 - Incidência de materiais recicláveis recuperáveis no município de Tupã



Fonte: Elaborado pela autora com base em BRASIL (2022d)

A CETESB avalia as condições operacionais dos locais de destinação final por meio de três índices de qualidade ambiental: Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR), Índice de Qualidade de Estação de Transbordo (IQT) e Índice de Qualidade de Usinas de Compostagem (IQC). A Tabela 15, apresenta os valores do IQR e do IQT dos anos de 2020 e 2021 do município de Tupã. Cabe ressaltar que a tabela não apresenta valores de IQC, uma vez que o município em questão não utiliza a compostagem como técnica de tratamento para resíduos orgânicos. Cabe ainda esclarecer que a Cetesb (2022) enquadra esses índices em: condição inadequada (0 à 7) e condição adequada (7,1 à 10). Na Tabela 12, para melhor visualização utilizou-se a cor vermelha para representar as condições inadequadas e a cor verde para representar as adequadas.

Tabela 12 - Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos (IQR) e Índice de Qualidade de Estação de Transbordo (IQT) no município de Tupã

Município	RSU (t.dia ⁻¹)	Inventário - IQR		Dispõe em	Inventário - IQT	
		2021	2022		2021	2022
Tupã	50,39	9,3	9,5	Quatá – A.P.	5,7	7,5

Fonte: São Paulo (2022; 2023)

Cor verde – representa um enquadramento adequado; Cor vermelha – representa um enquadramento inadequado.

Pela Tabela 12, nota-se que Tupã apresentou tanto em 2021 quanto em 2022 um IQR adequado. Com relação ao IQT, no ano de 2021 ele foi categorizado como inadequado, entretanto houve progresso e no ano de 2022 o índice obteve nota 7,5, estando assim dentro do padrão adequado.

Segundo São Paulo (2022), as alterações nas condições operacionais da disposição de resíduos podem ser causadas por vários motivos, dentre eles destaca o esgotamento de áreas para disposição final de resíduos e a dificuldade de seleção de novas áreas devido as restrições impostas no licenciamento, como restrições técnicas, locacionais e legais. Além disso, o órgão evidencia a dificuldade financeira dos municípios, que foi agravada pela crise econômica e pela diminuição de arrecadação, que influencia diretamente a disponibilidade de recursos para a operação dos aterros. Por fim, salienta a falta e dificuldade de implantação de políticas de reciclagem, reutilização e redução.

No caso do município de Tupã, a proposição da São Paulo (2022) se ratifica, pois o município recentemente esgotou todas as células de seu aterro sanitário, não dispondo mais de local adequado para disposição final desse resíduo. Dessa forma, o município dispõe os RSU em um local (chamado de transbordo) até que aconteça a transferência para um aterro particular localizado no município de Quatá-SP.

Tendo em vista todas as dificuldades apresentadas, é de suma importância buscar soluções mais adequadas e modernas para a gestão de resíduos sólidos, que tragam novas tecnologias de tratamento, além de soluções mais regionalizadas, para que assim, possa-se melhorar as condições de disposição final dos resíduos sólidos e minimizar os custos da gestão de resíduos, não só em Tupã, mas também em todo o país.

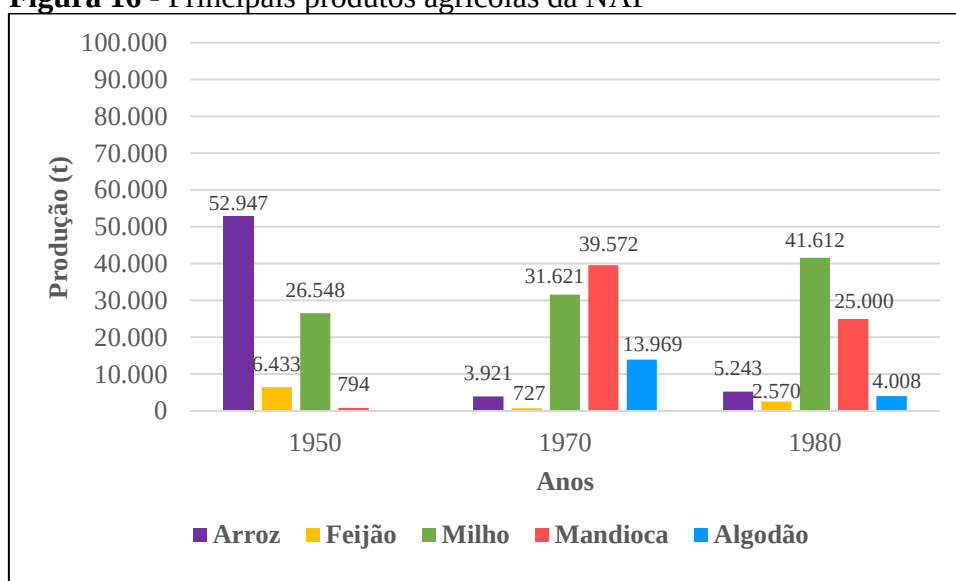
3.3.3. O agronegócio da região

Segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) da ESALQ/USP, em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), no ano de 2020 o agronegócio brasileiro representou 24,31% do Produto Interno Bruto (PIB) de toda a economia do Brasil (CEPEA, 2021).

No âmbito paulista, muitas regiões contribuem para este setor, inclusive a região da NAP, cuja vocação econômica predominante é a agropecuária. Essa região, de clima tropical e composta originalmente por uma vegetação de mata Atlântica Continental e de Cerrado (BOIN, 2000), foi explorada de forma expressiva pela pecuária e agricultura com o cultivo inicialmente de café, algodão, maracujá, arroz, feijão e milho e mais recentemente pelo cultivo da cana-de-açúcar e do amendoim (ROMA; GUIMARÃES, 2018).

A Figura 16 ilustra os principais produtos agrícolas da NAP nas décadas de 1950, 1970 e 1980.

Figura 16 - Principais produtos agrícolas da NAP



Fonte: Adaptado de Gil (2007)

Já a Tabela 13 aponta a produção agrícola da região da NAP nos anos de 2002, 2006 e 2008.

Tabela 13 - Produção das lavouras da NAP – 2002, 2006 e 2008 (toneladas)

Produção/Ano	2002	2006	2008
Arroz	1.052	303	306
Algodão	4.110	2.503	1.260
Banana	4.503	5.730	4.260
Uva	5.740	5.480	4.992
Feijão	7.498	3.341	3.510
Maracujá	12.701	7.493	7.172
Café	12.701	8.687	6.188
Amendoim	36.627	33.404	39.669
Milho	79.941	72.107	50.624
Cana-de-açúcar	3.635.557	8.363.015	13.517.469

Fonte: Adaptado de Roma e Guimarães (2018)

Como pode-se observar pela Tabela 13, a cultura da cana-de-açúcar teve grande expansão a partir da década de 2000. Segundo Gil (2007, p. 224) isso se deve ao fato do solo da região ser arenoso, com topografia plana e o clima tropical, fatores esses que favorecem o cultivo da cana-de-açúcar. Além disso, a autora destaca que a “degradação das pastagens, a descapitalização do produtor rural” e as inovações tecnológicas da engenharia agroeconômica contribuíram também para o crescimento do cultivo da cana nesta região.

Além da cana-de-açúcar, outro produto que merece destaque na região da NAP é a produção de ovos no município de Bastos. Segundo Sousa *et al.* (2017), o estado de São Paulo é o maior produtor deste produto no Brasil e o município de Bastos concentra essa produção.

Já o município de Junqueirópolis destaca-se pela produção de acerola, que segundo Lourenzani *et al.* (2015), é o maior polo produtivo do estado de São Paulo e o terceiro maior produtor brasileiro da fruta.

Também merece destaque a produção de amendoim. Segundo Roma e Guimarães (2018, p. 109) o cultivo deste grão favorece a recuperação do solo pelo cultivo canavieiro, pelo fato da sua capacidade de fixação de nitrogênio. Além do mais, devido à biotecnologia no melhoramento das sementes, é possível ter aumento de 100% das sacas colhidas, em média.

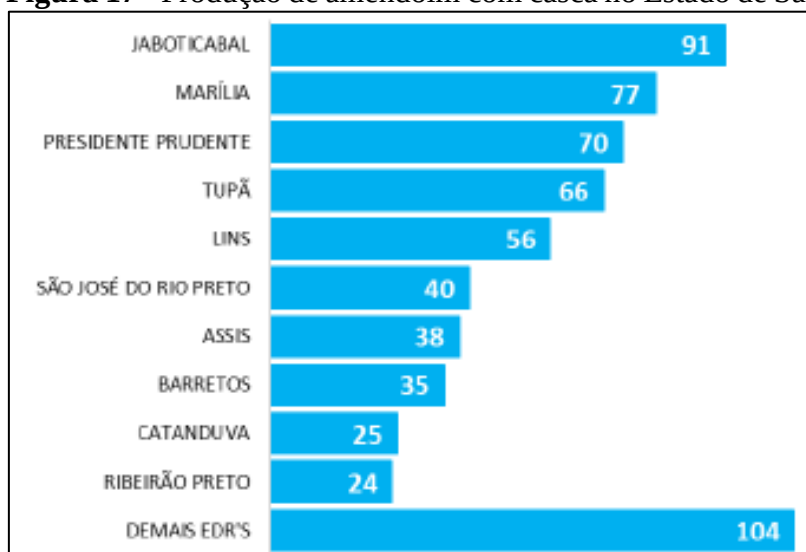
De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), destaca-se um aumento significativo da área plantada de amendoim especificadamente na região de Tupã, devido à existência de indústria processadora do produto. Assim os produtores desta região têm o amendoim como atividade principal de cultivo.

A seguir será discutido um pouco mais sobre a produção de amendoim no município de Tupã, objeto de estudo deste trabalho.

3.3.3.1. Produção de amendoim

O cultivo de amendoim no Brasil tem se mostrado interessante em algumas regiões do país devido as suas condições edafoclimáticas e geográficas que favorecem o cultivo deste grão (CONAB, 2015).

O estado de São Paulo produziu, no ano de 2020, mais de 620 mil toneladas de amendoim (FIESP, 2022c), com destaque para os EDR's de Jaboticabal, Marília, Presidente Prudente, Tupã e Lins, conforme representado na Figura 17.

Figura 17 - Produção de amendoim com casca no Estado de São Paulo em 2020 (mil toneladas)

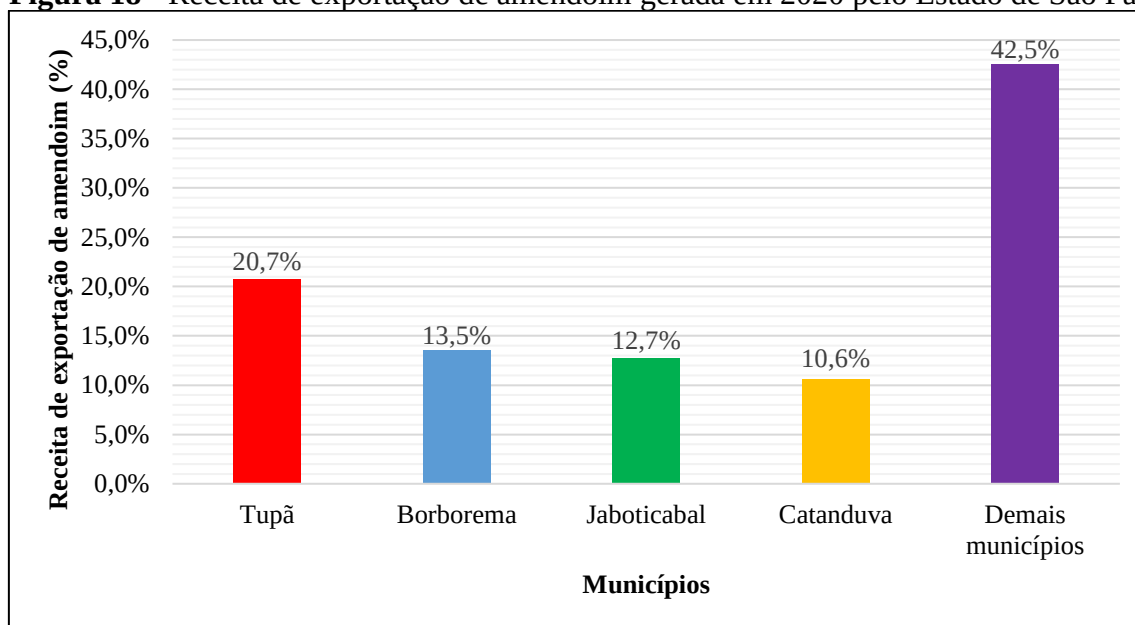
Fonte: Fiesp (2022c)

Segundo dados da Fiesp (2022a), houve aumento significativo na produção agrícola deste grão entre 2011 e 2020, que saltou de 331 para 684 mil toneladas, devido principalmente ao bom desempenho da produtividade, que cresceu 20% neste período. O bom desempenho se deve a três principais fatores:

i) investimentos nas áreas agrícolas e industriais, onde São Paulo conta com o maior parque industrial do País; ii) à profissionalização e especialização dos produtores de amendoim, que investiram no aprimoramento dos fatores de produção, como sementes mais eficientes e produtivas, melhora na prática agrícola, bem como em termos de infraestrutura das propriedades com investimentos em máquinas, equipamentos e implementos agrícolas que possibilitaram o aumento da produtividade e, consequentemente, da produção e do valor gerado na atividade; e iii) à sinergia e à organização dos agentes da cadeia produtiva, como, por exemplo, a implementação do Programa Pró-Amendoim, em meados de 2001, pela Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Amendoim e Balas (FIESP, 2022a, p. 4).

Atualmente o Brasil ocupa a 3ª posição global em exportação de amendoim, ficando atrás apenas da Argentina e do Senegal, sendo que sua produção atende cerca de 100 países. Ainda que com esse excelente desempenho, é possível aumentar as vendas externas deste produto devido as oportunidades existentes, pois enquanto o brasileiro consome cerca de 1,1 kg de amendoim por ano, os norte-americanos, por exemplo, consomem 6,7 13 kg.hab⁻¹.ano⁻¹ e os chineses 13 kg.hab⁻¹.ano⁻¹ (FIESP, 2022b).

Conforme mencionado anteriormente, a região de Tupã tem se destacado na produção de amendoim, devido a existência de indústrias processadoras do grão (CONAB, 2021), sendo grande parte desta produção voltada à exportação do produto. A Figura 18, ilustra os principais municípios exportadores (em receita) do estado de São Paulo.

Figura 18 - Receita de exportação de amendoim gerada em 2020 pelo Estado de São Paulo

Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da Fiesp (2022a)

Conforme pode-se observar pela Figura 18, o município de Tupã se destaca com 20,7% da receita de exportação de amendoim gerada pelo Estado de São Paulo no ano de 2020, seguido pelo município de Borborema, Jaboticabal e Catanduva.

A Tabela 14, apresenta dados de área de produção (em hectares) e de produtividade (em sacas de 25 kg) de amendoim no EDR de Tupã nos anos de 2020 e de 2021.

Tabela 14 - Área de produção e produtividade de amendoim na região da Tupã (2020 e 2021)

EDR	Área em Produção (ha)		Produtividade (sc. 25 kg)	
	2020	2021	2020	2021
Tupã	16.015,00	19.255,00	2.653.000,00	3.368.600,00

Fonte: Elaborado pela autora com base em IEA (2022)

A partir dos dados de produtividade de amendoim em Tupã do IEA (2022), que foram apresentados na Tabela 14, e utilizando um fator médio de 80/20 (FIESP, 2022c) na produção de amendoim com casca, em que 80% do amendoim representa o grão e 20% representam a casca (em massa), foi elaborado a Tabela 15.

Tabela 15 - Produção de casca de amendoim no município de Tupã (2020 e 2021)

	2020	2021
Produtividade de amendoim (sc. 25 kg)	2.653.000,00	3.368.600,00
Produtividade (toneladas)	66.325,00	84.215,00
Casca de Amendoim (toneladas)*	13.265,00	16.843,00

Fonte: Elaborado pela autora com base em IEA (2022) e FIESP (2022c)

* Fator de Correção (FIESP, 2022c, p. 3) - 80/20 (amendoim/casca)

Por fim, cabe destacar a carência de dados de produção agrícola do amendoim que pode prejudicar o planejamento estratégico do setor e a formulação de políticas públicas. Apesar dos ajustes realizados pelos órgãos oficiais (considerando as melhores fontes de dados oficiais disponíveis, a produção, a área plantada e a produtividade da cultura), faz-se necessário uma melhor organização das estatísticas oficiais de modo a refletir a real produtividade nacional, que pode ser auxiliada pelo setor privado (FIESP, 2022a). Entretanto, apesar da insuficiência de dados, pode-se notar a tendência de crescimento da cultura nos últimos anos.

3.4. Lógica *Fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* foi conceituada por Lotfi A. Zadeh na Universidade da Califórnia em 1965 (ZADEH, 1965). Diferente da lógica de Aristóteles, que tratava os valores em uma lógica binária (sim ou não, verdadeiro ou falso, branco ou preto, etc.), a Lógica *Fuzzy*, também conhecida como Lógica Difusa, foi elaborada a fim de conseguir capturar os graus de incerteza ou graus de verdade presentes nas decisões reais que a mente humana é capaz de realizar, uma vez que “o mundo real não é bivalente, é na realidade multivalente, com um infinito espectro de opções em vez de duas” (MALUTTA, 2004, p. 74).

Desta maneira, a Lógica *Fuzzy* é basicamente utilizada para expressar informações indefinidas do raciocínio lógico humano em linguagem matemática. Assim, ela consegue capturar informações imprecisas e convertê-las para uma forma numérica, que pode ser manipulada por computadores.

Como exemplo, pode-se citar o uso da Lógica *Fuzzy* na agronomia, como é o caso do estudo de Góes (2020) que por meio de uma modelagem *fuzzy* verificou os efeitos em relação às variáveis biométricas, nutricionais e de produtividade de grãos de soja. O uso na área ambiental, como o estudo de Marques (2017) que utilizou a lógica *fuzzy* para a concepção de uma rede de logística reversa para a recuperação de lixo eletrônico e o estudo de Duarte (2022) que fez uma previsão de suscetibilidade à incêndios e queimadas baseado em inferência *fuzzy*. A lógica também é utilizada na área médica, como o estudo de Bordinhon (2017) que criou um sistema inteligente *fuzzy* para classificar os fatores de risco à saúde, dentre tantas outras áreas que a teoria da lógica *fuzzy* pode permear.

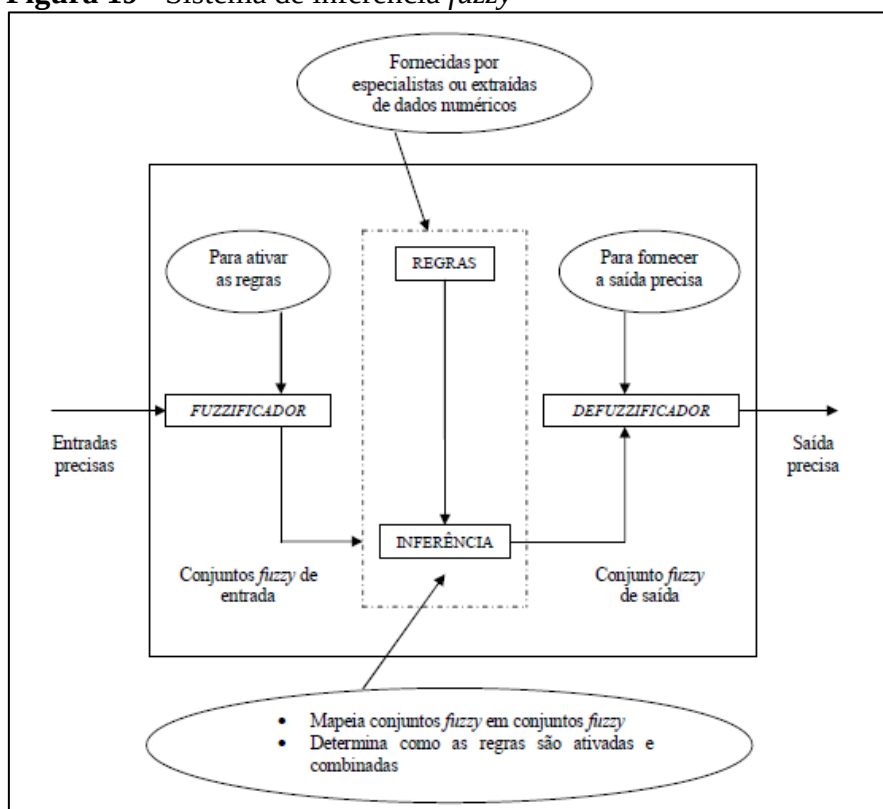
O conjunto de regras utilizado na inferência *fuzzy* é do tipo “Se-Então”, adequado para organizar estruturas imprecisas ou até discrepantes nos mais variados tipos de processo. Shaw e Simões (1999) citam as principais vantagens do método.

- Simplicidade para especificar as regras de controle (próxima ao raciocínio lógico humano);

- Facilitação da estrutura do processo;
- Múltiplos objetivos de controle;
- Incorporação simples do conhecimento de especialistas humanos.
- Tratamento superior das incertezas dos sensores utilizados;

Um sistema de inferência *fuzzy* se caracteriza basicamente por três componentes: (1) o *fuzzificador* (processador de entrada), (2) o método de inferência *fuzzy*, baseado nas regras linguísticas, e o (3) *defuzzificador* (processador de saída), conforme apontado pela Figura 19.

Figura 19 - Sistema de inferência *fuzzy*



Fonte: Malutta (2004)

O *fuzzificador* está localizado na entrada do sistema e tem a função de modificar as informações de entrada em conjuntos nebulosos, a partir de funções de pertinência.

