

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Vitor Alvarenga Torres

**TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PRODUÇÃO DE
COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO**

Belo Horizonte
2023

Vitor Alvarenga Torres

**TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PRODUÇÃO DE
COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Orientadora: Prof^a Dr^a Lisete Celina Lange

Belo Horizonte
2023

T693t	<p>Torres, Vitor Alvarenga. <i>Tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos para produção de combustível derivado de resíduo</i> [recurso eletrônico] / Vitor Alvarenga Torres – 2023. 1 recurso online (133 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientadora: Lisete Celina Lange.</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 133. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Meio ambiente – Teses. 3. Sustentabilidade e meio ambiente – Teses. 4. Resíduos sólidos urbanos – Teses. 5. Briquetes (Combustível) – Teses. 6. Carvão – Gaseificação – Teses. I. Lange, Lisete Celina. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos Urbanos Para Produção de Combustível Derivado de Resíduo"

VITOR ALVARENGA TORRES

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profa Liséte Celina Lange

Prof. Eduardo Coutinho de Paula

Prof. Marcelo Cardoso

Prof. Rogério José da Silva

Prof. Fernando Fernandes

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof^ª. Liséte Celina Lange

Coordenadora

Orientadora

Belo Horizonte, 18 de maio de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Cardoso, Professor do Magistério Superior**, em 18/05/2023, às 17:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério José da Silva, Usuário Externo**, em 18/05/2023, às 17:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Professor do Magistério Superior**, em 18/05/2023, às 17:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lisete Celina Lange, Professora do Magistério Superior**, em 18/05/2023, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Fernandes, Usuário Externo**, em 24/05/2023, às 14:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 03/08/2023, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2308671** e o código CRC **27AFB08C**.

Ao meu pai, Artur.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos e à UFMG, pela oportunidade concedida e pelo acolhimento.

À minha orientadora, Prof^a Lisete Celina Lange, pela sabedoria, acolhimento, serenidade e carinho ao longo de toda a jornada.

Aos colegas do PPG-SMARH e do SIGERS, pelo companheirismo, cumplicidade e apoio durante o curso.

À Engenho Nove Engenharia Ambiental, pelo apoio técnico e financeiro dado ao projeto desde o início, e pela total confiança no sucesso da pesquisa. Em especial, às seguintes pessoas: Artur, Andrade e Pedro, pela confiança; Paulo, Míriam, Ana Paula e Fátima, pelo apoio técnico; Joel e Aguinaldo, pela grande ajuda ao longo de toda a operação da planta de tratamento.

Aos Institutos de Tecnologia do Meio Ambiente e Metalmeccânica do Senai-MG, pelo apoio técnico e financeiro dado ao projeto. Em especial, às seguintes pessoas: Dângelle, Mônica, Júlio, Max, Marcos, Guilherme, Henrique, Filipe e Carlos.

À PAM – Produtos Ambientais Metalúrgicos pelo apoio técnico e financeiro na etapa de briquetagem do material.

À Cimento Nacional, pela confiança na pesquisa e pelo apoio técnico e institucional oferecido, em especial ao Pedro e à Ana Carla.

À SEGMA, pelo apoio técnico na coleta e amostragem dos gases.

Ao Prof. Thiago, do DESA-UFMG, pelo apoio técnico nos procedimentos laboratoriais e nas análises cromatográficas.

À Gramadus, pelo apoio técnico e financeiro ao projeto.

Ao WtERT, à ABREN, e especialmente à FIEMG, pelo apoio institucional ao projeto.

Por último, mas não menos importante, à minha família, em especial aos meus pais, Patrícia e Artur, e à minha esposa, Marina, por todo o carinho, apoio e paciência ao longo desta árdua jornada.

"All have their worth, and each contributes to the worth of others"
J.R.R. Tolkien

RESUMO

A questão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil representa um grande desafio à sociedade. A recuperação energética por meio de tratamentos térmicos representa uma possível rota para a gestão adequada desses resíduos. Entretanto, desafios relacionados ao baixo poder calorífico inferior (PCI), à composição e à heterogeneidade dos RSU dificultam a aplicação de tratamentos tradicionais. Esta tese teve como objetivo a avaliação de uma tecnologia de tratamento térmico de RSU a temperaturas entre 150 e 250°C, sem triagem prévia, para a produção de combustível derivado de resíduo urbano (CDRU). Foi desenvolvida uma planta piloto com capacidade de processamento de até 1,0 t de RSU por batelada, para a produção de 3,2 t de CDRU. Durante a operação da planta, foram avaliadas as emissões atmosféricas de MP, CO, SO_x, NO_x, HCl e cloro livre, fluoreto, dioxinas e furanos. O CDRU produzido foi avaliado quanto aos parâmetros de qualidade da legislação nacional e normas internacionais. Parte do CDRU produzido passou por uma etapa de densificação e briquetagem e foi destinada à gaseificação. O gás de síntese obtido foi caracterizado por meio de cromatografia gasosa para avaliação de sua composição e estimativa de seu PCI, e os resultados foram comparados com o gás de madeira produzido sob as mesmas condições operacionais. Também foi realizada uma investigação exploratória de COVs e organoclorados presentes no gás de CDRU. As 3,0 t restantes de CDRU foram encaminhadas a uma usina de cimento para um teste de queima em escala plena. O processo de tratamento de RSU apresentou adequação à maioria dos limites normativos atuais para emissões atmosféricas, destacando-se as concentrações de 0,021 ngTEQ/Nm³ de dioxinas e furanos. O PCI médio das amostras de CDRU foi de 4.450 kcal/kg, com umidade de 11%, teor de cloro de 0,22% e concentração de mercúrio abaixo de 0,01 mg/kg, indicando assim bom potencial para uso como combustível e compatibilidade com as normas nacionais e internacionais aplicadas no estudo. O processo de briquetagem apresentou viabilidade para umidade ótima de 18% e resistência final à compressão de 15,3 MPa. O PCI do gás de síntese produzido foi de 6,61 MJ/m³, o que indica potencial para aproveitamento térmico em processos industriais. A metodologia utilizada na exploração por cromatografia não identificou substâncias organocloradas no gás, sendo detectada a presença principal de BTEX e acetonitrila em concentrações relevantes. A avaliação pelo método estatístico de Mann-Whitney não detectou diferenças significativas de composição entre o gás de madeira e o gás de CDRU para uma significância de 5%. No teste de queima em escala plena, não foram observadas variações expressivas nas condições de operação, no desempenho ambiental ou no clínquer produzido, em comparação à operação de rotina do empreendimento, para uma razão de substituição térmica de até 45% no pré-calcinador. As emissões de SO_x apresentaram redução média de 81,2% em relação à operação padrão da cimenteira. De forma geral, o tratamento proposto apresentou viabilidade técnica e ambiental, sendo que o CDRU produzido apresentou características adequadas para uso como matéria-prima de gás de síntese, produção de briquetes ou coprocessamento em escala plena, sem prejuízo em relação às operações padrão.

Palavras-chave: Briquetagem. Coprocessamento. Gaseificação. Sustentabilidade. Valorização energética de resíduos.

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) management in Brazil poses a substantial challenge to society. Energy recovery by means of thermal treatment can be a viable route to properly manage these wastes. However, challenges related to the poor lower heating value (LHV), composition, heterogeneity and high moisture of these wastes pose difficulties to the use of traditional treatment processes. This thesis aimed to assess a new thermal treatment technology for MSW, with temperatures ranging from 150°C to 250°C, without prior screening, for refuse derived fuel (RDF) production. A pilot plant with the capacity to treat up to 1.0 t/day of MSW was developed in order to manufacture 3.2 tonnes of RDF. During the operation of the plant, atmospheric emission levels for PM, CO, SO_x, NO_x, HCl and chlorine, fluorides and PCDD/Fs were evaluated. RDF samples were characterized and compared with national and international normative. Part of the RDF was pelletized and used as source material for a gasification process. The resulting syngas was characterized by chromatographic analyses to determine its composition and estimate its LHV, and the results were compared to syngas produced from wood chips in the same operational conditions. An exploratory investigation of VOCs and organochlorine substances in the syngas was also conducted using gas chromatography coupled to mass spectrometry. The remaining RDF was destined to a cement factory for an industrial scale coprocessing test. The MSW treatment process was shown to be adequate to most current Brazilian normative emission standards, with PCDD/Fs emissions of 0.021 ngTEQ/Nm³. The average LHV of the RDF samples was of 4450 kcal/kg, with average moisture content of 11%, 0.22% chlorine and less than 0.01 mg/kg mercury, indicating good potential for usage as an industrial solid fuel and compatibility with both national and international standards. The pelletizing process showed technical feasibility, with ideal moisture content of 18% and an average compression strength of 15.3 MPa. The LHV of the RDF syngas was of 6.61 MJ/Nm³, which indicates potential for thermal use in industrial processes. The method used in the chromatography investigation did not identify any organochlorine in the syngas, with the detection of BTEX and acetonitrile in relevant concentration. Comparison between the RDF and wood chip syngases using the Mann-Whitney method for a 5% significance level did not show significant differences in gas composition between the two feeds. In the coprocessing test, no expressive variations of operational conditions, environmental performance or clinker quality were observed, for a thermal substitution ratio of up to 45%. SO_x emissions showed an average reduction of 81.2% when compared to standard operation. From a general standpoint, the proposed treatment was shown to be environmentally and technically viable, and the RDF was shown to be an adequate feed for gasification, pelleting or for coprocessing, with no observed drawbacks when compared to standard operation.

Keywords: Coprocessing. Energy from waste. Gasification. Pelletization.. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da gestão dos RSU no estado de Minas Gerais.....	28
Figura 2 – Variação da composição gravimétrica do RSU por faixa de renda	30
Figura 3 – Fluxograma do processo de gaseificação	38
Figura 4 – Localização das indústrias com licenciamento para coprocessamento no Brasil	40
Figura 5 – Fluxograma da fabricação do clínquer	41
Figura 6 – Reator de desidratação (esquerda) e detalhe da correia de carregamento (direita)	54
Figura 7 – Combustores para a queima do combustível e fornalha	54
Figura 8 – Ciclone para retenção de sólidos e condensado (esquerda) e lavador por via úmida (direita)	55
Figura 9 – Sala de controle da operação	56
Figura 10 – Detalhe da interface gráfica utilizada	56
Figura 11 – Layout esquemático da planta piloto	57
Figura 12 – Detalhe da tomada de ar fresco com <i>damper</i>	60
Figura 13 – Fluxograma da metodologia de operação da planta piloto.....	62
Figura 14 – Resíduo <i>in natura</i> recebido (à esquerda) e detalhe da composição (à direita)	68
Figura 15 – Acumulação temporal de DBO, DQO e ST ao longo da operação.....	76
Figura 16 – Acumulação temporal de fenóis e nitrogênio amoniacal total ao longo da operação	76
Figura 17 – Principais fluxos de massa e energia na planta de tratamento	77
Figura 18 – Misturador (a), Filtro prensa (b) e gaiola na saída do filtro (c).....	88
Figura 19 – Gaseificador e equipamentos auxiliares.....	89
Figura 20 – Arranjo de impingers para extração de orgânicos voláteis.....	92
Figura 21 – Resultados dos dois primeiros lotes de briquetes em escala industrial..	94
Figura 22 – Briquetes fabricados após correção da umidade	94
Figura 23 - Chamas resultantes da queima do gás de síntese de CDRU (esquerda) e madeira (direita)	95
Figura 24 – Cromatograma para detecção de COVs do gás de síntese de madeira	98
Figura 25 – Cromatograma para detecção de COVs do gás de síntese de CDRU...	98

Figura 26 – Comparação entre padrões de quebra molecular do etilbenzeno e o,m,p-xilenos	99
Figura 27 – Tempos de detecção para etilbenzeno, o-xileno e m,p-xilenos.....	100
Figura 28 – Exemplo de padrão de quebra de molécula organoclorada (Diclorometano)	102
Figura 29 – Carregamento do CDRU para mistura	107
Figura 30 – Material preparado e carregamento na tremonha	108
Figura 31 – Comparação entre as emissões atmosféricas durante operação padrão e durante o teste de queima.....	112
Figura 32 – Comparação da composição do clínquer avaliada durante operação padrão do forno e após o teste de queima	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Porcentagem de resíduos com destinação inadequada por região do país	27
Tabela 2 – Resultados de estudos de composição gravimétrica do RSU no Brasil ..	29
Tabela 3 – Limites normativos para composição de CDR ou RSUE no Brasil.....	32
Tabela 4 – Classes de qualidade de CDRU segundo EN ISO 21640/2021	33
Tabela 5 – Resumo da literatura técnica avaliada – CDRU: estado-da-arte	37
Tabela 6 – Lista dos principais equipamentos da planta piloto	58
Tabela 7 – Composição gravimétrica do resíduo processado.....	68
Tabela 8 – Resultados das análises do CDRU e limites estabelecidos na DN 154/2010	71
Tabela 9 – Comparação de valores normativos nacionais com os dados para o CDRU produzido.....	72
Tabela 10 – Comparação de valores para classificação segundo EN ISO 21640/2021 com os dados para o CDRU produzido.....	72
Tabela 11 – Resultados das análises de emissões atmosféricas e comparação com os limites normativos em âmbito estadual e nacional	73
Tabela 12 – Resultados das análises da solução de lavagem	75
Tabela 13 – Valores operacionais médios ao longo da operação da planta	78
Tabela 14 – Custos estimados de capital e operação (valores para a data de agosto de 2022)	79
Tabela 15 – Formulações utilizadas para o teste de briquetagem do CDRU	88
Tabela 16 – Condições operacionais para o ensaio de cromatografia gasosa para detecção de compostos orgânicos	93
Tabela 17 – Composição dos gases de síntese produzidos	96
Tabela 18 – Substâncias detectadas no ensaio, massa molar e similaridade observada	101
Tabela 19 – Principais dados construtivos e operacionais do forno	108
Tabela 20 – Condições operacionais alvo durante o teste de queima	109
Tabela 21 – Resultados de emissões atmosféricas para operação padrão e teste de queima	111
Tabela 22 – Características do clínquer produzido durante operação padrão e durante o teste	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas e siglas no vernáculo:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BTEX – Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xileno

C₂S – Silicato dicálcico

C₃S – Silicato tricálcico

C₃A – Aluminato de cálcio

C₄AF – Ferroaluminato de cálcio

CDR – Combustível Derivado de Resíduos

CDRI – Combustível Derivado de Resíduos Industriais

CDRU – Combustível Derivado de Resíduos Urbanos

CLP – Controlador Lógico Programável

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

COPAM – Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

EUR – Euro

FSC – Fator de Saturação de Cal

GEE – Gases de Efeito Estufa

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IHM – Interface Homem-Máquina

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial

MA – Módulo de Alumina

MP – Material Particulado

MS – Módulo de Sílica

NO_x – Óxidos de nitrogênio

PCDD/Fs – dibenzodioxonas e -furanos policlorados

PCI – Poder Calorífico Inferior

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RSI – Resíduos Sólidos Industriais

SO_x – Óxidos de enxofre

THC – Hidrocarbonetos totais

UE – União Europeia

USD – Dólar americano

Abreviaturas e siglas em língua estrangeira:

CAPEX – Capital Expenditure

FID – Flame Ionization Detector

LHV – Lower Heating Value

MBT – Mechanical Biological Treatment

MSW – Municipal Solid Waste

OPEX – Operational Expenditure

RDF – Refuse Derived Fuel

SRF – Solid Recovered Fuel

USEPA – United States Environmental Protection Agency

WtE – Waste-to-Energy

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização e histórico da pesquisa	21
1.2	Hipóteses	23
1.3	Objetivo Geral	23
1.4	Referências de literatura	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	Gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil	26
2.2	Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil	28
2.3	Combustível derivado de resíduos – CDR	30
2.3.1	CDRU – Avanços recentes e estado-da-arte	34
2.4	Gaseificação de resíduos e CDR	37
2.5	Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer	39
2.5.1	O processo de produção do cimento Portland	40
2.5.2	Combustíveis alternativos e coprocessamento de resíduos	42
2.5.3	Coprocessamento de CDRU	43
2.6	Conclusões	44
2.7	Referências de literatura	44
3	TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PRODUÇÃO DE CDRU	52
3.1	Introdução	52
3.2	Objetivos	52
3.2.1	Objetivo Geral	52
3.2.2	Objetivos específicos	53
3.3	Materiais e métodos	53
3.3.1	Projeto e construção de planta piloto de desidratação de RSU	53
3.3.2	Determinação das condições ideais de operação da planta	58
3.3.3	Operação da planta	61
3.3.4	Caracterização do CDR produzido	65
3.3.5	Análises de emissões atmosféricas	65
3.3.6	Análise da solução de lavagem dos gases e da acumulação de poluentes 66	
3.3.7	Balances de massa e energia	66
3.3.8	Análise econômica preliminar	67
3.4	Resultados e discussão	67
3.4.1	Calibração da operação e processamento dos primeiros lotes de RSU ..	67
3.4.2	Resultados da análise do CDRU produzido	70

3.4.3	Resultados das análises de emissões atmosféricas	72
3.4.4	Resultados das análises de efluentes	75
3.4.5	Fluxos de massa e energia	77
3.4.6	Análise econômica preliminar	78
3.5	Conclusões	80
3.6	Referências de literatura	82
4	AVALIAÇÃO DA DENSIFICAÇÃO E DA GASEIFICAÇÃO DO CDRU PRODUZIDO	86
4.1	Introdução	86
4.2	Objetivos	87
4.2.1	Objetivo Geral	87
4.2.2	Objetivos específicos	87
4.3	Materiais e métodos	87
4.3.1	Densificação do CDRU e produção de briquetes	87
4.3.2	Gaseificação do CDRU	89
4.3.3	Caracterização do gás de síntese quanto à composição	90
4.3.4	Investigação da presença de COV e organoclorados	91
4.4	Resultados e discussão	93
4.4.1	Densificação dos briquetes	93
4.4.2	Gaseificação do CDRU e caracterização do gás de síntese	95
4.4.3	Presença de COVs e organoclorados	97
4.5	Conclusões	103
4.6	Referências de literatura	103
5	COPROCESSAMENTO DO CDRU: TESTE EM ESCALA PLENA	106
5.1	Introdução	106
5.2	Objetivos	106
5.2.1	Objetivo Geral	106
5.2.2	Objetivos específicos	107
5.3	Materiais e métodos	107
5.3.1	Preparação do CDRU para alimentação	107
5.3.2	Realização do teste de queima em escala industrial	108
5.3.3	Comparação das condições operacionais, das emissões atmosféricas e qualidade do clínquer	109
5.4	Resultados e discussão	110
5.4.1	Condições operacionais do forno clínquer	110
5.4.2	Emissões atmosféricas do forno de clínquer	111
5.4.3	Características do clínquer produzido	113
5.5	Conclusões	115

5.6	Referências de literatura	116
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
6.1	Sugestões para pesquisas futuras	121
7	REFERÊNCIAS DA LITETURA	124

1 INTRODUÇÃO

A mudança do paradigma energético mundial tem levado a uma busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis tradicionais e por uma maior diversificação das matrizes térmica e elétrica, o que se intensificou ainda mais em face às recentes crises geopolíticas e a consequente instabilidade nas cadeias de suprimento de combustíveis fósseis (IEA, 2022, KHUDAYKULOVA *et al.*, 2022).

Paralelamente, a problemática dos resíduos sólidos urbanos (RSU) torna-se cada vez mais relevante em função da necessidade mitigação dos impactos ambientais relacionados à sua geração, tratamento e disposição finais, em especial a geração de gases de efeito estufa (GEE) e lixiviados de difícil tratabilidade. Apenas no Brasil, são coletadas cerca de 67 milhões de toneladas de RSU por ano, das quais 27% não possuem destinação adequada e 73% são encaminhadas a aterros sanitários (SNIS, 2021). Apesar do uso de aterros sanitários ser considerado como uma estratégia adequada de gestão de resíduos, o aterramento de resíduos elimina qualquer possibilidade de recuperação de valor, seja na forma de materiais ou energia, o que significa que estratégias mais sustentáveis devem ser priorizadas. Destacam-se também os impactos ambientais negativos gerados em aterros, como a geração de lixiviados e gases que devem ser coletados e tratados, além do passivo ambiental criado.

A busca pela valoração energética dos RSU tem, portanto, dois principais objetivos: valorar os resíduos gerados por meio do aproveitamento energético destes como fonte térmica ou matéria-prima para tal, substituindo combustíveis tradicionais, e a redução dos impactos e passivos ambientais gerados pelo descarte irregular ou pelo aterramento de resíduos com possibilidades de recuperação ainda não esgotadas, o que representa uma perda de oportunidade do ponto de vista de sustentabilidade (PSOMOPOULOS *et al.*, 2009; BRUNNER, 2017).

Dada sua biodegradabilidade, sua heterogeneidade, sua alta umidade (e, conseqüentemente, baixo poder calorífico inferior – PCI) e a variação regional e sazonal em sua composição, a utilização de RSU como combustível em processos de geração de energia ou processos industriais possui diversos entraves técnicos, sendo

tipicamente necessárias etapas prévias de beneficiamento dos resíduos para viabilizar esse uso (MEYSTRE E SILVA, 2013; BAIDYA *et al.*, 2017; KOSAJAN *et al.*, 2020).

Uma das maneiras de se valorizar os RSU é por meio da produção de combustível derivado de resíduo urbano (CDRU). Essa produção pode se dar por meio da separação de rejeitos não recicláveis com alto PCI, da biossecagem da fração úmida, da triagem e densificação de materiais com alto PCI em briquetes, dentre outros (INFIESTA *et al.*, 2019; SHUMAL *et al.*, 2020; REZAEI *et al.*, 2020; TIBURCIO *et al.*, 2021).

A produção de CDRU torna possível aumentar também o valor agregado dos resíduos, viabilizando a logística de transporte por maiores distâncias e até mesmo a venda do produto final do processo para utilização em indústrias, a fim de substituir combustíveis tradicionais como coque e derivados de petróleo (INTHARATHIRAT & ABDUL SALAM, 2016).

O CDRU pode possuir potencial de aplicabilidade como combustível alternativo em processos industriais (e.g. coprocessamento na indústria de cimento), em processos de geração de energia térmica e elétrica (caldeiras a vapor) ou como matéria-prima em processos de conversão química que se beneficiam de uma maior homogeneidade (e.g. gaseificação e pirólise), sendo por vezes necessária sua densificação para melhor adequação de granulometria às especificidades destes processos.

Em face das dificuldades encontradas na gestão dos RSU no Brasil e no mundo e das possíveis aplicações para um CDRU, o presente trabalho buscou explorar uma nova rota de tratamento de resíduos em escala piloto, e o potencial de utilização do CDRU produzido em diferentes cenários.

1.1 Contextualização e histórico da pesquisa

Em busca de soluções alternativas e de baixo custo operacional para sistemas de saneamento, foi estabelecido um convênio tecnológico entre a Universidade Federal de Minas Gerais e uma empresa parceira no ano de 2015. Como um dos resultados deste projeto, foi proposto um sistema de tratamento térmico de RSU a temperaturas brandas para a produção de CDRU, sem a necessidade de triagem prévia, para redução da massa e volume do resíduo por meio da perda de umidade, com

consequente valoração energética do mesmo. Uma patente foi depositada pela UFMG no ano de 2018, sob o protocolo BR 10 2018 003828 1 do INPI, de título "Processo de desidratação e densificação de resíduos sólidos e biomassa e dispositivo" (INPI, 2018).

Como continuidade da pesquisa, este trabalho buscou explorar a viabilidade técnica da tecnologia desenvolvida e patenteada, avaliando não apenas o processo para a produção de CDRU mas também o seu uso em diferentes aplicações e escalas.

Para melhor compreensão do trabalho, a tese foi estruturada em capítulos, divididos de acordo com as etapas metodológicas realizadas, sendo o presente capítulo dedicado à introdução e o Capítulo 2 a uma revisão da literatura, com foco no estado-da-arte sobre os temas abordados.

A primeira etapa metodológica do trabalho, apresentada no Capítulo 3, explorou o processo de tratamento térmico em si, com o desenvolvimento de uma planta piloto de tratamento de RSU para a produção de CDRU, seus balanços de massa e energia, além dos eventuais impactos ambientais resultantes. Também foi realizada a caracterização do CDRU produzido, para avaliação de sua adequação potencial como fonte térmica, e um levantamento dos custos relacionados à operação da planta.

No Capítulo 4, foi explorada a viabilidade de densificação do CDRU e sua posterior gaseificação para produção de gás de síntese. Foram testadas diferentes misturas para a fabricação dos briquetes, que em seguida foram avaliados quanto à sua composição e resistência mecânica. Já o gás de síntese produzido foi avaliado quanto à sua composição e poder calorífico e comparado com o gás produzido utilizando a madeira como matéria-prima, tomado como padrão neste trabalho para referência.

O Capítulo 5 apresenta a avaliação da aplicabilidade do CDRU para coprocessamento. Para tal, foi realizado um teste de queima em escala plena em um forno de clínquer de uma indústria parceira e avaliados o desempenho operacional e ambiental da unidade industrial, além da qualidade do clínquer produzido.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais acerca dos resultados obtidos nas etapas anteriores do trabalho. Também são propostas etapas posteriores para o aprofundamento das pesquisa em outros trabalhos.

1.2 Hipóteses

- O tratamento térmico de RSU a baixas temperaturas, em conjunto com a cominuição do material para adequação de granulometria, é capaz de produzir um material com propriedades adequadas para uso como combustível alternativo, mesmo sem etapa de triagem prévia do RSU;
- O tratamento térmico proposto é capaz de atender aos limites legais para lançamento de emissões atmosféricas vigentes no estado de Minas Gerais, para sistemas de tratamento térmico de resíduos, em especial aos limites de concentrações de dioxinas e furanos;
- O CDRU resultante do processo possui características adequadas para o adensamento por meio de processo de briquetagem, para correção de granulometria e densidade para uso em outros processos industriais;
- O CDRU resultante do processo possui potencial como matéria-prima para gaseificação e produção de gás de síntese para fins energéticos;
- O CDRU resultante do processo pode ser utilizado como combustível alternativo na fabricação do clínquer via coprocessamento, sem prejuízos à qualidade e atendendo às exigências normativas para o produto;

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é avaliar a adequação de um processo original de tratamento térmico de RSU, visando a valoração energética e aplicável em diferentes escalas, para a produção de CDRU, assim como a aplicabilidade deste produto para utilização em processos térmicos industriais ou de geração de eletricidade, com enfoque especial no coprocessamento e na gaseificação.

1.4 Referências de literatura

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; PARILIKAR, U. V. Sustainability of cement kiln co-processing of wastes in India: a pilot study. *Environmental Technology*. v. 38, 2017.

BRUNNER, P.H. WTE: Thermal Waste Treatment for Sustainable Waste Management. Em: MEYERS, R. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* Ed. Springer, 2017,

IEA, International Energy Agency. *World Energy Outlook 2022*. 2022.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environment Management*. v. 236, 2019.

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. *Patente nº BR 10 2018 003828 1 – Processo de Desidratação e Densificação de Resíduos Sólidos e Biomassa e Dispositivo*. 2018.

INTHARATHIRAT, Rotchana; ABDUL SALAM, P. Valorization of MSW-to-Energy in Thailand: Status, Challenges and Prospects. *Waste and Biomass Valorization*, v. 7, n. 1, p.31–57, 2016.

KHUDAYKULOVA, M; YUANQIONG, H.; KHUDAYKULOV, A.. Economic Consequences and Implications of the Ukraine-Russia War. *International Journal of Management Science and Business Administration*. v.8, n. 4, p. 44-52. 2022.

KOSAJAN, V.; WEN, Z.; FEI, F.; DINGA, C. D.; WANG, Z.; ZHAN, J. The feasibility analysis of cement kiln as na MSW treatment infrastructure: from a life cycle environmental impact perspective. *Journal of Cleaner Production*. v. 267, 2020.