Sendo X o universo de discurso e x caracterizado pela função de pertinência $\mu_A(x)$ que possui valores no intervalo $iZ[0, 1]$. Se existem m conjuntos *Fuzzy* como $A_1(x)$, $A_2(x)$, $A_m(x)$ com m funções de pertinência $\mu_{A_i}(x)$, $iZ1, 2, m$. A base de conhecimento abarca a base de dados e a base de regras. As funções de pertinência dos conjuntos *Fuzzy* estão contidas na base de dados. A base de regras é um conjunto de termos linguísticos no formato de regras SE-ENTÃO (IF_THEN) com antecedentes e consequentes, respectivamente, conectados por operador lógico “E” (AND) (MOLLO NETO, 2007, p. 17).

O método de inferência *fuzzy* é elaborado a partir de regras criadas por especialistas da área, que articulam as entradas e saídas linguísticas. Esse sistema avalia o grau de relevância

das variáveis, inferindo o acionamento de regras que regem o sistema (FORTI *et al.*, 2020). A lógica utilizada por esse sistema, simula a tomada de decisões humanas, pois gera ações (consequências) a partir da inferência de um conjunto de condições de entrada.

Segundo Gabriel (2008, p. 37), “uma variável linguística u pode ser associada a um conjunto de termos linguísticos por uma função $T(u)$, sendo que tais termos podem ser números *fuzzy* sobre um conjunto universo U .”

[...] para definir um número *fuzzy*, precisamos introduzir o conceito de α - nível de um conjunto *fuzzy* A .

Definição 2: Sejam A um conjunto *fuzzy* e $\alpha \in [0,1]$. Definimos como α - nível de A o conjunto $[A]^\alpha = \{x \in U: \mu_A(x) \geq \alpha\}$.

Definição 3: Seja A um conjunto *fuzzy*. O suporte de A , $\text{supp } A$, são todos os elementos de U que têm grau de pertinência diferente de zero em A , ou seja,

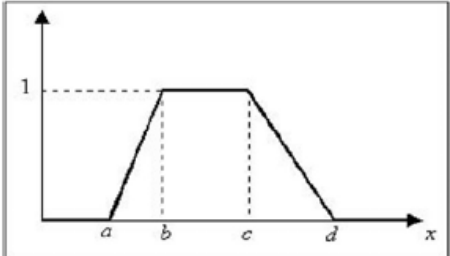
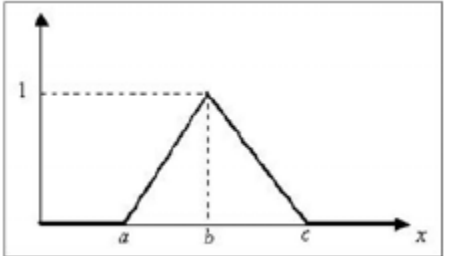
$$\text{supp } A = \{x \in U: \mu_A(x) > 0\}$$

Definição 4: Um conjunto *fuzzy* A é chamado de número *fuzzy* quando o conjunto universo, onde A está definido é o conjunto de números reais, ou seja, $\mu_A: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$, e satisfaz as seguintes condições:

- (i) $[A]^\alpha \neq \emptyset, \forall \alpha \in [0,1]$;
- (ii) $[A]^\alpha$ é um intervalo fechado, $\forall \alpha \in [0,1]$;
- (iii) O suporte de A é limitado. (GABRIEL, 2008, p. 34)

Os números *fuzzy* mais habituais são os triangulares e os trapezoidais, conforme apontado pela Tabela 16.

Tabela 16 - Demonstração do conjunto de regras para construção das funções de pertinência do modelo *fuzzy*.

TRAPEZOIDAL (trapmf)	TRIANGULAR (trimf)
$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{if } a \leq x < b \\ 1 & \text{if } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{if } c < x \leq d \\ 0 & \text{caso oposto} \end{cases}$ Ou $\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0)$	$f(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{if } a < x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{if } b < x \leq c \\ 0 & \text{caso oposto} \end{cases}$ Ou $\text{trimf}(x; a, b, c) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}, 0)$
	

Os métodos de inferência mais conhecidos e aplicados são o *Mamdani Systems* (MAMDANI; ASSILIAN, 1975) e o *Sugeno Systems* (TAKAGI; SUGENO, 1985; SUGENO; KANG, 1988).

O método de Mamdani, proposto nesta pesquisa, foi criado por Ebrahim H. Mamdani, na década de 1970, em que o mesmo propôs um sistema de inferência *fuzzy*, cujas regras de produção possuem relações do tipo SE-ENTÃO que considera tanto seus antecedentes como seus consequentes. Devido a sua simplicidade, esse sistema é amplamente utilizado como método para a resolução de problemas reais (MOLLO NETO, 2007).

A relação criada neste modelo entre as entradas e saídas segue as seguintes funções de pertinência:

- em cada uma das regras da base de regras *Fuzzy*, adota-se o operador matemático *mínimo* para o conectivo lógico “e”.
- adota-se o *máximo* para o conectivo lógico “ou” para conectar as regras *Fuzzy* da base de regras.
- as sentenças “se...então...” são modeladas pela aplicação *mínimo*, que erroneamente costuma ser denominada por implicação de Mamdani (O *mínimo* não é uma implicação *Fuzzy*) (MOLLO NETO, 2007, p. 20).

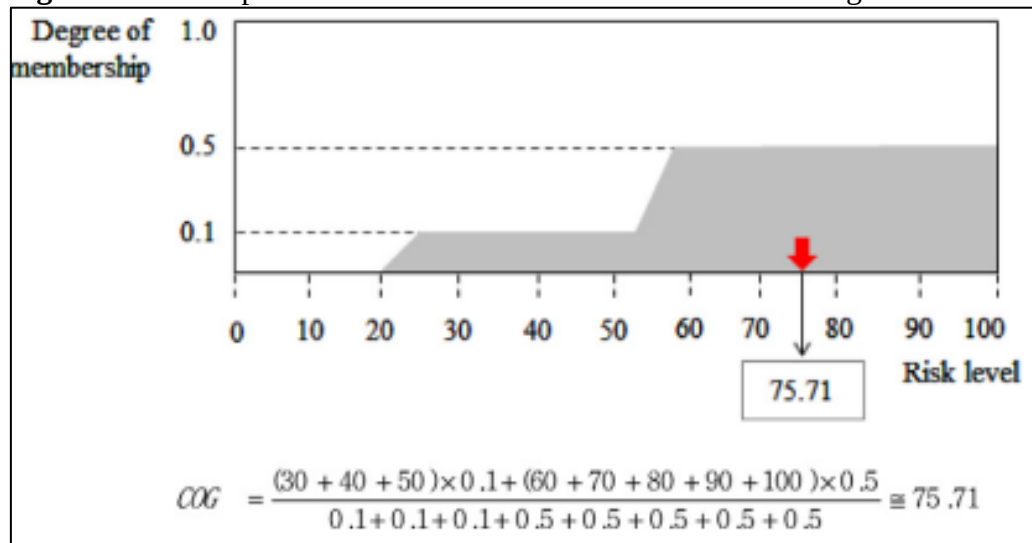
Após o sistema de inferência ser realizado, é feita a *defuzzificação*, que tem o objetivo de alterar os conjuntos nebulosos obtidos para valores não nebulosos, gerando assim um número real como saída (MALLUTTA, 2004). Os métodos mais utilizados para essa conversão são: centro de massa e média dos máximos.

O método de centro de massa ou centro de gravidade, proposto nesta pesquisa, determina a abscissa do ponto do centro de massa correspondente a um conjunto *fuzzy* de saída dado, proveniente de uma base de conhecimento processada, e utiliza essa abscissa como valor de saída.

Para esse cálculo é realizada uma amostragem de pontos e realizada a média ponderada dos mesmos, conforme exemplo mostrado na Figura 20.

A seguir, serão abordados os procedimentos metodológicos utilizados, a fim de apontar as variáveis que serão utilizadas no estudo, as regras do método criado para a inferência *fuzzy*, as análises estatísticas que serão realizadas para validar o sistema criado e, por fim, a metodologia usada para estimar os valores da área de estudo para inserção no sistema.

Figura 20 - Exemplo de cálculo de centro de massa ou centro de gravidade



Fonte: Oh, Yang e Lee (2012)

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, para melhor entendimento da base metodológica aplicada é necessário um delineamento da metodologia a ser adotada bem como a definição de alguns conceitos.

O cunho científico do trabalho propicia a produção de conhecimento dirigido para a resolução de problemas da sociedade de um modo crítico em que os dados são analisados de maneira sistematizada (COLLIS; HUSSEY, 2010; PEREIRA et al., 2018). Nesta pesquisa, buscou-se gerar um modelo, com base em estudos com rigor científico, que possibilite a aplicação em diversas regiões do país, a fim de classificar um CDR quanto a sua qualidade, conforme delimitação dada pela ABNT (2020).

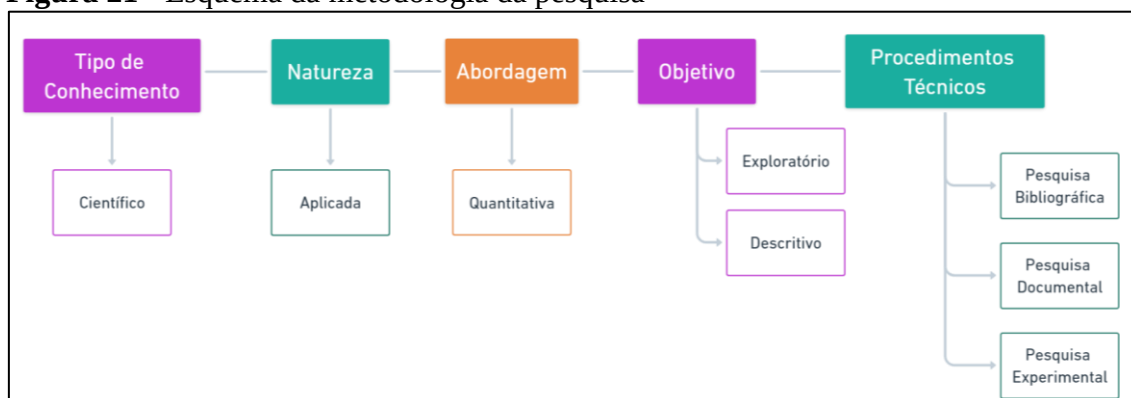
A natureza aplicada do estudo permite gerar conhecimentos dirigidos à solução de problemas específicos para aplicações práticas (BARROS; LEHFELD, 2000), neste caso a utilização de rejeitos de RSU com casca de amendoim para a geração de um CDR para fins energéticos.

Além disto, a pesquisa apresentou uma abordagem quantitativa, pois o enfoque matemático, ao ser gerado um modelo, permitiu a previsão de acontecimentos (PEREIRA et al., 2018).

Quanto ao seu objetivo, a pesquisa teve caráter exploratório e descritivo, dado que pesquisas exploratórias têm como propósito familiarizar o pesquisador ao problema, com vista a torná-lo mais explícito e estudos descritivos possibilitam conceber particularidades de um determinado fenômeno ou de uma população. Sendo assim, a partir da pesquisa exploratória e descritiva foi possível detalhar a relação entre o CDR e a aplicação da casca do amendoim como componente auxiliar de um combustível, bem como identificar as variáveis que servirão como critérios de análise do sistema.

Com relação aos procedimentos técnicos, o estudo contou com uma pesquisa bibliográfica em bases científicas de alcance mundial e com uma pesquisa documental, caracterizada por Sá-Silva, Almeida e Guindani (2009), como uma investigação em documentos que não foram tratados cientificamente, como relatórios, reportagem de jornais, de revistas, filmes entre outros materiais utilizados para divulgação. Além disto, foi utilizada a pesquisa experimental com análises em laboratório para levantamento das variáveis do município avaliado.

Objetivando facilitar o entendimento, a Figura 21 apresenta um resumo dos procedimentos metodológicos aplicados na tese.

Figura 21 - Esquema da metodologia da pesquisa

Fonte: Elaborado pela autora

A seguir será apontado as etapas de realização do trabalho.

4.1. Realização da revisão bibliográfica sobre o tema proposto

O estudo contou com uma pesquisa bibliográfica em bases científicas de alcance mundial (*Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* e *Scielo*) e do Portal de Periódicos da Capes, para apresentar e caracterizar o que venha a ser um CDR. Além disso, apontou as classificações, bem como possíveis utilizações energéticas para um combustível formado a partir de resíduos.

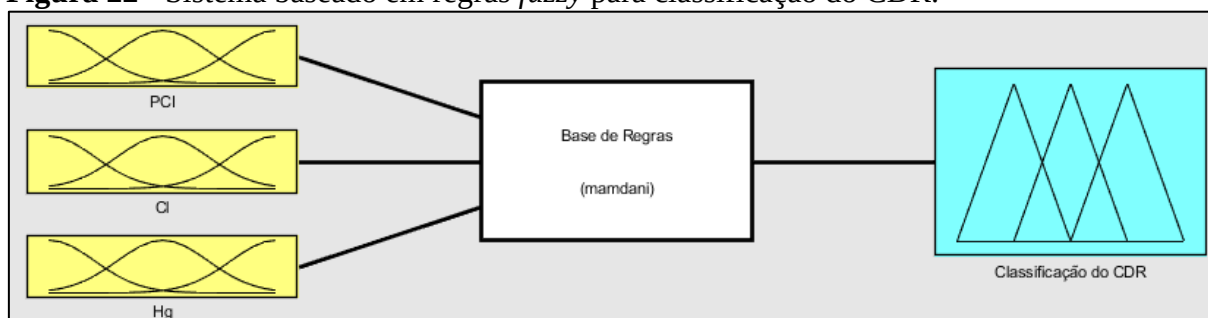
Além disto, foi utilizada uma pesquisa bibliográfica nas legislações brasileiras e do estado de São Paulo para categorizar os marcos regulatórios para o tratamento térmico de resíduos, na qual o CDR está envolvido.

4.2. Modelagem fuzzy para classificação de CDR

Para a elaboração das funções de pertinência e de gráficos, foi utilizada a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox*, do software *MATLAB*[®], bem como o uso de planilhas eletrônicas (Microsoft Excel). Ambos os softwares estão licenciados para o uso na Faculdade de Ciências e Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

A partir da pesquisa bibliográfica nas bases de dados científicas e dos limites estabelecidos pelas legislações do Brasil e do mundo, foram definidas as variáveis de entrada a serem utilizadas na modelagem. Notou-se que as três principais variáveis que determinam a qualidade de um CDR são: PCI, teor de cloro e teor de mercúrio. Como variável de saída, propôs-se a classificação do CDR.

Dessa forma, foi considerado o seguinte modelo matemático para representar a situação: $F: A \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow B \subset \mathbb{R}$, sendo $\mathbb{R}$ o conjunto dos números reais; A o conjunto das variáveis de entrada e B o conjunto das variáveis de saída. A Figura 22 apresenta as variáveis de entrada e a de saída propostas na modelagem.

Figura 22 - Sistema baseado em regras *fuzzy* para classificação do CDR.

Fonte: Elaborado pela autora

Para estabelecer o conjunto de regras linguísticas, adaptou-se a Tabela 4 da ABNT (2020) que propunha os limites de classificação dos RSUE, conforme apontado pela Tabela 17.

Tabela 17 - Limites para classificação dos CDR

Unidade	Característica de Classificação			
	Classes			
PCI (base seca) kcal.kg⁻¹	P1 PCI ≥ 4.750	P2 4.750 > PCI ≥ 3.580	P3 3.580 > PCI ≥ 2.390	P4 PCI < 2.390
Teor de Cloro %	C1 Cl $\leq 0,5$	C2 0,5 < Cl $\leq 1,5$	C3 1,5 < Cl $\leq 3,0$	C4 Cl > 3,0
Teor de Mercúrio mg.kg⁻¹	H1 Hg $\leq 0,1$	H2 0,1 < Hg $\leq 0,25$	H3 0,25 < Hg $\leq 0,5$	H4 Hg > 0,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2020)

P – Poder Calorífico Inferior; C – Teor de Cloro; H – Teor de Mercúrio

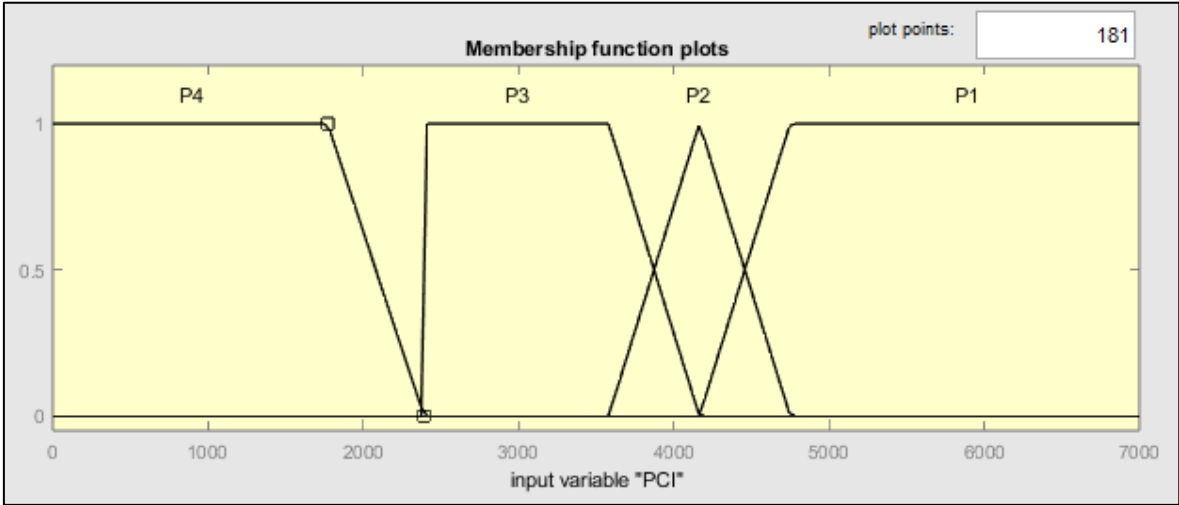
Funções de pertinência triangulares e trapezoidais foram utilizadas para definir as variáveis de entrada. A Tabela 18 aponta a definição do grau de pertinência das variáveis de entrada. As Figuras 23, 24 e 25 ilustram o grau de pertinência para cada uma das variáveis: PCI, teor de cloro e teor de mercúrio, respectivamente.

Tabela 18 - Definição do grau de pertinência das variáveis

Variável	Conjunto Fuzzy	Tipo de Função	Limitador
Poder Calorífico Inferior	P4	Trapezoidal	[-436 -46.3 1770 2390]
	P3	Trapezoidal	[2390 2390 3580 4165]
	P2	Triangular	[3580 4165 4750]
	P1	Trapezoidal	[4165 4750 10000 10000]
Teor de Cloro	C1	Trapezoidal	[-1 -0.5265 0.5 1]
	C2	Triangular	[0.5 1 1.5]
	C3	Trapezoidal	[1 1.5 3 3]
	C4	Triangular	[3 3.5 5.167]
Teor de Mercúrio	H1	Trapezoidal	[-0.2 – 0.1032 0.1 0.175]
	H2	Triangular	[0.1 0.175 0.25]
	H3	Trapezoidal	[0.175 0.25 0.5 0.5]
	H4	Triangular	[0.5 0.7 1]

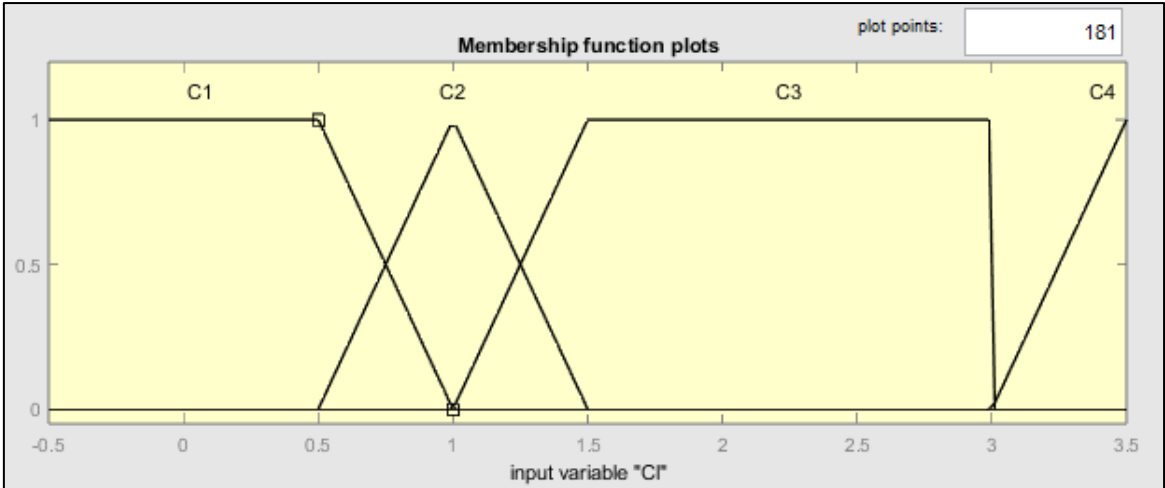
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 23 - Grau de pertinência para conjuntos *fuzzy* da variável de entrada PCI.



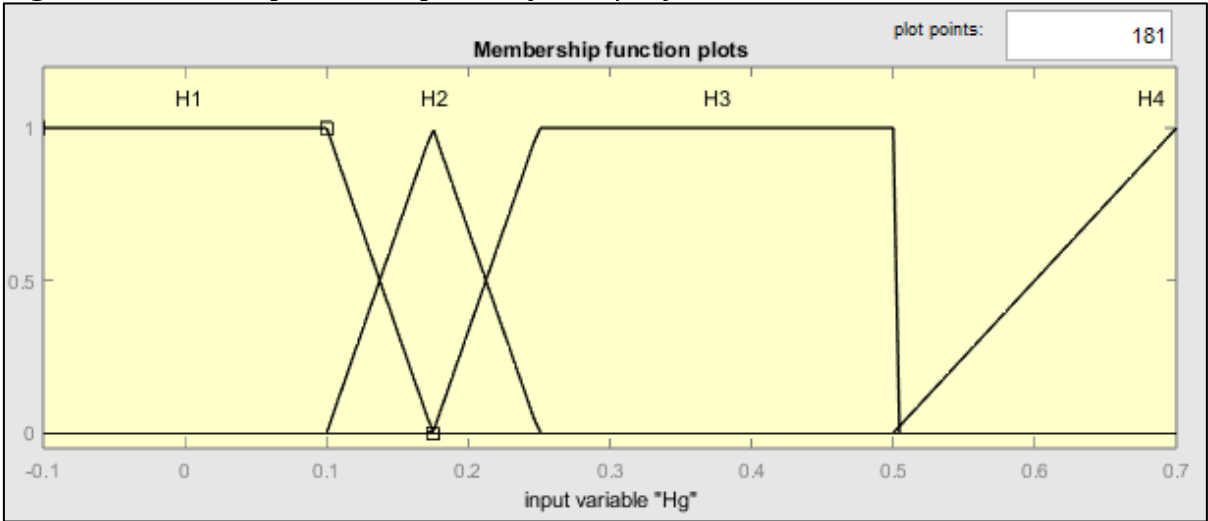
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 24 - Grau de pertinência para conjuntos *fuzzy* da variável de entrada teor de cloro



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 25 - Grau de pertinência para conjuntos *fuzzy* da variável de entrada teor de mercúrio



Fonte: Elaborado pela autora

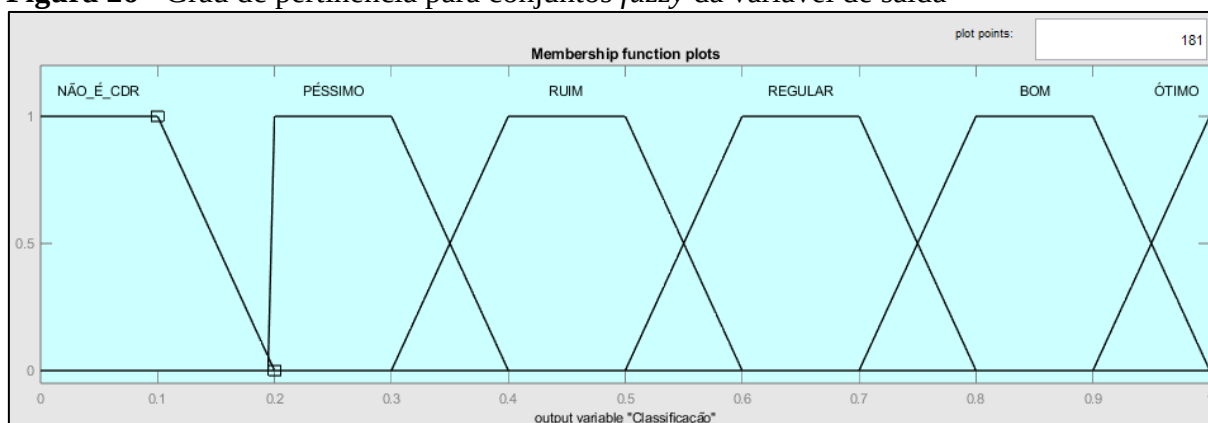
A variável de saída do sistema foi denominada “Classificação do CDR” e foi gerado um número real para o intervalo [0,1]. As funções de pertinência são do tipo trapezoidais e os graus de pertinência da variável são apontados na Tabela 19 e na Figura 26.

Tabela 19 - Definição do grau de pertinência da variável de saída

Conjunto Fuzzy	Tipo de Função	Limitador
Não é um CDR	Trapezoidal	[-0.375 – 0.1 0.1 0.2]
Péssimo	Trapezoidal	[0.2 0.2 0.3 0.4]
Ruim	Trapezoidal	[0.3 0.4 0.5 0.6]
Regular	Trapezoidal	[0.5 0.6 0.7 0.8]
Bom	Trapezoidal	[0.7 0.8 0.9 1]
Ótimo	Trapezoidal	[0.9 1 1 10]

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 26 - Grau de pertinência para conjuntos *fuzzy* da variável de saída



Fonte: Elaborado pela autora

Como cada uma das três variáveis de entrada apresentam 4 classes, foram realizadas sessenta e quatro ($4 \times 4 \times 4$) combinações entre os conjuntos *fuzzy*. Para a construção da base de regras do sistema, foi levado em consideração a análise de especialistas por meio da aplicação de um questionário estruturado (Apêndice A), por meio do aplicativo *Google Forms*^{®12}. O Quadro 5 apresenta as regras adotadas na modelagem.

Quadro 5 - Base de regras do sistema *fuzzy* para classificação de um CDR.

Regra	Variáveis de Entrada			Variável de Saída
	PCI	Teor de Cloro	Teor de Mercúrio	Classificação do CDR
1	P1	C1	H1	ÓTIMO
2	P1	C1	H2	BOM
3	P1	C1	H3	REGULAR
4	P1	C1	H4	Não é CDR
5	P1	C2	H1	BOM

¹² Após avaliação realizada pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista - UNESP/Campus Presidente Prudente, solicitada por meio da Plataforma Brasil, a pesquisa foi dispensada de análise, justificada pela Resolução n° 674 de 06 de maio de 2022, Art. 26, Inciso XI.

Continua.

Regra	Variáveis de Entrada			Variável de Saída
	PCI	Teor de Cloro	Teor de Mercúrio	Classificação do CDR
6	P1	C2	H2	BOM
7	P1	C2	H3	REGULAR
8	P1	C2	H4	Não é CDR
9	P1	C3	H1	REGULAR
10	P1	C3	H2	REGULAR
11	P1	C3	H3	RUIM
12	P1	C3	H4	Não é CDR
13	P1	C4	H1	Não é CDR
14	P1	C4	H2	Não é CDR
15	P1	C4	H3	Não é CDR
16	P1	C4	H4	Não é CDR
17	P2	C1	H1	BOM
18	P2	C1	H2	BOM
19	P2	C1	H3	REGULAR
20	P2	C1	H4	Não é CDR
21	P2	C2	H1	BOM
22	P2	C2	H2	REGULAR
23	P2	C2	H3	RUIM
24	P2	C2	H4	Não é CDR
25	P2	C3	H1	REGULAR
26	P2	C3	H2	REGULAR
27	P2	C3	H3	RUIM
28	P2	C3	H4	Não é CDR
29	P2	C4	H1	Não é CDR
30	P2	C4	H2	Não é CDR
31	P2	C4	H3	Não é CDR
32	P2	C4	H4	Não é CDR
33	P3	C1	H1	REGULAR
34	P3	C1	H2	REGULAR
35	P3	C1	H3	RUIM
36	P3	C1	H4	Não é CDR
37	P3	C2	H1	REGULAR
38	P3	C2	H2	RUIM
39	P3	C2	H3	RUIM
40	P3	C2	H4	Não é CDR
41	P3	C3	H1	RUIM
42	P3	C3	H2	RUIM
43	P3	C3	H3	PÉSSIMO
44	P3	C3	H4	Não é CDR
45	P3	C4	H1	Não é CDR
46	P3	C4	H2	Não é CDR
47	P3	C4	H3	Não é CDR

Continua.

Regra	Variáveis de Entrada			Variável de Saída
	PCI	Teor de Cloro	Teor de Mercúrio	Classificação do CDR
48	P3	C4	H4	Não é CDR
49	P4	C1	H1	Não é CDR
50	P4	C1	H2	Não é CDR
51	P4	C1	H3	Não é CDR
52	P4	C1	H4	Não é CDR
53	P4	C2	H1	Não é CDR
54	P4	C2	H2	Não é CDR
55	P4	C2	H3	Não é CDR
56	P4	C2	H4	Não é CDR
57	P4	C3	H1	Não é CDR
58	P4	C3	H2	Não é CDR
59	P4	C3	H3	Não é CDR
60	P4	C3	H4	Não é CDR
61	P4	C4	H1	Não é CDR
62	P4	C4	H2	Não é CDR
63	P4	C4	H3	Não é CDR
64	P4	C4	H4	Não é CDR

Fonte: Elaborado pela autora

P – Poder Calorífico Inferior; C – Teor de Cloro; H – Teor de Mercúrio

Para calcular o valor numérico da variável de saída, utilizou-se o método de inferência Mamdani. Para a *defuzzificação*, foi utilizado o método de centro de massa ou centro de gravidade.

4.3. Cenários hipotéticos

A fim de simular alguns cenários hipotéticos para o modelo, considerou-se 6 possibilidades:

- Cenário 1: PCI = 2.000 kcal.kg⁻¹, Cl = 3,5% e Hg = 0,7 mg.kg⁻¹;
- Cenário 2: PCI = 2.400 kcal.kg⁻¹, Cl = 2,0% e Hg = 0,3 mg.kg⁻¹;
- Cenário 3: PCI = 3.000 kcal.kg⁻¹, Cl = 2,5% e Hg = 0,2 mg.kg⁻¹;
- Cenário 4: PCI = 4.000 kcal.kg⁻¹, Cl = 2,0% e Hg = 0,0 mg.kg⁻¹;
- Cenário 5: PCI = 4.800 kcal.kg⁻¹, Cl = 0,0% e Hg = 0,2 mg.kg⁻¹;
- Cenário 6: PCI = 5.000 kcal.kg⁻¹, Cl = 0,3% e Hg = 0,0 mg.kg⁻¹;

Os resultados desses cenários, serão expostos no tópico de Resultados e Discussões.

4.4. Caracterização das amostras coletadas no município de Tupã

Com a finalidade de verificar a efetividade da modelagem obtida, aplicou-se o modelo de classificação para amostras de CDR do município de Tupã, sendo que em algumas dessas amostras foram inseridos diferentes percentuais de casca de amendoim para verificar se a incorporação desse tipo de composto pode melhorar a qualidade do CDR.

4.4.1. Coleta e preparo das amostras

O material utilizado neste estudo foi somente o rejeito proveniente da coleta dos RSU do município de Tupã, São Paulo, Brasil, ou seja, eliminou-se toda a fração passível de ser reciclada durante a coleta. A Figura 27 apresenta a Estação de Transbordo do município em questão, onde foi realizada a coleta do material no dia 25 de julho de 2023.

Figura 27 - Estação de Transbordo Municipal



Fonte: Foto tirada pela autora em 25 de julho de 2023

Na estação de transbordo o material fica acondicionado em quatro contêineres e à medida que um container se enche, o mesmo é transportado para o Aterro Sanitário do município de Quatá. No dia da coleta, apenas um dos contêineres tinham resíduos, sendo assim, para conseguir variabilidade na retirada do rejeito, optou-se por retirar material de cinco pontos distintos, conforme mostrado pela Figura 28.

Figura 28 - Coleta das amostras



Fonte: Foto tirada pela autora em 25 de julho de 2023

Na sequência, o material foi levado a Central de Laboratórios (Figura 29) da Faculdade de Ciências e Engenharia (FCE/UNESP) e o mesmo foi pesado em uma balança eletrônica digital da marca BAISEC, modelo 40 kg (Figura 30), até a obtenção de uma massa de 5 kg, sendo o excesso coletado, devidamente descartado.

Figura 29 - Central de Laboratórios da FCE/UNESP



Fonte: Foto tirada pela autora em 25 de julho de 2023

Figura 30 – Determinação da massa do material



Fonte: Foto tirada pela autora em 25 de julho de 2023

No mesmo dia, uma agroindústria do município disponibilizou 5 kg de casca de amendoim proveniente de seu processo produtivo para que as amostras desse estudo pudessem ser formadas.

Para formação das amostras, inicialmente foi necessário realizar a trituração de 500g de casca de amendoim. Para isso, foi utilizado um moinho de facas da marca MARCONI, do Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP) conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 - Trituração da casca de amendoim



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 26 de julho de 2023

Com relação ao rejeito, para estabelecer um padrão de homogeneização para posterior trituração de 500 g de amostra, foram realizados dois quarteamentos seguidos, conforme pode-se observar pela Figura 32. O processo de quarteamento, segundo estabelecido pela NBR 10.007 (ABNT, 2004b), é a divisão da amostra em quatro partes iguais em que são escolhidas duas partes opostas entre si para representar a amostra total, enquanto as outras duas alíquotas são descartadas. O processo de quarteamento pode ser feito quantas vezes necessárias até atingir a massa desejada para posteriores análises.

Figura 32 - Homogeneização da amostra a partir do método de quarteamento

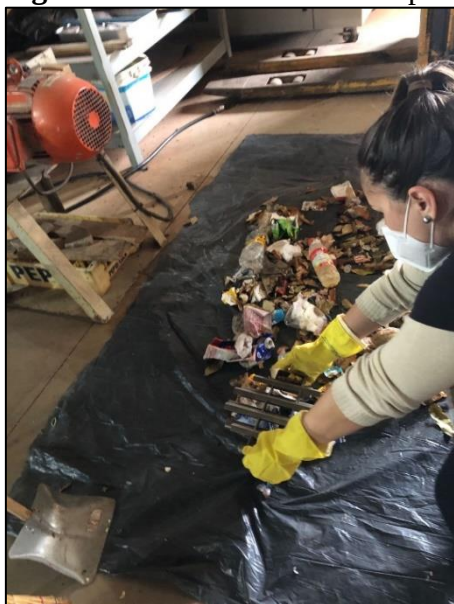


Fonte: Fotos tiradas pela autora em 26 de julho de 2023

Na sequência, foi passado sobre os rejeitos um ímã para a retirada de materiais magnéticos presentes no material (Figura 33), a fim de não danificar o equipamento, caso existisse algum parafuso, por exemplo, na amostra. Em seguida o material foi triturado por um moinho de facas da marca SEIBT e modelo MGHS6/230 (Figura 34) também localizado no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP).

Posteriormente misturou-se diferentes percentuais de rejeito com casca de amendoim (ambos triturados), baseado nas proporções do estudo de Gundim (2022), para formação de cinco tipos diferentes de amostras de 20 g cada. Para isso, utilizou-se uma balança analítica da marca MARTE e modelo AY220 (Figura 35) localizada no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP). A Tabela 20, apresenta as diferentes composições das cinco amostras.

Figura 33 - Retirada de metais presentes no rejeito



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 26 de julho de 2023

Figura 34 - Trituração dos rejeitos



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 26 de julho de 2023

Figura 35 - Balança analítica para formação das amostras

Fonte: Fotos tiradas pela autora em 27 de julho de 2023

Tabela 20 - Composição das amostras

Amostras	Percentual de rejeito	Percentual de casca de amendoim	Massa de rejeito	Massa de casca de amendoim
A ₁	100%	0	20 g	0
A ₂	90%	10%	18 g	2 g
A ₃	75%	25%	15 g	5 g
A ₄	50%	50%	10 g	10 g
A ₅	0	100%	0	20 g

Fonte: Elaborado pela autora

Após a preparação das amostras, todas feitas em triplicatas, deu-se início ao processo de determinação do poder calorífico, teor de mercúrio e teor de cloro, conforme será apresentado a seguir.

4.4.2. Determinação de poder calorífico inferior

Para determinação do poder calorífico inferior, é necessário, previamente, a determinação da umidade do material. Para isso, utilizou-se uma balança de umidade à infravermelho (Figura 36) da marca SHIMADZU e modelo MOC63u situada no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP).

Figura 36 - Balança de umidade à infravermelho para determinação de umidade

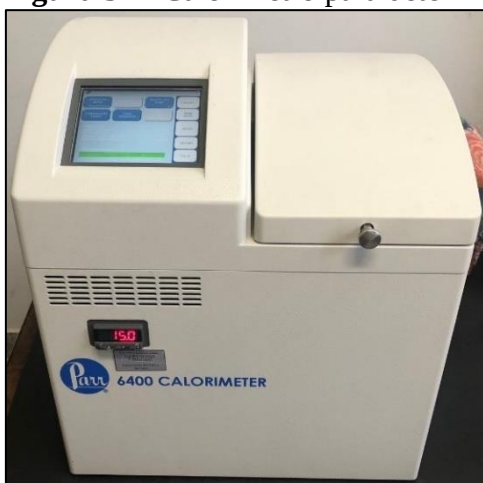


Fonte: Fotos tiradas pela autora em 27 de julho de 2023

No equipamento foram colocados 0,5 g de cada uma das cinco amostras para a determinação da umidade, cujos resultados estão apresentados em tópico posterior (Resultados e Discussões).

Em seguida, para determinação do poder calorífico inferior, foi utilizado um calorímetro da marca Parr e modelo 6400, conforme mostrado na Figura 37, localizado no Laboratório de Resíduos Sólidos e Compósitos da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP). Neste aparelho é inserido o valor da umidade da amostra a ser analisada, conforme obtido em etapa anterior.

Figura 37 - Calorímetro para determinação de poder calorífico



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 27 de julho de 2023

Devido à alta umidade presente na amostra com o rejeito puro, foi necessário utilizar a amostra em sua forma granulada e não em *pellet* sólido, como comumente é utilizado em

calorímetros. Para isso foi utilizado 0,5 g de cada amostra, sendo as análises realizadas em triplicatas.

É importante ressaltar que na amostra composta somente por rejeito (A_1), a combustão do material não aconteceu depois de três tentativas. O fio de ignição queimou, mas o composto, objeto dessa análise, não entrou em combustão e isso ocorreu, provavelmente, devido à alta umidade do rejeito. Dessa forma, para a obtenção do PCI da A_1 , utilizou-se como processo auxiliar a secagem do material por meio de uma estufa da marca IMARVIL por 4h à 100°C (Figura 38).

Figura 38 - Estufa utilizada para diminuição da umidade



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 27 de julho de 2023

Após o resíduo sair da estufa, o material seguiu para o calorímetro, sendo inserido no equipamento o valor da umidade do material ainda úmido para o cálculo do PCI da A_1 .

4.4.3. Determinação do teor de cloro

Para realizar a determinação do teor de cloro na amostra foi utilizado o método de Fluorescência de Raios X, utilizando um equipamento Shimadzu, modelo XRF700 (Figura 39) com capacidade de varredura de Sódio (Na) a Escândio (Sc) e de Alumínio (Al) a Urânio (U), cuja função é identificar a composição química das amostras, ou seja, os elementos constituintes desse composto. A análise, realizada em triplicata, foi realizada no dia 01 de agosto de 2023 no

Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT/UNESP) em que foram utilizadas 0,5 g de cada amostra.

Figura 39 - Aparelho de Fluorescência de Raios X



Fonte: Fotos tiradas pela autora em 01 de agosto de 2023

Após a inserção das amostras no equipamento, o mesmo fez as análises e plotou os resultados na forma de tabela, conforme será apresentado em tópico posterior.

4.4.4. Determinação do teor de mercúrio

Optou-se por utilizar um método mais sensível para determinação de mercúrio total, a espectrometria de absorção atômica. Devido ao custo elevado da técnica, resolveu-se realizar a análise somente na amostra 1, composta exclusivamente por rejeito, pois caso a determinação de mercúrio total fosse muito pequena nessa amostra, as demais, possivelmente, também teriam uma concentração muito baixa de mercúrio total, em razão da diminuição da quantidade de rejeito das amostras 2 à 5. Assim, todas as amostras seriam classificadas como H1 (melhor faixa).

A determinação de mercúrio total na amostra foi realizada no dia 01 de setembro de 2023 no Laboratório de Química da Faculdade de Ciências e Engenharia (FCE/UNESP), em triplicatas, utilizando um espectrômetro de absorção atômica da marca PERKIN ELMER e modelo SMS 100 (Figura 40), dedicado para quantificação de mercúrio em amostras sólidas. É importante ressaltar que as amostras foram acondicionadas em local adequado para que não ocorresse a contaminação por mercúrio presente no ambiente, como por exemplo, através de lâmpadas fluorescentes.

Figura 40 - Espectrômetro de absorção atômica dedicado para quantificação de mercúrio total em amostras sólidas



Fonte: PERKIN ELMER (2009)

A seguir, são apresentadas as análises estatísticas que foram realizadas para as amostras extraídas da Estação de Transbordo do município de Tupã/SP.