MEYSTRE, J. A.; SILVA, R. J. The possibility of coprocessing municipal solid waste - MSW in clinker kilns to cement production. *Engenharia Térmica*. v.12, 2013.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1718–1724, 2009.

REZAEI, H.; PANAH, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood. *Sustainability*. v. 12, 2020.

SHUMAL, M.; JAHROMI, A. R. T.; FERDOWSI, A.; DEHKORDI, S. M. M. N.; MOLOUDIAN, A. DEHNAVI, A. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refuse-Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. *Renewable Energy*. v. 146, 2020.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, Ministério do Desenvolvimento Regional. *Diagnóstico Temático – Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Ano de Referência 2020*. Brasília, 2021.

TIBURCIO, R. S.; MALPELI JUNIOR, M.; LEITE, J. T. C.; YAMAJI, F. M.; NETO, A. M. P. Physicochemical and thermophysical characterization of reject waste and evaluation of their use as refuse-derived fuel. *Fuel*. v. 293, 2021.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS estabelecida pela Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos urbanos são definidos como os resíduos domiciliares de residências urbanas e os resíduos oriundos da limpeza urbana. A PNRS é um marco histórico importante na gestão dos RSU no país, determinando metas intermediárias e objetivos claros para a União, para as entidades federativas e para os municípios. O Decreto nº 11.043/2022 (BRASIL, 2022), estabeleceu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES, atualizando a meta de fim dos lixões até 2024 e incluindo objetivos para a reciclagem e aproveitamento de materiais.

Segundo o relatório mais recente disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), a coleta de RSU anual no Brasil é de quase 67 milhões de toneladas. De todo esse valor, estima-se que cerca de 27% ainda possui destinação inadequada – i.e. lixões e aterros controlados – o que resulta em impactos ambientais e sociais diversos, entre a propagação de doenças e atração de vetores, contaminação do solo e de águas subterrâneas em função da percolação dos lixiviados e solubilizados de resíduos, emissão descontrolada de metano em função da biodegradação anaeróbia da fração orgânica do resíduo, além dos impactos à população que vive nas imediações dessas instalações irregulares.

A situação não é, entretanto, uniforme ao longo do país. Segundo dados da Abrelpe (2020) apresentados na Tabela 1, as regiões com menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e menor densidade populacional têm maior dificuldade em dispor os RSU de forma adequada. Na região Centro-Oeste, por exemplo, a porcentagem de RSU destinadas a lixões reduziu de 22,9% para 22,8% em dez anos de vigência da PNRS. Além disso, a redução no volume encaminhado aos lixões ocorre, frequentemente, paralelamente a um aumento no volume destinado a aterros controlados, tal como visto nas regiões Sul, Sudeste e Norte, o que continua a ser uma solução inadequada, apesar de preferível aos lixões.

Tabela 1 – Porcentagem de resíduos com destinação inadequada por região do país

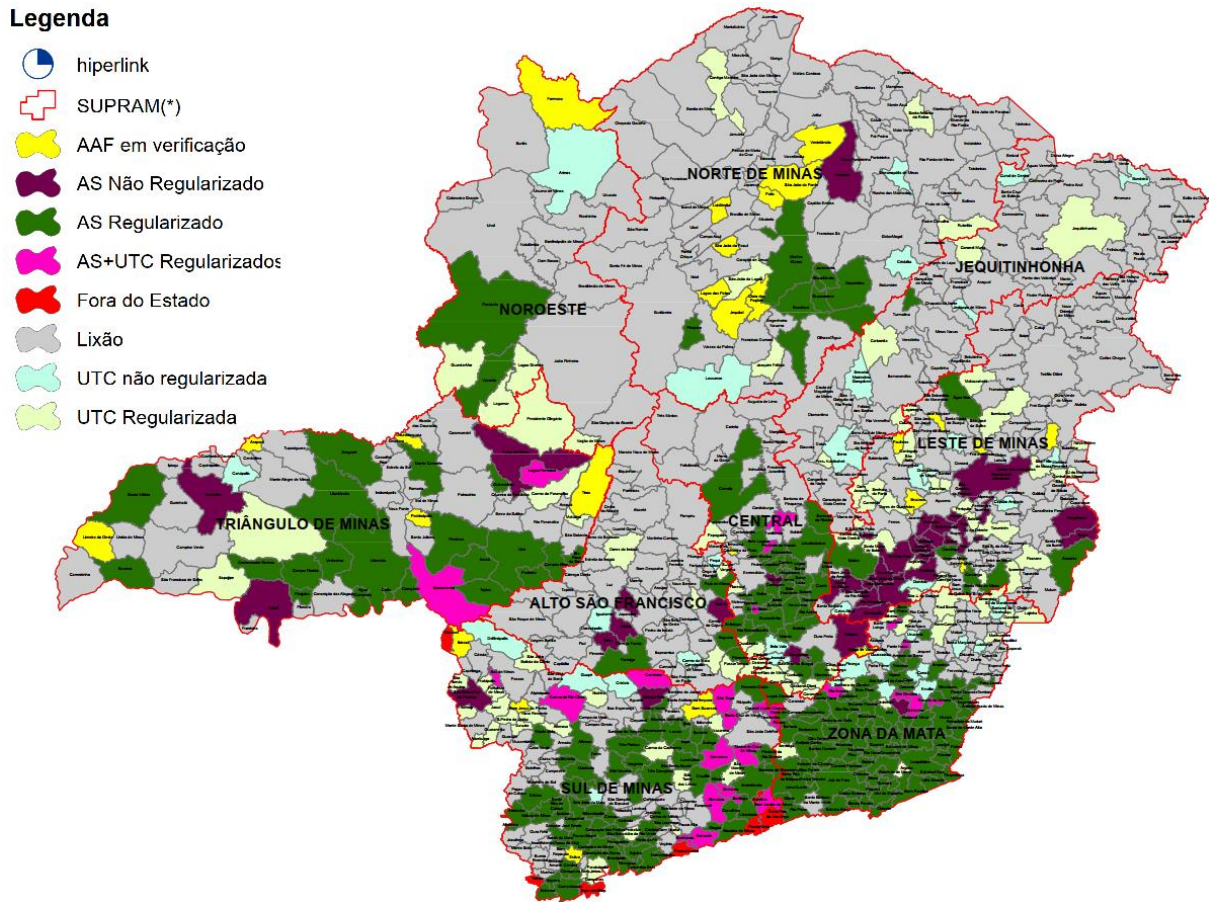
Região	% do RSU destinado a lixões		% do RSU destinado a aterros controlados	
	2010	2019	2010	2019
Sul	12,9	11,1	18	18,3
Sudeste	11,7	10,1	17,1	17,2
Centro-Oeste	22,9	22,8	49	35,9
Nordeste	34,2	31,5	32,9	32,9
Norte	38,2	34,9	28,8	29,8
Brasil	19,3	17,5	23,9	23

Fonte: Abrelpe (2020)

Tais regiões possuem, tipicamente, menores densidades populacionais, o que torna a viabilidade técnica e econômica de alternativas tradicionais de manejo de RSU (aterros sanitários, usinas de recuperação energética, dentre outros) baixa, devido à ausência de escala. Os custos adicionais de transporte oneram poderes executivos municipais que, tipicamente, já enfrentam constrições orçamentárias diversas.

O mesmo padrão pode ser observado também em escala estadual. O estado de Minas Gerais é um ótimo exemplo da realidade da gestão dos RSU no país, com presença de coleta e destino considerados adequados (aterros sanitários) nas regiões do estado com maior industrialização, densidade populacional e IDH, enquanto municípios de menor população e com menor IDH não conseguem se adequar aos parâmetros estabelecidos pela PNRS, apesar das iniciativas do Estado para viabilizar consórcios entre municípios para buscar viabilidade técnica e econômica para a implantação de aterros sanitários (Figura 1). O forte contraste entre a região Sul do estado, com predominância das cores verde e rosa (aterro sanitário e aterro sanitário com UTC regularizados, respectivamente), e as regiões Norte, Nordeste e do Vale do Jequitinhonha, predominantemente cinza (lixões) evidencia essa disparidade. Além do IDH, a população e a densidade populacional também possuem forte correlação com a qualidade da destinação final, uma vez que municípios de menor tamanho e com maior dispersão encontram maiores desafios na viabilização econômica de projetos de saneamento.

Figura 1 – Mapa da gestão dos RSU no estado de Minas Gerais



Fonte: FEAM (2020). Adaptado pelo autor.

Na região sudeste do estado, conhecida como Zona da Mata Mineira e com IDH médio de 0,770, 88% dos municípios possuem destinação adequada para seus resíduos. Já na região norte do estado, com IDH médio de 0,625, apenas 23% dos municípios têm destinação adequada – um ótimo exemplo da correlação entre IDH e qualidade da gestão de RSU (FIEMG, 2016; FEAM, 2019).

2.2 Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil

Em qualquer avaliação de rotas tecnológicas para a disposição de RSU, é importante conhecer as características esperadas para o RSU. A heterogeneidade, biodegradabilidade e alta umidade desse tipo de resíduo criam obstáculos econômicos e logísticos para a aplicação de uma única modalidade de tratamento, devendo ser avaliadas as características do resíduo de forma mais detalhada para cada cenário.

A primeira avaliação a ser realizada é a de composição gravimétrica – i.e. qual o percentual de cada tipo de material presente no resíduo, em massa. É com base na composição gravimétrica que se pode avaliar a viabilidade técnica de processos de triagem para reciclagem, compostagem ou biometanização da fração orgânica, incineração em usinas de recuperação energética, dentre outros.

Vários estudos de avaliação da composição gravimétrica podem ser encontrados na literatura. Alguns desses estudos, realizados em diferentes regiões do Brasil, foram avaliados para esse trabalho e seus resultados resumidos podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de estudos de composição gravimétrica do RSU no Brasil

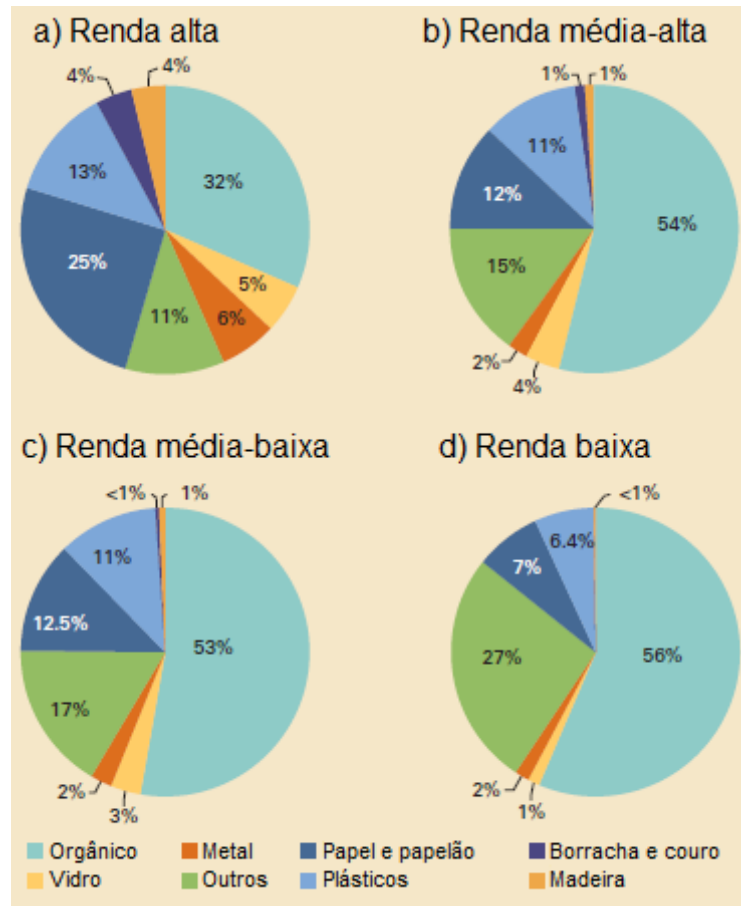
Referência	Componente [% em massa]					
	Matéria Orgânica	Plásticos	Papel e papelão	Vidros	Metais	Outros
Abrelpe (2021)	45,3	16,8	10,4	2,7	2,3	22,5
Alcântara (2010)	60,5	13,2	9,3	3,2	2,4	11,5
Costa et al. (2012)	46,5	13,5	13,0	3,3	4,0	19,7
Lima et al. (2018)	44,9	17,1	6,9	1,3	2,8	27,1
Menezes et al. (2019)	43,8	16,0		15,8		24,5
Siqueira et al. (2015)	40,5	10,7	8,8	1,1	0,8	38,1

Esse tipo de estudo tem grande relevância, devido ao fato de que a composição varia substancialmente entre diferentes locais, diferentes faixas de renda e ao longo do tempo para o mesmo local (BANCO MUNDIAL, 2018; MENEZES *et al.*, 2019). Dessa forma, novas avaliações da composição gravimétrica são relevantes mesmo em áreas onde já há estudos prévios.

De maneira geral, regiões mais rurais e/ou de menor IDH possuem maior fração orgânica em seu RSU, enquanto regiões mais ricas e industrializadas possuem menor

fração orgânica e maior presença de plásticos, papéis e metais, tipicamente de embalagens, tal como evidenciado na Figura 2.

Figura 2 – Variação da composição gravimétrica do RSU por faixa de renda



Fonte: Banco Mundial (2018). Adaptado pelo autor.

Observa-se que o Brasil se enquadra, de maneira geral, no grupo de países de renda média, conforme a avaliação do Banco Mundial, o que é condizente com a realidade socioeconômica do país. É importante lembrar, entretanto, que projetos de gestão de RSU em áreas predominantemente pobres e/ou rurais podem apresentar valores substancialmente diferentes e a avaliação da composição gravimétrica caso a caso é indicada para uma maior confiabilidade das projeções.

2.3 Combustível derivado de resíduos – CDR

Uma forma de se valorizar energeticamente os RSU é por meio de sua transformação em combustível, por meio de processos biológicos, mecânicos e/ou térmicos – os chamados combustíveis derivados de resíduo ou CDR.

Existem diversas tecnologias disponíveis para a produção de CDR no mercado. A escolha e aplicação da tecnologia mais adequada depende do tipo de resíduo – urbano ou industrial, perigoso ou não-perigoso, líquido ou sólido – a ser tratado e do tipo de processo industrial no qual ele será utilizado.

Uma importante distinção pode ser feita em função da origem do CDR:

- Combustíveis derivados de resíduos industriais – CDRI
- Combustíveis derivados de resíduos urbanos – CDRU

A utilização de *blends* de resíduo industrial para o coprocessamento em fornos de cimento, por exemplo, se baseia tipicamente na adequação de granulometria e mistura de materiais com características desejáveis (alto poder calorífico, baixo teor de cloro), como resíduos de madeira, papéis e papelões contaminados, plásticos não recicláveis, além de borras oleosas e solventes. O mesmo tipo de processo é realizado para produção de CDR a partir pneus inservíveis (PSOMOULOS E THEMELIS, 2015; BAIDYA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017; FARIA *et al.*, 2019).

Os resíduos sólidos urbanos apresentam, por outro lado, diversas dificuldades de ordem técnica para a produção de CDRU. A presença de frações orgânicas com alto teor de água, a variabilidade na composição, os grandes volumes produzidos, os altos custos para triagem e para adequação das características são alguns dos desafios encontrados por gestores públicos e privados (MEYSTRE E SILVA, 2013; BAIDYA *et al.*, 2017; KOSAJAN *et al.*, 2020).

Em consonância com os princípios da PNRS, a produção de CDR como forma de valorização energética deve ser priorizada em relação à disposição em aterros. Além disso, a substituição energética viabilizada pela produção de CDR atende às expectativas da Política Energética – PE (Lei Federal 9.478/1997) e da Política Nacional sobre a Mudança do Clima – PNMC (Lei Federal 12.187/2009).

Em função dos potenciais riscos ambientais associados à combustão de CDR, é necessário regular sua produção e sua utilização de forma a garantir a segurança ambiental dos processos. Entretanto, a legislação ambiental nacional e estadual no

Brasil é bastante limitada no que diz respeito aos CDRs de diferentes resíduos e diferentes processos, dificultando sua utilização em maior escala.

A Resolução SMA nº 38 de 2017, pioneira no tema no Brasil, abriu as portas para a caracterização dos CDRs e suas aplicações, inclusive prevendo a diferenciação entre CDR proveniente de resíduos industriais e de RSU. Entretanto, sua aplicação se limitava à queima em fornos de clínquer, ou seja, produção de CDR para coprocessamento, sendo posteriormente substituída pela Resolução SIMA nº 47 de 2020, mais abrangente nas possibilidades de utilização do CDR. Nesta, são estabelecidos parâmetros de PCI mínimo e teores de cloro e mercúrio máximos para a utilização do CDRU em diferentes sistemas, conforme o risco ambiental avaliado para cada cenário.

Ainda em 2020, foi publicada a primeira norma técnica em âmbito nacional para a regularização do uso energético de RSU, a norma ABNT NBR 16.849:2020. A norma estabelece parâmetros para caracterização e utilização de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), que incluem a exigência de um sistema básico de pré-tratamento, verificação da elegibilidade (em especial quanto à periculosidade), amostragem, classificação e uso. A Tabela 3, a seguir, indica as os limites estabelecidos em cada instrumento legal.

Tabela 3 – Limites normativos para composição de CDR ou RSUE no Brasil

Referência	PCI mínimo (kcal/kg)	Teor de cloro máximo (%)	Teor de mercúrio máximo (mg/kg)
SMA nº 38/2017	3.583	1,0	0,5
SIMA nº 47/2020	Entre 2.300 e 2.775	Entre 0,3 e 1,0	Sem limite
NBR 16.849/2020	2.750	3,0	1,0

As baixas restrições quanto à composição química do CDR são ideais para viabilizar uma utilização mais ampla de RSU na produção de CDR, uma vez que a heterogeneidade desses resíduos impede uma determinação precisa de composição. Nota-se que a norma da ABNT tem menor restrição de parâmetros, o que provavelmente se deve à maior possibilidade de tratamentos por ela abordados (e.g. pirólise, gaseificação e incineração).

É interessante notar que a SIMA nº 47 define um limite de emissões de dioxinas e furanos inferior àquele previsto na legislação nacional (CONAMA 316/2002), reduzindo o limite de 0,5 ng/Nm³ para 0,13 ng/Nm³ (no caso de caldeiras industriais) ou 0,11 ng/Nm³ (para fornos de clínquer), se aproximando dos padrões europeus de emissões e mitigando assim um dos principais riscos relacionados com o uso de CDRs.

Além dos parâmetros apresentados na Tabela 3, a norma ABNT também recomenda, como especificações complementares, a determinação da forma predominante das partículas, a granulometria, o teor de cinzas e de umidades e a concentração de metais (antimônio, arsênio, berílio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, estanho, manganês, mercúrio, níquel, platina, paládio, ródio, selênio, tálio, telúrio, vanádio e zinco).

Outro marco normativo relevante para a classificação de CDRs é a norma europeia EN ISO 21640/2021. Uma vez que as limitações de PCI, cloro e mercúrio são diferentes de acordo com o uso ao qual se destina o combustível, um limite fixo global torna a utilização do CDR mais difícil. Como solução, são estabelecidas classes de qualidade para cada parâmetro, sendo melhor a qualidade do combustível quanto menor for sua classe. Dessa forma, cabe ao usuário do CDR a avaliação se o combustível possui ou não aplicabilidade em seu processo, e ao órgão regulador a emissão de licença ou permissão para o uso do mesmo conforme a tipologia do processo. Os critérios para cada classe são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de qualidade de CDRU segundo EN ISO 21640/2021

Característica	Classe				
	1	2	3	4	5
PCI (MJ/kg)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cloro (%)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Mercúrio (mg/MJ)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,15

Em função da busca por rotas adequadas para a gestão dos RSU em todo o mundo, esforços atuais se concentram em buscar processos para a viabilização da produção de CDRU de qualidade adequada aos processos industriais e em escala

suficientemente alta para que haja viabilidade econômica. Na sequência, são descritos os avanços recentes e o estado-da-arte, conforme a literatura técnica consultada.

2.3.1 CDRU – Avanços recentes e estado-da-arte

Para a avaliação dos mais recentes avanços na área de CDRU e suas aplicações, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em plataformas de trabalhos científicos (PortalCAPES, *ScienceDirect*, Google Acadêmico) com as palavras-chave “ Refuse derived fuel - RDF”, “Solid recovered fuel - SRF”, “Municipal solid waste - MSW” e filtrados os resultados para trabalhos publicados nos últimos cinco anos.

Wang *et al.* (2019) avaliaram o comportamento de queima de diferentes misturas de CDR, incluindo resíduos agrícolas e florestais, lodos de estações de tratamento de esgoto, casca de arroz e serragem, com composição próxima àquela encontrada no RSU, por meio de análises termogravimétrica e espectrometria de massa. Foi notado que um maior percentual de matéria orgânica úmida (resíduos agrícolas) resultou em maior estabilidade da combustão e menores emissões de SO_x. Além disso, maiores índices de biomassa também resultaram em maiores energias de ativação.

Ham e Matsuto (2019) avaliaram diferentes sistemas de recuperação energética de RSU, incluindo digestão anaeróbia, incineração, um sistema de biossecagem e um sistema de separação e secagem mecânica para produção de CDRU. Os resultados indicaram maior recuperação energética pela rota de CDRU, mas também menor eficiência termodinâmica devido ao gasto energético para o tratamento preliminar necessário.

Azam *et al.* (2019, 2020) compararam as características de combustão de RSU, CDRU e carvão, para a avaliação da possibilidade do uso de RSU e CDRU como substitutos de combustíveis tradicionais para a geração de eletricidade no Paquistão. Foi observado que o poder calorífico do CDRU testado é suficientemente próximo ao do carvão avaliado, viabilizando seu uso no processo como fonte energética do ponto de vista termodinâmico.

Infiesta *et al.* (2019) avaliaram um processo de produção de CDRU em escala plena (55 t/dia), na cidade de Boa Esperança/MG, por meio da aplicação de um processo

de tratamento mecânico biológico (MBT), associado à secagem térmica e adequação de granulometria por meio de cominuição. Foi mostrado que o balanço energético após a queima do CDRU é positivo e que o CDRU produzido possui características adequadas para o coprocessamento.

Psaltis e Komilis (2019) avaliaram a viabilidade ambiental e econômica da biossecagem de RSU antes da incineração. Foi observado que a redução da umidade anterior ao tratamento térmico não apresentou ganhos do ponto de vista de emissões de GEE ou de custos, devido aos gastos de eletricidade envolvidos no processo de secagem utilizado, apesar do ganho substancial de PCI.

Tosti *et al.* (2019) analisaram um processo de hidrogaseificação de CDRU para produção de *syngas*, em contraponto à combustão de CDRU. Os autores indicaram que, para tarifas por tonelada recebida superiores a 80 EUR/t, o processo possui potencial para aplicação em escala plena, podendo ser utilizado como alternativa para a disposição de RSU, desde que haja pré-tratamento para produção de CDRU, incluindo a triagem para separação de inertes, recicláveis e matéria orgânica.

Shumal *et al.* (2020) analisaram a possibilidade de recuperação das frações rejeitadas de RSU em uma planta de MBT, na cidade de Isfahan, Irã, para a produção de CDRU. Foi observado que o CDRU das fontes de rejeitos avaliadas (rejeitos da compostagem e do tratamento mecânico) podem ser classificadas com nível 3, 1 e 1 segundo a diretriz europeia para classificação de CDR, quanto ao seu PCI, concentração de cloro e concentração de mercúrio, respectivamente.

Yang *et al.* (2020) avaliaram que a substituição de carvão por CDRU como matéria-prima para gaseificação e produção de *syngas* e/ou H₂ pode reduzir as emissões de GEE no processo em até 40%, com custo de produção de energia estimado de 0,05 USD/kWh.

Rezaei *et al.* (2020a) avaliaram as propriedades de peletização de CDRU em diferentes composições e com diferentes graus de umidade, para densificação energética e redução de custo de transporte. Foi observada uma umidade ótima de 20% para a peletização, do ponto de vista de gasto energético para o processamento. Em outro estudo (2020b), o mesmo grupo avaliou o impacto da composição na

peletização, indicando que a maior presença de plásticos e papéis resulta em pellets com maior densidade energética, porém com maiores custos de peletização se comparados a maiores frações orgânicas.

Silva, Contreras e Bortoleto (2021) realizaram uma análise de ciclo de vida (LCA) para a produção de CDRU na cidade de Brasília/DF, comparando três diferentes cenários de produção de CDRU com o cenário base de aterramento de todos os resíduos. O estudo concluiu que a redução da emissão de GEE nos cenários com produção de CDRU varia entre 2% e 23% em relação ao cenário base, havendo ainda ganhos adicionais pelo aumento da vida útil dos aterros na região.

Tiburcio *et al.* (2021) caracterizaram as frações rejeitada de RSU após a triagem manual na unidade de triagem da cidade de Santo André/SP, quanto às suas propriedades físico-químicas e termofísicas para a utilização como CDRU. Foram observados valores de PCI próximos de 20 MJ.kg⁻¹ e baixo teor de cloro nas cinzas de fundo após combustão, com potencial para uso como combustível.

Wzorek (2021) avaliou o potencial da secagem térmica solar para a produção de CDR a partir de uma mistura de resíduos, incluindo lodo de ETE, serragem e farinha de ossos. As misturas testadas resultaram em PCIs entre 13 e 19 MJ.kg⁻¹, atingindo umidades abaixo de 20% em cerca de 10 dias, nas condições de teste.

Zaman *et al.* (2021) avaliaram o aumento do PCI do RSU com a aplicação de um processo de biossecagem com diferentes vazões de ar no reator de secagem. Foi observado um aumento de até 55,3% no PCI da mistura, alcançando valores de 17,6 MJ.kg⁻¹. A umidade final observada na mistura foi de 27,28%. Os autores avaliam que o processo tem potencial de aplicação para a produção de CDRU.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos principais estudos avaliados e uma síntese de seus resultados mais relevantes para este trabalho.