4.4.5. Análise de correlação entre umidade e PCI

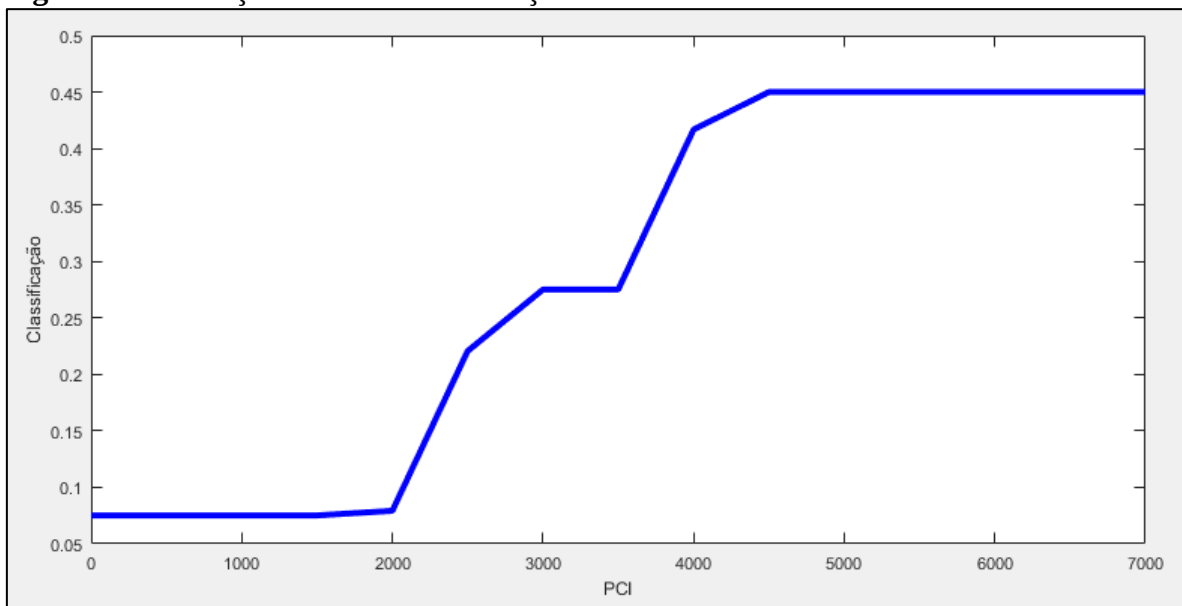
A fim de analisar a relação linear existente entre a umidade e o PCI das amostras, foi realizado teste de correlação por meio do coeficiente de Pearson, em que o valor deste coeficiente indica a magnitude da relação linear. Segundo Sousa (2019), o valor zero sinaliza a ausência de relação entre as variáveis, enquanto valores absolutos próximos a 1 indicam que a relação linear entre as variáveis é forte. Quanto ao sinal, o sinal positivo sinaliza que ambas as variáveis variam na mesma direção, já o sinal negativo indica que elas variam em direções opostas. O teste foi realizado no *MINITAB STATISTICAL SOFTWARE*® versão 21.4, ao nível de significância de 5%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Modelagem *fuzzy* para classificação de CDR

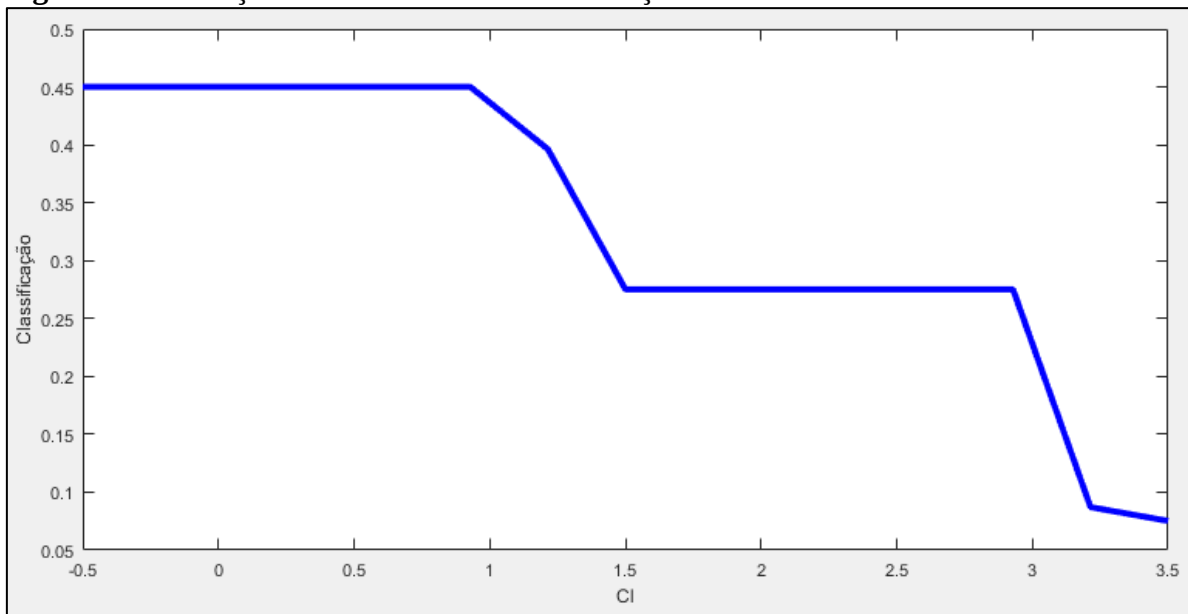
As Figuras 41, 42 e 43 representam a relação entre as variáveis de entrada - PCI, teor de cloro e teor de mercúrio, respectivamente, com a variável de saída – Classificação do CDR, obtidas pelo sistema *fuzzy*.

Figura 41 - Variação de PCI x classificação do CDR em 2D.



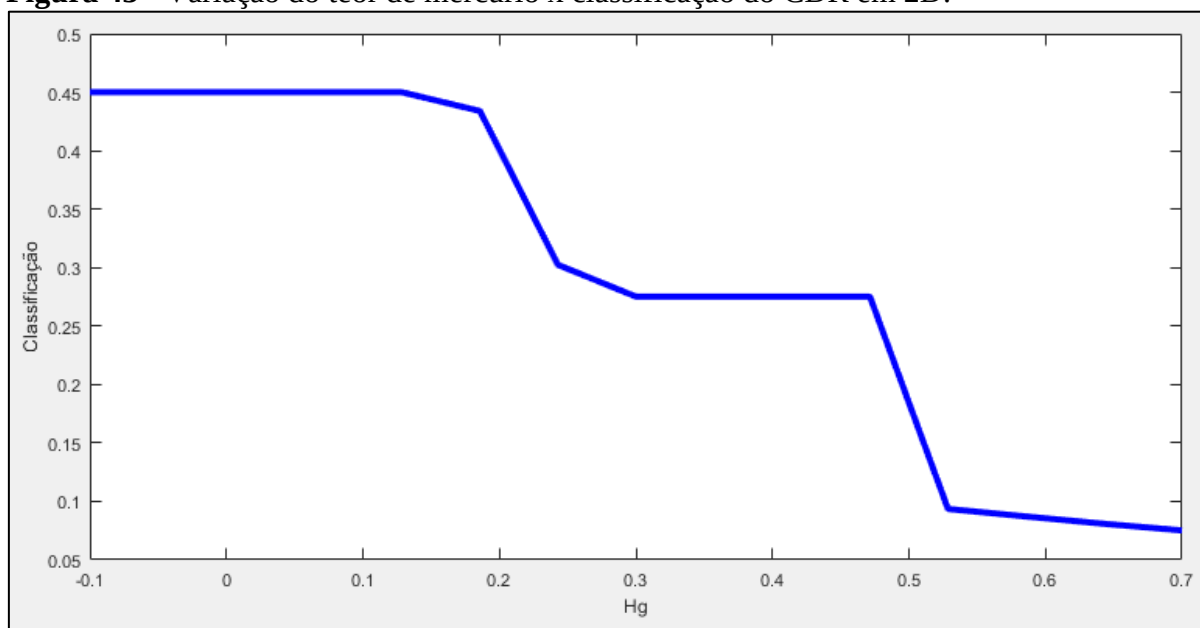
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 42 - Variação do teor de cloro x classificação do CDR em 2D.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 43 - Variação do teor de mercúrio x classificação do CDR em 2D.

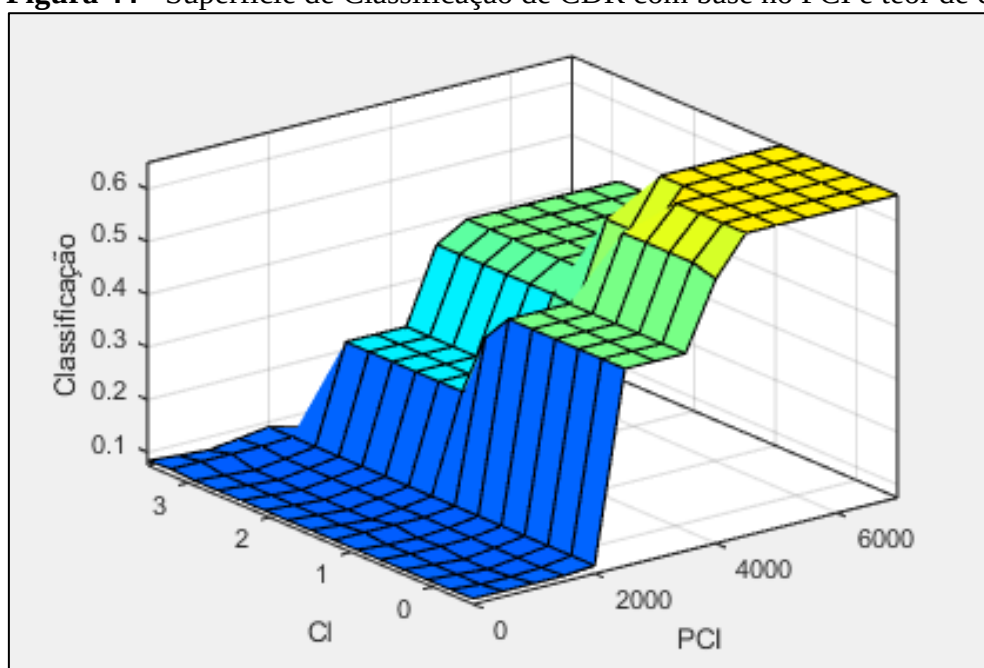


Fonte: Elaborado pela autora

Pela Figura 41 percebe-se que quanto maior for o PCI, melhor será a classificação do CDR, ao contrário do que aparece nas Figuras 42 e 43, que quanto menor for o valor de teor de cloro e mercúrio, melhor será a classificação desse combustível. As informações extraídas dos três gráficos corroboram com a classificação apontada por Reza *et al.* (2013), que foi adaptada da norma americana ASTM E856-83 e da página da ERFO (vide Quadro 3).

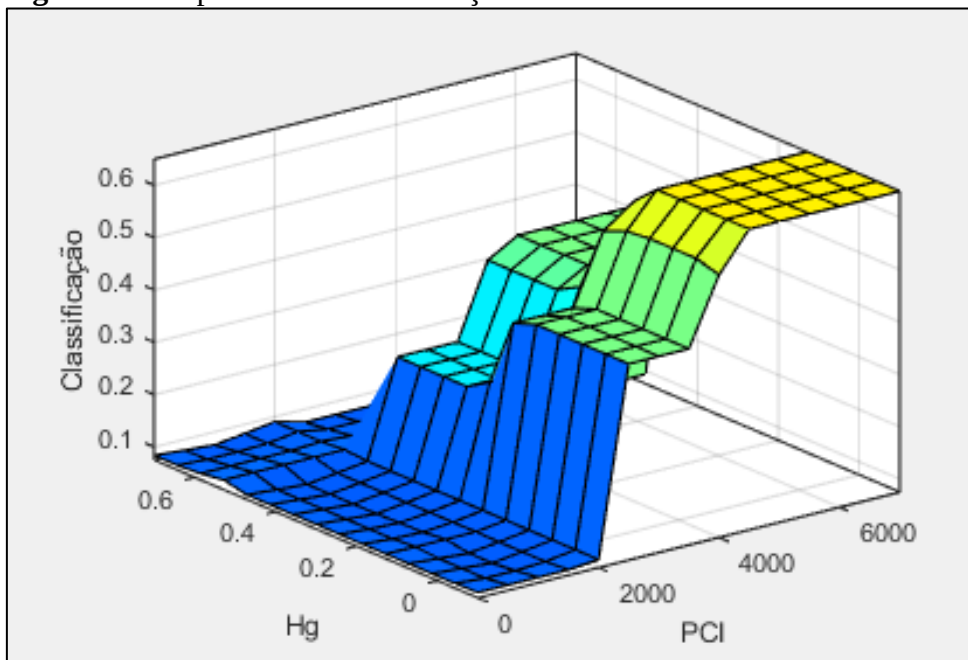
As Figuras 44, 45 e 46 mostram a superfície em 3D formada como solução da modelagem *fuzzy* pela Inferência de Mamdani.

Figura 44 - Superfície de Classificação de CDR com base no PCI e teor de cloro em 3-D.



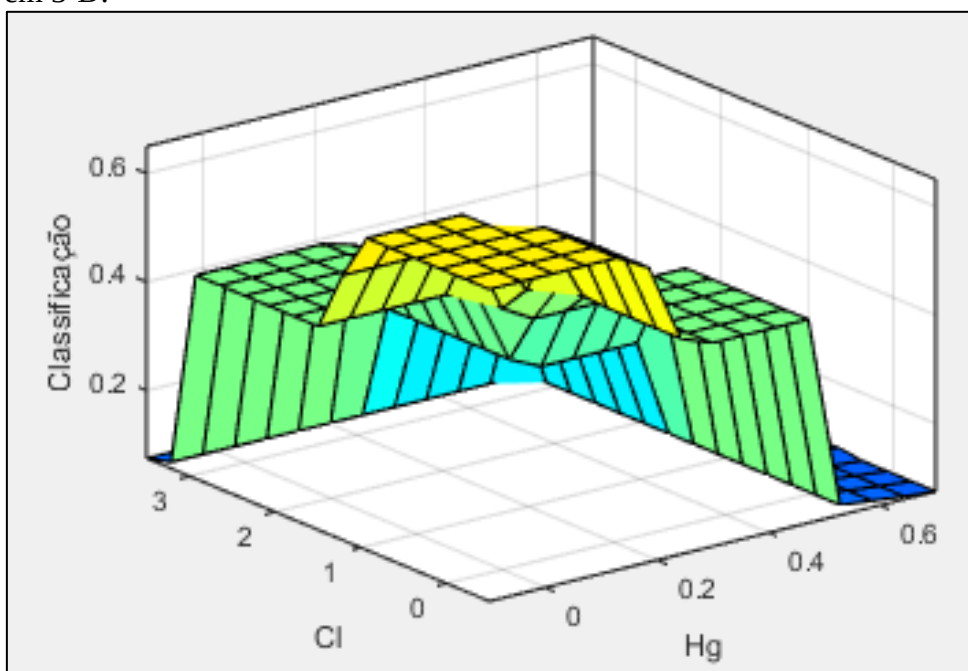
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 45 - Superfície de Classificação de CDR com base no PCI e teor de mercúrio em 3-D.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 46 - Superfície de Classificação de CDR com base no teor de mercúrio e teor de cloro em 3-D.



Fonte: Elaborado pela autora

As figuras apresentadas em 3D permitem a visualização da interação de duas variáveis de entrada com a classificação do CDR. Verifica-se na Figura 44 que, quanto maior for o PCI e menor a concentração de cloro, melhor será a classificação do CDR. Caso semelhante acontece com a Figura 45, que quanto maior for o PCI e menor a concentração de mercúrio, melhor será a classificação do CDR. É importante verificar que níveis de PCI abaixo de 2.390

kcal.kg⁻¹, independente dos teores de cloro e mercúrio, apontaram, em ambas as figuras, que o composto não tem classificação, visto que não são considerados CDR, demonstrando a inviabilidade do processo de queima do combustível. Conforme apresentado pelo Quadro 1, proposto por Brasil (2008, p. 28), quando o composto não possui viabilidade técnica, para que se torne um CDR é necessário a adição de um combustível auxiliar de maneira a aumentar o PCI do composto.

A Figura 46 aponta que quanto menores os níveis de teor de cloro e mercúrio, melhor será a classificação do CDR. Desta forma, a representação do gráfico em 3D da Figura 46 se inverte aos das Figuras 44 e 45, pois os limites estabelecidos para que o composto não seja um CDR pela ABNT (2020) são superiores para teores de cloro ($Cl > 3,0\%$) e mercúrio ($Hg > 0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$), e inferior para o nível de PCI ($PCI < 2.390 \text{ kcal.kg}^{-1}$).

É importante chamar atenção para o fato de que nos três gráficos de superfície apresentados, nota-se que os patamares de classificação ficaram muito claros e bem definidos.

Na sequência, serão apresentados 6 cenários hipotéticos a fim de simular algumas possibilidades.

5.2. Cenários hipotéticos

Seis opções foram consideradas para simular diferentes cenários hipotéticos, conforme apresentado pela Tabela 21.

Tabela 21 - Cenários hipotéticos para modelagem *fuzzy*

Cenário	PCI (kcal.kg ⁻¹)	Cl (%)	Hg (mg.kg ⁻¹)	Regra(s)	Classificação do CDR	
1	2.000	3,5	0,7	64	não é um CDR	0,0827
2	2.400	2,0	0,3	43	péssimo	0,2750
3	3.000	2,5	0,2	42	péssimo	0,4100
				43	ruim	0,5900
4	4.000	2,0	0,0	25	regular	0,5900
				41	ruim	0,4100
5	4.800	0,0	0,2	2	bom	0,7800
				3	regular	0,2200
6	5.000	0,3	0,0	1	ótimo	0,9700

Fonte: Elaborado pela autora

Como pode-se observar pela Tabela 21, os resultados apresentados pelo sistema de classificação foram coerentes com as saídas esperadas, validadas pelos especialistas. No Cenário 1 foram inseridos valores de PCI, Cl e Hg que não estão previstos como CDR, conforme a NBR 16.849 (ABNT, 2020) e a classificação foi de quase nula (0,0827). No Cenário 2 foram incluídos valores que já categorizam o composto como sendo um CDR, mas como os valores são ainda baixo para PCI e altos para Cl e Hg, a classificação continua sendo desfavorável (0,275). Já no melhor cenário previsto (Cenário 6), o índice de classificação do

CDR foi apontado como 0,97, valor esse muito próximo de 1 (valor máximo de classificação). Por fim, os Cenários de 3 à 5, tiveram suas respostas bem interessantes, uma vez que o sistema aponta uma resposta intermediária entre duas opções de classificação, corroborando com a importância da Lógica *Fuzzy*, apontada por Malutta (2004, p. 74), para capturar os graus de incerteza da realidade, uma vez que “o mundo real não é bivalente, é na realidade multivalente, com um infinito espectro de opções em vez de duas”.

5.3. Amostras coletadas no município de Tupã

5.3.1. Poder calorífico

A Tabela 22 aponta o teor de umidade e o PCI, respectivamente, para amostras de 0,5g, provenientes de rejeito e casca de amendoim do município de Tupã.

Tabela 22 - Teor de umidade e PCI das amostras de CDR do município de Tupã

Amostras	Umidade (%)	PCI (cal.g ⁻¹)
A ₁ *	57,38	5403,69
A ₂	43,17	1962,35
A ₃	32,03	2736,45
A ₄	30,54	3287,14
A ₅	10,34	3962,26

Fonte: Elaborado pela autora

*Após passar pela estufa

Como pode-se observar pela Tabela 24, à medida que se aumentou à quantidade de casca de amendoim nas amostras, o teor de umidade foi diminuindo e o PCI foi aumentando, com exceção do poder calorífico de A₁, que passou por um processo de secagem para diminuição da umidade, para que pudesse ter sido feito a queima do CDR, conforme já relatado anteriormente.

Os dados apresentados nesta tabela ratificam o que Gundim (2022) encontrou em seu estudo, que a mistura de palha de cana e casca de eucalipto com CDR tornam o combustível de melhor qualidade especialmente quanto ao poder calorífico e a umidade. Desta forma, pode-se induzir que a mistura de CDR com biomassas de caráter mais “seco”, ou seja, de menor umidade, produz um composto com maior poder calorífico que o torna um combustível de melhor viabilidade energética.

Na sequência, serão apresentados os resultados das análises do teor de cloro e mercúrio.

5.3.2. Teor de cloro

A Tabela 23 aponta a composição química das amostras (0,5g cada), provenientes de rejeito e casca de amendoim do município de Tupã a partir da análise por Fluorescência de Raios X (FRX).

Tabela 23 - Composição química das amostras de CDR do município de Tupã (%) a partir da análise por FRX.

Elemento Químico	A₁ (%)	A₂ (%)	A₃ (%)	A₄ (%)	A₅ (%)
CaO	49.214	37.830	37.583	32.391	23.338
Cl	-	29.604	-	-	-
K ₂ O	19.063	17.145	21.155	25.515	24.494
SiO ₂	15.703	5.768	19.766	18.091	28.276
Fe ₂ O ₃	8.328	3.660	10.877	10.778	9.766
SO ₃	4.562	1.598	6.287	7.548	8.111
TiO ₂	1.320	3.516	2.169	2.494	2.535
MnO	0.432	0.236	0.682	0.626	0.641
CuO	0.375	0.168	0.759	0.487	0.523
ZnO	0.346	0.138	0.405	0.235	0.180
NiO	0.337	-	-	-	-
SrO	0.116	0.047	0.242	0.169	0.083
Br	0.087	0.108	-	-	-
P ₂ O ₅	-	0.153	-	1.251	1.203
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0.246	0.767
V ₂ O ₅	0.046	-	-	0.087	-
Rb ₂ O	0.042	0.014	-	0.046	-
ZrO ₂	0.029	0.016	0.075	0.037	-
OsO ₄	-	-	-	-	0.082

Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se pela Tabela 23 que a única amostra que apresentou teor de cloro foi a amostra 2, com uma concentração de 29,6%. O fato da composição das amostras serem extremamente heterogêneas, conforme mostrado na Figura 3 (composição gravimétrica média dos RSU no Brasil) e ratificado pela Figura 15 (composição gravimétrica dos RSU de Tupã), pode ter contribuído para que a fração de um determinado material estivesse na amostra 2 e não nas demais amostras.

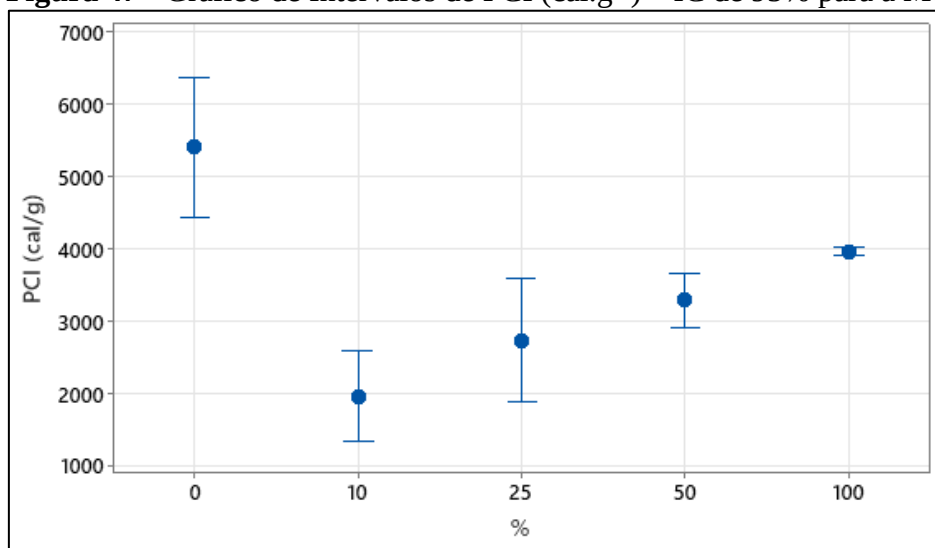
5.3.3. Teor de mercúrio

Como resultado, na amostra 1, obteve-se uma concentração de $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$ de mercúrio total, ratificando assim a suposição inicial que a concentração de mercúrio total seria muito inferior à $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$. Dessa forma, todas as amostras foram classificadas como H1.