Tabela 5 – Resumo da literatura técnica avaliada – CDRU: estado-da-arte

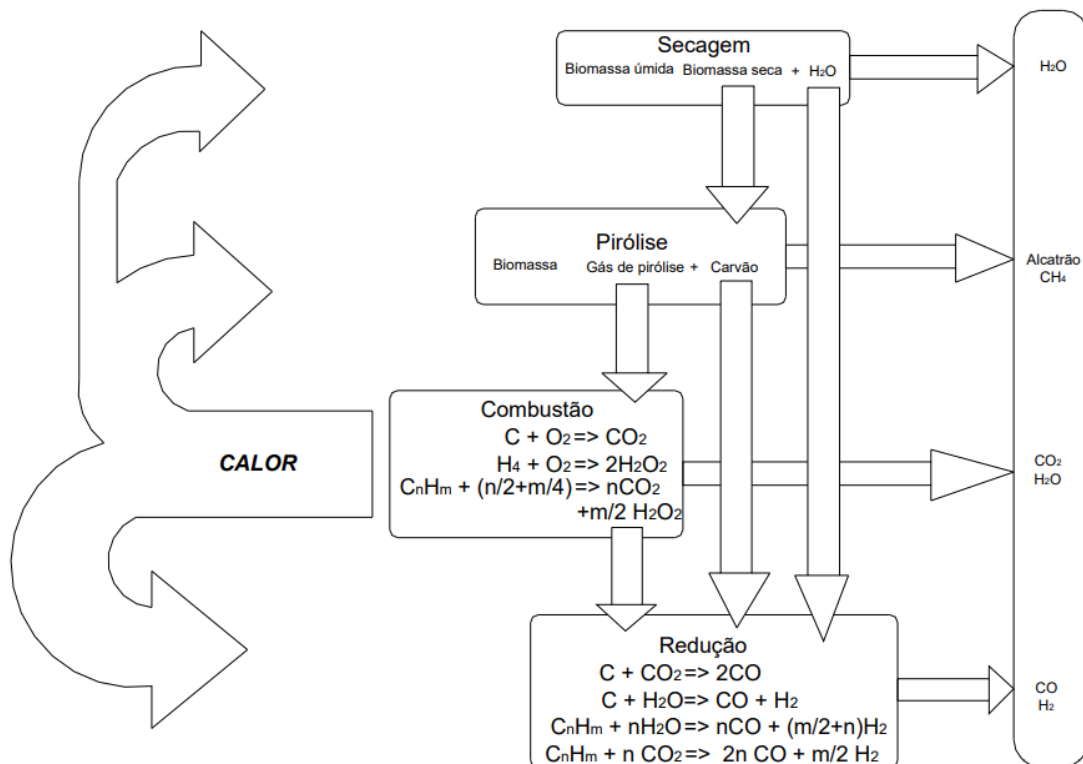
Referência	Resumo
Wang et al. (2019)	Avaliação do comportamento de queima de CDR com diferentes composições. Fração orgânica aumenta a estabilidade da combustão e a energia de ativação
Ham e Matsuto (2019)	Comparação de diferentes rotas de valorização energética. CDRU possui maior potencial de energia, mas menor eficiência
Azam et al. (2019, 2020)	Comparação de RSU, CDR e carvão como fonte energética no Paquistão. CDR apresenta propriedade térmicas e físico-químicas adequadas para substituição
Infiesta et al. (2019)	Avaliação da produção de CDRU em planta de MBT (55t/dia). Balanço energético positivo e CDRU com potencial fins energéticos.
Psaltis e Komilis (2019)	Avaliação da viabilidade ambiental e econômica da biossecagem antes da incineração. Custos e emissões de GEE superiores devido ao gasto energético no processo.
Tosti et al. (2019)	Gaseificação de CDRU para produção de syngas. Viabilidade econômica para gate-fee superior a 80 EUR/ton
Shumal et al. (2020)	Avaliação de uso de rejeitos de MBT como CDR. Rejeitos de compostagem e triagem atendem a especificações da UE para CDR.
Yang et al. (2020)	Substituição de carvão por CDRU para produção de syngas. Potencial de redução de até 40% nas emissões de GEE
Rezaei et al. (2020a, 2020b)	Características de peletização de CDRU com diferentes valores de umidades e diferentes composições
Silva, Contreras e Bortoleto (2021)	LCA para produção de CDRU em Brasília. Redução de emissões de GEE estimadas entre 2% e 23%
Tiburcio et al. (2021)	CDRU com rejeitos de triagem manual. PCI de 20 MJ.kg ⁻¹ , com baixo teor de cloro nas cinzas de fundo
Wzorek (2021)	Secagem térmica solar para produção de CDR a partir de diferentes resíduos. PCI entre 13-19 MJ.kg ⁻¹ e umidade inferior a 20%
Zaman et al. (2021)	Biossecagem de RSU. Produto final com PCI de 17,6 MJ.kg ⁻¹ e umidade de 27,28%

2.4 Gaseificação de resíduos e CDR

A gaseificação consiste no processamento térmico dos resíduos a altas pressões e temperaturas, de forma a converter os compostos orgânicos presentes em uma mistura gasosa denominada *syngas* ou gás de síntese, de composição variável, formada principalmente por hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono e quantidades menores de metano e impurezas (ZHENG et al., 2018). A qualidade do combustível gerado é altamente dependente do gás utilizado no processo de oxidação parcial e da composição do resíduo utilizado (DEL ALAMO et al, 2012; ZHENG et al. 2018).

O processo de gaseificação de matéria orgânica tem início com o aquecimento e secagem do material. Após a remoção inicial de umidade, o material segue em direção às zonas de maior temperatura no reator, onde têm início as reações de volatilização e de pirólise do material. Os gases produzidos na pirólise passam por um processo de combustão, elevando a temperatura e criando condições adequadas para o craqueamento do alcatrão formado e para as reações de quebra dos hidrocarbonetos maiores e oxidação parcial do metano, tendo como principais produtos o monóxido de carbono e o hidrogênio (ANDRADE, 2007). Um fluxograma do processo é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de gaseificação



Fonte: Andrade (2007).

Para a gaseificação de biomassa e resíduos sólidos, a densidade e granulometria do material é determinante para a escolha do tipo de gaseificador. Os gaseificadores mais comumente usados para essa finalidade são os de fluxo contracorrente, fluxo concorrente (*downdraft*) e de leito fluidizado (ANDRADE, 2007).

Os riscos ambientais associados à gaseificação dizem respeito principalmente à possibilidade de formação de dioxinas e furanos e à dispersão de vapores de metais

nas áreas próximas aos locais de processamento dos resíduos (LONATI E ZANONI, 2013; PANEPINTO et al., 2015).

Parte do interesse tecnológico nas tecnologias de gaseificação está no potencial de produção de gás hidrogênio, de grande valor industrial e considerado um caminho para a redução das emissões de GEE em indústrias de grande impacto, em especial nos transportes e na indústria siderúrgica (MUKHERJEE *et al.*, 2020).

2.5 Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer

O coprocessamento é o processo no qual os resíduos com composição química adequada para incorporação ao clínquer são adicionados junto à matéria prima e aos combustíveis tradicionais nos fornos rotativos da indústria cimenteira, para a queima a temperaturas que podem ultrapassar os 2000°C (BOURTSALAS, 2018).

Como as indústrias de cimento possuem grande potencial de poluição atmosférica, os sistemas de tratamento de emissões já existentes, aliados às altas temperaturas e tempo de residência no forno rotativo, são tipicamente robustos o suficiente para mitigar os impactos resultantes da queima dos resíduos (ARAÚJO E DA SILVA, 2000; CHEN et al., 2014; BOURTSALAS, 2018).

No ano de 2021, havia no Brasil 36 plantas de produção de cimento com licenciamento ambiental para o coprocessamento de resíduos, que correspondem a 70% da capacidade produtiva nacional para este ano. A concentração maior dessas plantas é na região Sudeste, em especial nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, tal como pode ser visto na Figura 4 (ABCP, 2022).

Figura 4 – Localização das indústrias com licenciamento para coprocessamento no Brasil



Fonte: ABCP (2022). Adaptado pelo autor.

A limitação da aplicação está relacionada à umidade dos resíduos, seu poder calorífico, à presença de cloro e à adequação da composição química das cinzas ao clínquer produzido. De forma geral, os processos disponíveis têm limitações críticas relativas ao custo de tratamento e à composição dos resíduos, o que impede sua aplicação de forma ampla no tratamento de resíduos sólidos urbanos sem um processo robusto de triagem e separação de frações inertes e orgânicas. (ABCP, 2022).

Para melhor entender como a utilização dos resíduos como combustíveis pode ser realizada no processo de coprocessamento, é necessário também compreender o processo produtivo do clínquer, principal componente do cimento Portland, e suas características.

2.5.1 O processo de produção do cimento Portland

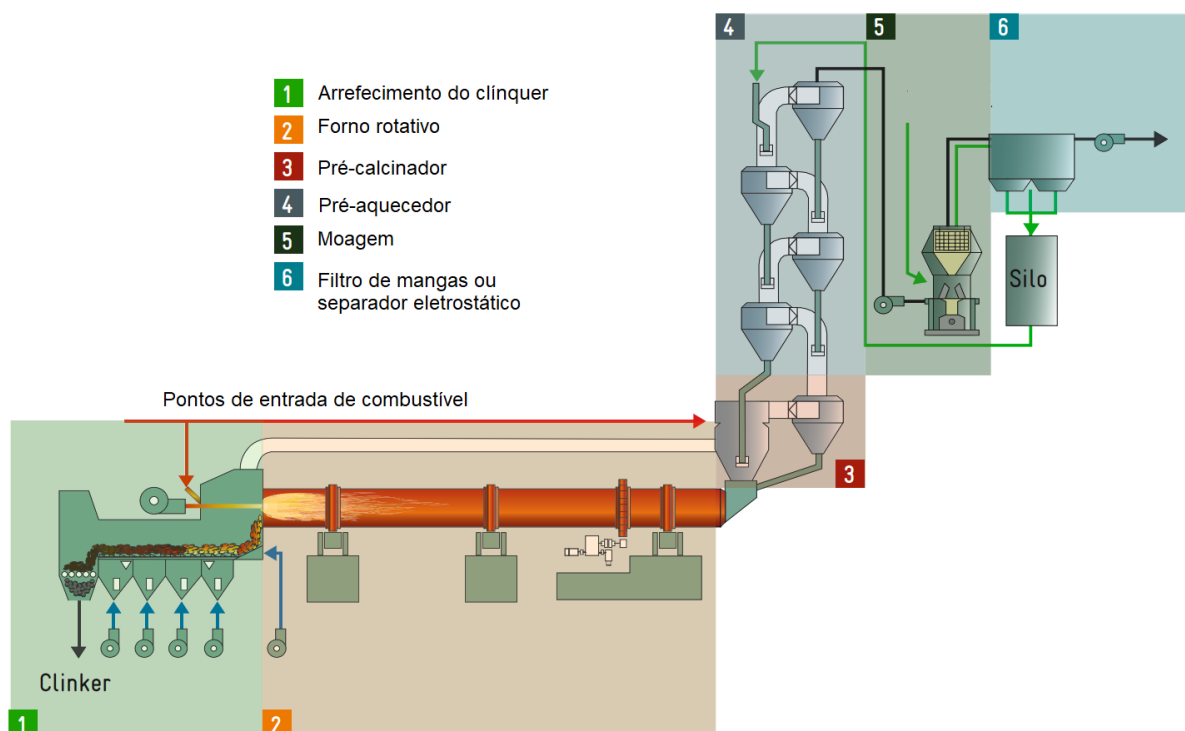
O principal componente do cimento Portland é o clínquer – uma mistura de silicatos, aluminatos e ferroaluminatos de cálcio. Além do clínquer, o cimento Portland pode possuir uma gama de adições – e.g. argila pozolânicas, escória de alto forno, fíler de calcário, cal e gesso. A composição de cada tipo de cimento é limitada pelas especificações técnicas da norma ABNT NBR 16.697/2019.

A fabricação do clínquer tem início com a moagem e mistura de suas matérias-primas, sendo o calcário a principal delas. Como matérias-primas secundárias, tem-se a sílica, argilas e hematita para correção da composição, em função das características da jazida de calcário.

O calcário passa por um processo de redução chamado de calcinação, por meio do aquecimento e liberação de dióxido de carbono, transformando-se em cal. Após a calcinação, as matérias-primas previamente moídas são misturadas e inseridas no forno rotativo, onde ocorre o processo de clínquerização. A matéria-prima é movimentada lentamente dentro do forno, em direção à saída na outra extremidade.

A manutenção das altas temperaturas necessárias para o processamento resultam em grandes gastos energéticos. Há dois pontos principais de entrada de combustíveis no processo: no combustor principal e no pré-calcinador. O fluxograma apresentado na Figura 5 ilustra os principais equipamentos do processo e os pontos de entrada de combustíveis.

Figura 5 – Fluxograma da fabricação do clínquer



Fonte: GIZ (2017). Adaptado pelo autor.

No Brasil, o processo de fabricação a seco é o mais difundido e responde pela quase totalidade do parque industrial nacional. Nesse tipo de processo, o principal

combustível utilizado é o coque. Devido ao seu custo e à alta pegada de carbono decorrente de seu uso, as indústrias têm buscado combustíveis alternativos que possam ser utilizados no processo (SNIC, 2019).

2.5.2 Combustíveis alternativos e coprocessamento de resíduos

A razão de substituição térmica em fornos de clínquer no Brasil é, atualmente, de aproximadamente 15%. Segundo relatório do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento – SNIC (2019), dentre os principais combustíveis alternativos utilizados, destacam-se o carvão vegetal (40,8%), os pneus inservíveis (22,4%) e os resíduos industriais (14,5%).

O uso de combustíveis alternativos é limitado, principalmente, pelos seguintes fatores:

- Poder calorífico inferior – combustíveis de menor PCI reduzem a capacidade de processamento de matéria-prima do forno, o que impacta negativamente a produção e pode impactar negativamente a receita da indústria em momentos de alta demanda;
- Teor de cloro – combustíveis com alto teor de cloro geram corrosão em equipamentos, incrustações e colagem no forno, podem piorar a qualidade do clínquer produzido e são precursores para a formação de PCDD/Fs;
- Teor de metais (em especial o mercúrio) – podem resultar em concentrações de metais acima do limite permissível no clínquer, maior custo em controle de emissões e eventuais dificuldades para incorporação da cinza no produto;
- Teor de umidade – pode resultar na diminuição da temperatura no forno e perda da produtividade devido ao gasto energético para evaporação da umidade presente no combustível, além de dificuldade no controle operacional;
- Granulometria – para o combustor principal, é comum o requerimento de granulometria inferior a 25 mm. Na torre de pré-calcinação, são tolerados valores maiores, de aproximadamente 50 mm;
- Densidade – combustíveis de densidade muito alta tem sua combustibilidade prejudicada no queimador principal, atingindo o fundo do forno. Combustíveis de densidade muito baixa, por outro lado, podem ser problemáticos para a queima na pré-calcinação por serem arrastados junto com os gases combustos.

Os combustíveis alternativos a serem utilizados devem, portanto, atender aos critérios supracitados para que haja viabilidade técnica para sua utilização.

2.5.3 Coprocessamento de CDRU

O coprocessamento de CDRU pode ser uma rota adequada para a destinação dos RSU, mas encontra dificuldades para aplicação não só em função das necessidades específicas para os combustíveis alternativos, discutidas anteriormente, mas também devido às diversas dificuldades logísticas ainda existentes no cenário nacional de gerenciamento dos RSU.

Diversos estudos acerca das aplicações de CDRU como combustível alternativos em fornos rotativos e seus potenciais benefícios podem ser encontrados na literatura (KARA, 2012; MEYSTRE E SILVA, 2013, SAMOLADA E ZABANIOTOU, 2014; PSOMOPOULOS E THEMELIS, 2009; PSOMOPOULOS E THEMELIS, 2016; ÇANKAYA, 2019; KOSAJAN *et al.*, 2020). Os principais benefícios apontados pelos autores são a redução das emissões de GEE (em alguns estudos, superiores a 40%) e o aumento da vida útil de aterros, além da redução da extração de produtos minerais.

Na literatura revisada também foram encontrados estudos de caso para o coprocessamento de CDRU. Baidya, Ghosh e Parilikar (2017) realizaram um estudo piloto de coprocessamento de CDRU na Índia, em dois fornos rotativos com capacidade produtiva de 3.600 e 12.500 toneladas.dia⁻¹, respectivamente. As emissões de PCDD/Fs alcançaram um patamar máximo de 0,004 ng TEQ.Nm⁻³, abaixo do limite legal de 0,1 ng TEQ.Nm⁻³ vigente na região, enquanto as emissões de mercúrio alcançaram 0,002 mg.Nm⁻³, também abaixo do limite legal. As razões de substituição térmica no estudo, no entanto, foram baixas, abaixo de 2,0%.

Panahandeh, Asadollahfardi e Mirmohammadi (2017) realizaram um estudo de caso com LCA da produção de clínquer com uso de CDRU na cidade de Teerã, no Irã. Os autores indicam que a substituição térmica por CDRU em razões entre 5% e 30% tem potencial para redução da acidificação na atmosfera e da emissão de gases de efeito estufa em até 11,5% e 3,81%, respectivamente, mas apontam que mais estudos de caracterização do RSU de Teerã são necessários para a validação dos cálculos.

Paramita, Hartono e Soesilo (2018) avaliaram o potencial de aplicação de CDRU como combustível alternativo na cidade de Cilacap, na Indonésia. O PCI obtido foi de 14,8 MJ.kg⁻¹ a um custo de produção de 20,32 USD.ton⁻¹ (corrigido para valores atuais, cotação de agosto de 2022). O potencial de redução de emissões de metano projetado é de 2,9x10⁶ Nm³ ao longo da vida útil do aterro que receberia os resíduos.

De maneira geral, os estudos encontrados na bibliografia consultada contam com processos de triagem e separação de recicláveis e/ou da fração orgânica e inertes para a produção e posterior coprocessamento de CDRU. Estudos mais recentes frequentemente associam a produção de CDRU a unidade de MBT automatizadas, que possuem CAPEX elevado e necessitam de escala para viabilidade econômica. Não foram encontrados estudos práticos, em escala piloto ou plena, do coprocessamento de RSU *in natura* ou CDRU não triado.

2.6 Conclusões

Neste capítulo, foi explorada a problemática dos RSU no Brasil – sua geração, composição gravimétrica e desafios relacionados à destinação adequada. Em função desse cenário, observou-se que a produção de CDRU é uma rota tecnológica possível para o tratamento de RSU no Brasil.

Pesquisas sobre diferentes rotas para a produção de CDRU e para seu uso foram consultadas e seus resultados discutidos de forma sintética neste trabalho. Dentre os estudos de estado-da-arte avaliados, destacou-se a possibilidade de uso do CDRU como matéria-prima para gaseificação ou como combustível alternativo em fornos de clínquer.

Para um melhor entendimento das rotas de gaseificação e coprocessamento, foi apresentada uma breve revisão de ambas as tecnologias, de forma a fundamentar a discussão dos resultados da tese sob a luz da bibliografia consultada.

2.7 Referências de literatura

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. *Panorama do Coprocessamento 2020 – Ano Base 2019*. São Paulo, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16849: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2020.

ABRELPE. *Panorama 2019: Resíduos Sólidos Urbanos*. São Paulo, 2020.

ANDRADE, R. V. *Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental*. Universidade Federal de Itajubá – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (Tese de doutorado). Itajubá, 2007.

ARAUJO, S.; SILVA, R. J. Dioxin and furan formation and destruction in rotary kiln used in waste co-processing. *In: ENCIT 2000 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas*. Porto Alegre, 2000.

ALCANTARA, A.J.O. *Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos e Caracterização Química do Solo da Área de Disposição Final do Município de Cáceres/MT*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2010

AZAM, M.; JAHROMY, S. S.; RAZA, W.; JORDAN, C.; HARASEK, M.; WINTER, F. Comparison of the combustion characteristics and kinetic study of coal, municipal solid waste and refuse derived fuel: Model-fitting methods. *Energy Science and Engineering*. v. 7, 2019.

AZAM, M.; ASHRAF, A.; JAHROMY, S. S.; RAZA, W.; KHALID, H.; RAZA, N.; WINTER, F. Isoconversional nonisothermal kinetic analysis of municipal solid waste, refuse-derived fuel, and coal. *Energy Science E Engineering*. v. 8, 2020.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; PARILIKAR, U. V. Sustainability of cement kiln co-processing of wastes in India: a pilot study. *Environmental Technology*. v. 38, 2017.

BANCO MUNDIAL. *What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Disponível em: http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html. Acessado em julho de 2021.

BOURTSALAS, A.C. WTE: Non-recycled Combustible Wastes in Cement Production. Em: THEMELIS, N.; BOURTSALAS, A.C.: *Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes*. Ed. Springer. Nova Iorque, EUA, 2018.

BRASIL. *Lei Federal nº 9.478 – 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*. Brasília, 1997.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.187 – Institui a Política sobre a Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências*. Brasília, 2009.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.305 – Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e dá outras providências*. Brasília, 2010.

ÇANKAYA, S. Investigating the environmental impacts of alternative fuel usage in cement production: a life cycle approach. *Environment, Development and Sustainability*. v. 22, 2020.

CEN – European Committee for Standardization. *EN ISO 21640:2021 – Solid recovered Fuels – Specifications and classes*. Bruxelas, 2021.

CHEN, T.; GUO, Y.; LI, X.; LU, S.; YAN, J. Emissions behavior and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans (PCDD/Fs) from cement kilns in China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 6, p. 4245-4253, 2014.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 316/2002: Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos*. Brasília, 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 499/2020: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos*. Brasília, 2020.

COSTA, L.E.B.; COSTA, S.K.; REGO, N.A.C.; DA SILVA JUNIOR, M.F. Gravimetria dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.3, 2012.

DEL ALAMO, G.; HART, A.; GRIMSHAW, A.; LUNDSTROM, P. Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGOS Plants. *Waste Management*, v.32, p.1835-1842, 2012.

FARIA D. G.; CARVALHO, M. M. O.; VAKKILAINEN, E. K.; CARDOSO, M. Waste-derived alternative fuels CO₂ emissions: cement clinkering process simulation. *Anais do I Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos*. Rio de Janeiro, 2019

FEAM. *Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais em 2018*. Belo Horizonte, 2019.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Mapa dos resíduos sólidos urbanos do estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2020.

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. *Diagnóstico Regional – Regional Zona da Mata*. Belo Horizonte, 2016.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Waste-to-Energy options in municipal solid waste management: A guide for decision makers in developing and emerging countries*. Bonn, Alemanha. 2017.

HAM, G.; MATSUTO, T. Comparison of energy recovery system from municipal solid waste in terms of energy balance and life cycle CO₂ emission. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. v.23, 2021.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environment Management*. v. 236, 2019.

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.

KOSAJAN, V.; WEN, Z.; FEI, F.; DINGA, C. D.; WANG, Z.; ZHAN, J. The feasibility analysis of cement kiln as na MSW treatment infrastructure: from a life cycle environmental impact perspective. *Journal of Cleaner Production*. v. 267, 2020.

LIMA, P.G.; DESTRO, G.E.; BRAGA JUNIOR, S.S.; FORTI, J.C. Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos em um Aterro Sanitário. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v.12(4), 2018.

LONATI, G., ZANONI, F. Monte-Carlo human health risk assessment of Mercury emissions from a MSW gasification plant. *Waste Management*, v. 33, p. 347-355, 2013.

MEYSTRE, J. A.; SILVA, R. J. The possibility of coprocessing municipal solid waste - MSW in clinker kilns to cement production. *Engenharia Térmica*. v.12, 2013.

MENEZES, R.O.; CASTRO, S.R.; SILVA, J.B.G.; TEIXEIRA, G.P.; SILVA, M.A.M. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domésticos: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.24, n.2, 2019.

MUKHERJEE, C.; DENNEY, J. MBONIMPA, E.G.; SLAGLEY, J.; BHOWMIK, R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Review*, v.119. 2020

PANAHANDAH, A.; ASADOLLAHFARDI, G.; MIRMOHAMMADI, M. Life cycle assessment of clinker production using refuse-derived fuel: A case study using refuse-derived fuel from Tehran municipal solid waste. *Environmental Quality Management*. v. 27, 2017.

PANEPINTO, D.; TADESCO, V.; BRIZIO, E.; GENON, G. Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste Biomass Valorization*, v. 6, p.123-135, 2015.

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). *Earth and Environmental Science*. v. 159, 2018.

PSALTIS, P.; KOMILIS, D. Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste. *Waste Management*. v. 83, 2019.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1718–1724, 2009.

PSOMOPOULOS, N. C. C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. *Management of Environmental Quality*. v. 27, 2016.

REZAEI, H.; PANAH, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood. *Sustainability*. v. 12, 2020a.

REZAEI, H.; PANAH, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technologies*. v. 205, 2020b.

SAMOLADA, M.C.; ZABANIOTOU, A.A. Energetic valorization of SRF in dedicated plants and cement kilns and guidelines for application in Greece and Cyprus. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 83, 2014.

SHUMAL, M.; JAHROMI, A. R. T.; FERDOWSI, A.; DEHKORDI, S. M. M. N.; MOLOUDIAN, A. DEHNAVI, A. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refuse-Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. *Renewable Energy*. v. 146, 2020.

SILVA, R. J.; FRANCISCO, R. V. C. S. G.; LOPES, A. O. Co-processing of scrap tires and waste from re-refining of used lube oil in cement kilns. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. v. 4, 2017.

SILVA, V.; CONTRERAS, F.; BORTOLETO, A. P. Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasilia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*. v. 279, 2021.

SIQUEIRA, H.; DINIZ E SOUZA, A.; BARRETO, A.C.; ABDALA, V.L. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Nova Ponte (MG). *Revista DAE*, p.39-52, 2016.

SIMA. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo. *Resolução SIMA nº 047/2020*. São Paulo, 2020.

SMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente de São Paulo. *Resolução SMA nº 038/2017*. São Paulo, 2017.

SNIC. *Roadmap Tecnológico do Cimento*. Rio de Janeiro, 2019.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, Ministério do Desenvolvimento Regional. *Diagnóstico Temático – Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Ano de Referência 2020*. Brasília, 2021.

TIBURCIO, R. S.; MALPELI JUNIOR, M.; LEITE, J. T. C.; YAMAJI, F. M.; NETO, A. M. P. Physicochemical and thermophysical characterization of reject waste and evaluation of their use as refuse-derived fuel. *Fuel*. v. 293, 2021.

TOSTI, S.; SOUSA, M.A.; BUCETI, G.; MADEIRA, L.M.; POZIO, A. Process analysis of refuse derived fuel hydrogasification for producing SNG. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 44, 2019.

U.E., União Europeia. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. Bruxelas, 2008.

WANG, T.; HOU, H.; YE, Y.; RONG, H.; LI, J.; XUE, Y. Combustion behavior of refuse-derived fuel produced from sewage sludge and rice husk/wood sawdust using thermogravimetric and mass spectrometric analyses. *Journal of Cleaner Production*. v. 222, 2019.

WZOREK, M. Solar drying of granulated waste blends for dry biofuel production. *Environmental Science and Pollution Research*. v. 28, 2021.

YANG, Y.; LIEW, R. K.; TAMOTHRAN, A. M.; FOONG, S. Y.; YEK, P. N. Y.; CHIA, P. W.; TRAN, T. V.; PENG, W.; LAM, S. S. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*. v.19, 2021.

ZAMAN, B.; SAMADIKUN, B. P.; HARDYANTI, N.; PURWONO, P. Waste to energy: calorific improvement of municipal solid waste through biodrying. *Environmental and Climate Technologies*. v. 25, 2021.

ZHENG, X.; YING, Z.; WANG, B.; CHEN, C. Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂. *Applied Thermal Engineering*, v. 144, p.242-247, 2018.

3 TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA PRODUÇÃO DE CDRU

3.1 Introdução

Um dos maiores obstáculos para a produção de CDRU é o alto teor de umidade presente nos resíduos em função da presença de matéria orgânica úmida, que resulta em valores de PCI inadequados para o uso como combustível.

Estratégias para a solução deste obstáculo envolvem, tipicamente, a triagem dos resíduos para separação da matéria orgânica úmida de frações de maior PCI, como plásticos e papéis não recicláveis (SHUMAL *et al.*, 2020; TIBURCIO *et al.*, 2021). Outra alternativa é o tratamento térmico dos resíduos, com ou sem triagem, para a redução da umidade e, em temperaturas maiores, alteração das características físico-químicas para obter um produto de maior valor energético (BADYIA, 2017; INFIESTA *et al.*, 2019). Por fim, há também estudos que indicam o potencial da biossecagem da fração orgânica como forma de reduzir a umidade e aumentar o PCI do material (HAM & MATSUTO, 2019; PSALTIS & KOMILIS, 2019).

Nesta etapa da tese, foi explorado o tratamento térmico de RSU com alto teor de matéria orgânica, a temperaturas entre 150° e 250°C, para a redução da umidade e da biodegradabilidade do material, em atmosfera não inerte. Tal como descrito no capítulo introdutório da tese, o processo de tratamento utilizado consiste de tecnologia inédita apresentada na patente depositada sob o protocolo BR 10 2018 003828 1 do INPI, sob o título "Processo de desidratação e densificação de resíduos sólidos e biomassa e dispositivo" (INPI, 2018) que ainda não havia sido testada em escala piloto industrial.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta etapa foi avaliar a viabilidade técnica e ambiental de um processo inédito de tratamento térmico de RSU, em temperaturas e condições correspondentes a processos de torrefação, para a produção de CDRU em escala piloto.

3.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta etapa, destacam-se:

- Caracterizar o CDRU produzido no processo e compará-lo com padrões normativos nacionais e internacionais;
- Avaliar o balanço ambiental do processo, em especial no tocante às emissões atmosféricas geradas durante o tratamento dos RSU;
- Avaliar os principais fluxos de massa e energia envolvidos;
- Realizar uma análise preliminar dos custos de capital e operacionais relacionados ao tratamento.

3.3 Materiais e métodos

3.3.1 Projeto e construção de planta piloto de desidratação de RSU

Para este trabalho, foi desenvolvida uma planta piloto para a desidratação de resíduos sólidos, com capacidade estimada de 1,0 tonelada de resíduos por batelada. A maior parte dos equipamentos utilizados foi reaproveitada da antiga unidade de pirólise piloto da UFMG, desenvolvida por Tôrres Filho (2014), de tal forma que não foi possível otimizar o dimensionamento dos componentes maiores (reator, fornalha, lavador de gases) às particularidades do processo aqui tratado. A planta é composta por:

- um reator de desidratação por contato direto de 3,0 m³ de volume interno, com braços para movimentação e cominuição da carga (Figura 6);
- uma fornalha de biomassa com volume útil de 25,0 m³ e dois combustores para a alimentação do cavaco de madeira a ser utilizado (Figura 7);
- um ciclone para a retenção de sólidos carregados e condensado (Figura 8);
- um lavador de gases via úmida, tipo *quench* (Figura 8);
- uma chaminé para a exaustão dos gases de combustão;
- um reservatório para a solução de lavagem dos gases.

Na sequência são apresentadas fotos ilustrativas da planta piloto, da Figura 6 à Figura 8.

Figura 6 – Reator de desidratação (esquerda) e detalhe da correia de carregamento (direita)



Fonte: Autor (2023).

Figura 7 – Combustores para a queima do combustível e fornalha



Fonte: Autor (2023).

Figura 8 – Ciclone para retenção de sólidos e condensado (esquerda) e lavador por via úmida (direita)



Fonte: Autor (2023).

Existem ainda componentes auxiliares (tubulações, bombas, ventiladores, sensores, painéis elétricos, dentre outros) necessários para o funcionamento da unidade. Um controlador lógico programável (CLP) foi instalado para o controle da velocidade de alimentação do combustível em função da temperatura da fornalha, e quatro termopares (três tipo J, um tipo K) foram alocados para a medição da temperatura dos gases em diferentes pontos do processo:

- termopar 1 (tipo J): temperatura dos gases na entrada do reator;
- termopar 2 (tipo J): temperatura dos gases na saída do reator;
- termopar 3 (tipo K): temperatura dos gases na fornalha;
- termopar 4 (tipo J): temperatura dos gases na saída do lavador de gases.

A CLP foi conectada a um computador via *Ethernet* e sua configuração foi realizada por meio do programa *MasterTool IEC XE 3.30*, de distribuição livre, da Altus. Já a configuração da interface homem-máquina (IHM) é realizada por meio do programa de distribuição livre *Blueplant 2018 1.50 (BP6400)*, da mesma empresa. A Figura 9

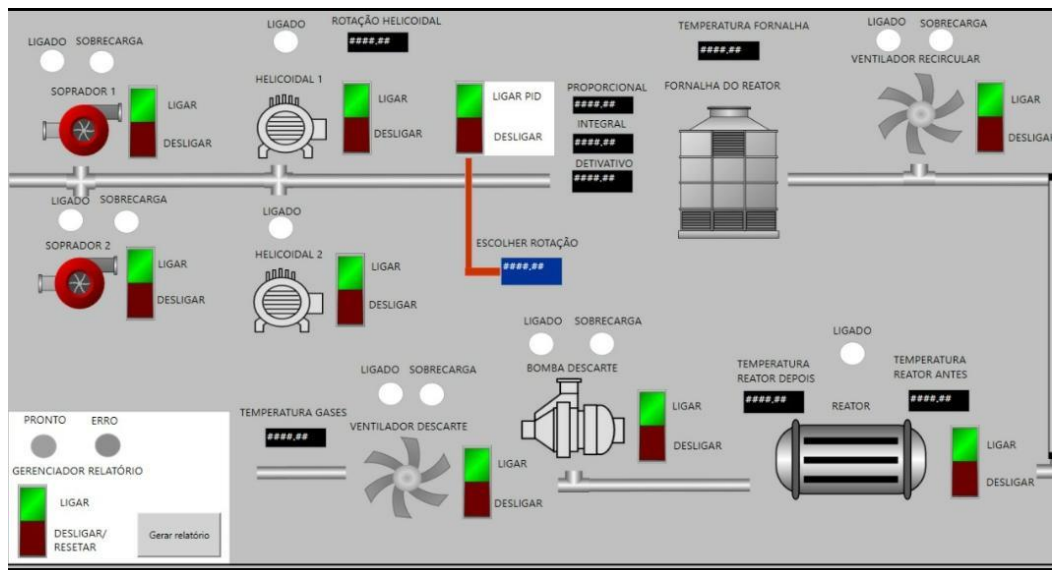
apresenta a sala de controle da operação, e a Figura 10 apresenta em detalhe a IHM gráfica desenvolvida para o projeto.

Figura 9 – Sala de controle da operação



Fonte: Autor (2023).

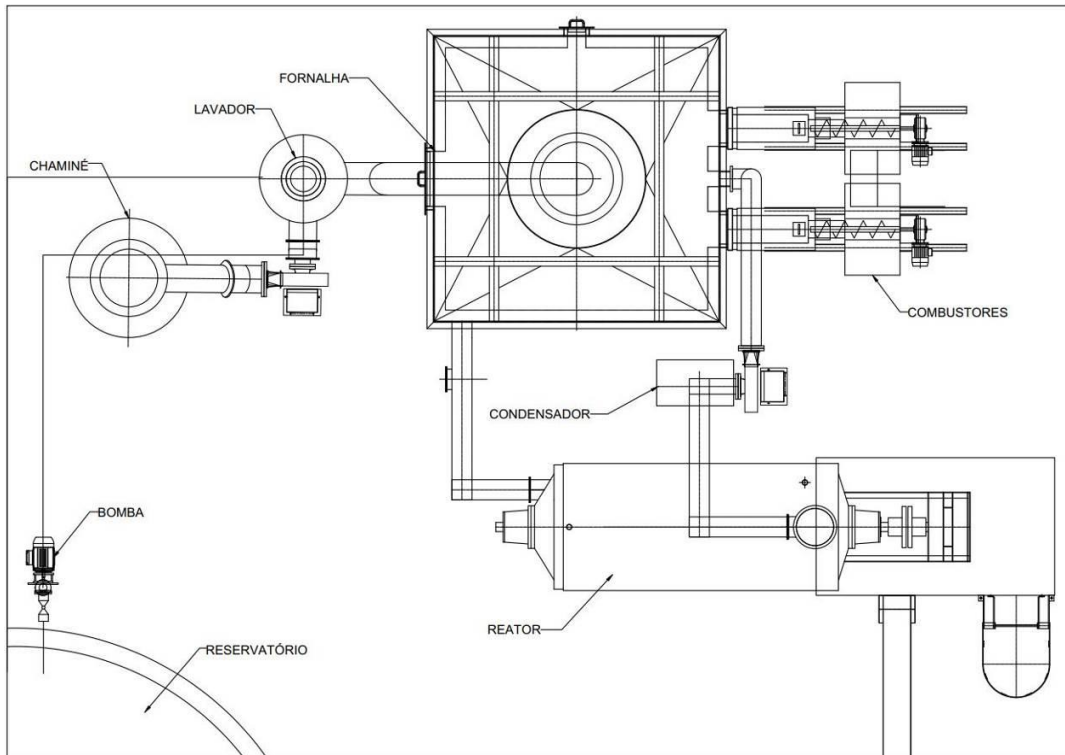
Figura 10 – Detalhe da interface gráfica utilizada



Fonte: Autor (2023).

A Figura 11 apresenta o layout esquemático da planta e a Tabela 6 apresenta a lista detalhada dos equipamentos utilizados.

Figura 11 – Layout esquemático da planta piloto



Fonte: Autor (2023).

Tabela 6 – Lista dos principais equipamentos da planta piloto

Equipamento	Qtde.	Potência [CV]
Reator de desidratação de 3,0 m ³ com braços internos e conjunto motorreductor	1	25,0
Fornalha de aquecimento e pós-queima de gases de 25 m ³	1	-
Combustor de cavaco de madeira com rosca helicoidal e conjunto motorreductor com inversor de frequência	2	1,5
Ventilador de ar de combustão para o combustor	2	1,0
Ventilador de exaustão do reator (vazão nominal 3000 m ³ /h; pressão nominal 400 mmca)	1	10,0
Ventilador de exaustão do sistema após o lavador (vazão nominal 5000 m ³ /h; pressão nominal 100 mmca)	1	5,0
Ciclone para sólidos e condensado, diâmetro nominal 650 mm	1	-
Lavador de gases via úmida, diâmetro nominal 1000 mm	1	-
Chaminé para lançamento de emissões, com luvas para amostragem de gases para análise	1	-
Reservatório tipo australiano para solução de lavagem, capacidade nominal 40 m ³	1	-
Bomba primária para circulação da solução de lavagem (vazão nominal de 40 m ³ /h, altura manométrica de 25 mca)	1	3,0
Correia transportadora para elevação de RSU para carregamento	1	1,5
CLP Altus modelo XP325	1	-
Computador para operação da IHM e captação de dados	1	-
Termopar tipo J, com cabeçote, cabo e conversor de sinal	3	-
Termopar tipo K, com cabeçote, cabo e conversor de sinal	1	-
Balança para pesagem de resíduos	1	-

3.3.2 Determinação das condições ideais de operação da planta

3.3.2.1 *Start up* e testes iniciais

Após a construção da planta, foi realizado o seu comissionamento para verificação do funcionamento adequado de todos os equipamentos. Foram verificados todos os motores elétricos (instalação, acionamento, sentido de giro e rotação), todos os equipamentos mecânicos (eixo do reator, roscas de alimentação, ventiladores, bombas e correia transportadora), todos contadores e as configurações dos inversores de frequência das roscas de alimentação dos combustores.

Em seguida, foi verificado o funcionamento adequado do CLP e da IHM, incluindo a instalação dos termopares e a captação dos dados de temperatura, a ser realizada a cada dez segundos durante a operação da planta.

Para as coletas de amostras de emissões atmosféricas, foi realizado o levantamento de perfil de velocidades no ponto de coleta para verificação da existência de fluxo laminar de escoamento em condições nominais de operação e eventual ajuste da vazão de ar.

3.3.2.2 Ajuste da alimentação de combustível e da temperatura na fornalha

De forma a garantir a segurança ambiental do processo, uma fornalha de pós-queima foi utilizada para tratar os gases provenientes do processo de desidratação, em função de potencial de presença de compostos orgânicos voláteis (COV) e/ou organoclorados (precursores de dioxinas e furanos) nestes. Para essa finalidade, determinou-se uma temperatura mínima na fornalha de 800°C, com um alto tempo de residência (superior a três segundos).

Com o objetivo de economizar combustível ao evitar o aquecimento excessivo da fornalha, foram instalados inversores de frequência nas roscas alimentadoras dos combustores, para viabilizar a variação da vazão mássica de combustível em função da temperatura da fornalha. O controle da variação foi realizado por um controlador tipo PID, com *override* para ajuste manual. A temperatura na fornalha foi aferida continuamente por meio de um termopar tipo K, instalado na parte superior da fornalha em face oposta à da entrada da chama.

3.3.2.3 Ajuste da temperatura no reator

O ajuste da temperatura no reator é uma das principais variáveis do tratamento. Temperaturas muito elevadas podem levar à degradação química de espécies, à formação de dioxinas e furanos ou à combustão da carga, uma vez que há presença de oxigênio em concentração suficientemente alta no reator.

Optou-se, como condição inicial de operação, pela temperatura de 200°C para os gases antes da entrada do reator. Essa temperatura é suficientemente alta para o rápido aquecimento da carga e evaporação da umidade presente, ao mesmo tempo que não apresenta risco substancial de formação de dioxinas e furanos. O

posicionamento do termopar para a tomada de temperatura pode ser visto na Figura 6, apresentada anteriormente.

O controle da temperatura de entrada foi realizado de forma manual, por meio da mistura dos gases combustos da fornalha de pós-queima (controlado por válvula borboleta) com ar fresco à temperatura ambiente (controlado por *damper* tipo flange cego, apresentado na Figura 12). A flexibilidade da operação permite trabalhar somente com ar fresco para o arrefecimento da carga, caso seja interessante. Durante o processamento de bateladas muito úmidas ou de maior massa, foram toleradas temperaturas de entrada de até 250°C durante o aquecimento inicial da carga, visando a redução do tempo de processamento.

Figura 12 – Detalhe da tomada de ar fresco com *damper*



Fonte: Autor (2023).

3.3.2.4 Ajuste da vazão da solução de lavagem dos gases

Como controle ambiental das emissões atmosféricas do sistema, foi dimensionado um lavador de gases por via úmida, com as seguintes funções:

- Retirada de material particulado por impactação;
- Diminuição brusca da temperatura dos gases combustos saídos da câmara de pós-queima, reduzindo a possibilidade de eventual reformação de dioxinas e furanos.

A temperatura dos gases na saída do lavador deve ser inferior a 200°C, de forma a evitar a possibilidade de reformação de dioxinas e furanos. Essa temperatura depende da troca eficiente de calor entre as gotículas da solução de lavagem, injetadas no lavador a alta pressão por meio de dois bicos atomizadores, e os gases de combustão.

Um termopar tipo J foi posicionado próximo à saída do lavador de gases para verificação dessa temperatura. Um registro tipo globo na linha de recalque da bomba primária possibilita o ajuste da vazão, para a adequação da operação do lavador às condições de operação escolhidas.

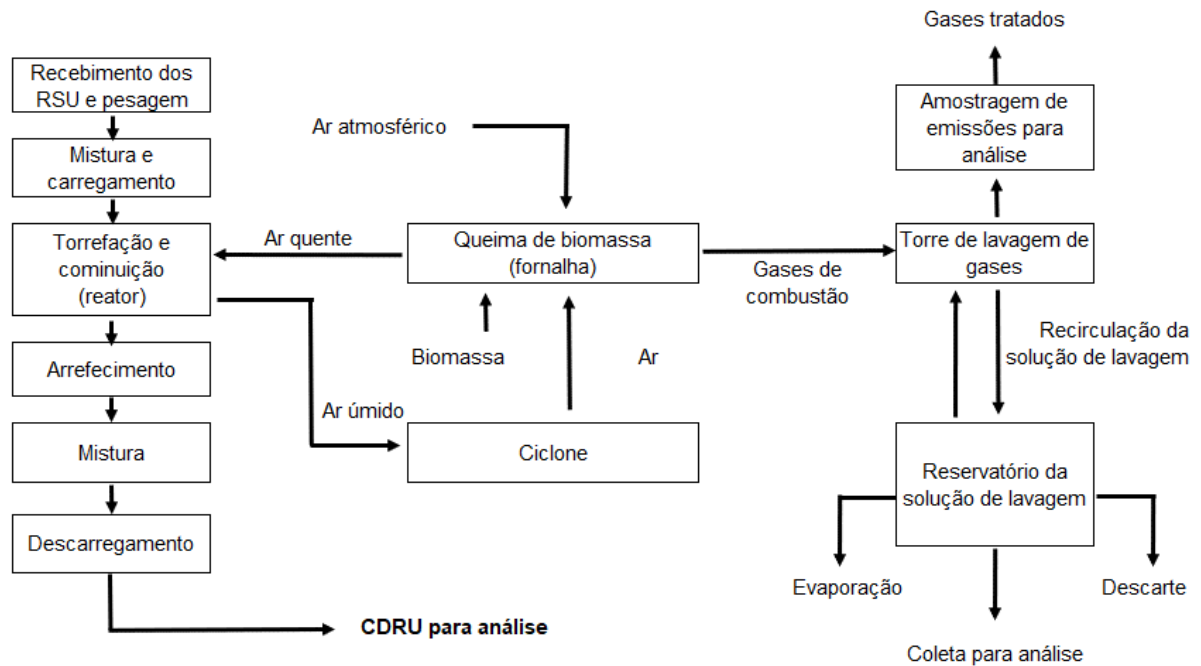
Durante um teste de queima inicial, sem alimentação de RSU, foi determinada a abertura ideal do registro e a adequação das bombas instaladas ao equipamento e ao processo propostos, visando manter a temperatura na saída do lavador abaixo do limite imposto de 200°C. Uma bomba reserva foi instalada no sistema para eventual aumento da vazão em caso de necessidade ou má operação da bomba inicial.

3.3.3 Operação da planta

A planta piloto de tratamento de RSU funcionou por um período de aproximadamente dois meses, ao longo de um ano. Na primeira etapa, com duração de uma semana, foram processadas cerca de 2,0 toneladas de RSU, em quatro bateladas, para coleta de dados sobre a operação e amostras de emissões atmosféricas e efluentes, além da caracterização do CDRU produzido. Em momento posterior, a planta foi operada por um total de oito semanas para a produção de 3,0 toneladas de CDRU para um teste de queima em forno de clínquer. A escolha do volume de RSU a ser tratado se baseou na quantidade mínima de CDRU para a viabilização de um teste de queima em escala plena, em forno rotativo comercial, conforme indicação da empresa proprietária do forno.

Um fluxograma da metodologia de operação da unidade é apresentado na Figura 13, a seguir.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia de operação da planta piloto



Fonte: Autor (2023).

Na sequência, são descritas de forma mais detalhada as etapas de operação da planta.

3.3.3.1 Recebimento dos RSU e pesagem do material

Os resíduos para o tratamento térmico foram recebidos sem triagem, tratamento prévio ou compactação, em caçambas metálicas. Os resíduos foram fornecidos por uma empresa parceira, responsável pela coleta em shopping centers, supermercados e empreendimentos comerciais na região metropolitana de Belo Horizonte.

Uma vez que o trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade de um processo de produção de CDRU sem a necessidade de triagem, foi evitada a separação de materiais e mantido o abastecimento uniforme do reator ao longo das bateladas. Foi realizada a retirada de materiais que pudessem trazer risco aos equipamentos (faixas têxteis promocionais de grande porte, pallets de madeira) ou à equipe técnica (lâminas, garrafas de vidro quebradas). É importante frisar que a aplicação da triagem seria potencialmente benéfica à qualidade do CDRU e à sustentabilidade do processo (pela recuperação de materiais reutilizáveis ou recicláveis) e pode ser integrada em aplicações posteriores da tecnologia.

Após o recebimento, os resíduos foram dispostos em um pátio de transbordo até o momento do carregamento no reator. Para a minimizar a ocorrência de odores e atração de vetores em função da putrefação da matéria orgânica presente, os resíduos foram processados em até 48h após o recebimento e, em casos específicos, embalados em sacos de polietileno para minimizar o espalhamento de lixiviado.

3.3.3.2 Mistura e carregamento

Antes da alimentação do reator, os resíduos foram pesados em balança industrial com o auxílio de contenedores plásticos para controle do balanço de massa. Após a pesagem, o conteúdo dos contenedores foi disposto sobre a correia transportadora que alimenta o reator.

Nos casos de resíduos cuja granulometria ou densidade inviabilizou o uso da correia transportadora, um guincho elétrico foi utilizado para alçar os contenedores até a plataforma de carregamento, para o transbordo manual no interior do reator por meio da boca de alimentação superior.

O eixo interno que realiza a mistura e cominuição da carga foi mantido acionado durante essa etapa de carregamento para auxiliar na distribuição da carga no reator e impedir o entupimento da entrada ou a acumulação de resíduos em apenas uma área do reator.

3.3.3.3 Tratamento térmico - torrefação

Após o carregamento, o sistema de lavagem e exaustão de gases foi acionado e foi realizado o aquecimento da fornalha até a temperatura alvo para a pós-queima (800°C). Uma vez atingida a temperatura alvo, foi iniciado o aquecimento da carga, por meio do ajuste da válvula borboleta para passagem de gases da fornalha para o reator.

O controle do processo de tratamento foi feito por meio da análise das temperaturas dos gases na entrada e na saída do reator. Por se tratar de um processo altamente endotérmico, a temperatura na saída do reator deve ser sempre inferior àquela observada na entrada. À medida que a umidade nos resíduos diminui, é esperado que as temperaturas se aproximem. Desta forma, foi adotado um intervalo mínimo de temperatura de 20°C entre as temperaturas de entrada e saída do reator para a

interrupção do tratamento, uma vez que não foi viável o monitoramento em tempo real da umidade nos gases de saída do reator por motivos de custo de instrumentação. A umidade foi verificada pontualmente por meio de janelas de acesso com uso de sistema de borbulhador e medidor de vazão.

Em função da natureza combustível da carga do reator, das temperaturas de operação e da presença de oxigênio nos gases quentes que adentram o reator, há risco de combustão da carga. Como a combustão é uma reação de natureza exotérmica, sua detecção pode ser realizada pela avaliação das temperaturas na entrada e na saída do reator. Caso a temperatura de saída seja maior do que a temperatura de entrada do reator, pressupõe-se que há combustão da carga. Como protocolo para a supressão da combustão, foi determinado o abafamento da carga e o corte da entrada de oxigênio, por meio do fechamento de ambas as entradas de gases e desligamento do ventilador de exaustão, até que a temperatura no reator seja suficientemente baixa para a descarga ou retomada do processo.

3.3.3.4 Arrefecimento

Após a torrefação de cada carga, foi feito um breve arrefecimento da mesma, para garantir a segurança ocupacional dos operadores e a exaustão de eventuais componentes voláteis que ainda estejam no reator. Para esse objetivo, foi realizado o fechamento da válvula borboleta que regula a passagem dos gases quentes da fornalha, permitindo apenas a entrada de ar atmosférico.

Durante o processo de arrefecimento, foi mantida a alimentação da fornalha para garantir a operação adequada do sistema de pós-queima e tratamento de emissões atmosféricas.

3.3.3.5 Cominuição, mistura, descarregamento e armazenamento

Após o arrefecimento da carga, foi adicionada serragem de madeira em uma razão de 1:25 em massa, considerando a massa inicial de RSU tratado, para melhoria das características de granulometria e uniformização do material.

A mistura e cominuição do material foi realizada ao longo de todo o tratamento por meio da impactação e movimentação gerada pelos braços do eixo rotativo, com frequência de 20 rpm.

O descarregamento foi feito pela comporta inferior do reator, com o auxílio do eixo rotativo. Eventuais sobras no interior do reator foram retiradas manualmente com o uso de vassoura ou rastelo, já com o equipamento de mistura desligado.

Em cada batelada, o CDRU retirado foi carregado em contenedores plásticos e encaminhado para a pesagem e registro em balança. Após a pesagem, o material foi levado para uma caçamba separada, na qual foi realizada a mistura com os produtos de bateladas anteriores para homogeneização.

3.3.4 Caracterização do CDR produzido

Após a homogeneização e quarteamento do CDRU produzido nas bateladas iniciais, foi coletada uma amostra de 5,0 kg análise laboratorial para determinação de sua umidade e teor de cinzas, por meio de análise em estufa, e do seu poder calorífico inferior (PCI) segundo a norma técnica ABNT NBR 8.628/1984. Também foram realizados ensaios para a caracterização do combustível conforme parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA 499/2020 e na Deliberação Normativa COPAM 154/2010, que regulam o coprocessamento de resíduos em âmbito nacional e no estado de Minas Gerais, respectivamente.

Os resultados obtidos nas análises laboratoriais foram comparados com os limites das normas de coprocessamento supracitadas e com os limites estabelecidos para a caracterização de CDRU determinados na norma ABNT NBR 16.849/2020. Também foi avaliada a adequação do combustível à Resolução SIMA nº 47/2020 e à norma europeia EN ISO 21640/2021, utilizadas como referências nacional e internacional de classificação de CDR neste trabalho, respectivamente, para os parâmetros de PCI, teor de cloro e teor de mercúrio.

3.3.5 Análises de emissões atmosféricas

Para a avaliação das emissões atmosféricas foi realizada a medição da vazão na chaminé durante o processo de tratamento e a coleta de material para análise da concentração dos seguintes compostos, em triplicata: material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x), ácido clorídrico, fluoretos, gás cloro, dioxinas e furanos, óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono. A amostragem dos gases foi realizada conforme as orientações estabelecidas nas normas técnicas ABNT NBR

11.966, ABNT NBR 11.967, ABNT NBR 12.019, ABNT NBR 12.020, ABNT NBR 12.021 e ABNT NBR 12.827 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, além dos métodos 1 a 8 da Agência de Proteção Ambiental Americana (*US Environmental Protection Agency* - USEPA).

A escolha dos compostos avaliados teve como base as análises tipicamente realizadas em outros sistemas de tratamento térmico de resíduos, de forma a verificar a segurança do sistema contra a corrosão, a emissão de gases com potencial de efeito estufa, gases com potencial de toxicidade e/ou mutagenicidade e outros riscos à saúde humana.

A coleta de material foi feita utilizando um equipamento do tipo CIPA – Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos. O tamanho da amostra foi limitado a triplicata, em função de restrições orçamentárias.

3.3.6 Análise da solução de lavagem dos gases e da acumulação de poluentes

A coleta de amostras da solução de lavagem dos gases foi realizada diariamente ao longo da primeira fase de operação, com o objetivo de avaliar de forma preliminar o acúmulo de poluentes na solução e sua tratabilidade. Para reduzir as incertezas, todas as coletas foram realizadas antes do início da operação, na saída do lavador de gases após 15 minutos de recirculação da solução pela bomba hidráulica, de forma a homogeneizar o volume do reservatório.

Os seguintes parâmetros foram analisados em laboratório: condutividade, pH, DBO, DQO, sólidos totais, nitrogênio amoniacal, sulfetos, índice de fenóis. As metodologias utilizadas na análise têm como base os padrões estabelecidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

3.3.7 Balanços de massa e energia

De posse dos dados de massa, vazões mássicas e volumétricas e temperaturas obtidos durante o período de operação da planta piloto, associados aos dados conhecidos e estimados a respeito dos componentes eletromecânicos utilizados, foram avaliados os principais fluxos de massa e energia no processo. Os balanços foram realizados para a planta piloto, considerando as aproximações necessárias,

para a estimativa de consumo elétrico, térmico e energético total do processo, assim como da eficiência térmica da operação.

3.3.8 Análise econômica preliminar

Com base nos dados de operação, em especial a carga média e tempo de tratamento para cada batelada, assim como os consumos de combustível e energia elétrica, foram estimados os custos de capital e de operação por tonelada de resíduo tratado. Para os custos operacionais, foram considerados dois cenários: no primeiro, a fonte térmica para o tratamento é proveniente da combustão de biomassa; no segundo, há aproveitamento de calor residual de outros processos industriais para o tratamento.

Os valores de referência utilizados para a análise de custos foram baseados nos gastos reais aferidos durante a construção e a operação da planta e corrigidos pela inflação para a data base de agosto de 2022. Nos casos em que os gastos não puderam ser aferidos diretamente (e.g. custo de aço e calderaria para construção de equipamentos já existentes), foi realizada pesquisa de mercado com fornecedores de serviços já cadastrados na empresa parceira, na região metropolitana de Belo Horizonte.

3.4 Resultados e discussão

3.4.1 Calibração da operação e processamento dos primeiros lotes de RSU

A operação teve início com o recebimento dos resíduos de uma empresa parceira. Dadas as dificuldades logísticas, riscos ocupacionais e questões legais ligadas ao recebimento de resíduos domésticos provenientes da coleta pública, foram utilizados resíduos de um supermercado na região, com grande proporção de resíduos orgânicos (Figura 14).

Figura 14 – Resíduo *in natura* recebido (à esquerda) e detalhe da composição (à direita)



Fonte: Autor (2023)

Foram realizadas a triagem e a análise da composição gravimétrica do resíduo recebido em massa bruta e sem quarteamento, tal como indicado na Tabela 7. Observa-se um percentual de matéria orgânica superior àquele esperado de RSU não triado, o que se justifica pela origem do resíduo recebido. O alto percentual relativo de madeira se deve à presença de pallets e caixotes danificados.