5.3.4. Análise de correlação entre umidade e PCI

O coeficiente de correlação de Pearson entre a variável umidade e a variável PCI, foi de -0,921. O fato do valor absoluto ter sido próximo a 1, indica que a relação linear é bastante forte, ou seja, as variáveis estão extremamente relacionadas. Já o sinal negativo do coeficiente indicou que as variáveis possuem um sentido inverso, isto é, quanto menor a umidade, maior é o valor do PCI nas amostras. A Figura 47 apresenta o intervalo de confiança do PCI, em que se utilizou os desvios padrão individuais para o cálculo dos intervalos.

Figura 47 - Gráfico de Intervalos de PCI (cal.g^{-1}) – IC de 95% para a Média



Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se, pela Figura 47, que quanto mais rejeito há na amostra, maior é o desvio padrão, devido a heterogeneidade do composto. No caso da amostra contendo apenas casca de amendoim (A_5), o desvio padrão é bem menor.

5.4. Cenário com as amostras do município de Tupã

A partir das análises de PCI, teor de cloro e teor de mercúrio realizadas nas cinco amostras coletadas no município de Tupã, resumiu-se na Tabela 24 os resultados encontrados.

Tabela 24- Análises das amostras coletadas no município de Tupã

Amostras	Massa (g)	PCI (kcal.kg^{-1})	Cloro (%)	Mercúrio (mg.kg^{-1})	Umidade (%)
A ₁	0,5142	5403,69*	0	$31,7409 \times 10^{-6}$	57,38
A ₂	0,5309	1962,35	29,60	0	43,17
A ₃	0,5254	2736,45	0	0	32,03
A ₄	0,5265	3287,14	0	0	30,54
A ₅	0,5306	3962,26	0	0	10,34

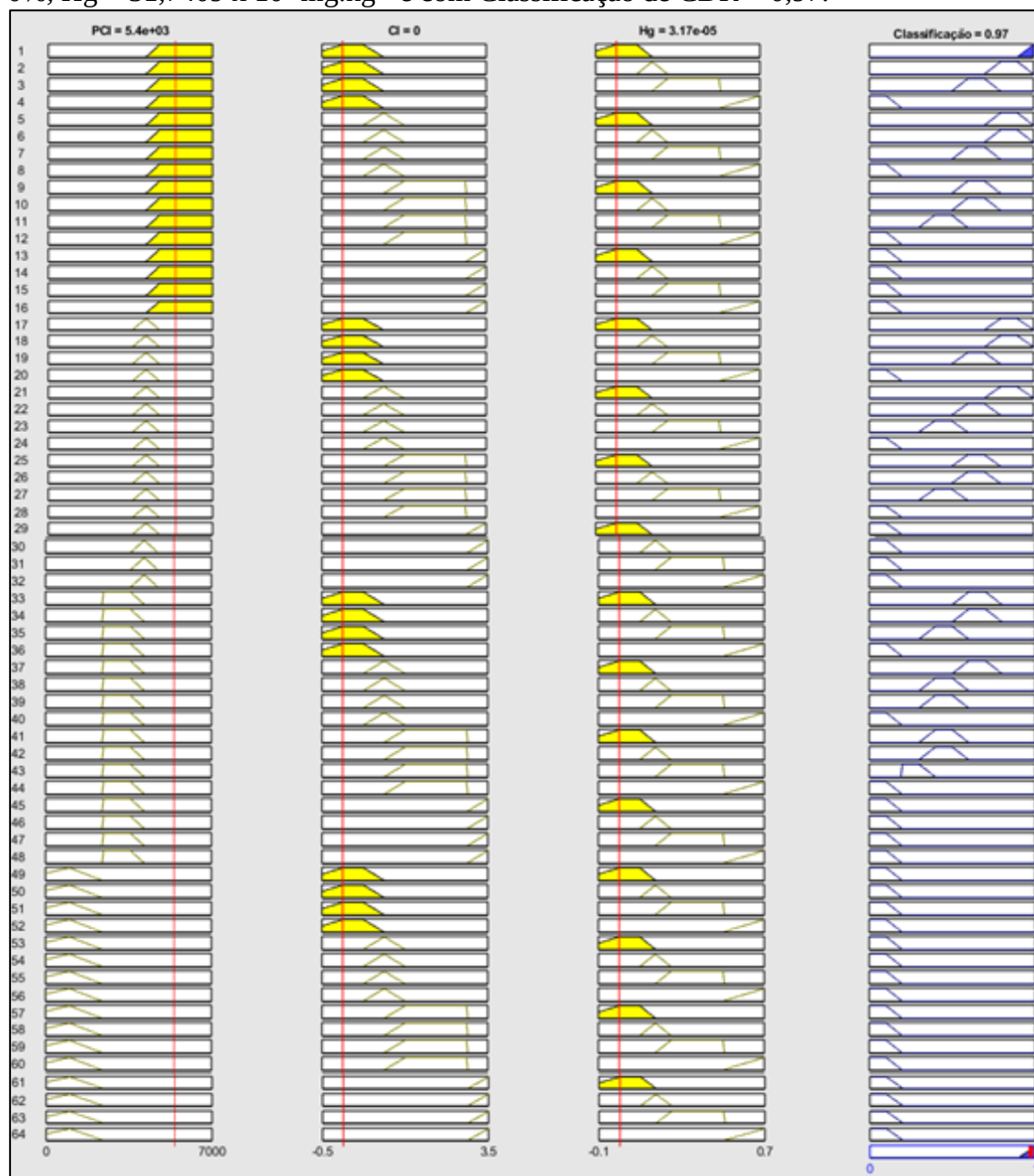
Fonte: Elaborado pela autora

A₁ – 100% rejeito; A₂ – 90% rejeito; A₃ – 75% rejeito; A₄ – 50% rejeito; A₅ – 0% rejeito

*Após passar pela estufa

A partir da Tabela 24, foi possível simular os cenários baseado no modelo *fuzzy* construído. As Figuras 47 à 51 apontam a simulação para cada uma das cinco amostras.

Figura 48 - Método de inferência de Mamdani para A1, com PCI = 5.403,69 kcal.kg⁻¹, Cl = 0%, Hg = 31,7409 x 10⁻⁶mg.kg⁻¹ e com Classificação de CDR = 0,97.

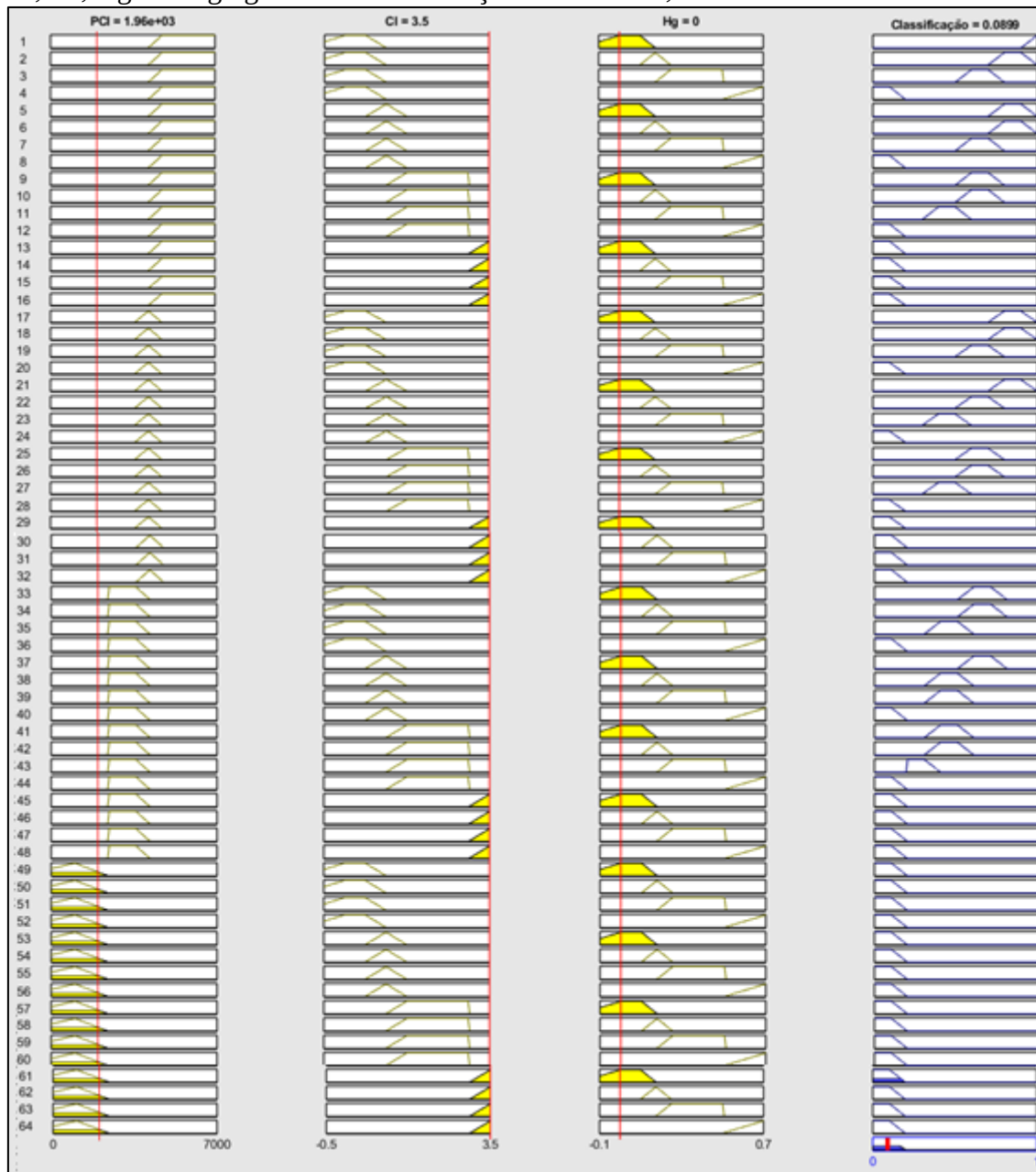


Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 48, ao se basear nos valores de PCI de 5.403,69 kcal.kg⁻¹, de teor de cloro de 0% e de teor de mercúrio de 31,7409 x 10⁻⁶ mg.kg⁻¹, determina a classificação do CDR como de 0,97. Ao se analisar o grau de pertinência da variável de saída, constata-se que o ponto possui maior grau de pertinência dentro do conjunto *fuzzy* ‘Ótimo’, uma vez que sobrecai sobre a base de regras número 1. Cabe salientar que essa classificação ideal só foi capaz devido à secagem do material previamente, corroborando com o apontamento do Quadro 1 (BRASIL, 2008, p.

28) que menciona a necessidade de um pré-tratamento para aumentar o PCI, quando não há viabilidade energética para queima do resíduo.

Figura 49 - Método de inferência de Mamdani para A2, com $\text{PCI} = 1.962,35 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $\text{Cl} = 29,6\%$, $\text{Hg} = 0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de $\text{CDR} = 0,08999$.



Fonte: Elaborado pela autora

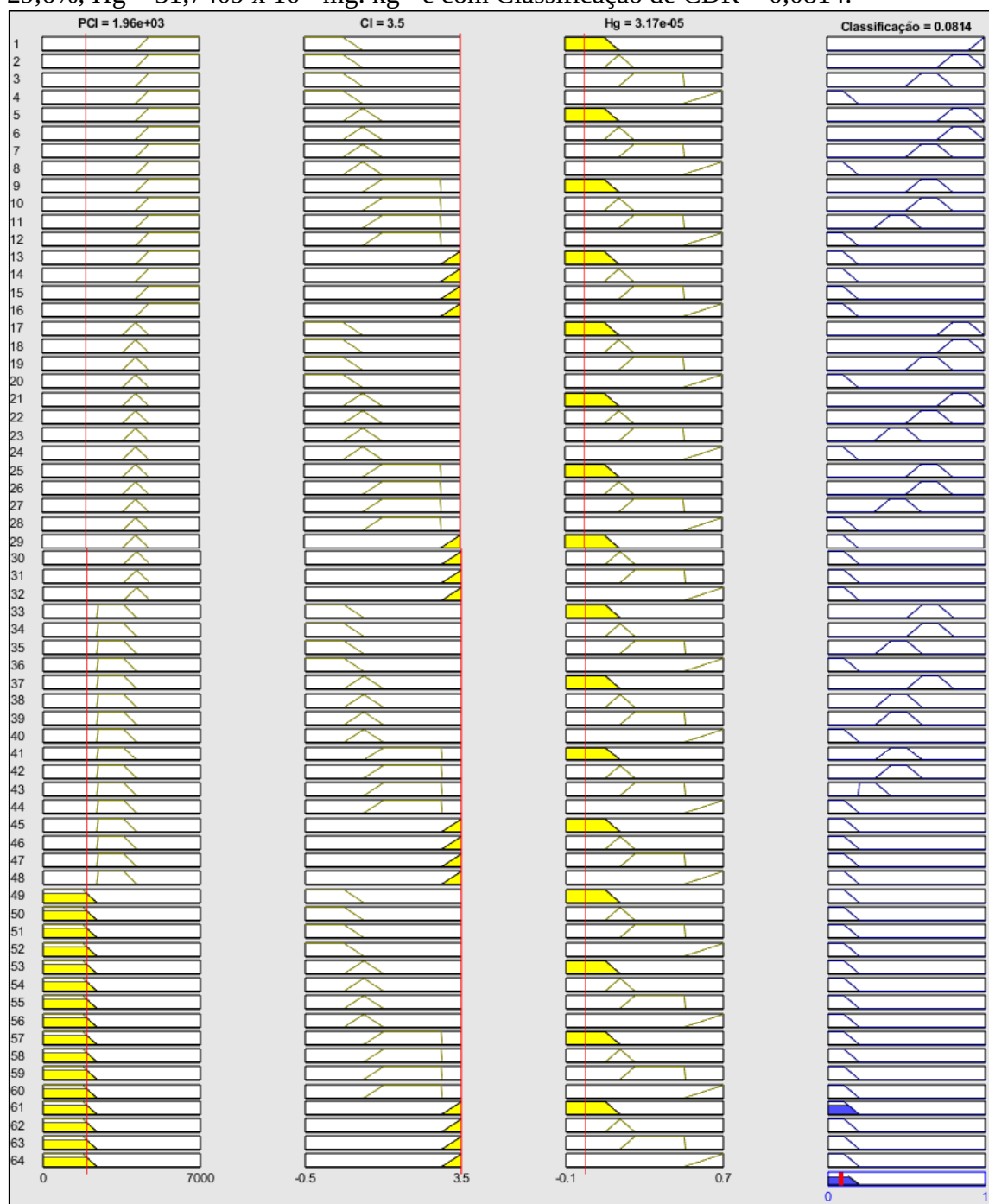
A Figura 49, ao se basear nos valores de PCI de $1.962,35 \text{ kcal.kg}^{-1}$, de teor de cloro de $29,6\%$ e de teor de mercúrio de 0 mg.kg^{-1} , determina a classificação do CDR como de $0,0899$.

Conforme já relatado, o fato da composição das amostras serem extremamente heterogêneas, pode ter contribuído para que a fração de um determinado material estivesse na amostra 2 e não nas demais amostras, elevando o teor de cloro.

Observa-se, ainda neste caso, que o ponto possui maior grau de pertinência dentro do conjunto *fuzzy* ‘Não é CDR’, visto que sobrecai sobre a base de regras número 61. O resultado corrobora com a Tabela 17, baseada na norma da ABNT (2020), visto que o PCI é classificado como P4 e o teor de cloro como C4 e que, portanto, não podem ser considerados um CDR.

Caso o valor do teor de mercúrio atingisse $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$, como em A_1 , a classificação do CDR permaneceria a mesma (‘Não é CDR’), visto que a base de regras não mudaria (Regra 61). A única diferença estaria no grau de pertinência que passaria a ser 0,0814, conforme mostrado na Figura 50.

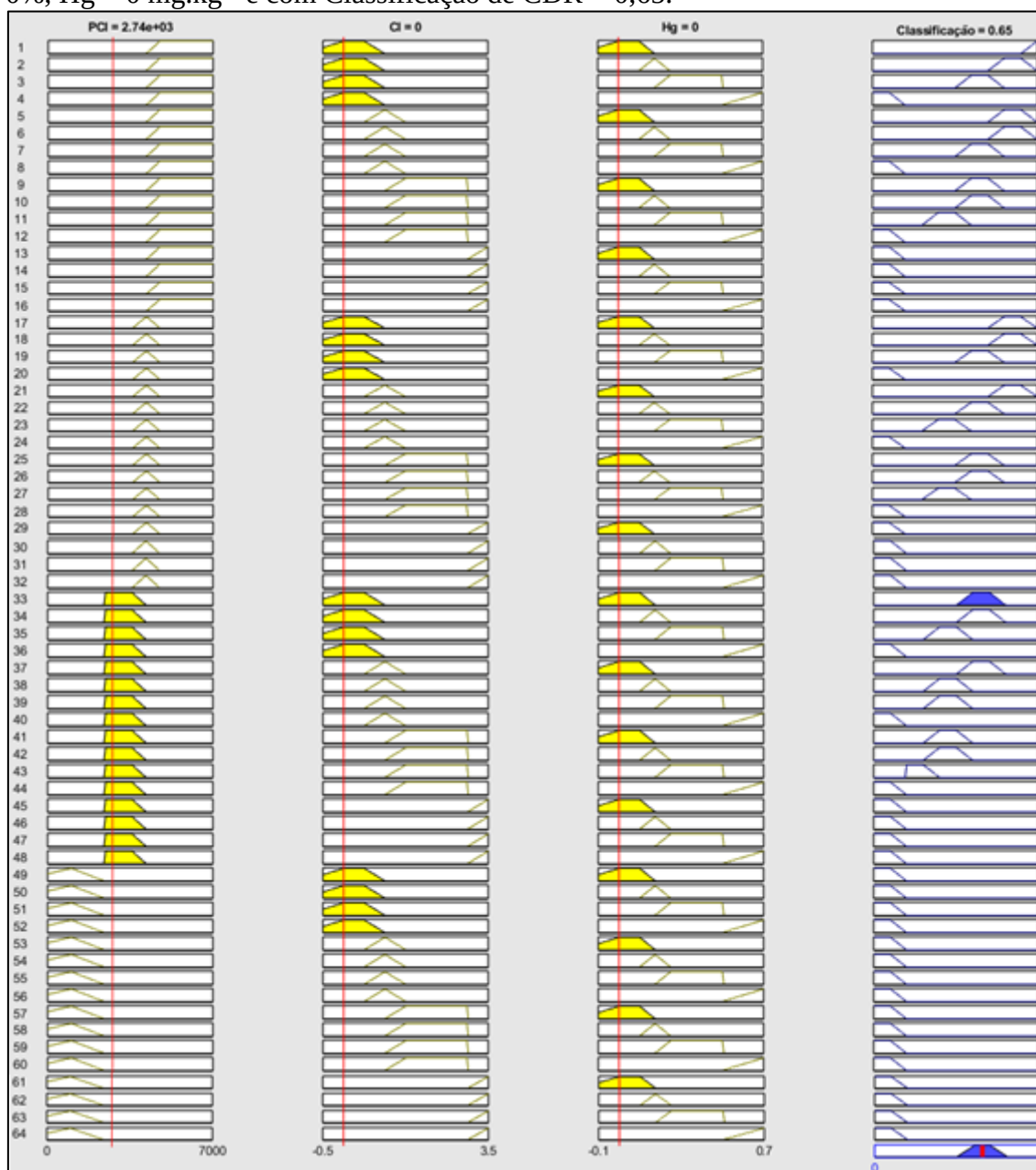
Figura 50 - Método de inferência de Mamdani para A2, com $PCI = 1.962,35 \text{ kcal. kg}^{-1}$, $CI = 29,6\%$, $Hg = 31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg. kg}^{-1}$ e com Classificação de $CDR = 0,0814$.



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da Figura 51, que a simulação foi realizada com valores de PCI de $2.736,45 \text{ kcal. kg}^{-1}$, de teor de cloro de 0% e de teor de mercúrio de 0 mg.kg^{-1} , a classificação do CDR melhorou, obtendo-se uma resposta 'regular' (com grau de pertinência de $0,65$).

Figura 51 - Método de inferência de Mamdani para A3, com $PCI = 2.736,45 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $Cl = 0\%$, $Hg = 0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de CDR = 0,65.