Tabela 7 – Composição gravimétrica do resíduo processado

Matéria orgânica	Plásticos	Papéis e papelão	Metais	Madeira	Outros
79%	4%	3%	3%	7%	4%

Aos se comparar a composição do resíduo utilizado aos valores de composição gravimétrica típicos, observa-se que trata de um resíduo atípico, com concentração de matéria orgânica substancialmente superior àqueles observados na Tabela 2. Valores superiores de matéria orgânica resultam em maior teor de umidade e menor poder PCI antes do tratamento, o que resulta em um maior gasto energético no tratamento para redução da umidade.

O início da operação foi feito com os parâmetros base citados e, a partir dos resultados obtidos, foi realizado o ajuste das condições de operação para o melhor funcionamento do processo. Dada a alta razão de resíduos orgânicos e a conseqüente umidade presente, a temperatura de entrada no reator teve que ser aumentada para

250°C e o tempo de torrefação para aproximadamente 4h. Além disso, a vazão de combustível utilizada foi de aproximadamente 200 kg/h, superior à estimativa inicial, para a manutenção da estabilidade da combustão na fornalha, o que resultou também em maiores temperaturas de pós-queima, em torno de 900°C. A vazão dos gases no reator foi mantida em aproximadamente 3.000 m³/h, determinada pelas características do equipamento de recirculação e verificada pontualmente por meio de sonda pitot na entrada do reator.

Foram processadas, inicialmente, sete bateladas, totalizando 1.982 kg. A redução de massa no processo oscilou entre 72 e 85%, com uma média de 82%. É importante notar que parte do material, em especial plásticos filme e outras embalagens leves, foram carregados para o ciclone e, eventualmente, para a fornalha, em função do gradiente de pressão existente, resultando numa perda de massa adicional não esperada e não quantificável. Para a correção deste problema, foi instalada posteriormente uma grade na saída do reator, para a retenção de sólidos grosseiros. Além disso, parte do material recebido não foi processada (pallets de madeira, tambores de ferro, EPIs, faixas promocionais de material têxtil) devido às limitações operacionais da planta, e não foram registradas no balanço de massa.

Quanto ao CDR produzido, notou-se uma forte descaracterização física das frações orgânicas, com redução de umidade, redução da granulometria e eliminação do chorume, do forte odor inicial e da biodegradabilidade. A Figura 7 apresenta o aspecto do CDR produzido. Foi observada uma mudança de coloração e aroma levemente adocicado, indicando a torrefação do material nas condições de operação adotadas, com descaracterização física do material e alteração da cor. Tais alterações são condizentes com as reações de quebra de carboidratos e proteínas e formação de maloidinas e melanoidinas, mais conhecidas como reações de Maillard.

Figura 7 – Aspecto do CDR produzido (detalhe à direita)



Fonte: Autor (2023)

Para verificação da biodegradabilidade do material, um lote de 200 kg de CDR foi mantido em estoque por aproximadamente doze meses, em galpão com fechamento superior para proteção da chuva e aberturas laterais para ventilação. Durante esse período, não foram observados indícios de degradação biológica ou alteração no odor.

Foi observada a atração de moscas-soldado nas primeiras duas semanas após o tratamento dos resíduos, com o desenvolvimento de pupas no substrato do CDRU. Após as duas semanas iniciais, com a eliminação das pupas geradas, não foram observados novos episódios de atração de insetos ou animais de maior porte.

3.4.2 Resultados da análise do CDRU produzido

Os resultados das análises laboratoriais do CDRU produzido são apresentados na Tabela 8. Os resultados foram agrupados conforme as classes de metais estabelecidos na Deliberação Normativa COPAM 154/2010 e os limites de concentração estabelecidos são apresentados em coluna separada.

Tabela 8 – Resultados das análises do CDRU e limites estabelecidos na DN 154/2010

Parâmetro	Valor limite DN 154/2010	L.Q.	Valor medido
Cádmio		2,50 mg/kg	< 2,50 mg/kg
Mercúrio	100 mg/kg	0,05 mg/kg	< 0,05 mg/kg
Tálio		72,99 mg/kg	< 72,99 mg/kg
Arsênio		2,05 mg/kg	< 2,05 mg/kg
Cobalto		5,00 mg/kg	< 5,00 mg/kg
Níquel	1.500 mg/kg	10,00 mg/kg	< 10,00 mg/kg
Selênio		2,05 mg/kg	< 2,05 mg/kg
Telúrio		364,94 mg/kg	< 364,94 mg/kg
Antimônio		1,00 mg/kg	1,57 mg/kg
Cromo		50,0 mg/kg	< 50,0 mg/kg
Estanho	5.800 mg/kg	364,94 mg/kg	< 364,94 mg/kg
Chumbo		10,00 mg/kg	< 10,00 mg/kg
Vanádio		2,05 mg/kg	< 2,05 mg/kg
Cloro	-	0,01%	0,22%
Umidade	-	0,01%	12%
PCI	1.500 kcal/kg	417,00 kcal/kg	4.450,00 kcal/kg
Teor de cinzas	-	0,001%	4%

Observa-se que todos os parâmetros químicos avaliados, com exceção do antimônio, ficaram abaixo do limite de quantificação, e que todos os valores ficaram muito abaixo dos limites normativos estabelecidos. Quanto ao PCI, observou-se um valor quase três vezes superior ao limite normativo inferior, indicando potencial adequado para o uso como combustível.

Os valores encontrados para o PCI, de 4.450 kcal/kg são superiores aos valores resultantes de processos de biossecagem relatados por Ham & Matsuto (2021) e Psaltis *et al.* (2019), de 1.721 kcal/kg e 2.700 kcal/kg, respectivamente, indicando uma maior qualidade do CDR torrefado do ponto de vista térmico. O valor é inferior àquele obtido por Tôrres Filho (2014) em processo de pirólise de RSU em atmosfera inerte, de 5.903 kcal/kg.

Destaca-se ainda a adequação do CDRU produzido aos limites estabelecidos pelas normas SIMA nº 47/2020, ABNT NBR 16.849/2020 e EN ISO 21640/2021, tal como indicado na Tabela 9 e na Tabela 10, respectivamente.

Tabela 9 – Comparação de valores normativos nacionais com os dados para o CDRU produzido

Referência	PCI mínimo (kcal/kg)	Teor de cloro máximo (%)	Teor de mercúrio máximo (mg/kg)
SMA nº 47/2020 ¹	3.583	1,0	N/A
NBR 16.849/2020	2.750	3,0	1,0
Valor medido	4.450	0,22	< 0,05

¹Considerados aqui os valores limites para coprocessamento.

Tabela 10 – Comparação de valores para classificação segundo EN ISO 21640/2021 com os dados para o CDRU produzido

Característica	Classe					Valor medido	Classe resultante
	1	2	3	4	5		
PCI (MJ/kg)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3	18,63	3
Cloro (%)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3	0,2	2
Mercúrio (mg/MJ)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,15	<0,002	1

Observa-se que o CDRU produzido atinge parâmetros adequados para a utilização como combustível em fornos de clínquer assim como em outros processos industriais nos quais o requerimento de PCI para o combustível auxiliar não seja particularmente alto. As baixas concentrações de mercúrio (não detectado pelo ensaio da amostra) e de cloro indicam risco ambiental relativamente baixo para o uso do CDRU como combustível alternativo, com base no padrão normativo apresentado.

3.4.3 Resultados das análises de emissões atmosféricas

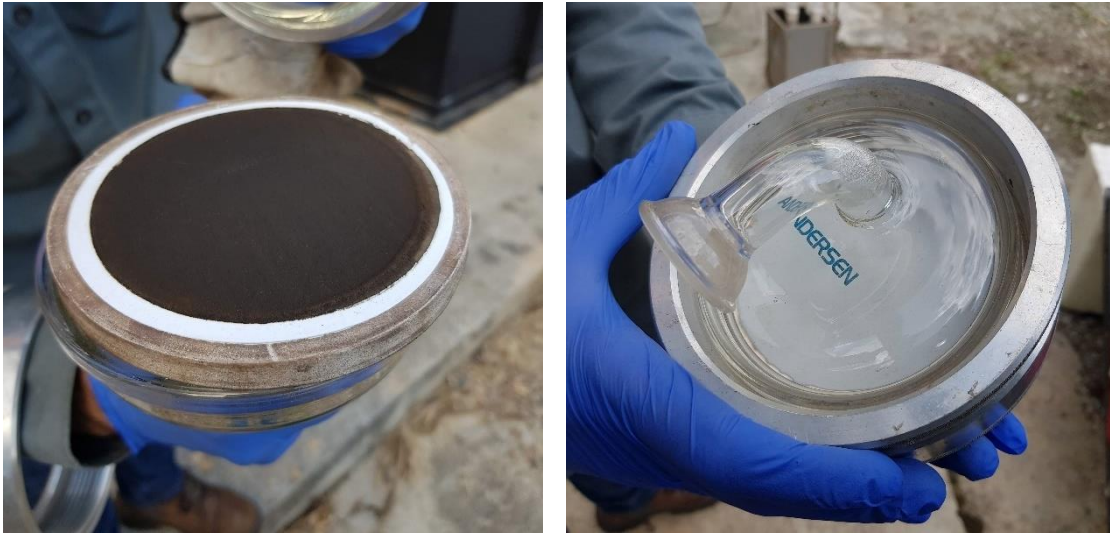
Os resultados das análises de emissões atmosféricas são apresentados na Tabela 11, assim como uma comparação com os limites normativos para as emissões atmosféricas em âmbito estadual e nacional.

Tabela 11 – Resultados das análises de emissões atmosféricas e comparação com os limites normativos em âmbito estadual e nacional

Parâmetro	Unidade	Limite COPAM 187/2010	Limite CONAMA 316/2002	Média	Incerteza	LQ
MP, corrigido a 8% de O ₂	mg/Nm ³	200,0	70	260,55	21,97	1,0
SO _x , corrigido a 8% de O ₂	mg/Nm ³	-	280	35,75	9,16	1,3
NO _x , corrigido a 8% de O ₂	mg/Nm ³	-	560	51,97	10,98	6,8
CO	ppm	3.290	100	1976,8	5,5	3,3
O ₂	%	-	-	15	1,5	0,3
CO ₂	%	-	-	4,6	1,2	1,0
Fluoretos, corrigido a 7% de O ₂	mg/Nm ³	-	5	<0,26	-	0,26
Ácido clorídrico	mg/Nm ³	-	-	2,41	0,33	1,0
Cloro livre	mg/Nm ³	-	180	17,47	1,60	1,0
PCDD/Fs	ngTEQ/Nm ³	-	0,50	0,021	0,001	0,002

Observou-se que o parâmetro de MP não atendeu às exigências normativas da Resolução CONAMA 316/2002 para sistemas de tratamento térmico de resíduos. Os resultados tampouco atenderam aos padrões da DN COPAM nº 187/2010, que estabelece um limite de 200 mg/Nm³ para geradores de calor que utilizam cavaco de madeira como combustível. Atribui-se esse resultado à alta umidade do combustível nos dias de amostragem, o que impactou a qualidade da combustão e das emissões atmosféricas durante a operação. Após a secagem do cavaco ao sol e melhor ajuste das condições de alimentação, foi verificada melhoria expressiva no aspecto do filtro de MP, entretanto sem quantificação da melhoria (Figura 8). Destaca-se que, para uma aplicação comercial da tecnologia, a utilização de soluções simples como ciclones ou filtros de manga seria indicada para melhoria da qualidade das emissões.

Figura 8 – Aspecto do filtro de material particulado no dia das amostragens (à esquerda) e após secagem do combustível (à direita)



Fonte: Autor (2023).

Para a DN 187/2010, não existem limites normativos para NO_x e SO_x , e os valores de CO ficaram substancialmente abaixo do limite de 3.290 ppm descrito na norma. Já a Resolução CONAMA 316/2022 apresenta limites mais restritos para os parâmetros, uma vez que sua aplicação é voltada para incineradores de resíduos, nos quais o risco ambiental associado às emissões atmosféricas é maior, o que resultou em não conformidade para as emissões de CO. Tal como para os valores de MP, a medição de CO foi potencialmente impactada pela umidade do combustível, o que reduz a qualidade da combustão.

Os valores de fluoretos ficaram abaixo do limite de quantificação em todas amostragens. Destaca-se a presença de cloro livre nas emissões, com concentração de 17,47 mg/Nm^3 . Esse valor pode ser resultado da presença de polímeros clorados (PVC), resíduos de produtos de limpeza (hipocloritos) e cloreto de sódio nos alimentos processados. Apesar da concentração observada, os valores se adequam às exigências normativas nacionais, tal como visto na Tabela 11.

Por fim, os valores encontrados para PCDD/Fs, de 0,021 ngTEQ/Nm^3 , encontram-se substancialmente abaixo dos limites normativos nacionais de 0,50 ngTEQ/Nm^3 , assim como abaixo de valores mais restritos observados em normas recentes, tal como a Resolução CONAMA 499/2020 e a Resolução SIMA 047/2020. Esses resultados

possibilitam concluir que o risco de formação de dioxinas e furanos é baixo para o tratamento proposto, que inclui sistema de pós-queima e *quenching*.

3.4.4 Resultados das análises de efluentes

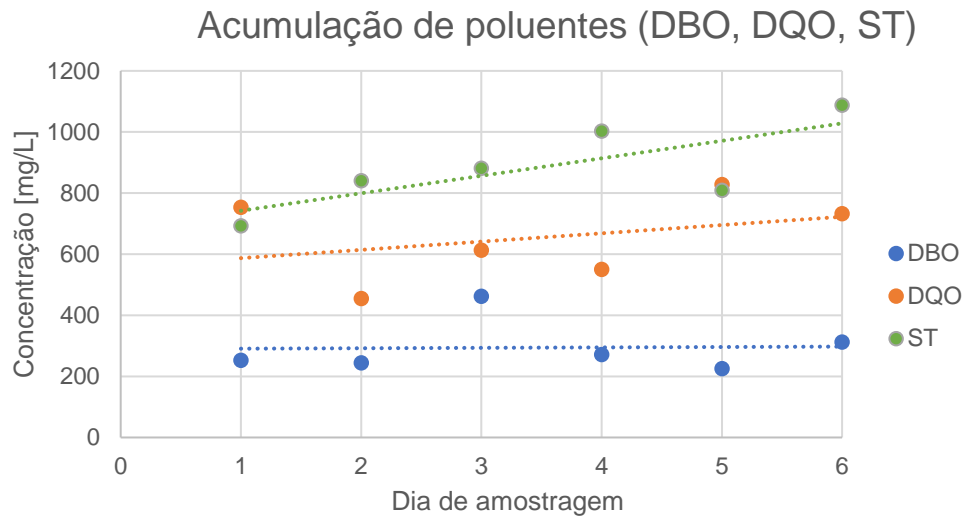
Os resultados das análises das amostras da água de lavagem são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados das análises da solução de lavagem

Parâmetro	Unidade	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6
Condutividade	µS/cm	959	1139,4	1334,9	1362,4	1405,4	1807,3
DBO	mg/L	252	244,1	461,9	270,8	224,5	311,5
DQO	mg/L	753	454,7	612,4	549,2	827,2	731,7
Fenóis	mg/L	10,5	11,6	3,8	6,3	7,5	7,8
Nitrogênio amoniacal total	mg/L	21,2	22,4	23,9	26,9	31,3	29,7
Sólidos totais	mg/L	692	840,2	880,6	1002,7	808,1	1087,3
pH	-	7,5	7,5	7,9	7,8	7,9	7,7
Sulfetos	mg/L	0,02	0,09	0,06	0,05	0,01	0,01

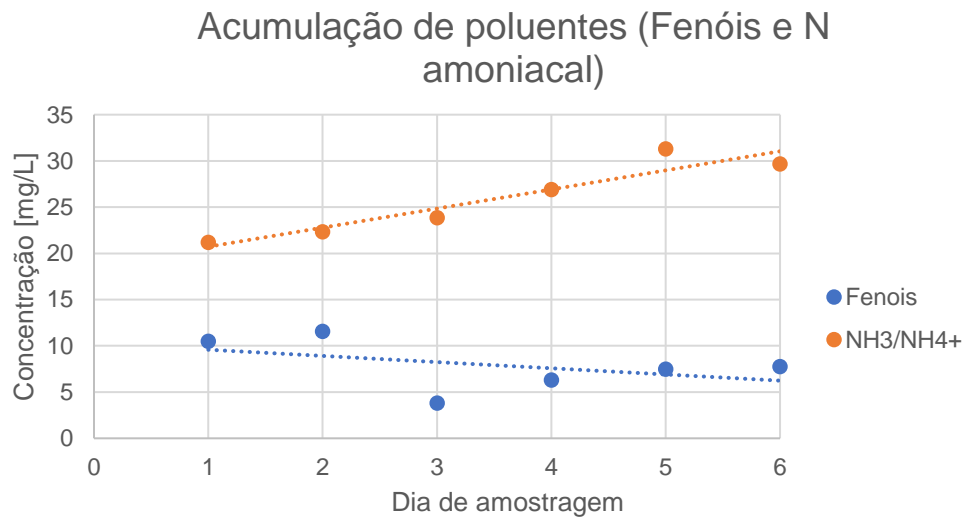
No início da operação, foi utilizada água potável como solução de lavagem. Entretanto, para o controle da população de mosquitos e manutenção da segurança ocupacional dos colaboradores, foi adicionado um desinfetante a base de cresóis e fenóis (creolina) à solução. Dessa forma, optou-se pela análise não dos valores brutos das medições, mas pela variação das concentrações ao longo da operação, tal como apresentado na Figura 15 e na Figura 16. Os valores apresentados estão corrigidos em função do volume de água adicionado ao longo da operação.

Figura 15 – Acumulação temporal de DBO, DQO e ST ao longo da operação



Fonte: Autor (2023)

Figura 16 – Acumulação temporal de fenóis e nitrogênio amoniacal total ao longo da operação



Fonte: Autor (2023)

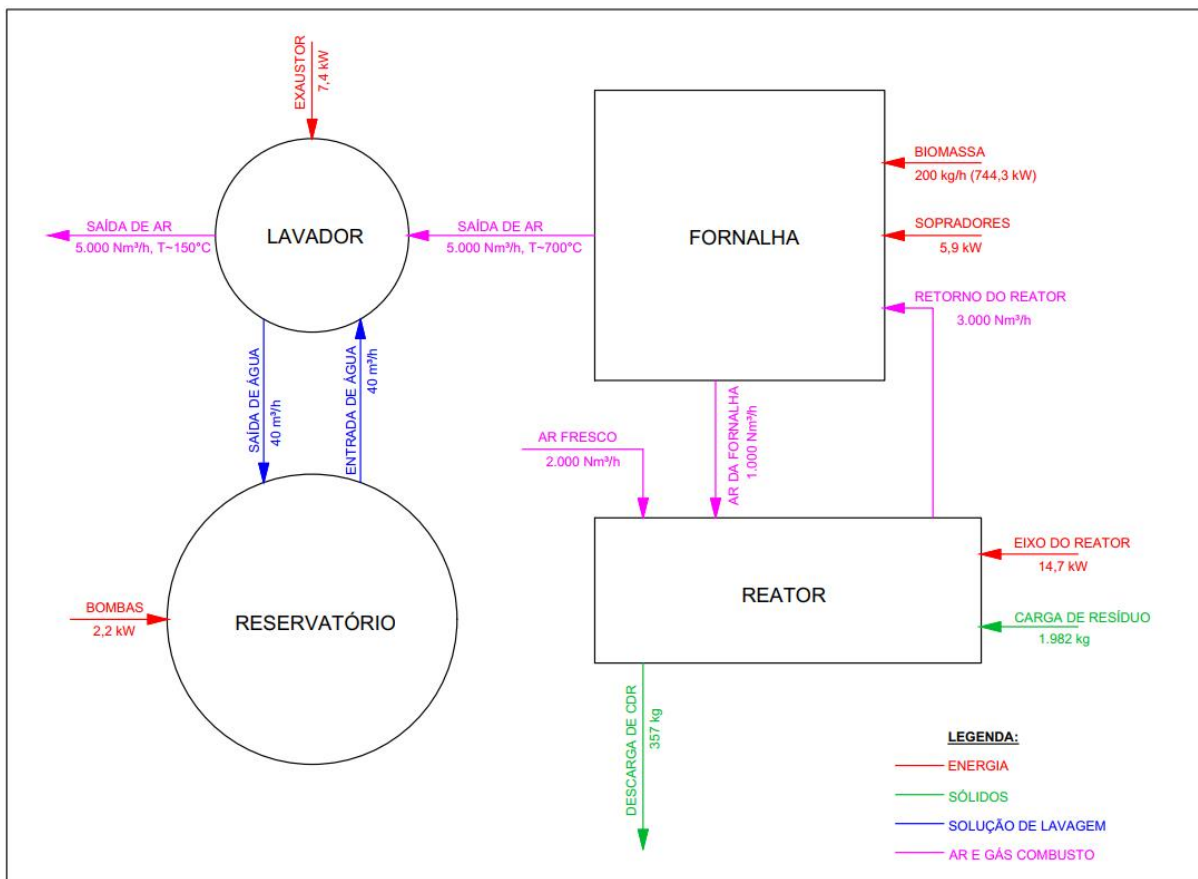
Observou-se uma tendência de aumento da concentração DBO, DQO, sólidos, e nitrogênio amoniacal. Já para a concentração de fenóis, foi observada uma redução, o que provavelmente se deve à evaporação de compostos fenólicos presentes na creolina adicionada à solução de lavagem. Foi realizada a regressão linear para o ajuste das séries de dados obtidos.

As concentrações de DBO, DQO, nitrogênio amoniacal, sólidos e a relação DQO/DBO ao longo dos testes se aproximam de valores encontrados na literatura para esgotos sanitários (METCALF & EDDY, 2003; VON SPERLING, 2018) e indicam a viabilidade de tratamento biológico em estações de tratamento de esgotos sanitários, caso haja possibilidade de lançamento na rede pública. Especificamente para o estado de Minas Gerais, os valores atendem aos padrões de qualidade estabelecidos no programa Precend para coleta de efluentes não-domésticos (COPASA, 2010).

3.4.5 Fluxos de massa e energia

Para a avaliação dos fluxos de massa e energia no processo de tratamento, foram levantados, identificados e lançados os principais fluxos, tal como indicado na Figura 17.

Figura 17 – Principais fluxos de massa e energia na planta de tratamento



Fonte: Autor (2023).

Observa-se que, do gasto total de energia durante o processo (em vermelho no diagrama), 96,1% corresponde à energia térmica proveniente da combustão de

biomassa. O alto consumo de combustível é necessário para garantir temperaturas de pós-queima adequadas para o tratamento das emissões atmosféricas do reator. Entretanto, dado o alto tempo de detenção dos gases na fornalha (aproximadamente 5,0 s), há possibilidade para otimização do dimensionamento da fornalha em projetos posteriores, de forma a reduzir o consumo térmico relativo ao sistema de pós-queima.

A eficiência térmica global média da planta, determinada pela energia transferida para o resíduo na forma de calor sensível e latente para a remoção de umidade, foi de apenas 15% (considerando uma eficiência de combustão de 95%). Esse valor se deve principalmente ao calor perdido no sistema de tratamento de emissões atmosféricas, em função da necessidade do quench para proteção dos equipamentos e mitigação do risco de reformação de PCDD/Fs. Para implementações da tecnologia em maior escala, a avaliação da viabilidade técnica e econômica de sistemas de tratamento de emissões que possibilitem o aproveitamento do potencial dos gases de exaustão é recomendada para o aumento da eficiência global.

Em função das restrições de instrumentação, não foi possível estimar com precisão as perdas térmicas nas tubulações e no reator e seu impacto na eficiência térmica global.

3.4.6 Análise econômica preliminar

Os dados coletados ao longo dos três meses de operação foram sumarizados na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 – Valores operacionais médios ao longo da operação da planta

Variável de processo	Valor médio aferido
Carga média de resíduos por batelada	1.000 kg
Tempo médio de carregamento	1h30min
Tempo médio de tratamento	5h
Tempo médio de descarregamento	30min
Consumo elétrico médio por batelada	165,8 kWh
Consumo médio de combustível (biomassa) por batelada	1.000 kg

Com base nos dados operacionais e nos valores obtidos durante a construção da planta, foram levantados dados estimados de custos de capital e custos operacionais para a unidade, considerando-se 300 dias de produtividade no ano, com operação de 16h diárias (duas bateladas por dia, em dois turnos). Os valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Custos estimados de capital e operação (valores para a data de agosto de 2022)

Custos de capital		
Elemento	Custo	
Fabricação de equipamentos (reator, combustores, fornalha, sistema de tratamento de emissões)	R\$ 500.000,00	
Reservatório para solução de lavagem	R\$ 12.000,00	
Equipamentos eletromecânicos (exaustores, bombas, motores e redutores)	R\$ 95.000,00	
Instrumentação, automação, instalações elétricas e rede	R\$ 30.000,00	
TOTAL	R\$ 637.000,00	
Custos operacionais		
Elemento	Consumo ou custo mensal	Custo anual
Consumo de água	100 m ³	R\$ 14.400,00
Consumo de energia elétrica	8,29 MWh	R\$ 19.896,00
Consumo de combustível (biomassa)	50 t	R\$ 150.000,00
Pessoal (um encarregado e um auxiliar de produção por turno)	R\$ 15.000,00	R\$ 180.000,00
Custos de manutenção (estimados em 5% do CAPEX/ano)	R\$ 2.650,00	R\$ 31.850,00
TOTAL		R\$ 396.146,00

Para um tratamento estimado de 600 t/ano, o custo operacional de tratamento estimado por tonelada é de R\$ 660,00/t. Observa-se que os principais custos da operação são relativos ao consumo de combustível para o tratamento e ao pagamento de pessoal. A automatização dos processos de carregamento e o aproveitamento de calor residual de outras fontes poderiam reduzir substancialmente o valor de

tratamento. No caso do aproveitamento de calor residual de processos industriais, poderia-se suprimir o custo com combustíveis, reduzindo o custo de tratamento seria reduzido para R\$ 410,00/t. É importante frisar que os valores aqui apresentados foram levantados com base na operação da planta experimental, sem otimização dos equipamentos e com resíduo atípico, com maior teor de matéria orgânica e umidade.

Um fator definidor para a avaliação da viabilidade técnica do investimento é a precificação do CDRU produzido. Em sondagens informais com profissionais ligados à área de blendagem de resíduos e coprocessamento de resíduos em indústrias na região metropolitana de Belo Horizonte, foram citados valores entre R\$ 200,00/t e R\$ 250,00/t para a compra de CDR com as características obtidas (pesquisa realizada em agosto de 2022). Cabe notar que esses valores possuem grande tendência de variação de acordo com os preços internacionais de combustíveis tradicionais e com a flutuação da demanda de cimento.

Não foram computados nesta análise valores referentes a custos administrativos da operação, valores referentes à aquisição ou construção de imóveis ou valores referentes a fretes e movimentação dos resíduos e do CDRU produzido, uma vez que cada cenário local exige uma análise mais. A viabilidade econômica do tratamento frente a outras alternativas prevalentes (e.g. aterros sanitários) depende da disponibilidade de outras soluções na região, dos custos de frete associados ao transporte dos resíduos brutos e da existência de fábricas de cimento com licença para coprocessamento de resíduos.

3.5 Conclusões

O projeto, construção e operação da planta piloto de produção de CDRU atenderam adequadamente à premissa de simplicidade operacional. Toda a operação de tratamento foi realizada por apenas um supervisor e um auxiliar de produção, o que indica o potencial para um baixo custo relativo de operação da planta.

O combustível utilizado como fonte térmica no processo (cavaco de eucalipto) é renovável, de baixo custo e boa disponibilidade no mercado nacional. O processo pode ser facilmente adaptado para outras fontes de biomassa ou biogás, com a adequação dos combustores e sistemas de alimentação de combustível.

Verificou-se que a torrefação dos resíduos associada à cominuição, em especial da fração orgânica, atingiu os objetivos de aumento do poder calorífico, redução da umidade e redução da biodegradabilidade, viabilizando o manuseio e estoque do CDRU por longos períodos.

O CDRU produzido apresentou características físico-químicas consideradas adequadas para o uso como combustível em fornos de clínquer e em outros sistemas de geração térmica de energia, atendendo a padrões normativos nacionais e internacionais. A concentração de cloro encontrada, apesar de baixa, pode ser um fator limitante para o aproveitamento energético e sua adequação à tipologia do sistema de queima e tratamento de emissões deve ser observada para cada caso. O PCI do produto obtido foi superior aos valores relatados na literatura para CDRs provenientes de biossecagem e de plantas MBT.

Quanto à segurança ambiental do processo de tratamento, verificou-se o não atendimento a parâmetros de MP e CO estabelecidos em âmbito nacional para sistemas de tratamento térmico de resíduos, conforme determinado pela Resolução CONAMA nº 316/2002.. Um melhor controle da combustão e a utilização de sistemas adicionais para remoção de MP (e.g. ciclones ou filtros de manga) podem ser necessários para a aplicação comercial da tecnologia. As concentrações de dioxinas e furanos nas amostras coletadas foram substancialmente inferiores aos limites estabelecidos em todas as normas consultadas. Os efluentes gerados no sistema de lavagem de gases apresentaram características de tratabilidade próximas àqueles encontrados em efluentes sanitários, viabilizando o lançamento em rede pública de coleta, quando existente e permitido pela concessionária ou autarquia local.

A avaliação dos fluxos de energia indica potencial para otimização dos equipamentos e aumento da eficiência energética no processo. A eficiência térmica global foi estimada em 15%, o que se deve em parte à necessidade de manutenção de altas temperaturas de pós-queima e ao tamanho da fornalha. De todo o consumo energético, apenas 3,9% foi relativo ao consumo de energia elétrica.

Os custos estimados de capital para a construção e instalação da unidade de tratamento foram de R\$ 637.000,00. Já os custos operacionais anuais foram estimados em R\$ 396.146,00/ano, dos quais 37,9% correspondem a custos com

combustível e 45,4% a mão-de-obra. É possível concluir que a utilização de fontes mais baratas de calor (e.g. calor residual de processos industriais) e uma maior automatização dos processos de alimentação e descarregamento é capaz de reduzir substancialmente os custos operacionais para o tratamento dos resíduos. A viabilidade econômica do tratamento depende, entretanto, de fatores específicos de cada local, como a disponibilidade e custo de outras rotas de gestão (e.g. aterros) e a existência de mercado para a aquisição do CDRU produzido, assim como valores de frete, custo de área para a implantação da unidade de tratamento, dentre outros.

3.6 Referências de literatura

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8628: Determinação do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11966: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e da vazão - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11967: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12019: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12020: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados em amostragem*. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12021: Efluentes gasosos de dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e névoas de ácido sulfúrico*. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12827: Efluentes gasosos com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16849: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2020.

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*, 23^a Ed. 2017.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; PARILIKAR, U. V. Sustainability of cement kiln co-processing of wastes in India: a pilot study. *Environmental Technology*. v. 38, 2017.

CEN – European Committee for Standardization. *EN ISO 21640:2021 – Solid recovered Fuels – Specifications and classes*. Bruxelas, 2021.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 316/2002: Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos*. Brasília, 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 499/2020: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos*. Brasília, 2020.

COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais. *Deliberação Normativa nº 154/2010: Dispõe sobre o Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer*. Belo Horizonte, 2010.

COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais. *Deliberação Normativa nº 187/2013: Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas*. Belo Horizonte, 2013.

COPASA, Companhia de Saneamento de Minas Gerais. *Norma Técnica T 187/6 – Lançamento de efluentes não-domésticos no sistema de esgotamento sanitário da COPASA*. Belo Horizonte, 2018.

HAM, G.; MATSUTO, T. Comparison of energy recovery system from municipal solid waste in terms of energy balance and life cycle CO₂ emission. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. v.23, 2021.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environment Management*. v. 236, 2019.

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. *Patente nº BR 10 2018 003828 1 – Processo de Desidratação e Densificação de Resíduos Sólidos e Biomassa e Dispositivo*. 2018.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. Metcalf & Eddy Inc. 4^a ed. 2003.

PSALTIS, P.; KOMILIS, D. Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste. *Waste Management*. v. 83, 2019.

SHUMAL, M.; JAHROMI, A. R. T.; FERDOWSI, A.; DEHKORDI, S. M. M. N.; MOLOUDIAN, A. DEHNAVI, A. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refuse-Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. *Renewable Energy*. v. 146, 2020.

SIMA. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo. *Resolução SIMA nº 047/2020*. São Paulo, 2020.

TIBURCIO, R. S.; MALPELI JUNIOR, M.; LEITE, J. T. C.; YAMAJI, F. M.; NETO, A. M. P. Physicochemical and thermophysical characterization of reject waste and evaluation of their use as refuse-derived fuel. *Fuel*. v. 293, 2021.

TÔRRES FILHO, Artur. *Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. 1984.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. *EMC – NSPS Methods (40 CFR Part 60 Appendix A)*. 1979.

VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Volume 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Ed. UFMG. 2018.

4 AVALIAÇÃO DA DENSIFICAÇÃO E DA GASEIFICAÇÃO DO CDRU PRODUZIDO

4.1 Introdução

A gaseificação de CDRU se apresenta como rota de potencial viabilidade técnica e econômica na gestão de RSU. O gás de síntese produzido pode ser utilizado como fonte térmica em processos industriais ou na geração de eletricidade em sistemas de ciclo Rankine ou Brayton (BRIDGEWATER, 1995; MONARCA *et al.*, 2012). Outra possibilidade é o uso do gás como matéria-prima na fabricação de hidrogênio, cuja demanda tem crescido fortemente nos últimos anos em função de sua importância na descarbonização de processos industriais (ZHAO *et al.*, 2021; KIM & SOHM, 2022; KHADEMI *et al.*, 2023).

A composição do gás de síntese é intrinsecamente ligada à composição da matéria-prima utilizada e da atmosfera de gaseificação. A utilização de oxigênio puro resulta em gases de maior poder calorífico pela eliminação do nitrogênio inerte presente no ar atmosférico. Já a injeção de vapor supercrítico no gaseificador pode ser realizada com a finalidade de se aumentar o percentual de hidrogênio no gás produzido (HELSEN, 2000; ZHAO *et al.*, 2021, KHADEMI *et al.*, 2023)

Em função da natureza dos equipamentos de gaseificação, a alteração da granulometria e densidade do material podem ser necessárias para ser garantir o andamento adequado do processo. Nos casos de resíduos leves orgânicos, de plásticos ou de papel, a peletização ou a briquetagem são os processos mais comumente utilizados, tendo como principal diferença entre si a dimensão média do produto final. A adição de ligantes de natureza mineral (cal, cimento portland) ou orgânica (resinas fenólicas ou à base de formaldeído) é comum para trazer maior coesão e resistência mecânica ao produto.

Nesta etapa do trabalho, parte do CDRU produzido na operação da planta piloto de tratamento foi destinada a um processo de briquetagem com adição de ligantes e posterior gaseificação. A briquetagem foi realizada com o apoio de uma indústria parceira que atua na fabricação de briquetes metalúrgicos, enquanto os testes de gaseificação foram realizados em escala piloto na unidade de gaseificação localizada no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento da UFMG – CePTS.

4.2 Objetivos

4.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta etapa do trabalho foi avaliar o potencial de briquetagem e posterior gaseificação do CDRU produzido pelo processo de tratamento térmico utilizado, em escala piloto, em um gaseificador do tipo *downdraft*.

4.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta etapa, destacam-se:

- Determinar uma composição ideal para o briquete de forma a garantir coesão no processo produtivo com equipamentos comerciais e dimensão adequada para a utilização em equipamentos de grande porte;
- Caracterizar o briquete quanto à variação dimensional, aspectos organolépticos, biodegradabilidade e resistência mecânica à compressão;
- Verificar a possibilidade de produção de gás de síntese com combustibilidade adequada para uso como fonte térmica;
- Caracterizar a composição do gás de síntese por meio de análise de cromatografia gasosa;
- Estimar o PCI do gás de síntese produzido em função de sua composição;
- Comparar o gás de síntese de CDRU com o gás de síntese produzido a partir da gaseificação de cavacos de eucalipto nas mesmas condições estequiométricas e com dados secundários de outros trabalhos;
- Verificar a presença de compostos orgânicos voláteis, em especial organoclorados, que possam trazer restrições ao uso do gás de síntese produzido, por meio de análise de cromatografia gasosa associada a espectrometria de massas.

4.3 Materiais e métodos

4.3.1 Densificação do CDRU e produção de briquetes

Nesta etapa metodológica, foram separados 200 kg de CDRU para o processo de densificação por meio da fabricação de briquetes. Com base na experiência prévia da empresa parceira que prestou auxílio durante essa etapa, foram propostas oito

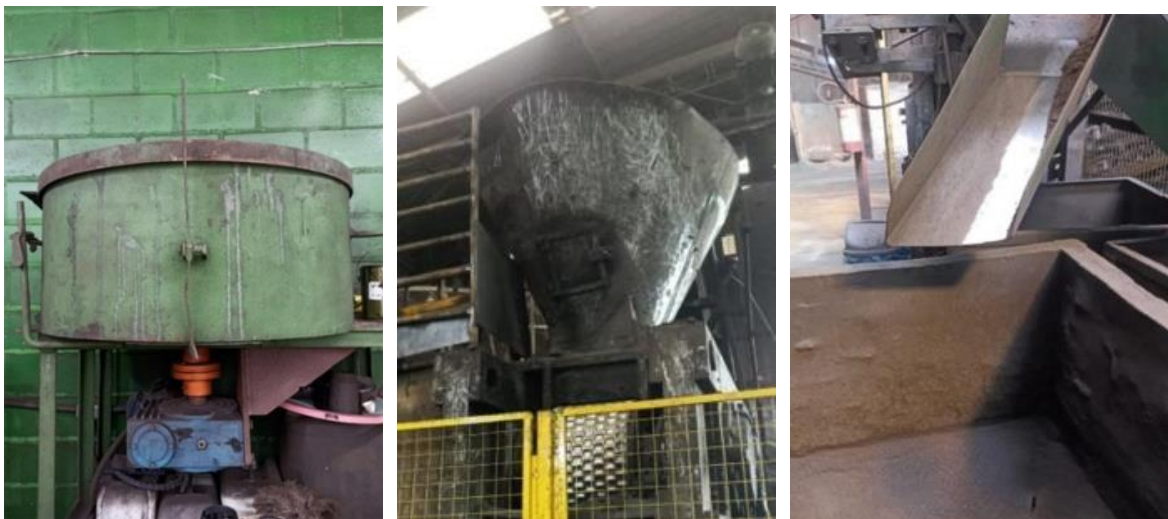
diferentes formulações de briquetes para verificação da coesão dos briquetes fabricados, em escala de bancada. As formulações utilizadas são apresentadas na Tabela 15:

Tabela 15 – Formulações utilizadas para o teste de briquetagem do CDRU

Formulação	Resina orgânica A [%]	Resina orgânica B [%]	Ligante inorgânico cimentício [%]	Umidade [%]
#1	3	-	3,5	14
#2	3	2	3,5	14
#3	5	-	-	14
#4	5	-	2	14
#5	-	2	4	14
#6	-	-	3	14
#7	2	2	2	14
#8	-	4	2	14

Amostras foram preparadas para cada uma das formulações e, após um período de 72h de cura, a formulação que apresentou melhor resultado de coesão foi utilizada para a preparação de uma batelada de briquetes em escala piloto, com equipamentos de maior porte, tal como indicado na Figura 18.

Figura 18 – Misturador (a), Filtro prensa (b) e gaiola na saída do filtro (c)



Fonte: Autor (2023)

Com o ajuste da mistura, foi realizada a produção de uma batelada de aproximadamente 80 kg de briquetes de CDRU, dos quais foram retiradas amostras para o ensaio de resistência à compressão e controle dimensional.

A resistência à compressão dos briquetes foi medida utilizando-se a carga limite em ensaio em prensa hidráulica, tal como preconizado na norma técnica ABNT NBR 5739/2018, utilizada para verificação da resistência em corpos de prova. Foram realizados ensaios após 24h, 48h e 96h de cura. Quando a resistência média observada dos briquetes foi inferior a 10 MPa, a formulação da mistura foi alterada e os testes foram refeitos.

4.3.2 Gaseificação do CDRU

Os briquetes fabricados foram levados à unidade piloto de gaseificação da UFMG. O sistema, que opera em bateladas, é composto por um gaseificador de diâmetro interno de 650mm, do tipo *downdraft*, com capacidade para até 1,0 m³ de matéria prima, um soprador de vazão nominal de 120 Nm³/h com rotâmetro e válvula para ajuste de vazão e um sistema de lavagem do gás de síntese composto com um ciclone e dois lavadores por via úmida. A Figura 19 apresenta o sistema instalado.

Figura 19 – Gaseificador e equipamentos auxiliares



Fonte: Autor (2023)

Para o teste de gaseificação, o sistema foi adaptado, com a retirada dos lavadores por via úmida e instalação de um queimador em aço inoxidável, adaptado com luvas de tomada para a medição de vazão e amostragem do gás.

Com base na composição estequiométrica e vazão mássica estimadas para a matéria-prima, foi estabelecida a vazão de ar para a gaseificação de forma a obter uma razão de equivalência estequiométrica λ entre 0,25 e 0,35. A composição química do CDRU foi estimada em função da composição gravimétrica dos resíduos.

Para a operação de gaseificação, foi realizado o carregamento da coluna com 10,0 kg de carvão vegetal e adicionada uma pequena quantidade de óleo diesel, para aquecimento do sistema. Em cima da coluna de carvão, foi adicionada a matéria prima para o teste.

No primeiro teste, foi realizada a gaseificação de um lote de cavaco de eucalipto, seco ao sol, de malha #2. O objetivo da gaseificação da madeira é o estabelecimento de uma linha de base para a comparação com o CDRU utilizando as mesmas condições de operação, o que não seria possível fazer com a mesma precisão utilizando dados secundários da literatura. A escolha do cavaco de eucalipto se deve à utilização relativamente comum e bem estabelecida da madeira como matéria-prima da gaseificação. Já no segundo teste, o procedimento foi repetido, mas desta vez com o carregamento dos briquetes de CDRU acima da camada de carvão vegetal.

Em ambos os testes, após a estabilização do processo e da temperatura e da verificação da combustibilidade do gás de síntese no queimador, foram realizadas medições de vazão e temperatura, assim como as coletas de amostras do gás. A coleta dos gases foi realizada por meio da utilização de sonda tipo Pitot, com o arrefecimento parcial do gás utilizando água e armazenamento de sacos de coleta de amostra do tipo TEDLAR. Para cada teste, foram coletadas cinco amostras de 5L cada.

4.3.3 Caracterização do gás de síntese quanto à composição

As amostras coletadas foram encaminhadas para análise da composição por meio de cromatografia gasosa. Os testes foram realizados utilizando um cromatógrafo Shimadzu GC-2014, com sensor do tipo FID (detector de ionização de chama). A

temperatura da coluna foi ajustada para 250°C para a melhora da precisão das análises, conforme experiência do operador.

Após ajuste do equipamento, foram realizadas três corridas de análise com gases padrão para cada um dos compostos esperados para o gás de síntese: CO₂, CO, CH₄, H₂, O₂, N₂. Esta etapa é necessária para determinação da intensidade de resposta do equipamento para o gás puro e posterior comparação com os resultados da análise do gás de síntese.

Em seguida, foram realizadas dez corridas, com volume de injeção de 10 µL, sendo uma corrida para cada uma das amostras coletadas no ensaio de gaseificação (cinco para o gás de madeira e cinco para o gás de CDRU). As áreas resultantes da análise integrativa do sinal de resposta do equipamento foram comparadas com as áreas determinadas nos ensaios com os gases padrão para a determinação do percentual em massa de cada um dos componentes do gás de síntese gerado pelas duas matérias primas avaliadas.

De posse da composição dos gases, foi realizada uma avaliação do PCI utilizando o programa AComb5, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. A análise do programa utiliza valores do banco de dados sobre cada um dos componentes, assim como os dados de composição do gás inseridos pelo usuário para a estimativa do PCI. Uma vez que o método de cromatografia utilizado não é capaz de determinar a concentração de vapor d'água presente no gás, foi considerada a condição de saturação para ambas as misturas em condições atmosféricas (1 atm e 25°C).

4.3.4 Investigação da presença de COV e organoclorados

Em função dos riscos operacionais e ocupacionais causados pela eventual presença de compostos organoclorados em combustíveis, uma etapa metodológica adicional foi estabelecida para a verificação da presença destes no gás de síntese de CDRU.

A primeira etapa necessária para a verificação foi a extração dos eventuais compostos orgânicos presentes no gás síntese para uma solução em fase líquida. Para tal, utilizou-se um arranjo de borbulhamento do gás em metanol, num conjunto de

impingers em série, conforme metodologia estabelecida por Santos *et al.* (2022) . A montagem dos *impingers* é apresentada na Figura 20, a seguir.

Figura 20 – Arranjo de impingers para extração de orgânicos voláteis



Fonte: Autor (2023)

Durante a extração, os *impingers* foram mantidos imersos em banho de gelo à temperatura de 0°C. Uma bomba de amostragem com vazão de 100 mL/min foi utilizada para a garantia da estabilidade das condições de extração. Foram realizadas extrações para os gases da madeira e do CDRU, sendo utilizados 20L de cada gás.

Após a extração, as soluções foram levadas para análise em outro equipamento de cromatografia gasosa, de melhor resolução, acoplado a um espectrômetro de massa quadrupolo, para identificação de compostos traço (Cromatógrafo ThermoScientific Trace 1300 GC e espectrômetro ISQ 7000). Antes da análise, doze corridas foram realizadas com a utilização de um padrão de substâncias orgânicas padrão USEPA *Mix VOC 48* da Supelco (SUPELCO, 2023), com concentração de 10 ppm para todas as substâncias, para a calibração do equipamento (determinação das rampas de aquecimento, velocidade de injeção, faixa de massas molares para análise) e melhor identificação das substâncias que eventualmente podem estar presentes no gás

Após determinadas as condições de teste com melhor sensibilidade para os compostos que se buscava identificar, foram realizadas três corridas para a solução de extração do gás de síntese de CDRU e três corridas para a solução do gás de síntese de madeira, considerado como linha de base para comparação. O sinal obtido nos testes foi comparado com o sinal obtido nas corridas com padrão USEPA e com

os dados da biblioteca do equipamento, para identificação das substâncias orgânicas presentes. . As principais condições operacionais do ensaio são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Condições operacionais para o ensaio de cromatografia gasosa para detecção de compostos orgânicos

Variável	Valor
Temperatura da coluna de cromatografia	80°C a 300°C
Taxa de aquecimento da coluna (rampa)	8°C/min
Tempo de corrida	27,5 min
Volume padrão de injeção	1 µL

4.4 Resultados e discussão

4.4.1 Densificação dos briquetes

Das nove misturas apresentadas anteriormente na Tabela 15, apenas as misturas #5, #7 e #8 apresentaram coesão adequada durante a etapa de bancada. Ao se realizar as análises preliminares de coesão e resistência, determinou-se visualmente que a mistura #7 apresentou as melhores características físicas.

De posse da formulação de melhor desempenho, foi preparado um lote de CDRU para briquetagem em escala industrial, mas em função das condições de alimentação do equipamento, o produto final não obteve coesão adequada, tal como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Resultados dos dois primeiros lotes de briquetes em escala industrial



Fonte: Autor (2023)

Após novo ajuste de umidade para 18%, o lote foi novamente submetido ao processo de densificação. Os produtos apresentaram coesão adequada em inspeção visual, tal como indicado na Figura 22 e foram encaminhados para a cura e verificação de umidade.

Figura 22 – Briquetes fabricados após correção da umidade



Fonte: Autor (2023)

Após 96 horas de cura, foi realizado o ensaio de resistência à compressão mecânica, com resultado de 1,7 MPa, muito inferior ao valor de 10 MPa estabelecido como alvo,

A escolha do valor de 10 MPa para a resistência à compressão se deve ao fato de que esse é o valor de referência para briquetes metalúrgicos produzido no mesmo empreendimento.

Em função da baixa resistência resultante, a formulação dos briquetes foi alterada, com aumento da massa de resina orgânica de 4% para 7% da massa total e manutenção da umidade em 18%. Após 96h de cura, um novo ensaio de resistência à compressão foi realizado, com resistência média dos corpos de prova de 15,3 MPa.

Quando à densidade do CDR, houve um incremento de 0,37 g/cm² (CDRU bruto) para 0,83 g/cm³ (briquete curado), o que representa um aumento de 124,3% na densidade mássica do material, com impacto também na densidade energética.

A comparação dos resultados de umidade ótima com valores encontrados por Rezaei *et al.* (2020a, 2020b), que estudaram misturas de composição gravimétrica similar, indicam bastante proximidade (18% e 20%, respectivamente).

4.4.2 Gaseificação do CDRU e caracterização do gás de síntese

Durante o processo de gaseificação, não foram observados problemas ou diferenças nas condições operação entre os lotes de gaseificação de madeira e CDRU. Ambos os gases de síntese apresentaram boa combustibilidade, com chama de baixa intensidade energética, tal como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Chamas resultantes da queima do gás de síntese de CDRU (esquerda) e madeira (direita)



Fonte: Autor (2023)

As medições de vazão e temperatura do gás nos pontos de tomada também apresentaram variação inexpressiva entre a operação com madeira e com o CDRU. Foram aferidos valores de vazão de 56,35 Nm³/h e temperatura média de 327°C durante a medição. A vazão mássica média aferida de matéria prima no gaseificador foi de 22 kg/h, resultando numa razão de equivalência estequiométrica efetiva de 0,39, levemente superior àquela desejada. O baixo nível de instrumentação e controle e a alimentação gravitacional da matéria prima não possibilitou um melhor ajuste da condição de operação, mas não foram observados problemas maiores no processo.

Os resultados da composição dos gases, conforme análise de cromatografia gasosa, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Composição dos gases de síntese produzidos

Composto [% em massa]	Gás de síntese de madeira	Gás de síntese de CDRU
CH ₄	0,8	0,7
O ₂	0,5	0,0
N ₂	67,7	66,0
CO ₂	11,8	13,2
H ₂	8,0	7,3
CO	10,2	8,2
Soma	99,0	95,4

O teste U de Mann-Whitney para comparação entre as concentrações de cada composto, para uma significância de 5%, indicou não haver diferença significativa entre a composição dos dois gases. A diferença entre os somatórios dos componentes se deve à incerteza de medição do equipamento e do método utilizado, sendo considerada como adequada para a natureza do ensaio.

As concentrações de H₂ indicam haver possível potencial técnico para a produção de hidrogênio a partir do gás de síntese, caso este seja produzido em atmosfera de oxigênio puro com adição de vapor d'água superaquecido, tal como discutido por Bridgewater (1995) e Zhao *et al.* (2021).

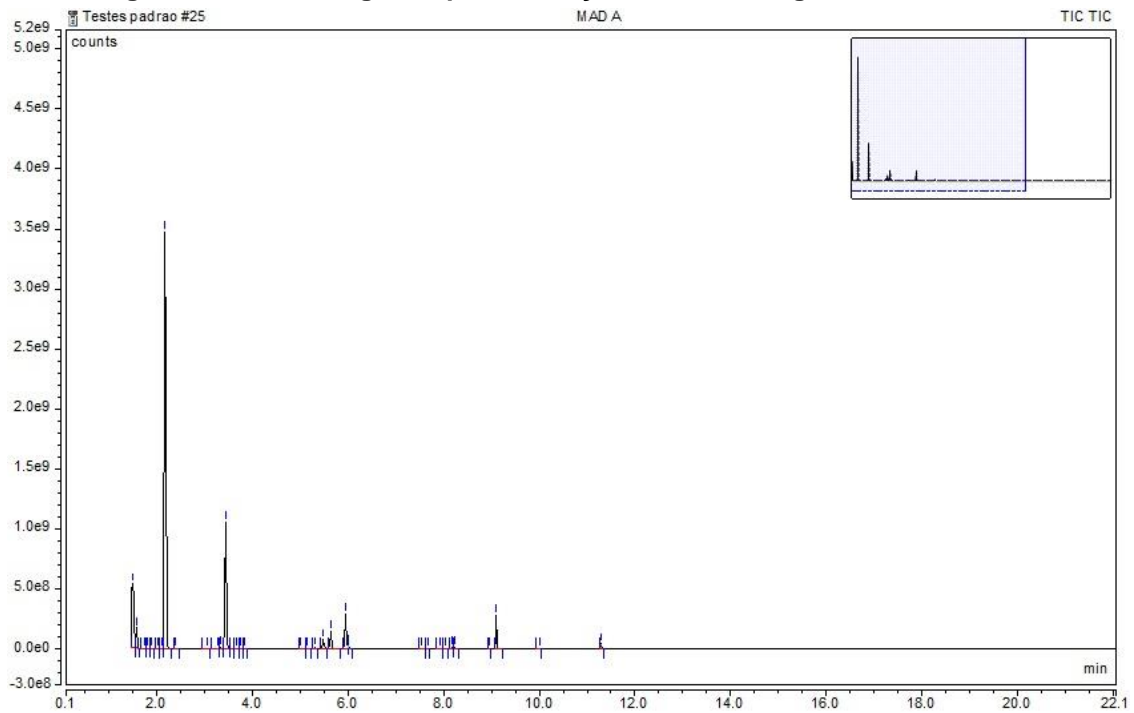
A análise cromatográfica não indicou presença de óxidos de nitrogênio ou enxofre para o método utilizado. O vapor d'água eventualmente presente no gás também não é capaz de ser detectado pelo equipamento com a metodologia utilizada.

De forma geral, os valores de H₂ e CO, principais componentes do ponto de visto energético, foram levemente inferiores aos valores relatados por Vonk *et al.* (2021) e Santos *et al.* (2023) para gases de síntese de biomassa produzidos com ar atmosférico em gaseificadores de leito fixo *downdraft*. A razão de equivalência estequiométrica superior àquela desejada pode ter sido a causa da maior presença de N₂ e CO₂ na composição final do gás, o que impacta negativamente o PCI.