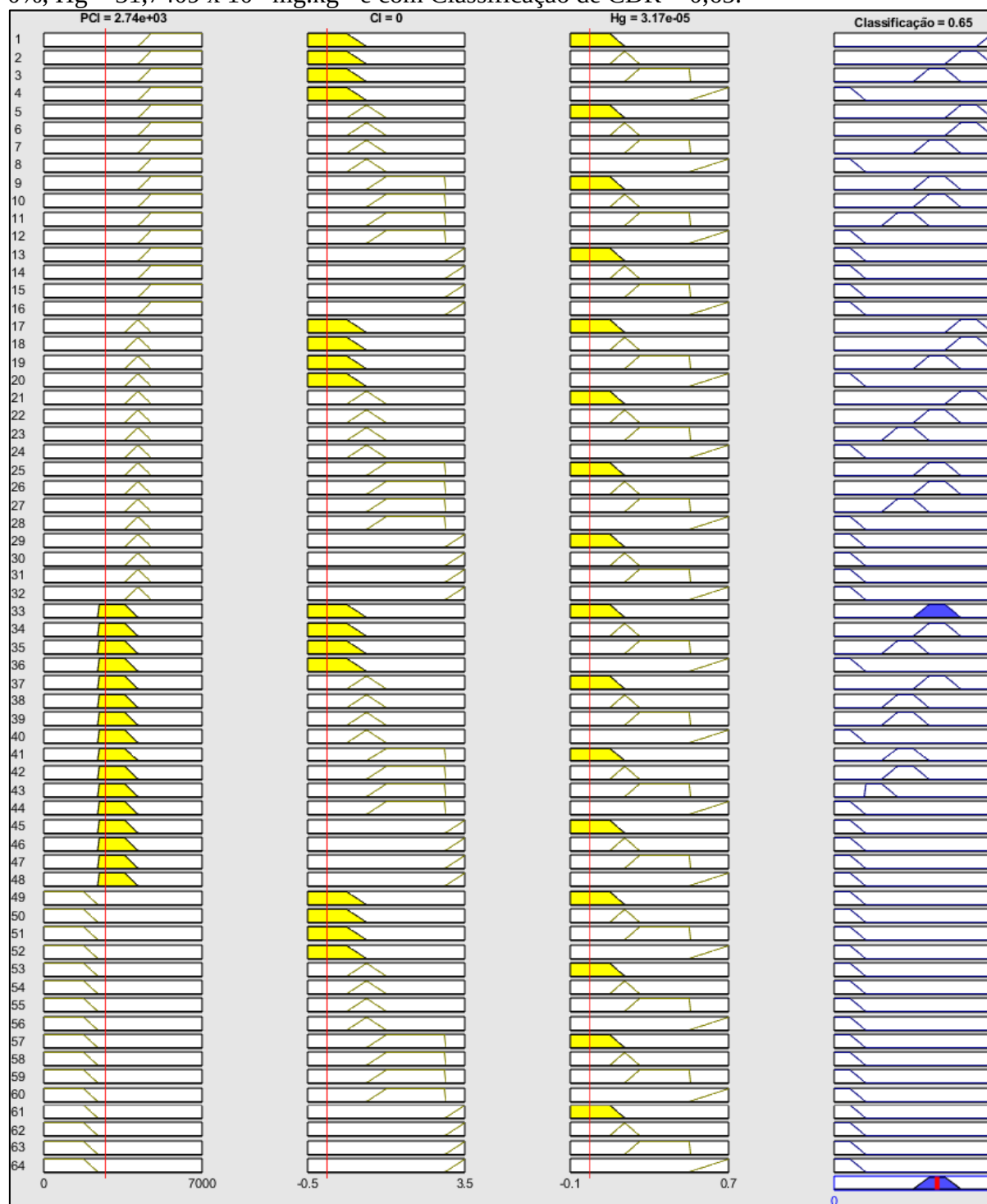


Fonte: Elaborado pela autora

Apesar do teor de cloro e de mercúrio estar na melhor faixa, C1 e H1, respectivamente, o valor do PCI sobrecarrega no pior intervalo, o P3, conforme apontado pela Tabela 17 (adaptada da ABNT, 2020). Sendo assim, o valor do PCI afeta negativamente a qualidade e consequentemente a classificação do CDR.

Caso o valor do teor de mercúrio fosse $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$, como determinado em A₁, a classificação do CDR permaneceria a mesma ('Regular'), visto que a base de regras não mudaria (Regra 33) e nem o grau de pertinência (0,65), conforme apontado na Figura 52.

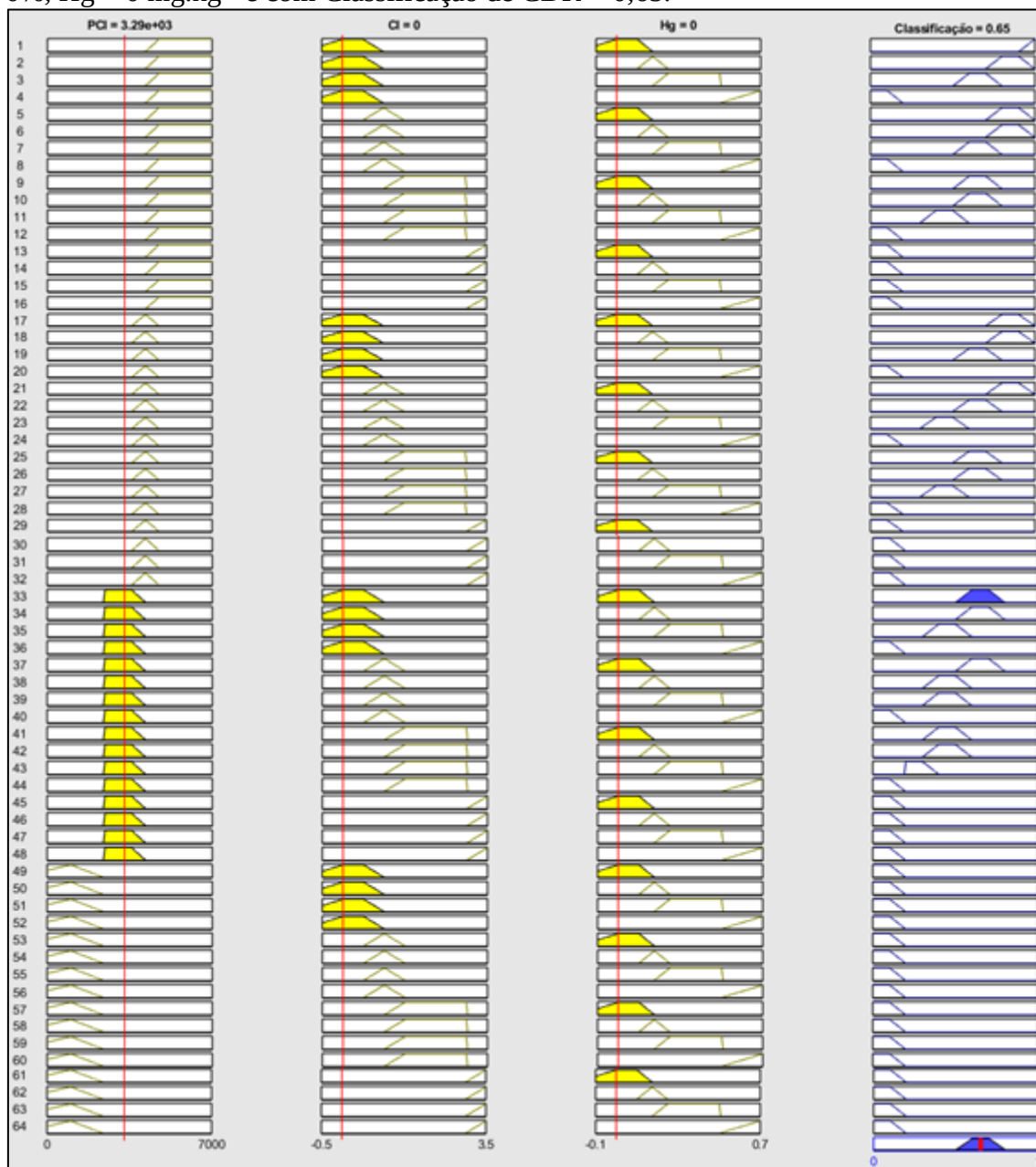
Figura 52 - Método de inferência de Mamdani para A3, com $PCI = 2.736,45 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $Cl = 0\%$, $Hg = 31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de $CDR = 0,65$.



Fonte: Elaborado pela autora

Na amostra 4, o valor de PCI foi de $3.287,14 \text{ kcal.kg}^{-1}$, de teor de cloro foi de 0% e de teor de mercúrio foi de 0 mg.kg^{-1} , conforme apontado pela Figura 53.

Figura 53 - Método de inferência de Mamdani para A4, com $PCI = 3.287,14 \text{ kcal. kg}^{-1}$, $Cl = 0\%$, $Hg = 0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de $CDR = 0,65$.

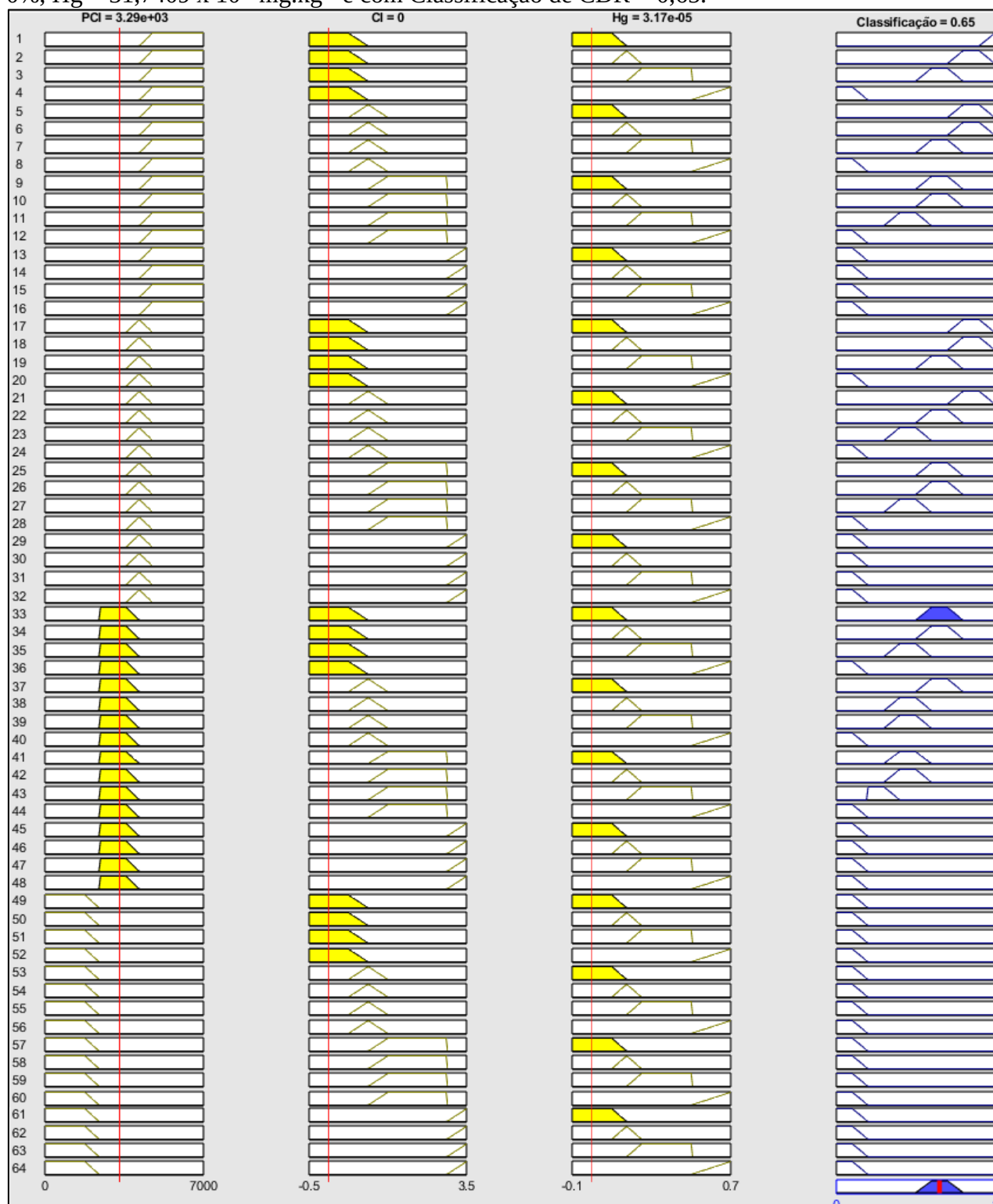


Fonte: Elaborado pela autora

O cenário da amostra 4 (Figura 53) foi muito similar ao da amostra 3, uma vez que o grau de pertinência foi o mesmo (0,65) e, consequentemente, a resposta do sistema também foi a mesma ('regular'). Sendo assim, ao aumentar o valor de PCI de $2.736,45 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para $3.287,14 \text{ kcal.kg}^{-1}$, mantendo-se o teor de cloro e de mercúrio à nível zero, não afetou a classificação do CDR.

Foi simulado também na amostra 4 se o teor de mercúrio fosse de $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$, conforme apontado na Figura 54.

Figura 54 - Método de inferência de Mamdani para A4, com $PCI = 3.287,14 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $CI = 0\%$, $Hg = 31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de CDR = 0,65.

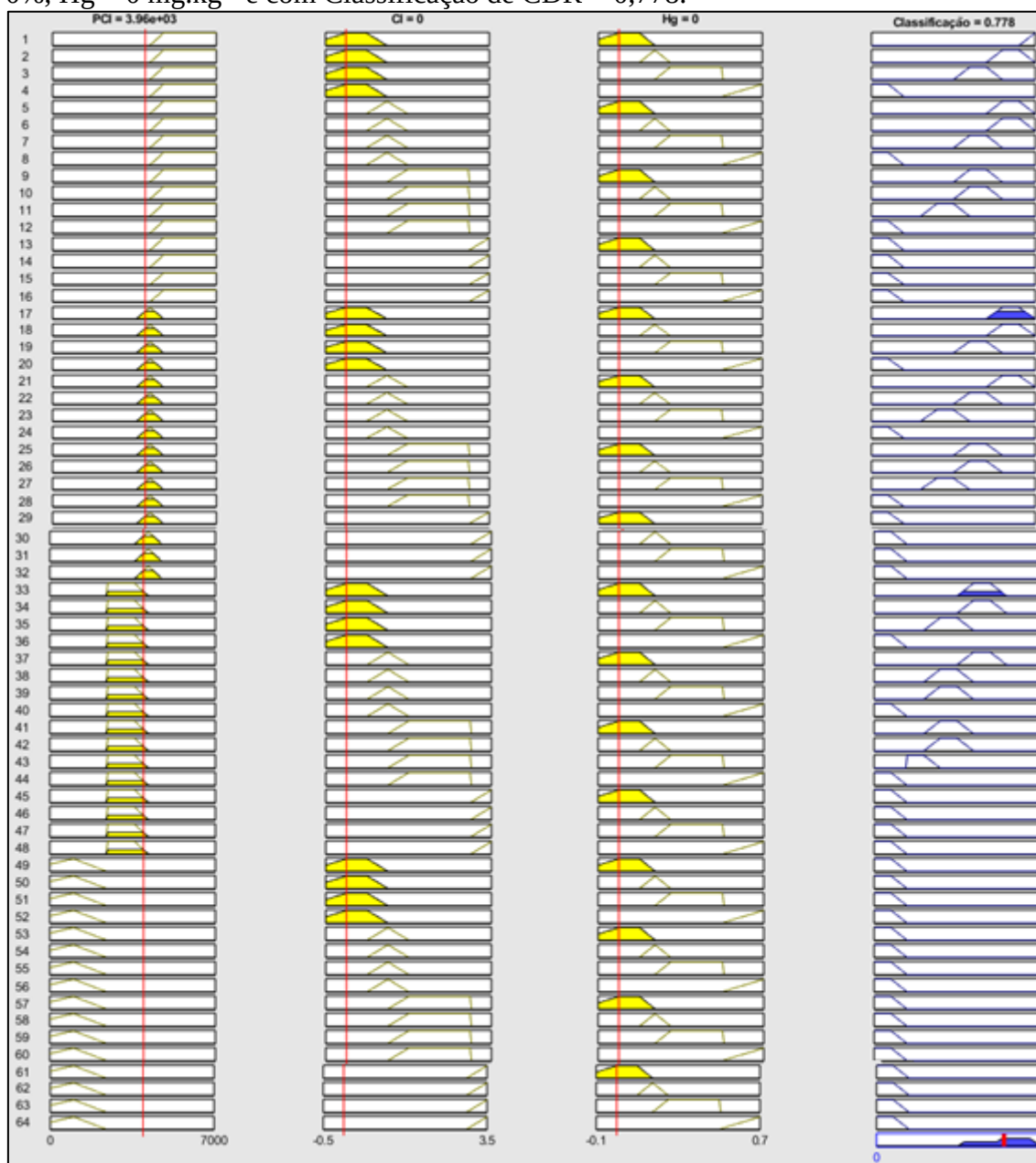


Fonte: Elaborado pela autora

Conforme apontado na Figura 54, se o valor do teor de mercúrio fosse $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$, a base de regras não mudaria (Regra 33) e nem o grau de pertinência (0,65), portanto a classificação do CDR permaneceria a mesma ('Regular').

A Figura 55, apresentada a seguir, ilustra o cenário para a amostra 5.

Figura 55 - Método de inferência de Mamdani para A5, com $PCI = 3.962,26 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $CI = 0\%$, $Hg = 0 \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de $CDR = 0,778$.

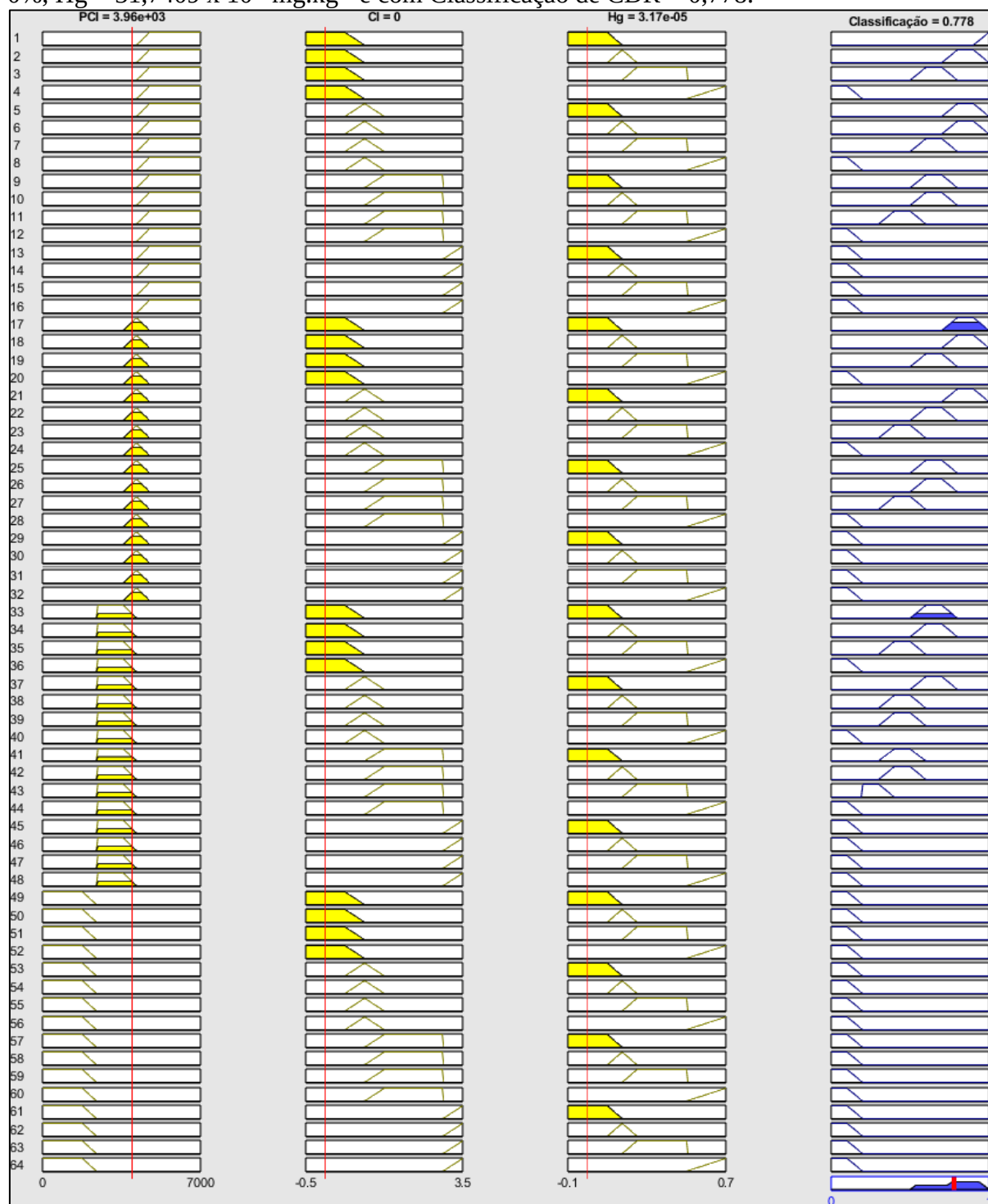


Fonte: Elaborado pela autora

No cenário da amostra 5 (Figura 55), o sistema recaiu sobre duas bases de regras, as de número 17 e 33, apontando assim duas opções de classificação, 'Bom' e 'Regular'. O fato de o ponto estar dentro de uma condição intermediária, é levada em consideração para determinar a Classificação, dada como 0,778. Quando se analisam os graus de pertinência da variável de saída, verifica-se que o ponto possui maior grau de pertinência dentro do conjunto *fuzzy* 'Bom'.

Por fim, a Figura 56 simula a amostra 5 caso o teor de mercúrio fosse de $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$.

Figura 56 - Método de inferência de Mamdani para A5, com $PCI = 3.962,26 \text{ kcal.kg}^{-1}$, $CI = 0\%$, $Hg = 31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$ e com Classificação de $CDR = 0,778$.



Fonte: Elaborado pela autora

De forma idêntica ao que ocorre quando o teor de mercúrio é zero, quando esse valor é de $31,7409 \times 10^{-6} \text{ mg.kg}^{-1}$, as bases de regras não mudam (Regra 17 e 33) e nem o grau de pertinência (0,778), portanto a classificação do CDR permaneceu a mesma ('Bom').

Na Tabela 25 foi realizado um resumo da classificação dada pela modelagem *fuzzy* obtidas das amostras do município de Tupã/SP.