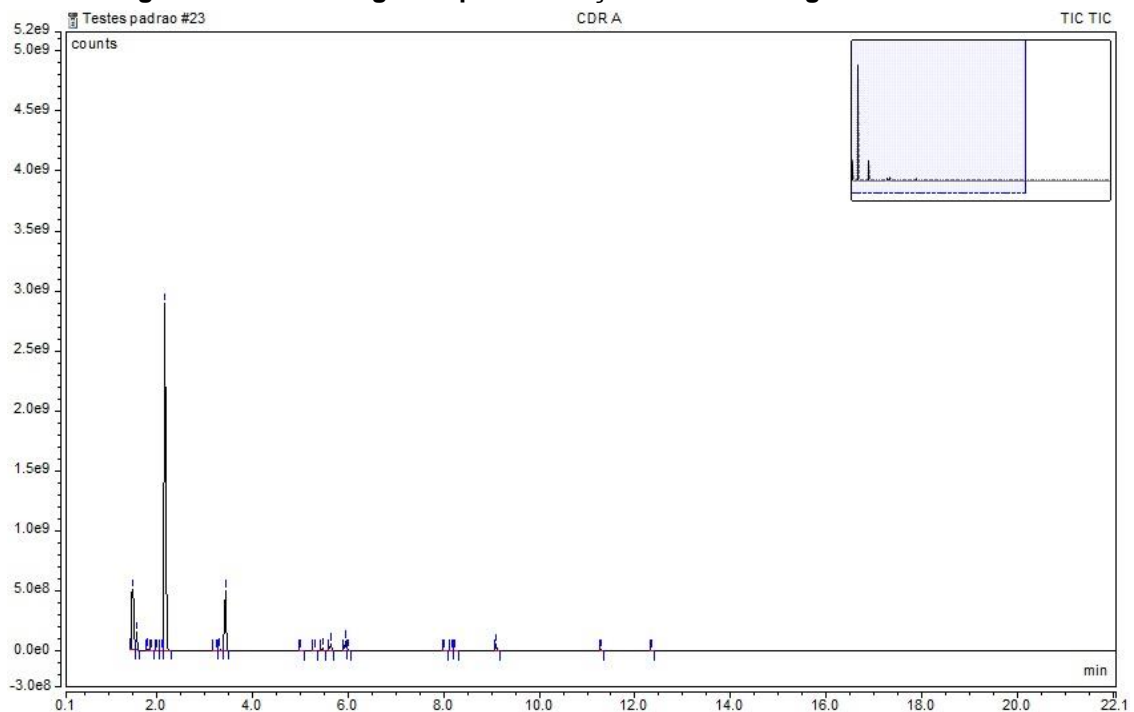
Os valores de PCI estimados para o gás de madeira e o gás de CDRU, com base na composição estequiométrica encontrada, foram de 6,81 MJ/Nm³ e 6,61 MJ/Nm³, respectivamente. Ambos os valores se apresentam de acordo com valores encontrados na literatura para gases de síntese produzidos a partir da gaseificação de matéria orgânica com uso de ar atmosférico (HELSEN, 2000). Há potencial para aproveitamento energético em processos de baixa eficiência, mas é sugerido o incremento do PCI por meio do uso de oxigênio puro na gaseificação para processos de maior exigência térmica.

4.4.3 Presença de COVs e organoclorados

A análise cromatográfica com espectrometria de massas revelou a presença de diversas substâncias orgânicas na extração, tanto para o gás de madeira quanto para o de CDRU. Os cromatogramas para ambos os gases são apresentados na Figura 24 e na Figura 25.

Figura 24 – Cromatograma para detecção de COVs do gás de síntese de madeira

Fonte: Autor (2023)

Figura 25 – Cromatograma para detecção de COVs do gás de síntese de CDRU

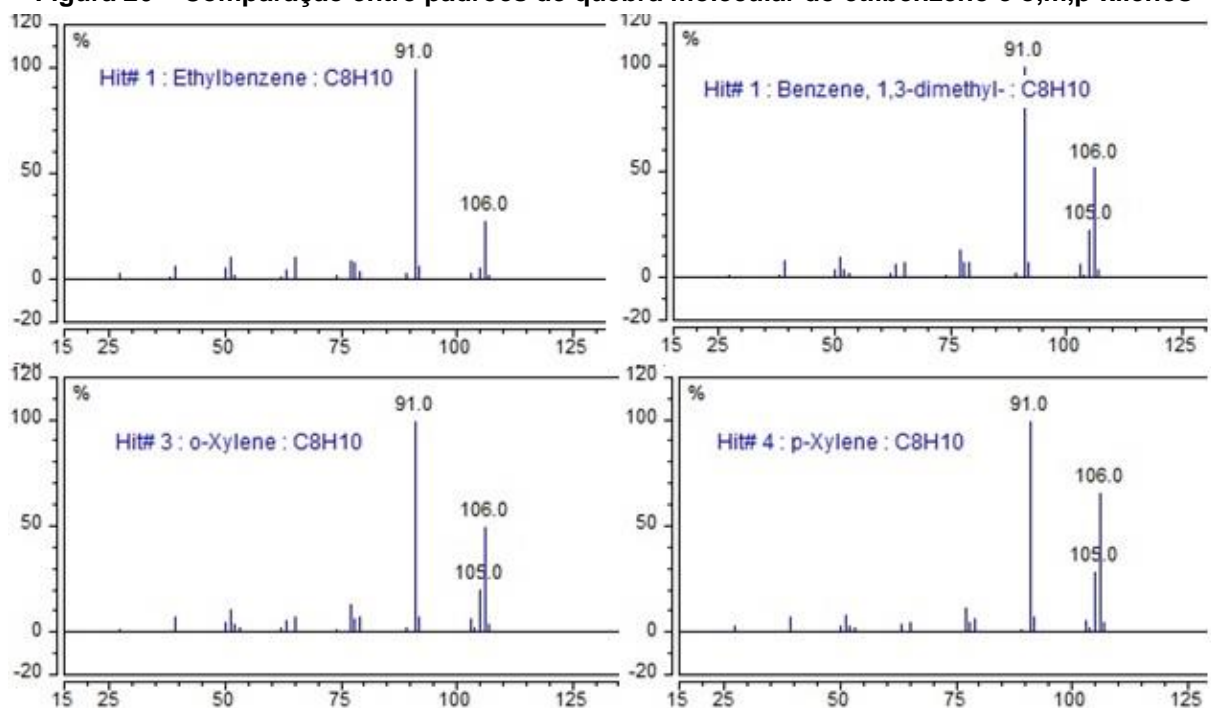
Fonte: Autor (2023)

Em ambos os gases, foi observado um pico de intensidade correspondente ao benzeno em torno de dois minutos, quando comparado ao padrão de quebra

molecular da biblioteca do programa e à resposta do padrão de COVs testado para calibração do método. Em função da intensidade próxima à saturação do equipamento, foi realizado o desligamento do filamento durante o período de detecção do benzeno (para segurança do equipamento) e aumentado o volume de injeção em 3x, de forma a obter uma maior intensidade de sinal para outras espécies, a fim de facilitar sua identificação.

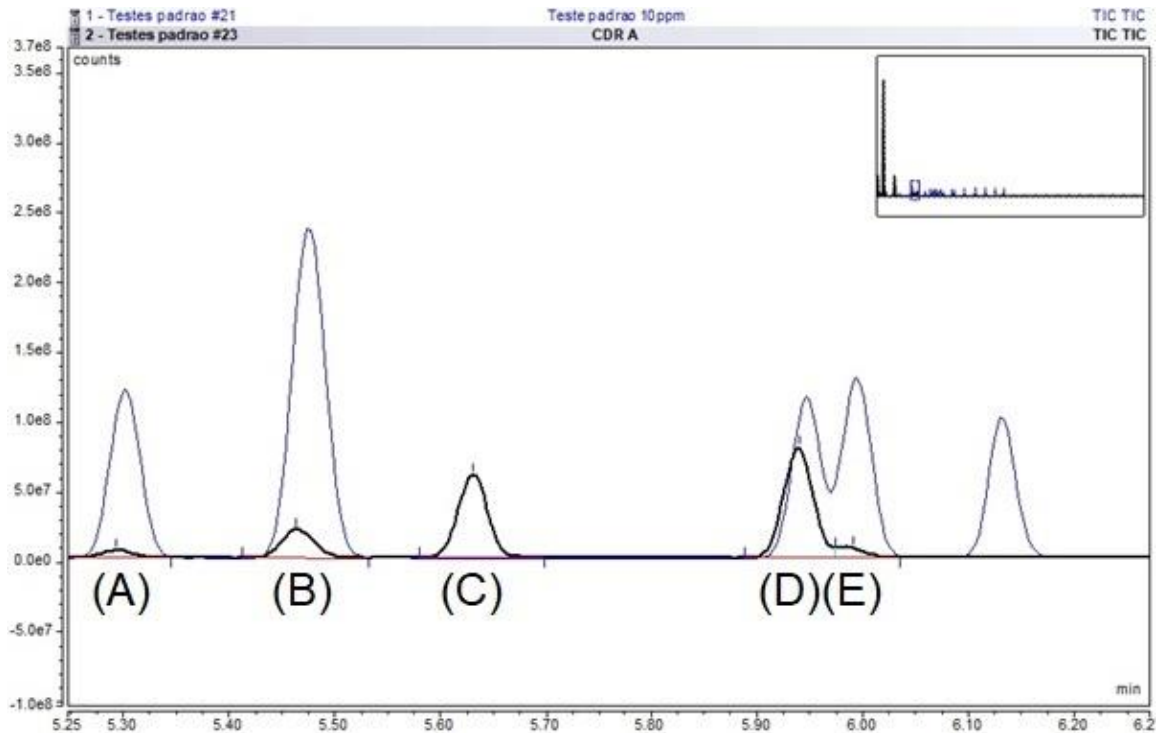
Após tratamento dos dados, verificou-se que os maiores picos de sinal na análise do gás de CDRU foram obtidos para acetonitrila, benzeno e tolueno, em ordem de detecção. Para compostos isômeros – e.g. etilbenzeno, o,p,m-xilenos – a diferenciação foi realizada pelo tempo de detecção no equipamento e comparação com os dados do padrão utilizado como base (Figura 27), uma vez que os padrões de quebra molecular são muito similares (Figura 26).

Figura 26 – Comparação entre padrões de quebra molecular do etilbenzeno e o,m,p-xilenos



Fonte: Autor (2023).

Figura 27 – Tempos de detecção para etilbenzeno, o-xileno e m,p-xilenos



Legenda: (A) etilbenzeno; (B) m,p-xilenos; (C) feniletino; (D) estireno; (E) o-xileno. Linha preta: sinal do gás de síntese de CDRU. Linha azul: sinal de resposta do padrão de COVs.

Fonte: Autor (2023).

Para o ensaio com maior concentração, foi realizada a avaliação do padrão de quebra molecular e a comparação com os dados do padrão para todos os picos de detecção observados. Além dos compostos já citados, foram encontrados picos de várias outras substâncias com similaridade considerada adequada (padrão de quebra molecular compatível e similaridade superior a 40% com os dados da biblioteca do programa). A Tabela 18 apresenta todos os compostos encontrados, sua fórmula estequiométrica e o percentual de similaridade com o banco de dados para as condições de ensaio.

Tabela 18 – Substâncias detectadas no ensaio, massa molar e similaridade observada

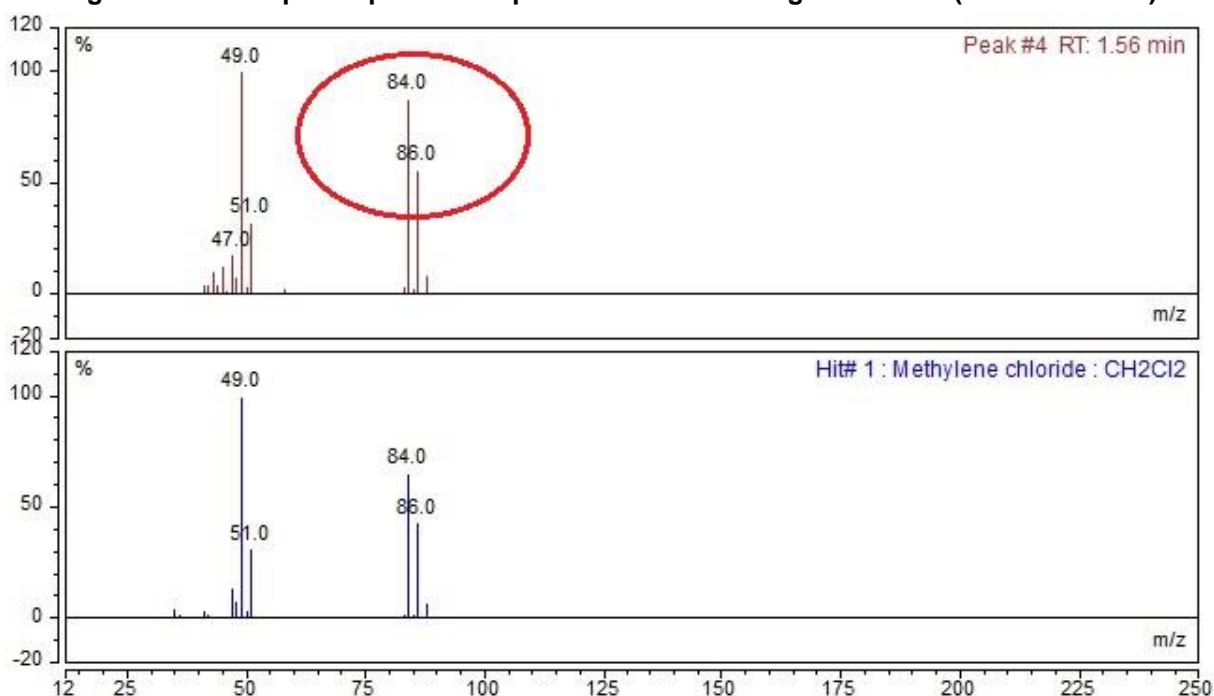
Composto	Fórmula	Similaridade
Acetonitrila	C ₂ H ₃ N	65%
Ciclopentadieno	C ₅ H ₆	55%
Benzeno	C ₆ H ₆	98%
Tolueno	C ₇ H ₈	94%
Feniletino	C ₈ H ₆	86%
Estireno	C ₈ H ₈	72%
o-Xileno	C ₈ H ₁₀	52%
m,p-Xileno	C ₈ H ₁₀	68%
Etilbenzeno	C ₈ H ₁₀	63%
2-metoxi-1-penteno	C ₆ H ₁₂ O	80%
Etil-metil-benzeno	C ₉ H ₁₀	49%
Dietil-benzeno	C ₁₀ H ₁₄	61%
Benzociclobuteno	C ₈ H ₆ O	53%
Benzenopropinil	C ₉ H ₈	45%
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	95%

A maior parte dos compostos encontrados no ensaio são esperados como subprodutos de processos de combustão e quebra térmica e moléculas maiores. Os resultados apresentam forte semelhança com aqueles relatados por Del Alamo *et al.* (2012). Observou-se a presença notável de compostos aromáticos, em especial o benzeno, cuja origem no gás de CDRU pode estar relacionada à presença de serragem de madeira na composição dos briquetes. Outra hipótese para sua origem é a presença de estrutura fenólicas na resina utilizada para fabricação dos briquetes. Monômeros de plásticos comuns (e.g. estireno) também foram encontrados. Não foram encontradas substâncias únicas ao gás de madeira ou gás de CDRU nos ensaios realizados.

A varredura do espectro por compostos organoclorados não retornou nenhuma substância para o método utilizado, indicando uma possível ausência de cloro no gás de síntese, o que é benéfico do ponto de vista de segurança ambiental e ocupacional. É importante notar que o método foi calibrado em função de um padrão com a

presença de diversos compostos organoclorados (diclorometano, tricloroetileno, clorofórmio, bromodiclorometano, dentre outros), mas não é possível prever todos os compostos existentes. Em função disso, o padrão de quebra de massa molecular também foi avaliado para todos os picos, uma vez que a distribuição dos isótopos ³⁵ e ³⁷ do cloro gera padrões de quebra bastante específicos com picos de intensidade próxima espaçados de dois intervalos de massa, conforme ilustrado na Figura 28. O gráfico superior indica os picos de intensidade medidos pelo equipamento no teste com o padrão de VOCs; o gráfico inferior apresenta o padrão do banco de dados do programa.

Figura 28 – Exemplo de padrão de quebra de molécula organoclorada (Diclorometano)



Fonte: Autor (2023)

Apesar da metodologia utilizada não ter detectado substâncias halogenadas, é importante notar que o método de ensaio deve ser refinado para a detecção das substâncias desejadas. Para esse trabalho, o método foi montado a partir do padrão de COVs citado, mas caso haja interesse na investigação por moléculas mais específicas, especialmente de maior massa molar, é fundamental verificar a adequação do método por meio de testes complementares.

4.5 Conclusões

Verificou-se a compatibilidade do CDRU produzido com um processo de densificação e briquetagem industrial, com adição de resina orgânica ligante e correção da umidade. A melhor condição de produção dos briquetes foi obtida para uma adição de 7% de resina orgânica e 2% de ligante cimentício em massa, com umidade ótima de 18%. A quantidade necessária de resina necessária para garantir a coesão do material pode tornar o processo oneroso, sendo necessária uma avaliação econômica mais aprofundada. A resistência média final do produto, de 15,3 MPa, torna possível a alimentação em pilhas de grandes dimensões, ideal para usos em diferentes sistemas.

Os briquetes produzidos apresentaram umidade, granulometria e densidade adequados para um processo de gaseificação *downdraft* em escala piloto, produzindo gás de síntese de CDRU com combustibilidade adequada e PCI de 6,61 MJ/m³, compatível com valores observados para gases de biomassa na literatura. Não houve diferenças significativas entre a composição dos gases de madeira e de CDRU para as condições de teste avaliadas.

A pesquisa exploratória para detecção de COVs e compostos organoclorados indicou a presença de BTEX em quantidades substanciais, em especial o benzeno. Não foram detectadas substâncias cloradas com a metodologia desenvolvida, o que indica uma baixa probabilidade da existência de organoclorados em concentração relevante no gás de síntese produzido. Os compostos traços presentes no gás de CDRU também estiveram presentes no gás de madeira com intensidade de sinal semelhante, o que indica que as concentrações são próximas. Para uma comparação quantitativa, é necessário refinar o método e estabelecer uma linha de base com um padrão conhecido para cada um dos componentes desejados.

4.6 Referências de literatura

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

BRIDGWATER, A.V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel*. v. 74, n. 5, p. 631–653, 1995.

DEL ALAMO, G.; HART, A.; GRIMSHAW, A.; LUNDSTROM, P. Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGOS Plants. *Waste Management*. v. 32, p. 1835-1842. 2012.

HELSEN, L. *Low-temperature pyrolysis of CCA-treated wood waste*. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Católica de Leuven. Bélgica. 2000

KHADEMI, M. H.; ALIPOUR-DEHKORDI, A.; NALCHIFARD, F. Sustainable hydrogen and syngas production from waste valorization of biodiesel synthesis by-product: Green chemistry approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 175. 2023

KIM, W.; SOHN, I. Critical challenges facing low carbon steelmaking technology using hydrogen direct reduced iron. *Joule*. v.6, p.2228-2232. 2022.

MONARCA, D.; COLANTONI, A.; CECCHINI, M.; LONGO, L.; VECCHIONE, L.; CARLINI, M.; MANZO, A. Energy Characterization and Gasification of Biomass Derived by Hazelnut Cultivation: Analysis of Produced Syngas by Gas Chromatography. *Mathematical Problems in Engineering*. v.1. 2012

REZAEI, H.; PANAHA, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood. *Sustainability*. v. 12, 2020a.

REZAEI, H.; PANAHA, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technologies*. v. 205, 2020b.

SANTOS, S. M.; ASSIS, A. C.; GOMES, L.; NOBRE, C.; BRITO, P. Waste Gasification Technologies: A Brief Overview. *Waste*. v.1. p.140-165. 2023.

SUPELCO. *Safety Data Sheet – 48 Component Indoor Air Standard 40353-U*. Versão 7.2. 2022. Disponível em <https://www.sigmaaldrich.com/BR/en/sds/supelco/40353-u>. Acessado em 18/03/2023.

ZHAO, J.; XIE, D.; WANG, S.; ZHANG, R.; WU, Z., MENG, H.; CHEN, L.; WANG, T.; GUO, Y. Hydrogen-rich syngas produced from co-gasification of municipal solid waste and wheat straw in an oxygen-enriched air fluidized bed. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 46. 2021.

5 COPROCESSAMENTO DO CDRU: TESTE EM ESCALA PLENA

5.1 Introdução

O coprocessamento de RSU possui aplicabilidade limitada em função das características intrínsecas ao resíduo, em especial a alta umidade, o baixo poder calorífico e a heterogeneidade (SAMOLADA & ZABANIOTOU, 2014; PSOPOMOULOS & THEMELIS, 2016). Dessa forma, o pré-tratamento mecânico, biológico ou térmico dos RSU é essencial para produção de CDRU com características adequadas para o uso como combustível auxiliar em fornos de clínquer.

Ainda que o CDRU possua baixa umidade, baixo teor de cloro e poder calorífico adequado, obstáculos de natureza operacional à sua utilização (carreamento de combustível junto com os gases de exaustão, impactos relacionados à qualidade das emissões atmosféricas, entupimentos e colação na torre de pré-aquecimento, dificuldade de alimentação, dispersão de materiais na correia transportadora, dentre outros) devem ser avaliados e dependem de testes em maior escala, com uso de maquinário industrial.

A execução de um teste de queima em escala plena representa, portanto, um passo importante na maturação de uma tecnologia e na validação do CDRU como combustível alternativo viável para aplicação comercial. É a partir da obtenção de dados primários em escala industrial que se possibilitam as avaliações de viabilidade técnica e econômica, norteadoras dos investimentos em novas tecnologias.

Nesta etapa da tese, foi realizado um teste de queima em escala plena do CDRU produzido, em unidade industrial de um empreendimento parceiro, para comparação das condições operacionais, ambientais e de qualidade do produto quando comparadas ao processo industrial típico.

5.2 Objetivos

5.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta etapa do trabalho foi avaliar a viabilidade técnica do uso do CDRU produzido como combustível alternativo em fornos de clínquer em escala industrial.

5.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos desta etapa, destacam-se:

- Comparar os parâmetros operacionais do forno de clínquer durante o teste de queima e durante operação padrão do forno;
- Comparar os dados referentes às emissões atmosféricas do forno de clínquer durante o teste de queima e durante operação padrão do forno;
- Comparar a qualidade do clínquer produzido durante o teste de queima e durante a operação padrão do forno.

5.3 Materiais e métodos

5.3.1 Preparação do CDRU para alimentação

Para o teste de queima em escala industrial, foram produzidas 3,0 t de CDRU, armazenadas em caçamba metálica aberta. O material foi encaminhado à indústria parceira, pesado e disposto em área coberta no galpão de resíduos para coprocessamento. Após avaliação técnica com a equipe de qualidade de operação, foi definida uma razão de mistura de 1:1 em massa do CDRU produzido com pneus inservíveis cominuídos, de forma a reduzir os riscos de impactos na operação do forno. A mistura foi realizada com o auxílio de pá carregadeira e o material misturado foi então carregado à baia de alimentação para carregamento até a tremonha. A preparação do material é apresentada na Figura 29 e na Figura 30.

Figura 29 – Carregamento do CDRU para mistura



Fonte: Autor (2023)

Figura 30 – Material preparado e carregamento na tremonha



Fonte: Autor (2023).

5.3.2 Realização do teste de queima em escala industrial

Para a realização do teste de queima, foi obtida autorização prévia e explícita à Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais. Na Tabela 19 a seguir são apresentadas as características construtivas e operacionais do forno de clínquer utilizado.

Tabela 19 – Principais dados construtivos e operacionais do forno

Característica	Valor
Ano de inauguração	1959
Capacidade produtiva nominal	660.000t clínquer/ano
Combustível principal	Coque
Combustíveis alternativos utilizados	Moinha de carvão vegetal, misturas de resíduos plásticos e papéis não recicláveis (Classe II)
Tratamento das emissões atmosféricas	Filtros de manga

A taxa de alimentação de combustível e a razão de substituição térmica ao longo do teste foram definidas de forma automatizada pelo sistema de controle, em função das condições operacionais alvo e da vazão de farinha de cimento. Após autorização da equipe de operação, foi interrompida a alimentação dos outros combustíveis alternativos utilizados na unidade e iniciada a alimentação da mistura de CDRU com pneus inservíveis. A alimentação de coque como combustível primário foi mantida ao longo da operação. O processo de alimentação foi mantido ao longo de aproximadamente duas horas para a queima de todo o material. Ao final do teste, foi

retomada a operação padrão do forno. Os valores de operação durante o teste de queima são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Condições operacionais alvo durante o teste de queima

Variável	Valor
Temperatura alvo no pré-calcinador	830°C a 870°C
Teor de oxigênio alvo na chaminé	11%
Razão de substituição térmica no pré-calcinador	25% a 45%
Taxa de alimentação de resíduos no pré-calcinador	2,8t/h a 3,9 t/h

5.3.3 Comparação das condições operacionais, das emissões atmosféricas e qualidade do clínquer

Durante a execução do teste, foi verificada a adequação dos parâmetros operacionais alvo. Após o término da operação, foram registrados valores de variáveis operacionais, de emissões atmosféricas e da qualidade do clínquer, para comparação com dados relativos à operação padrão. De posse dos dados compilados, foram eliminados os *outliers* por meio de avaliação do desvio absoluto da mediana e realizados testes de hipótese não-paramétricos (Mann-Whitney) para cada amostra, a fim de verificar a existência de variação significativa em relação à operação padrão, para um intervalo de significância de 5%.

5.3.3.1 Variáveis operacionais

Para a verificação da manutenção das condições operacionais adequadas no forno de clínquer durante o teste, foi verificada a capacidade do controlador de manutenção das temperaturas de processo no pré-calcinador e nos diferentes estágios do pré-aquecedor, assim como a manutenção da vazão de combustíveis e da vazão mássica de farinha próxima às condições de produção plena da unidade.

5.3.3.2 Emissões atmosféricas

Durante o teste, foram controladas as concentrações das emissões atmosféricas de material particulado (MP), O₂, NO_x, SO_x, e hidrocarbonetos totais (THC). Os parâmetros foram determinados em função da exigência de monitoramento de emissões atmosféricas em tempo real preconizados na Deliberação Normativa

COPAM nº 154/2010, que regulamenta o coprocessamento de resíduos no Estado de Minas Gerais. Foi feita a opção pela comparação com a norma estadual, uma vez que os limites impostos por esta são mais restritos do que os observados na Resolução CONAMA nº 499/2020, de âmbito federal.

5.3.3.3 Qualidade do clínquer

Para a avaliação da qualidade do clínquer, foi realizada a verificação dos seus principais compostos minerais: Cal livre (CaO), Belita (C₂S), Alita (C₃S), Aluminato de cálcio (C₃A), Ferroaluminato de cálcio (C₄AF). Além disso, foram realizados ensaios para a verificação dos seguintes parâmetros de qualidade: Módulo de sílica (MS), Módulo de alumina (MA) e Fator de saturação de cal (FSC).

5.4 Resultados e discussão

5.4.1 Condições operacionais do forno clínquer

Durante a operação do forno de clínquer, não foram observadas variações expressivas nos valores de temperatura no pré-calcinador ou nos estágios do pré-aquecedor, no teor de oxigênio residual ou nas pressões de operação no forno.

Os valores operacionais se mantiveram dentro das faixas ideais de operação, com a alimentação da farinha e dos combustíveis sendo determinada pelos controladores PID do sistema.

Em função de um problema no britador de clínquer da unidade, a alimentação do forno precisou ser interrompida para a manutenção do equipamento, sendo reiniciada após cerca de 8h, o que gerou variações operacionais devido à rampa de partida e ao transiente operacional, de tal forma que parte dos dados coletados após a parada não possuem representatividade estatística para a análise.

A vazão mássica de combustível alternativo no queimador secundário se manteve em torno de 3,0 t/h ao longo do teste, alcançando o valor máximo de 3,9t/h, equivalente a uma razão de substituição térmica de 45% no pré-calcinador e 31% da demanda térmica total do forno. Os valores atingidos foram muito superiores aos testados por Baidya et al. (2017), que se limitaram a cerca de 2% da demanda térmica total, e se aproximaram de valores de substituição térmica observados para combustíveis

alternativos típicos no Brasil (ABCP, 2020), indicando a viabilidade técnica de alimentação e combustão do CDRU em escala industrial.

A alimentação de farinha foi mantida constante em forno de 136,5 t/h durante o teste, com produção horária de clínquer de 79,2 t/h. A alimentação foi reduzida após a parada em função da necessidade da rampa de ajuste da operação até o retorno da condição de pleno funcionamento. De maneira geral, não foram identificadas alterações expressivas nas condições operacionais do sistema em função da substituição do combustível para as razões de substituição avaliadas.