Tabela 25 - Resumo das classificações realizadas pela modelagem *fuzzy*

Amostras	Classificação	
A ₁ *	ÓTIMO	0,97
A ₂	NÃO É UM CDR	0,0899
A ₃	REGULAR	0,65
A ₄	REGULAR	0,65
A ₅	BOM	0,778
	REGULAR	0,222

Fonte: Elaborado pela autora

*Após passar pela estufa

Como pode-se observar pela Tabela 25, a única amostra que obteve a classificação de um CDR ‘ótimo’, foi a amostra 1, composta exclusivamente por rejeito. Entretanto, conforme salientado anteriormente, foi necessária a secagem do material para que se pudesse determinar o PCI da amostra. O fato comprova o exposto por Brasil (2008), no Quadro 1, que quando o PCI não é adequado, faz-se necessário um pré-tratamento térmico.

Apesar do êxito alcançado para a amostra 1, após passar pela estufa e em escala laboratorial, conclui-se que possivelmente a nível de uma planta real, seja ela de incineração, caldeira, forno clínquer etc., o custo para secagem prévia do material não tornaria o processo viável economicamente, pois um dos maiores gastos das indústrias, segundo Silva *et al.* (2020a), é com a secagem do material. Entretanto, estudos adicionais são necessários para que se ratifique essa premissa, inclusive com relação a secagem solar.

A outra possibilidade quando não há viabilidade técnica para a queima do material, segundo Brasil (2008), é a adição de um combustível auxiliar no composto. Nas amostras 2, 3 e 4 foram adicionadas frações de casca de amendoim para verificar a evolução do PCI e consequentemente a melhoria na classificação do CDR.

Na amostra 2, apesar da inserção de 10% de casca de amendoim, a classificação do PCI não teve progresso em relação a amostra 1, continuou como P4 ($\text{PCI} < 2.390 \text{ kcal.kg}^{-1}$). Além disso, a concentração de cloro se apresentou elevada (29,6%), sendo também classificada na pior faixa (C4). O fato de uma só variável estar na faixa 4, já classifica o composto como ‘não sendo um CDR’.

Nas amostras 3 (adição de 25% de casca de amendoim) e 4 (adição de 50% de casca de amendoim), a classificação permaneceu a mesma, como ‘regular’. Como tanto o teor de cloro quanto o de mercúrio permaneceram na melhor faixa, C1 e H1, respectivamente, o que determinou a classificação de ambas as amostras foi o PCI. Apesar de se ter dobrado a fração de casca de amendoim, ambos PCI permaneceram na classificação P3 ($2.390 \text{ kcal.kg}^{-1} \leq \text{PCI} <$

3.580 kcal.kg⁻¹). Assim, averigua-se que neste caso, dobrar a quantidade de casca de amendoim não aumenta satisfatoriamente o PCI do composto.

Por fim, foi verificado na amostra 5, contendo somente casca de amendoim, que o PCI aumentou consideravelmente (PCI = 3962,26 kcal.kg⁻¹), estando agora na faixa P2 (3.580 kcal.kg⁻¹ ≤ PCI < 4.750 kcal.kg⁻¹), fato que resultou na melhoria da classificação ('bom'), já que o teor de cloro e mercúrio permaneceram na faixa ideal (C1 e H1). O problema do uso exclusivo da casca de amendoim é o volume e a disponibilidade do material, pois enquanto os rejeitos provenientes de RSU possuem uma capacidade firme (garantia de disponibilidade de material ao longo de todo o ano), a produção de amendoim se dá em épocas do ano específicas, período da safra (época das águas) e da safrinha (época das secas), em que na seca a produtividade é menor, necessitando de irrigação. Além disso, devido às mudanças climáticas, as adversidades dos riscos naturais (chuvas intensas, secas prolongadas, riscos de incêndio e inundações) têm se intensificado no campo, o que pode alterar a produção da safra de ano a ano.

A partir dos resultados encontrados, aponta-se que mesmo com teores de cloro e mercúrio permanecendo nas melhores faixas (C1 e H1), devido à alta umidade e consequentemente baixo PCI dos rejeitos, a classificação da qualidade do CDR só chegou a ser considerada 'regular', ainda com a inserção de casca de amendoim como combustível auxiliar. O fato sugere que as amostras de CDR estudadas *in natura* (sem tratamento preliminar para secagem do material) não são indicadas para utilização em fornos e caldeiras para o cenário estudado.

O cenário para a realidade brasileira é muito similar com o encontrado neste estudo, uma vez que na composição gravimétrica média dos RSU no Brasil, mais da metade (51,4%) do resíduo representa a fração úmida do material, conforme dados do Cempre (2020) apresentado na Figura 3.

Quanto a utilização do CDR após a secagem do material, não é possível realizar uma predição quanto ao seu uso, uma vez que se faz necessário uma análise de viabilidade financeira para esse fim, cujo esse foco não foi objetivo deste trabalho. Entretanto, indica-se para estudos futuros, a análise de viabilidade econômica da secagem de rejeitos, com ou sem adição de biomassa, para uso em fornos e caldeiras, uma vez que os resultados em escala de laboratório foram positivos nesse caso.

6. CONCLUSÃO

Este estudo limitou-se a desenvolver um algoritmo de suporte à tomada de decisão que classificasse a qualidade de um CDR formado por rejeitos de RSU com ou sem adição de biomassa. Para isso, foi utilizado a casca do amendoim, proveniente das agroindústrias do município de Tupã/SP, como componente auxiliar de um combustível.

A fim de compreender a temática do trabalho e propiciar um embasamento ao estudo, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o CDR e a aplicação de biomassa, especialmente a casca do amendoim, como componente auxiliar de um combustível.

O CDR tem sido cada vez mais estudado, objetivando dar uma destinação aos resíduos sólidos, bem como substituir os combustíveis fósseis tradicionais em alguns casos, como é o caso da indústria cimenteira. Legislações têm sido criadas e aperfeiçoadas propondo diretrizes e condições para o uso dos CDRs e licenciamento de unidades de preparo dos mesmos.

As biomassas possuem bastante destaque no que concerne a produção de bioenergia. No caso da casca de amendoim, alguns autores a destacam como sendo um material de alto poder calorífico, muito próximo às biomassas já utilizadas em larga escala, e que dessa forma, portanto, pode ser utilizado na geração de energia.

Posteriormente, foi identificado as principais características utilizadas para classificar um CDR. Notou-se que o PCI, o teor de cloro e o teor de mercúrio são os fatores mais utilizados dentre as legislações, tanto nacional, como mundial, para se definir um bom CDR. O primeiro devido a ser um importante fator que indica a viabilidade energética para que aconteça uma boa combustão do composto. Já o segundo e terceiro irão indicar se a concentração está adequada dentro do que estabelece a legislação, a fim de não prejudicar a saúde humana e o meio ambiente. Dessa forma, esses três aspectos serviram como variáveis de entrada do sistema.

Após delimitar as variáveis gerou-se o modelo matemático para classificação do composto quanto a sua qualidade e aplicou-se o modelo ao município de Tupã, para verificação da efetividade do método. Nas condições que o trabalho foi realizado, o estudo revelou que o modelo matemático desenvolvido, utilizando a Lógica *Fuzzy*, foi capaz de classificar o CDR com base na categorização criada, adaptada da ABNT (2020), pois vários foram os cenários testados e as respostas obtidas foram muito similares ao que os especialistas apontariam.

Ao que se refere ao material testado para composição de um CDR, a pesquisa revelou que utilizar somente rejeito de RSU do município estudado, que é muito similar à realidade brasileira (devido a composição gravimétrica), não torna o CDR viável do ponto de vista energético, devido a grande quantidade de fração úmida, que diminui o PCI do composto. Sendo assim, haveria necessidade de um pré-tratamento (secagem) do material, fato esse que

encareceria o processo para o uso em larga escala. Entretanto, é importante deixar claro que essas conclusões são baseadas na condição em que o trabalho foi desenvolvido.

Para a realidade deste trabalho, o uso de um CDR composto exclusivamente de casca de amendoim apontou para um cenário arriscado. Apesar das classificações quanto à qualidade do composto ter sido entre ‘regular’ e ‘bom’, essa biomassa não possui uma capacidade firme, devido a questões de período de safra e de mudanças climáticas, que tornam alto o risco para as indústrias dependerem estritamente desse material.

Os cenários que utilizavam rejeitos com adição de casca de amendoim, não se mostraram satisfatórios, pois na melhor das circunstâncias, a classificação foi ‘Regular’. Possivelmente, assim como na amostra 1, caso houvesse a secagem do rejeito essa classificação poderia melhorar.

Então, como sugestão para estudos futuros, propõe-se que seja realizada uma análise de viabilidade econômica para a secagem de rejeitos para uso em fornos e caldeiras, podendo ou não ter adição de alguma biomassa, como a casca de amendoim, por exemplo.

Cabe salientar que o estudo teve a preocupação de utilizar somente rejeitos de RSU, isto é, eliminou-se toda a fração passível de ser reciclada para as análises. Dessa forma, o trabalho vai ao encontro do que propõe a PNRS que prioriza à reciclagem ao tratamento térmico, garantindo assim a sustentabilidade na gestão de resíduos, não só do ponto de vista ambiental, mas também social, uma vez que os catadores e as cooperativas dependem dos materiais recicláveis para o seu sustento.

Apesar de verificar avanços na gestão de resíduos do país nos últimos quinze anos, principalmente com a criação da PNRS, o Brasil tem ainda muito a caminhar neste campo. Os principais desafios se referem a questões políticas e de desigualdade social. Apesar de bastante controvérsia, a perspectiva ao se aprovar o Novo Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020a), é que ao trazer uma maior facilidade nas privatizações de estatais no setor de saneamento básico, se injete recursos para a melhoria na qualidade dos serviços, inclusive em todas as etapas do gerenciamento de resíduos.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM E856-83: 2004 – Standard Definitions of Terms and Abbreviations Relating to Physical and Chemical Characteristics of Refuse Derived Fuel**. 2004. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/astm-e856-83-2004?product_id=1164092. Acesso em: 02 jan. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE; PLASTIVIDA. **Caderno Informativo: Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2012. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-caderno>. Acesso em 01 mai. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2020**. São Paulo: Abrelpe, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2022**. São Paulo: Abrelpe, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS ESTADUAIS DE SANEAMENTO - AESBE. **Combustível de resíduo ajuda a diminuir emissão de gás carbônico**. 2020. Disponível em: <https://aesbe.org.br/novo/combustivel-de-residuo-ajuda-a-diminuir-emissao-de-gas-carbonico/>. Acesso em: 22 abr. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10.004. **Resíduos sólidos: classificação**, 2004a. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10.007. **Amostragem de Resíduos Sólidos**, 2004b. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16.849. **Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos: requisitos**, 2020. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BANDEIRA, M. L. S. **As implicações de um sistema de qualidade e segurança de alimentos na Indústria Alimentícia**. Tupã: FACCAT, 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Engenharia de Produção, Faculdades FACCAT, Tupã, 2018.
- BARROS, A. J. S; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- BOIN, M. N. **Chuvvas e erosões no Oeste Paulista: uma análise climatológica aplicada**. Rio Claro: UNESP, 2000. 264 f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências - Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2000.
- BORDINHON, M. R. **Sistema inteligente fuzzy para a classificação dos fatores de risco à saúde**. Ilha Solteira: UNESP, 2017. 93 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira,

2017.

BRÁS, I.; SILVA, M. E.; LOBO, G.; CORDEIRO, A.; FARIA, M.; LEMOS, L. T. Refuse derived fuel from municipal solid waste rejected fractions - a case study. **Energy Procedia**, v. 120, p. 349-356, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. **Dispõe sobre a Política Energética Nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências**. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19478.htm. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 264, de 26 de agosto de 1999. **Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos**. 1999. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0264-260899.PDF>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. 2002. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>. Acesso em: 14 dez. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. 2006. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0382-261206.PDF>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Dispõe sobre as Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico**. 2007a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445.htm. Acesso em: 03 out. 2021.

BRASIL. Decreto nº 6.017, de 17 de janeiro de 2007. **Regulamenta a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos**. 2007b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6017.htm. Acesso em: 28 jul. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de pesquisa Energética – EPE. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Nota Técnica DEN 06/08. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2008. 73 p.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. 2009. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm. Acesso em: 12 jan. 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. 2010a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-

2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.** 2010b.

Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm)

2010/2010/decreto/d7404.htm. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 09 de dezembro de 2010. **Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências.** 2010c. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7390.htm

Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 436, de 22 de dezembro de 2011. **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007.** 2011. Disponível em:

<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0436-221211.PDF>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de pesquisa Energética – EPE. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Nota Técnica DEA 18/14. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2014. 49 p.

BRASIL. Decreto nº 9.578, de 22 de novembro de 2018. **Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** 2018a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9578.htm. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Portaria Nº 1.082, de 18 de dezembro de 2018. **NR-13 Caldeiras, Vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento.** 2018b. Disponível em: https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-13.pdf. Acesso em: 03 jan. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. **Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010.** 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências.** 2020a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm. Acesso em: 12 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 499, de 06 de outubro de 2020. **Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer.** 2020b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>. Acesso em: 12 ago. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Visão Geral - Ano de Referência 2021.** Brasília: SNS/MDR, 2022a. 71 p.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. **Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** 2022b. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=10936&ano=2022&ato=2f2UTRE1kMZpWTb9a>. Acesso em: 12 jan. 2023.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. **Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** 2022c. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2022/decreto-11043-13-abril-2022-792514-publicacaooriginal-164977-pe.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Série Histórica - 2021.** 2022d. Disponível em: < <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/> >. Acesso em: 17 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Gestão Técnica dos Serviços - Ano de Referência 2021.** Brasília: SNS/MDR, 2023a. 66 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Gestão Administrativa e Financeira - Ano de Referência 2021.** Brasília: SNS/MDR, 2023b. 58 p.

BRAZ, C. E. M. **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia.** Araraquara: UNESP, 2014. 116f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Química – *Campus* de Araraquara da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Araraquara, 2014.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbonde bois.** Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

CARNEIRO, M. L. N. M.; GOMES, M. S. P. Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management.** v. 179, p. 397 – 417, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.007>. ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; CÁZARES, G. N. **Termodinámica.** [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **PIB do**

Agronegócio Brasileiro. 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 28 dez. 2022.

COLLIS, J.; HUSSEY, R. **Business research: a practical guide for undergraduate and postgraduate students.** [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2010.

COLVERO, D. A.; RAMALHO, J.; GOMES, A. P. D.; MATOS, M. A. A.; TARELHO, L. A. C. Economic analysis of a shared municipal solid waste management facility in a metropolitan region. **Waste Management**, v. 102, p. 823-837, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.033>.

COMITÉ EUROPEU DE NORMATIZAÇÃO - CEN. **CEN/TS 15359:2006 – Solid recovered fuels – Specifications and classes.** 2006. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/10cb526d-8db4-4215-8edd-1064df50d1c4/cen-ts-15359-2006>. Acesso em: 28 dez. 2022.

COMITÉ EUROPEU DE NORMATIZAÇÃO - CEN. **CEN 15359:2011 – Solid recovered fuels – Specifications and classes.** 2011. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/cb0123b1-6835-45e7-9257-12016bb1db42/en-15359-2011>. Acesso em: 28 dez. 2022.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRES. **Cempre Review 2019: Um panorama da reciclagem no Brasil.** 2020. Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em 02 de agosto de 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira.** Safra 2015-2016, v. 3, n. 3, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira.** Safra 2020-2021, v. 7, n. 4, 2021.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS - CEWEP. **Wasteto-Energy.** Energising your waste. 2018. Disponível em: www.cewep.eu/wpcontent/uploads/2018/07/Interactive-presentation-2018-New-slides.pdf. Acesso em: 30 dez. 2020.

CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CATANEO, A. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores *fuzzy* para avaliação energética de empresas de avicultura de postura. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 21-39, 2010. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n1p21-39>.

DALMO, F. C.; SIMÃO, N. M.; NEBRA, S.; SANT'ANA, P. H. M. Energy recovery from municipal solid waste of intermunicipal public consortia identified in São Paulo State. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 3, p. 301-310, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X18815953>.

DEMIRBAS, A. Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 29, n. 7, p. 649-655, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/009083190957801>.

DIAS, S. M.; COSTA M. **Avaliação do Potencial de Produção e Utilização de CDR em Portugal Continental**. 2006. Disponível em: http://enverg.ist.utl.pt/PDF/Potencial%20CDR%20v1%2006_06.pdf. Acesso em: 14 dez. 2022.

DOURADO, D. C.; TAVARES, E. L.; STROPARO, E. C.; SOUZA, K. V.; HILLIG, E.; SCHIRMER, W. N. Avaliação das propriedades físico-químicas de resíduos lignocelulósicos provenientes da produção do biodiesel. **Revista Espacios**, v. 38, n. 26, jan. 2017.

DUARTE, M. L. **Previsão da suscetibilidade à incêndios e queimadas utilizando um modelo baseado em inteligência artificial e sistema de inferência fuzzy**. Sorocaba: UNESP, 2022. 131 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2022.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP. **Agronegócio do amendoim no Brasil**: produção, transformação e oportunidades. Relatório. 2022a. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/agronegocio-do-amendoim-no-brasil/>. Acesso em: 20 out. 2022.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP. **Estudo da FIESP mostra que produção de amendoim mais que dobrou nos últimos 10 anos**. 2022b. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/imprensa/estudo-da-fiesp-mostra-que-producao-de-amendoim-mais-que-dobrou-nos-ultimos-10-anos/>. Acesso em: 22 dez. 2022.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP. **Agronegócio do amendoim no Brasil**: produção, transformação e oportunidades. Apresentação. 2022c. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/agronegocio-do-amendoim-no-brasil/>. Acesso em: 20 out. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade**. 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/news/story/pt/item/204029/icode/>. Acesso em: 11 mai. 2023.

FORTI, J. C.; MATULOVIC, M.; MOLLO NETO, M.; SANTOS, F. A.; LANZA, M. R. V.; BERTAZZOLI, R. Hydrogen Peroxide Production in an Electrochemical Flow-by Reactor using Gas Diffusion Electrodes Modified with Organic Redox Catalysts. **International Journal for Innovation Education and Research**. v. 8, n. 7, p. 152-170, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31686/ijier.vol8.iss7.2463>.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2012.

GABRIEL, C. P. C. **Aplicação da Lógica Fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. Botucatu: UNESP, 2008. 97 F. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2008.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, v. 103, p. 249-258, 2012.

GIL, I. C. **Nova Alta Paulista, 1930-2006: entre memórias e sonhos**. Do desenvolvimento contido ao projeto político de desenvolvimento regional. Presidente Prudente: UNESP, 2007. 395 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

GIZ. **Guidelines on pre- and co-processing of waste in cement production; use of waste as alternative fuel and raw material**. 2020. Disponível em: https://www.giz.de/de/downloads/giz-2020_en_guidelines-pre-coprocessing.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

GÓES, B. C. **Modelagem fuzzy da produção e nutrição da soja no plantio direto utilizando doses de molibdênio via foliar e nitrogênio**. Tupã: UNESP, 2020. 164 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Tupã, 2020.

GUNDIM, R. S. **Aplicação do Combustível Derivado de Resíduos (CDR) para otimizar o uso da palha de cana e casca de eucalipto como fonte de energia térmica**. Sorocaba: UFSCAR, 2022. 159 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso dos Recursos Renováveis, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2022.

HASHEM, F. S.; RAZEK, T. A.; MASHOUT, H. A. Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 275-282, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.316>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Portal Cidades**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/tupa/panorama>. Acesso em: 25 abr. 2023.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA. **Estatísticas da Produção Paulista: amendoim**. Disponível em: http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/subjetiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1. Acesso em: 10 nov. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **AR 5 Climate Change 2014**. Mitigation of Climate Change. Chapter 10 – Industry. 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf. Acesso em: 01 mai. 2020.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION - ISWA. **Guest Blog | David Biderman – Global Waste projected to be 3.4bn Tonnes by 2050**. 2018. Disponível em: <https://www.iswa.org/blog/guest-blog-david-biderman-global-waste-projected-to-be-3-4bn-tonnes-by-2050/?v=19d3326f3137>. Acesso em: 12 maio 2023.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

JARAMILLO, J. **Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales**. 1. Ed. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, 2007.

JIMENEZ, A. C. M.; NORDI, G. H.; BERECHÉ, M. C. P.; BERECHÉ, R. P.; GALLEGOS, A. G.; NEBRA, S. A. Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 11, p. 1137-1148, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17728123>.

KARA, Mustafa. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 68, p. 21-28, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.011>.

KATHIRAVALE, S.; YUNUS, M. N. M.; SOPIAN, K. B.; SHAMSUDDIN, A. H.; RAHMAN, R. A. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. **Fuel**, v. 82, n. 9, p. 1119-1125, 2003. [http://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00009-7](http://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00009-7).

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Recycling and thermal treatment of MSW in a developing country. **IOSR Journal of Engineering**, v. 7, n. 7, p. 30-38, 2017.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, p. 19-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.011>.

LOPES, E. J. **Desenvolvimento de sistema de gaseificação via análise de emissões atmosféricas**. Curitiba: UFPR, 2014. 146 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

LOURENZANI, W. L.; LOURENZANI, A. E. B. S.; PIGATTO, G.; PIGATTO, G. A. S.; QUEIROZ, T. R. Análise da competitividade da acerola no estado de São Paulo. **Revista Espacios**, v. 36, n. 12, p. 15, 2015.

MADLOOL, N. A.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S.; RAHIM, N. A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 15, n. 4, p. 2042-2060, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.

MALUTTA, C. **Método de apoio à tomada de decisão sobre a adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy**. Florianópolis: UFSC, 2004. 221 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a *Fuzzy* logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, n. 1, p. 1 – 13, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).

MARQUES, C. S. A. **Concepção da rede logística reversa para a recuperação de lixo eletroeletrônico (ee-lixo) com apoio da Lógica Fuzzy**. Ilha Solteira: UNESP, 2017. 157 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2017.

MELATTI, D. M. **Aspectos da organização social dos Kaingangs paulistas**. [s.l.]: Fundação Nacional do Índio. Departamento Geral de Planejamento Comunitário. Divisão de Estudos e Pesquisas, 1976. 172 p.

MOLLO NETO, M. **Desenvolvimento de um sistema para diagnóstico preventivo de laminite em bovinos de leite utilizando lógica fuzzy**. Campinas: UNICAMP, 2007. 177 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MONTES, A. V.; MORENO, E. M.; NAKAYAMA, I. B.; SCHELINI, J. M. V.; GUTIERRES, J. C. **Tupã: depoimentos de uma cidade**. Tupã: Gráfica & Editora Multi-Gráfica, 2004. 526 p.

NITHIKUL, J. **Potential of refuse derived fuel production from Bangkok municipal solid waste**. Thailand, Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development. 2007. Disponível em: <https://faculty.ait.ac.th/visu/wp-content/uploads/sites/7/2019/01/Jidapa-Thesis-12-12-07.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

NORDI, G. H.; PALACIOS-BERECHE, R.; GALLEGOS, A. G.; NEBRA, S. A. Electricity production from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 7, p. 709-720, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17705721>.

OH, J. YANG, J.; LEE, S. Managing uncertainty to improve decision-making in NPD portfolio management with a fuzzy expert system. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 10, p. 9868-9885, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano**. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/81186-humanidade-produz-mais-de-2-bilh%C3%B5es-de-toneladas-de-lixo-por-ano-diz-onu-em-dia-mundial>. Acesso em: 12 maio 2023.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE - OMS. **5 steps for planning and evaluating world water day activities**. World Health Organization, 2008.

PARAMITA, W.; HARTONO, D. M.; SOESILO, T. E. B. Sustainability of Refuse Derived Fuel Potential from Municipal Solid Waste for Cement's Alternative Fuel in Indonesia (A Case at Jeruklegi Landfill, in Cilacap). In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. **Anais...** IOP Publishing, 2018. p. 012027.

PEREIRA, A. S.; SHITSUKA, D. M.; PARREIRA, F. J.; SHITSUKA, R. **Metodologia da pesquisa científica**. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, NTE, 2018. e-book [recurso eletrônico]. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>. Acesso em: 23 dez. 2021.

PERKIN ELMER. **SMS 100 Mercury Analyzer**. 2009. Disponível em: https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/bro_sms100mercuryanalyzer.pdf. Acesso em: 05 set. 2023.

PETERS, J.; MAY, J.; STRÖHLE, J.; EPPLER, B. Flexibility of CFB Combustion: An Investigation of Co-Combustion with Biomass and RDF at Part Load in Pilot Scale. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184665>.

PIAIA, E. **Uso de rejeitos da coleta seletiva de materiais recicláveis para produção de combustível derivado de resíduos-CDR**. Florianópolis: UFSC, 2021.133 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

PIN, B. V. R.; BARROS, R. M.; LORA, E. E. S.; SANTOS, I. F. S. Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. **Energy Strategy Reviews**, v. 19, p. 31-43, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.002>.

PISANI JÚNIOR, R. Tratamento térmico de resíduos sólidos. In: SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; CASTRO, M. C. A. A.; CÓRDOBA, R. E.; CASTRO, M. A. S. (org.). **Resíduos Sólidos: conceitos, gestão e gerenciamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019, p. 77-113.

PUTTI, F. F.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; SILVA, A. O.; LUDWIG, R.; GABRIEL, C. P. C. *Fuzzy Logic to evaluate vitality of *catasetum fimbiratum* species (orchidacea)*. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 405–413, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n3p405>.

RAHMAN, A.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; SHARMA, S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, v. 145, p. 84-99, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.029>.

RBS TV. Projeto em Mafra, SC, transforma lixo em energia elétrica. **G1 – portal de notícias da Globo**. Mafra, 16 jun. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/projeto-em-mafra-sc-transforma-lixo-em-energia-eletrica.ghtml>. Acesso em: 03 jan. 2023.

REZA, B.; SOLTANI, A.; RUPARATHNA, R.; SADIQ, R.; HEWAGE. K. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 81, p. 105-114, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.

RODRIGUES, M. S. A.; BARREIRA, L.P.; PIMENTA, E.; DANTAS, F. Combustível Derivado de Resíduos (CDR): Definição, padronização e usos potenciais. **Água & Resíduos**, IV.2, 2017.

ROMA, C. M.; GUIMARÃES, R. B. Agroindústria canavieira, pilhagem territorial e rumos do desenvolvimento na região da Nova Alta Paulista/Sugarcane agribusiness, territorial looting and development process in the region of Nova Alta Paulista/Industria de la caña de azúcar, despojo territorial y proceso de desarrollo en la región de Nova Alta Paulista. **Revista Nera**, n. 41, p. 102-119, 2018.

SÁ-SILVA, J. R.; ALMEIDA, C.D. de; GUINDANI, J. F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2009.

SAKRI, A.; AOUABED, A.; NASSOUR, A.; NELLES, M. Refuse-derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 9, p. 1174-1184, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X2098227>.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X20982277>.

SAMPAIO, R. P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana**. São Carlos: USP, 2014. 130 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SANTOS, R. E.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. G. B. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v.231, p. 198-206, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 9.775, de 30 de novembro de 1938. **Fixa o novo quadro de divisão territorial do Estado, que vigorará de 1.º de janeiro de 1939 a 31 de dezembro de 1943, e dá outras providências**. 1938. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1938/decreto-9775-30.11.1938.html>. Acesso em 03 mar. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 7.750, de 31 de março de 1992. **Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e dá outras providências**. 1992. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1992/lei-7750-31.03.1992.html>. Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Norma Técnica P4.263, de dezembro de 2003. **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer**. 2003. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_263.pdf. Acesso em 12 ago. de 2022.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 12.300, de 16 de março de 2006. **Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes**. 2006. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2006/lei-12300-16.03.2006.html>. Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 13.798, de 09 de novembro de 2009. **Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC**. 2009a. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13798-09.11.2009.html>. Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SMA nº 079, de 04 de novembro de 2009. **Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE**. 2009b. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/resolucao/2009/2009_res_est_sma_79.pdf. Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 55.947, de 24 de junho de 2010. **Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas**. 2010. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2010/decreto-55947-24.06.2010.html>.

Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 59.113, de 23 de abril de 2013. **Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas.** 2013. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em 12 jan. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Decisão de Diretoria CETESB nº 326, de 05 de novembro de 2014. **Dispõe sobre os critérios para a verificação do atendimento dos limites de emissão dos parâmetros estabelecidos na Resolução SMA nº 79, de 04/11/2009, para o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Unidades de Recuperação de Energia - UREs.** 2014. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-326-2014-I.pdf>. Acesso em 12 jan. de 2022.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. Decisão de Diretoria CETESB nº 034, de 10 de fevereiro de 2015. **Dispõe sobre exigência técnica para Avaliação de Risco à Saúde Humana por exposição a emissões atmosféricas não intencionais de Dioxinas e Furanos que condiciona a emissão de Licença Ambiental Prévia de Unidades de Recuperação de Energia. (UREs).** 2015. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2014/12/DD-034-2015.pdf>. Acesso em 12 jan. de 2022.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SIMA nº 38, de 31 de maio de 2017. **Diretrizes e condições para o licenciamento e a operação da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos Urbanos – CDRU em Fornos de Produção de Clínquer.** 2017. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/05/resolucao-sma-38-2017/>. Acesso em 15 jun. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Resolução SIMA nº 47, de 06 de agosto de 2020. **Diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR.** 2020a. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/legislacao/2020/08/resolucao-sima-47-2020/>. Acesso em 15 jun. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Cultura e Economia Criativa. Museu Histórico e Pedagógico Índia Vanuíre. **Tupã Plural.** 2020b. Disponível em: <https://museuindiavanuire.org.br/acervo/exposicao-de-longa-duracao/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2021.** São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/> Acesso em: 02 ago. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos 2022.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/publicacoes-e-relatorios/> Acesso em: 20 jan. 2024.

SARAIVA, A. B.; SOUZA, R. G.; VALLE, R. A. B. Comparative lifecycle assessment of alternatives for waste management in Rio de Janeiro – Investigating the influence of an attributional or consequential approach. **Waste Management**, v. 68, p. 701-710, 2017.

SARC, R.; SEIDLER, I. M.; KANDLBAUER, L.; LORBER, K. E.; POMBERGER, R. Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry–Update 2019. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 9, p. 885-897, 2019. DOI: 10.1177/0734242X19862600.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; CASTRO, M. C. A. A.; CÓRDOBA, R. E.; CASTRO, M. A. S. (org.). **Resíduos Sólidos: conceitos, gestão e gerenciamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

SEGANTINI, E. **Aspectos toxicológicos da contaminação por metais pesados no ser humano**. São Paulo: Cetea - Informativo, v. 8, n. 5, 1996. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/informativo/v8n5/v8n5_artigo4.pdf. Acesso em: 22 abr. 2023.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo. Edgard Blücher: FAPESP, 1999.

SILVA, A. L. C. **Análise estatística e modelagem fuzzy dos parâmetros produtivos de bovinos de corte com ingestão de água tratada magneticamente**. Tupã: UNESP, 2018. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Tupã, 2018.

SILVA, T. D. P.; GUALBERTO, V. S.; LIMA, R. A.; MARQUES, R. B.; MALVEIRA, J. Q.; BUENO, A. V.; RIOS, M. A. S. Avaliação de biomassas residuais para fins energéticos. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8., 2020, Fortaleza, Ceará, Brasil. **Anais...** Fortaleza, Ceará, 2020a. Tema: “Outras fontes renováveis de energia - Caracterização, análise, equipamentos e sistemas de conversão energética da biomassa”.

SILVA, L. J. V. B.; SANTOS, I. F. S.; MENSAH, J. H. R.; GONÇALVES, A. T. T.; BARROS, R. M. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1386-1394, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>.

SILVA, L. L. M.; GARRIDO, R. G. Organofosforados e organoclorados: toxicologia médica e reflexos ambientais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18853>.

SILVA, M. F. F. Avaliação do Potencial Energético de Resíduos Agroindustriais. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210097>.

SOBRINHO, R. S. A. **Desenvolvimento de uma ferramenta para análise de dados de gerenciamento de RSU no Brasil e prospecção de oportunidades para recuperação energética**. Araranguá: UFSC, 2020. 75 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2020.

SOUSA, G. P.; PEREIRA, D. F.; RAMOS, D. D.; CATANEO, P. F.; WATANABE, K. Percepção dos produtores de ovos de Bastos/SP sobre ambiência, bem-estar animal e legislação na postura comercial. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 1, p. 40-47, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n1p40-47>.

SOUSA, Á.; PEREIRA, D. F.; RAMOS, D. D.; CATANEO, P. F.; WATANABE, K. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores**, p. 19-19, 2019.

SOUZA, A. R.; SILVA, A. T. Y. L.; TRINDADE, A. B.; FREITAS, F. F.; ANSELMO, J. A. Analysis of the potential use of landfill biogas energy and simulation of greenhouse gas emissions of different municipal solid waste management scenarios in Varginha, MG, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019.

SOUZA, A.; LEITE, C. A contribuição da infraestrutura ferroviária na formação das cidades do oeste paulista. **Revista de Arquitetura IMED**, v. 10, n. 1, p. 90-125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2021.v10i1.4383>.

SPBR. **Região Administrativa de Marília**. Disponível em: <https://www.spbr.com.br/faq/regiao-administrativa-de-marilia/>. Acesso em 03 mar. 2023.

SUGENO, M.; KANG, G. T. Structure identification of *Fuzzy* model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 28, p. 15–33, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3).

TAKAGI, T.; SUGENO, M. *Fuzzy* identification of systems and its application to modelling and control. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 15, p. 116–132, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>.

THEMELIS, N. J.; BARRIGA, M. E. D.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M. G. **Guidebook for the Application of WTE Technologies in Latin America and The Caribbean**. Earth Engineering Center, Columbia University - EEC/IDB. 2013. Disponível em: http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/pressreleases/Guidebook_WTE_v5_July25_2013.pdf. Acesso: 05 mai. 2022.

THEMELIS, N. J.; BARRIGA, M. E. D.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M. G. **Guia para a recuperação de energia e materiais a partir de resíduos sólidos**. Earth Engineering Center, Columbia University, 228 p. 2016. (Tradução da versão original de 2013).

TISI, Y. S. A. B. **Waste-to-Energy**: recuperação energética como forma ambientalmente adequada de destinação dos resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: Synergia, 2019.

TORRES, V. A.; LANGE, L. C. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 25-30, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210221>.

TRINDADE; A. B.; PALÁCIO, J. C. E.; GONZÁLEZ, A. M.; OROZCO, D. J. R.; LORA, E. E. S.; RENÓ, M. L. G.; OLMO, O. A. Advanced exergy analysis and environmental assessment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery. **Energy Conversion and Management**, v. 157, p. 195-214, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.083>.

TUPÃ. Lei nº 4.345, de 14 de fevereiro de 2008. **Estabelece o Plano Municipal de Saneamento Básico de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Tupã –SP.** 2008.

TUPÃ. Decreto nº 6.823, de 22 de dezembro de 2011. **Estabelece o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Tupã/SP.** 2011.

TUPÃ. **Qualidade de Vida:** terra do índio bravio onde é o céu sempre anil 2023. Disponível em: <https://www.tupa.sp.gov.br/pagina/5/qualidade-de-vida>. Acesso em: 25 abr. 2023.

UMMATIN, K. K.; ARIFIANTI, Q. A. M. O.; HANI, A.; ANNISSA, Y. Quality Analysis of Refused-Derived Fuel as Alternative Fuels in the Cement Industry and Its Evaluation on Production. In: International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI), 2019. **Anais...** IEEE, 2019. p. 1-6.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2000/76/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de Dezembro de 2000, relativa à incineração de resíduos. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias L 332**, p. 91, 2000.

UNIPETRO. **Amendoim:** tenha produtividade e desempenho durante a colheita da safra. 2023. Disponível em: <https://unipetro.com.br/amendoim-tenha-produtividade-e-desempenho-durante-a-colheita-da-safra/#:~:text=O%20ciclo%20do%20amendoim%20varia,outono%2C%20a%20partir%20de%20mar%C3%A7o>. Acesso em: 25 abr. 2023.

USÓN, A.; FERREIRA, G.; VÁSQUEZ, D.; BRIBIÁN, I.; SASTRESA, E. Estimation of the energy content of the residual fraction refused by MBT plants: a case study in Zaragoza's MBT plant. **Journal of Cleaner Production**, v. 20, p. 38-46, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.07.024>.

VELOSO, F. A importância do Programa de Aquisição de Alimentos para as famílias e entidades beneficiárias na região da nova alta paulista. **PEGADA-A Revista da Geografia do Trabalho**, v. 18, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.33026/peg.v18i2.5166>

ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets*. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO APLICADO AOS ESPECIALISTAS



Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
FACULDADE DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento

Questionário – Especialistas na Temática

Esta pesquisa intitulada como “**COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR) COM ADIÇÃO DE CASCA DE AMENDOIM: UMA AVALIAÇÃO COM ALGORITMO DE SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO**”, desenvolvida pela aluna Natália Dadario, que cursa o Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento da Faculdade de Ciências e Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP do Campus de Tupã, sob a orientação do Prof. Dr. Mario Mollo Neto, possui a seguinte finalidade: **Desenvolver um algoritmo de suporte à tomada de decisão que classifique a qualidade de um CDR formado por resíduos sólidos urbanos com ou sem adição de biomassa.**

Solicitamos a sua colaboração para responder a este formulário como especialista do assunto que durará apenas 5 minutos, como também sua autorização para apresentar os resultados deste estudo em eventos científicos e publicar em revista científica nacional e/ou internacional. É importante esclarecer que este questionário terá finalidade exclusivamente acadêmica, portanto, todas as respostas a esta pesquisa são anônimas e confidenciais e serão tratadas de forma agregada, de maneira que nenhuma resposta individual e o nome dos entrevistados, possa ser identificado.

Esclarecemos que sua participação no estudo é voluntária e, portanto, o(a) senhor(a) não é obrigado(a) a fornecer as informações e/ou colaborar com as atividades solicitadas pela pesquisadora. Caso decida não participar do estudo, ou resolver a qualquer momento desistir do mesmo, não sofrerá nenhum dano. A pesquisadora estará a sua disposição para qualquer esclarecimento que considere necessário em qualquer etapa da pesquisa.

Caso necessite de maiores informações sobre o presente estudo, favor entrar em contato com a **Pesquisadora Natália Dadario, pelo e-mail: natalia.dadario@unesp.br**, ou com o **Professor Orientador Dr. Mário Mollo Neto, pelo e-mail: mario.mollo@unesp.br**.

Agradecemos desde já pela sua colaboração.

Considerando, ter recebido as devidas explicações sobre a referida pesquisa e concordando que minha desistência poderá ocorrer em qualquer momento sem que ocorra quaisquer prejuízos físicos ou mentais, declaro o meu consentimento em participar da pesquisa. Declaro ainda estar ciente de que a participação é voluntária e que fui devidamente esclarecido(a) quanto a finalidade desta pesquisa, como também concordo que os dados obtidos na investigação sejam utilizados para fins científicos (divulgação em eventos e publicações).

() Declaro estar ciente e concordo em participar da pesquisa.

() Não quero participar da pesquisa.

Considere os limites para classificação dos CDR's propostos nessa pesquisa, adaptados da ABNT (2020).

Característica de Classificação				
Unidade	Classes			
PCI (base seca)	P1	P2	P3	P4
kcal/kg	$PCI \geq 4.750$	$4.750 > PCI \geq 3.580$	$3.580 > PCI \geq 2.390$	$PCI < 2.390$
Teor de Cloro	C1	C2	C3	C4
%	$Cl \leq 0,5$	$0,5 < Cl \leq 1,5$	$1,5 < Cl \leq 3,0$	$Cl > 3,0$
Teor de Mercúrio	H1	H2	H3	H4
mg/kg	$Hg \leq 0,1$	$0,1 < Hg \leq 0,25$	$0,25 < Hg \leq 0,5$	$Hg > 0,5$

Baseado nas características da tabela apresentada acima, classifique o CDR em:

- "ÓTIMO"
- "BOM"
- "REGULAR"
- "RUIM"
- "PÉSSIMO"
- "NÃO É CDR"

	Regra	Ótimo	Bom	Regular	Ruim	Péssimo	Não é CDR
1)	P1; C1; H1	()	()	()	()	()	()
2)	P1; C1; H2	()	()	()	()	()	()
3)	P1; C1; H3	()	()	()	()	()	()
4)	P1; C1; H4	()	()	()	()	()	()
5)	P1; C2; H1	()	()	()	()	()	()
6)	P1; C2; H2	()	()	()	()	()	()
7)	P1; C2; H3	()	()	()	()	()	()
8)	P1; C2; H4	()	()	()	()	()	()
9)	P1; C3; H1	()	()	()	()	()	()
10)	P1; C3; H2	()	()	()	()	()	()

11)	P1; C3; H3	()	()	()	()	()	()
12)	P1; C3; H4	()	()	()	()	()	()
13)	P1; C4; H1	()	()	()	()	()	()
14)	P1; C4; H2	()	()	()	()	()	()
15)	P1; C4; H3	()	()	()	()	()	()
16)	P1; C4; H4	()	()	()	()	()	()
17)	P2; C1; H1	()	()	()	()	()	()
18)	P2; C1; H2	()	()	()	()	()	()
19)	P2; C1; H3	()	()	()	()	()	()
20)	P2; C1; H4	()	()	()	()	()	()
21)	P2; C2; H1	()	()	()	()	()	()
22)	P2; C2; H2	()	()	()	()	()	()
23)	P2; C2; H3	()	()	()	()	()	()
24)	P2; C2; H4	()	()	()	()	()	()
25)	P2; C3; H1	()	()	()	()	()	()
26)	P2; C3; H2	()	()	()	()	()	()
27)	P2; C3; H3	()	()	()	()	()	()
28)	P2; C3; H4	()	()	()	()	()	()
29)	P2; C4; H1	()	()	()	()	()	()
30)	P2; C4; H2	()	()	()	()	()	()
31)	P2; C4; H3	()	()	()	()	()	()
32)	P2; C4; H4	()	()	()	()	()	()
33)	P3; C1; H1	()	()	()	()	()	()
34)	P3; C1; H2	()	()	()	()	()	()
35)	P3; C1; H3	()	()	()	()	()	()
36)	P3; C1; H4	()	()	()	()	()	()
37)	P3; C2; H1	()	()	()	()	()	()
38)	P3; C2; H2	()	()	()	()	()	()
39)	P3; C2; H3	()	()	()	()	()	()
40)	P3; C2; H4	()	()	()	()	()	()
41)	P3; C3; H1	()	()	()	()	()	()
42)	P3; C3; H2	()	()	()	()	()	()
43)	P3; C3; H3	()	()	()	()	()	()

44)	P3; C3; H4	()	()	()	()	()	()
45)	P3; C4; H1	()	()	()	()	()	()
46)	P3; C4; H2	()	()	()	()	()	()
47)	P3; C4; H3	()	()	()	()	()	()
48)	P3; C4; H4	()	()	()	()	()	()
49)	P4; C1; H1	()	()	()	()	()	()
50)	P4; C1; H2	()	()	()	()	()	()
51)	P4; C1; H3	()	()	()	()	()	()
52)	P4; C1; H4	()	()	()	()	()	()
53)	P4; C2; H1	()	()	()	()	()	()
54)	P4; C2; H2	()	()	()	()	()	()
55)	P4; C2; H3	()	()	()	()	()	()
56)	P4; C2; H4	()	()	()	()	()	()
57)	P4; C3; H1	()	()	()	()	()	()
58)	P4; C3; H2	()	()	()	()	()	()
59)	P4; C3; H3	()	()	()	()	()	()
60)	P4; C3; H4	()	()	()	()	()	()
61)	P4; C4; H1	()	()	()	()	()	()
62)	P4; C4; H2	()	()	()	()	()	()
63)	P4; C4; H3	()	()	()	()	()	()
64)	P4; C4; H4	()	()	()	()	()	()