5.4.2 Emissões atmosféricas do forno de clínquer

Os resultados das análises de emissões são apresentados na Tabela 21 a seguir:

Tabela 21 – Resultados de emissões atmosféricas para operação padrão e teste de queima

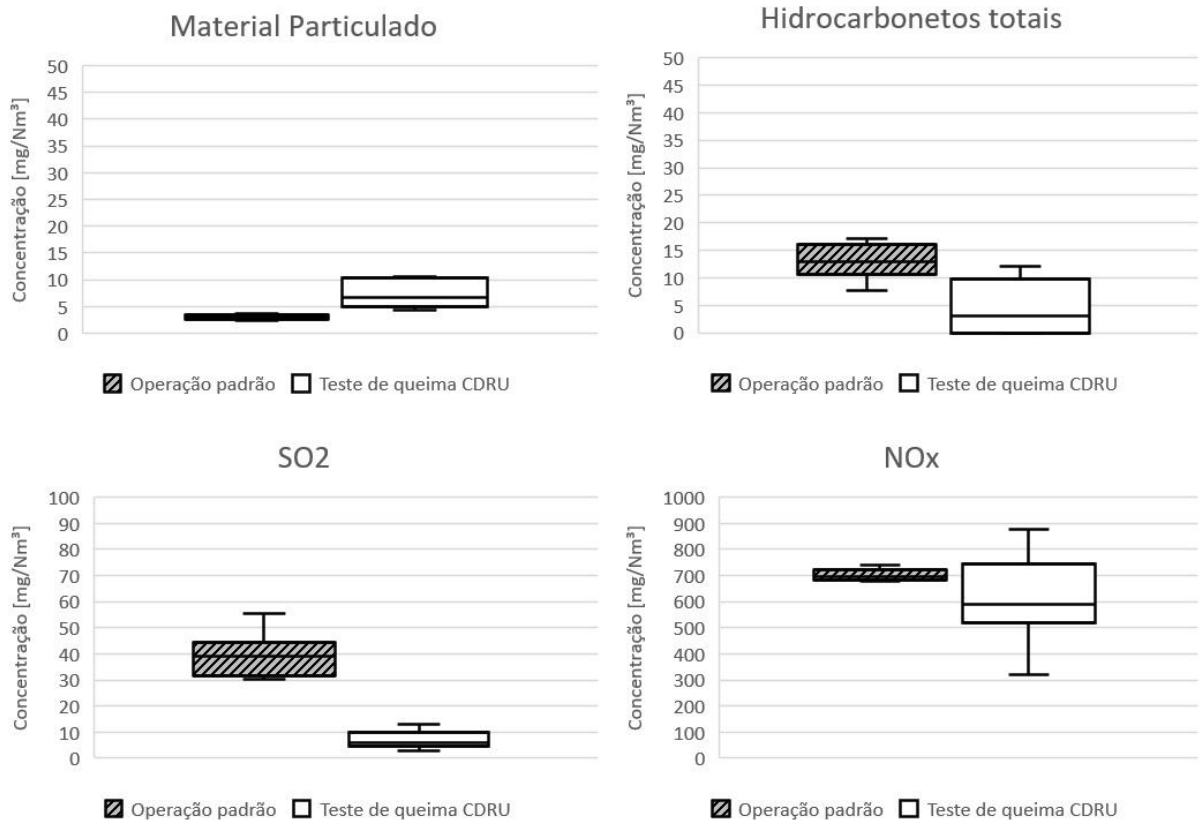
Componente*	Limite DN COPAM 154/2010	Valor médio para operação padrão	Valor médio durante teste	Mediana durante teste	Desvio padrão durante teste	Diferença entre as médias	p valor
MP [mg/Nm ³]	50	3,21	7,22	6,60	2,41	4,02	0,003
THC [ppm]	20	12,91	4,16	3,14	4,76	-8,74	0,028
SO ₂ [mg/Nm ³]	280	39,27	7,37	5,89	4,71	-31,90	<0,001
NO _x [mg/Nm ³]	730	701,63	628,29	590,32	174,83	-73,35	0,478
O ₂ [%]	N/A	13,44	11,81	11,71	0,95	-1,63	0,001

*Valores corrigidos para 11% de O₂

Foi observado que todos os parâmetros de emissões atmosféricas monitorados apresentaram-se dentro dos limites impostos pela Deliberação Normativa 154/2010 do COPAM. Em relação ao período de operação padrão utilizado para comparação, foram observadas variações pouco expressivas para todos os parâmetros. O teste de Mann-Whitney para comparação entre as amostras identificou diferenças significativas, para um grau de 5%, com pequeno aumento nas emissões de MP e pequena redução nas emissões hidrocarbonetos totais (THC) e O₂. Entretanto, dado o pequeno valor da variação e a natureza multifatorial da operação do forno, não é possível correlacionar essas variações com a utilização do combustível alternativo.

Para melhor interpretação dos resultados e verificação da escala das diferenças, foram plotados gráficos do tipo *box-whiskers*, tal como apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Comparação entre as emissões atmosféricas durante operação padrão e durante o teste de queima



Fonte: Autor (2023)

A redução de emissões acidificantes (NOx e SOx) relatada por Panahandeh et al. (2021) foi observada no teste, sendo significativa para os valores de SOx (redução de 81,2% em relação à operação padrão). Há correlação provável entre a redução das emissões de SOx e a utilização do CDRU, em função da redução da participação da borracha de pneus inservíveis e de coque na composição dos combustíveis. Já as diferenças nas emissões de NOx não apresentaram significância estatística.

De forma qualitativa, é possível afirmar que os valores observados são compatíveis com a operação regular do equipamento, sem variações expressivas no desempenho ambiental do sistema e com redução significativa nas emissões de SOx.

5.4.3 Características do clínquer produzido

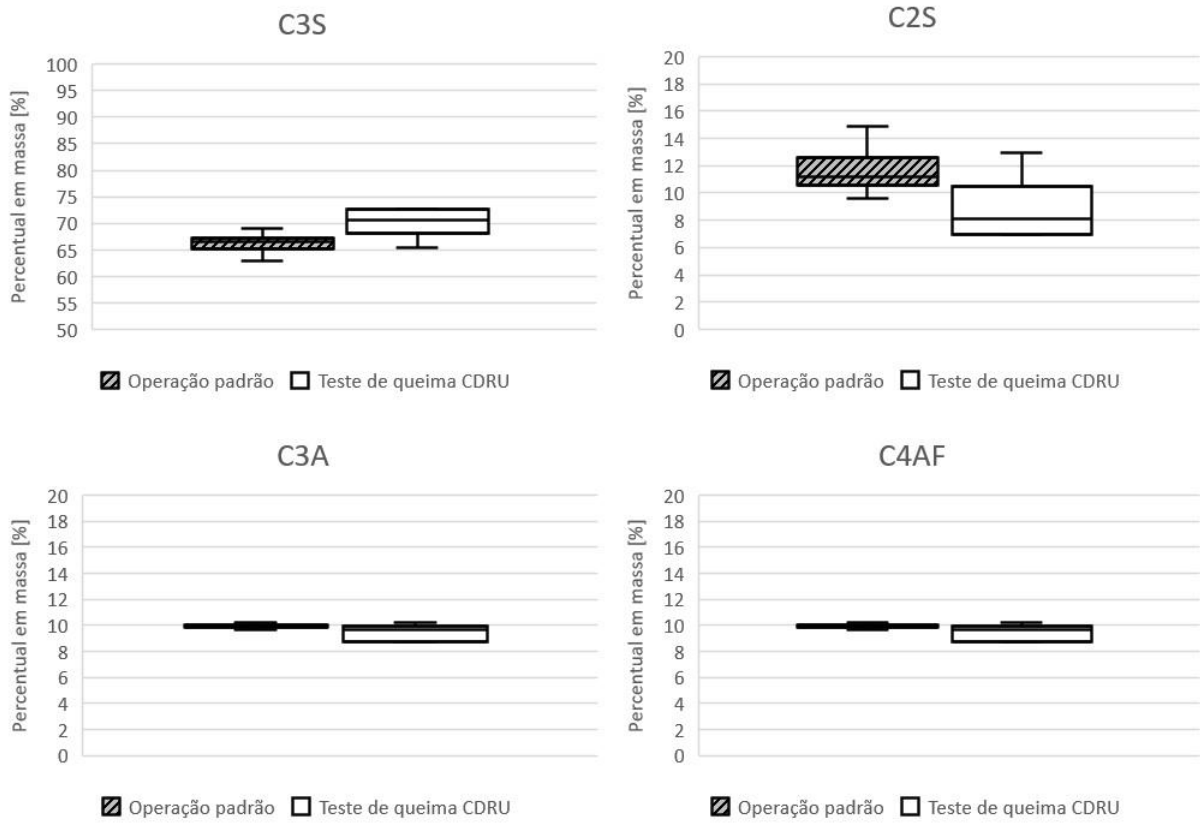
Os resultados das análises do clínquer produzido são apresentadas a seguir:

Tabela 22 – Características do clínquer produzido durante operação padrão e durante o teste

Componente*	Valor médio para operação padrão	Valor médio durante teste	Mediana durante teste	Desvio padrão durante teste	Diferença entre as médias	p valor
CaO livre [%]	1,04	0,78	0,84	0,13	-0,25	0,021
C ₃ S [%]	66,41	70,42	70,68	2,90	4,01	0,023
C ₂ S [%]	11,39	8,62	8,09	2,47	-2,77	0,035
C ₃ A [%]	9,90	9,40	9,67	0,67	-,049	0,174
C ₄ AF [%]	9,13	9,31	9,10	0,34	0,17	0,772
MS [-]	2,43	2,45	2,43	0,03	0,02	0,187
MA [-]	1,87	1,80	1,86	0,13	-0,07	0,509
FSC [-]	99,26	100,33	100,24	1,09	1,07	0,043

Observou-se novamente variações poucos expressivas entre o clínquer produzido durante o período de operação padrão avaliado e o clínquer produzido durante o teste de queima. O teste de Mann-Whitney identificou diferenças significantes para as concentrações de cal livre, alita, belita e para o fator de saturação de cal. O somatório dos silicatos (alita+belita) não apresentou variações significativas. Para melhorar interpretação dos resultados, foram plotados gráficos do tipo *box-whiskers* para os parâmetros avaliados, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Comparação da composição do clínquer avaliada durante operação padrão do forno e após o teste de queima



Fonte: Autor (2023)

Dada a pouca expressividade das diferenças (próximas ou menores que o desvio padrão da amostra) e o baixo impacto do CDRU no balanço de massa do forno (correspondente a cerca de 2% de toda a massa sólida que entra no sistema), pode-se afirmar que as variações observadas não possuem correlação provável com a utilização do combustível e são compatíveis com variações normais na operação do sistema.

A despeito das variações observadas, os percentuais de cada composto se mantiveram dentro da faixa de valores ideais adotados pela equipe de controle de qualidade da empresa parceira, sendo possível afirmar que o clínquer obtido no teste de queima é adequado para a produção de cimento Portland em conformidade com os critérios estabelecidos na norma técnica ABNT NBR 16.697/2018.

É importante frisar ainda que, apesar de mais robusto e indicado para distribuições não normais, o teste de Mann-Whitney não possui sensibilidade em relação ao

tamanho das diferenças observadas, por se tratar de um teste não-paramétrico de posições.

5.5 Conclusões

Esta etapa da tese teve como objetivo a realização de um teste de queima do CDRU produzido em escala plena, para avaliação da viabilidade técnica da aplicação do combustível em fornos de clínquer.

Após a mistura do CDRU com pneus cominuídos para manutenção da estabilidade da operação do forno, foi realizada a alimentação do combustível ao longo de aproximadamente duas horas e coletados dados operacionais e de emissões atmosféricas do forno. Ao final do teste de queima, foram coletadas amostras de clínquer para análise e comparação com dados padrão da unidade industrial.

Os resultados indicaram que a operação com a mistura de CDRU e pneus se mostrou adequada à operação industrial, sendo possível a manutenção da produtividade do forno próxima a 100% da capacidade nominal, com temperaturas estáveis no pré-calcinador e nos estágios do pré-aquecedor, com razões de substituição térmica de até 45% no pré-calcinador.

As análises de emissões atmosféricas indicaram adequação aos limites normativos estabelecidos em âmbito nacional (Resolução CONAMA nº 499/2020) e estadual (DN COPAM nº 154/2010). Não foram observadas diferenças expressivas entre os valores de emissões durante o teste de queima e durante a operação padrão do forno, com exceção dos valores de SO_x, que apresentaram redução expressiva e significativa, o que representa um ganho ambiental direto no uso do CDRU em substituição de combustíveis mais tradicionais.

De forma semelhante, a análise de composição do clínquer mostrou adequação do material produzido aos limites técnicos e de qualidade do empreendimento, com variações pouco expressivas e não significativas para a maior parte dos compostos avaliados.

Para a verificação da significância das diferenças observadas foi utilizado um teste não-paramétrico de posições (U de Mann-Whitney), em função da natureza não-

normal da distribuição dos dados e da maior robustez do teste. Como desvantagem, o teste não possui sensibilidade à variância da amostra, de tal forma que o tamanho das diferenças não resulta em alteração na avaliação. Dadas essas características do teste, a pequena amplitude das diferenças observadas e a variabilidade típica do processo de produção do clínquer, não foi possível afirmar que as variações observadas possuem qualquer correlação com o uso do CDRU.

Como conclusão final desta etapa, é possível afirmar que a utilização do CDRU produzido se mostrou tecnicamente viável em escala comercial para as razões de substituição térmica avaliadas, sem a observação de dificuldades técnicas relativas ao estoque, preparo e alimentação do material e sem impactos negativos perceptíveis na operação, desempenho ambiental ou qualidade do produto final.

5.6 Referências de literatura

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. *Panorama do Coprocessamento 2020 – Ano Base 2019*. São Paulo, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16.697: Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; PARILIKAR, U. V. Sustainability of cement kiln co-processing of wastes in India: a pilot study. *Environmental Technology*. v. 38, 2017.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 499/2020: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos*. Brasília, 2020.

COPAM, Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais. *Deliberação Normativa nº 154/2010: Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer*. Belo Horizonte, 2010.

SAMOLADA, M.C.; ZABANIOTOU, A.A. Energetic valorization of SRF in dedicated plants and cement kilns and guidelines for application in Greece and Cyprus. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 83, 2014.

PANAHANDAH, A.; ASADOLLAHFARDI, G.; MIRMOHAMMADI, M. Life cycle assessment of clinker production using refuse-derived fuel: A case study using refuse-derived fuel from Tehran municipal solid waste. *Environmental Quality Management*. v. 27, 2017.

PSOMOPOULOS, N. C. C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. *Management of Environmental Quality*. v. 27, 2016.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta tese, foi avaliada uma tecnologia inédita, em escala piloto, de tratamento térmico de RSU, em temperaturas brandas (de 150°C a 250°C) e atmosfera não inerte, para produção de CDRU por meio de torrefação do material. A pesquisa, de natureza exploratória, foi realizada em etapas.

A primeira etapa consistiu da construção e operação de uma planta piloto de tratamento para avaliação da viabilidade do tratamento, da qualidade do CDRU produzido e dos eventuais impactos ambientais causados pela atividade. Os resultados da operação alcançaram os objetivos iniciais de simplicidade operacional e escalabilidade, tratando adequadamente RSU mesmo sem a realização de triagem prévia de materiais.

O CDRU produzido apresentou características adequadas para utilização como fonte energética para caldeiras industriais e coprocessamento em fornos de clínquer, com PCI médio de 4.450 kcal/kg, teor de cloro de 0,22% em massa e sem concentração detectável de mercúrio para os testes realizados. Esses valores se encontram de acordo com os limites estabelecidos na norma técnica ABNT NBR 16.849/2020 e da Resolução SIMA nº 47/2020, utilizadas como padrão avaliativo em âmbito nacional neste trabalho. O CDRU também se adequou aos limites da norma europeia EN ISO 21640/2021, com classificação 2, 3 e 1 para PCI, cloro e mercúrio, respectivamente.

O balanço ambiental do processo indicou baixo impacto potencial dos efluentes líquidos gerados, com potencial de tratabilidade em ETEs sanitárias em função dos valores médios de DQO, DBO e a razão entre eles (785,64 mg/L, 352,96 mg/L e 2,23, respectivamente). Quanto às emissões atmosféricas, as concentrações de MP e CO nos períodos de coleta se apresentaram em desacordo com o padrão estabelecido pela Resolução CONAMA nº 316/2002 para sistemas de tratamento térmico. Uma avaliação preliminar identificou impacto negativo na qualidade de combustão no dia de amostragem em função da alta umidade do combustível utilizado, mas não foi possível quantificar esse impacto com os dados disponíveis. Sugere-se a avaliação do uso de sistemas mais robustos (multiciclones e/ou filtros manga) para sistemas comerciais de maior porte. Não foram identificados riscos ambientais substanciais em relação a emissões de PCDD/Fs durante a operação, para as condições de teste

utilizadas. É importante notar que há presença de cloro inorgânico nas emissões (19,88 mg/Nm³), em especial na forma de cloro livre.

O processo de densificação do CDRU para aumento da densidade energética e adequação de granulometria e massa para o processo de gaseificação se mostrou adequado em escala de bancada, mas com desafios para a escala industrial, em função da natureza dos equipamentos utilizados. Para a obtenção de coesão e resistência consideradas adequadas para o processo, foram necessárias concentrações de 7% de resina orgânica e 2% de ligante cimentício em massa, com umidade ótima de 18%. É importante frisar que os custos de densificação, por meio da briquetagem do material, em razão do alto uso de ligantes, podem inviabilizar a aplicação do processo em escala comercial, sendo necessários estudos de viabilidade econômica adicionais.

O processo de gaseificação do CDRU para produção de gás de síntese ocorreu de forma adequada, com produção de gás com condições adequadas de combustibilidade. O gás de síntese produzido não apresentou diferenças significativas de composição quando comparado ao gás de madeira (considerado como referência no estudo) para um teste de Mann-Whitney com significância de 5%. O PCI estimado do gás de CDRU foi de 6,61 MJ/m³, de acordo com valores da literatura técnica e com potencial de aproveitamento térmico em processos industriais.

A razão de equivalência estequiométrica utilizada no processo de gaseificação, de 0,39, foi superior àquela sugerida pela literatura, resultando num gás mais oxidado, com maior presença de nitrogênio e conseqüente menor poder calorífico. Para aplicações comerciais, sugere-se o uso de instrumentação mais robusta para monitoramento das vazões mássicas e ajuste mais preciso das condições de operação. As concentrações de H₂ sugerem a possibilidade de beneficiamento do gás de síntese para produção de hidrogênio, no caso de gaseificação em atmosfera de oxigênio puro com injeção de vapor. Sugere-se o estudo mais aprofundado sob essas condições para validação da hipótese.

A pesquisa cromatográfica exploratória para identificação de COVs e substâncias organocloradas identificou uma série de compostos orgânicos aromáticos tipicamente presentes em gases de síntese produzidos a partir de matéria orgânica (e.g. BTEX).

A metodologia de ensaio desenvolvida foi eficiente na identificação dos COVs desejados, com boa similaridade aos padrões existentes nos bancos de dados do programa utilizado. Para a quantificação das substâncias, sugere-se o estabelecimento de metodologias específicas por substância em função das massas moleculares e polaridades, de forma a melhorar a resolução e reduzir os ruídos de medição para comparação com padrões. A metodologia de ensaio utilizada não detectou padrões de sinal que pudessem ser relacionadas com substâncias organocloradas.

Por fim, a realização do teste de queima em escala plena foi bem sucedida, com razões de substituição térmica de até 45% no pré-calcinador, em mistura com pneus inservíveis em razão de 1:1 em massa. Não foram observadas quaisquer variações expressivas de natureza operacional durante o teste.

O tratamento dos dados apontou diferenças com significância estatística nas emissões atmosféricas entre o período de operação padrão avaliado e o teste, com pequeno aumento na concentração de MP e pequena nas concentrações de THC e O₂. Entretanto, dada pequena amplitude da diferença e a natureza multifatorial do processo, não é possível apontar correlação com uso do CDRU ou indicar que não se trata de oscilação natural do processo. As emissões de SO_x apresentaram redução média de 81,2% em relação a operação padrão, o que representa um ganho ambiental do uso do CDRU no processo.

Quanto à qualidade do clínquer, não foram identificadas mudanças na composição que possam ser correlacionadas ao uso do CDRU como combustível alternativo, em função da baixa participação no balanço de massa do forno e de seu baixo teor de cinzas. Os parâmetros de qualidade avaliados (MS, MA e FSC) não apresentaram diferença significativa em relação aos dados do clínquer produzido durante operação padrão da unidade.

De posse dos resultados de todas as etapas metodológicas, é possível confirmar a hipótese inicial de que o tratamento térmico de RSU sem triagem é capaz de produzir um CDRU com potencial de aplicação em processos térmicos em escala industrial. Além dos processos avaliados de coprocessamento e gaseificação em leito fixo,

outras possibilidades de aplicação podem ser avaliadas de forma mais detalhada – e.g. caldeiras a biomassa e gaseificadores a plasma.

A simplicidade do processo torna possível sua aplicação em cenários nos quais não há presença de sistema de triagem prévia, mas a aplicação de etapa preliminar de triagem traz vantagens para o processo, tanto do ponto de vista da qualidade do combustível (pela retirada de inertes e plásticos com presença de cloro) quanto do ponto de vista de sustentabilidade (pela priorização da recuperação de produtos recicláveis e reutilizáveis).

A planta piloto de torrefação utilizada, apesar de considerada como escala piloto, possui capacidade para o tratamento de resíduos de pequenas comunidades e municípios. A tecnologia, portanto, apresenta-se como uma alternativa tecnicamente viável para municípios que, tipicamente, encontram dificuldades para construir e operar aterros sanitários, incineradores ou outros tipos de tratamento, seja pela baixa disponibilidade de recursos, de escala ou pela ausência de mão-de-obra qualificada. A possibilidade de tratamento dos resíduos próximo ao local de geração reduz a distância média de transporte (DMT), o que representa outro impacto positivo se comparada a consórcios intermunicipais para a operação de aterros sanitários.

Quanto às limitações da pesquisa, destacam-se a não otimização dos equipamentos para o processo de torrefação, em função de restrições orçamentárias, assim como a limitação de instrumentação para balanços de massa e de energia mais precisos e para a realização de um balanço exergético do processo. No processo de gaseificação, não foi explorada a gaseificação do resíduo em atmosfera de oxigênio puro ou com adição de vapor. Outra limitação é a curta duração do teste de queima em escala plena, em função dos valores substanciais de combustível necessários para a execução de testes de maior duração.

6.1 Sugestões para pesquisas futuras

Dadas as limitações orçamentárias, de pessoal e de tempo, além da ampla gama de hipóteses consequente da natureza exploratória e da escala da pesquisa, há questões que não puderam ser devidamente exploradas neste trabalho.

Como comentário final, o pesquisador gostaria de propor reflexões e sugestões para pesquisas futuras, de forma a aprofundar a exploração dos temas aqui tratados. A seguir são apresentados os principais pontos identificados:

- Exploração do potencial de aproveitamento de calor residual para o tratamento dos resíduos: em função da baixa exigência térmica para o tratamento (temperaturas entre 150°C e 250°C), há potencial para o uso de calor residual no processo. As principais oportunidades são em tipologias com capacidade para recebimento dos resíduos e posterior utilização do CDRU, tal como usinas de cimento licenciadas para coprocessamento e empreendimentos com grandes caldeiras de biomassa (e.g. usinas sucroalcooleiras). Para um cenário mais bem determinado, é possível estabelecer parâmetros para um estudo de viabilidade econômica do investimento.
- Avaliação do impacto da triagem: em aterros sanitários e usinas MBT onde há a presença de sistemas de triagem bem estabelecidos, é possível avaliar a aplicabilidade do tratamento para rejeitos do processo. O processo de tratamento se adequa a rejeitos plásticos e de papéis não recicláveis, assim como a resíduos de alta umidade (restos de alimentos e podas), mas a realização de testes de forma separada possibilitaria uma avaliação mais robusta em função de dados primários mais detalhados.
- Avaliação do potencial de gaseificação em atmosfera rica em oxigênio e com adição de vapor: condições mais específicas de gaseificação e com maior controle operacional possibilitariam a produção de um gás de síntese de maior poder calorífico, com possível potencial para exploração comercial de produção de hidrogênio. A literatura possui muitos dados para gaseificação de RSU bruto ou rejeitos de plantas MBT, que podem ser usados como linha de base para comparação do gás e, posteriormente, da viabilidade técnico-econômica.
- Quantificação dos compostos orgânicos voláteis: o aprofundamento da metodologia das análises cromatográficas utilizadas para identificação e quantificação de espécies específicas de interesse pode ser útil para o estabelecimento de uma metodologia de referência de quantificação. Uma metodologia robusta poderia ser possivelmente aplicável a gases de outras fontes – e.g. biogás, gás de coqueria, dentre outros – aumentando a confiabilidade dos dados e o detalhamento da caracterização dos gases.

- Ampliação da escala de coprocessamento: realização de teste em maior escala de substituição e de duração, para avaliação mais aprofundada das eventuais variações no processo produtivo, inclusive eventuais ganhos ambientais provenientes da substituição de combustíveis tradicionais, além de análise multifatorial para determinação de correlações entre variáveis de processo e o uso do CDRU.
- Estudos de caso: dada a individualidade de cada região, sistemas de gestão e tratamento de RSU dependem de estudos mais aprofundados para verificação da aplicabilidade de novas rotas tecnológicas, incluindo análises de custo mais detalhadas, avaliação de custos relacionados a frete, potenciais mercados para aquisição do CDRU produzido, dentre outros. A elaboração de estudos de caso para regiões com eventual potencial para aplicação da tecnologia pode ser de grande valor para a elaboração de planos de gestão de resíduos nestes locais.

7 REFERÊNCIAS DA LITETURA

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. *Panorama do Coprocessamento 2020 – Ano Base 2019*. São Paulo, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11966: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e da vazão - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 11967: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1989.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12019: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12020: Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados em amostragem*. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12021: Efluentes gasosos de dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de dióxido de enxofre, trióxido de enxofre e névoas de ácido sulfúrico*. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12827: Efluentes gasosos com o sistema filtrante no interior do duto ou chaminé de fontes estacionárias - Determinação de material particulado - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1993.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16.697: Cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 16849: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8628: Determinação do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.

ABRELPE. *Panorama 2019: Resíduos Sólidos Urbanos*. São Paulo, 2020.

ALCANTARA, A.J.O. *Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos e Caracterização Química do Solo da Área de Disposição Final do Município de Cáceres/MT*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2010

ANDRADE, R. V. *Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental*. Universidade Federal de Itajubá – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (Tese de doutorado). Itajubá, 2007.

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*, 23^a Ed. 2017.

ARAUJO, S.; SILVA, R. J. Dioxin and furan formation and destruction in rotary kiln used in waste co-processing. *In: ENCIT 2000 – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas*. Porto Alegre, 2000.

AZAM, M.; ASHRAF, A.; JAHROMY, S. S.; RAZA, W.; KHALID, H.; RAZA, N.; WINTER, F. Isoconversional nonisothermal kinetic analysis of municipal solid waste, refuse-derived fuel, and coal. *Energy Science E Engineering*. v. 8, 2020.

AZAM, M.; JAHROMY, S. S.; RAZA, W.; JORDAN, C.; HARASEK, M.; WINTER, F. Comparison of the combustion characteristics and kinetic study of coal, municipal solid waste and refuse derived fuel: Model-fitting methods. *Energy Science and Engineering*. v. 7, 2019.

BAIDYA, R.; GHOSH, S. K.; PARILIKAR, U. V. Sustainability of cement kiln co-processing of wastes in India: a pilot study. *Environmental Technology*. v. 38, 2017.

BANCO MUNDIAL. *What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Disponível em: http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html. Acessado em julho de 2021.

BOURTSALAS, A.C. WTE: Non-recycled Combustible Wastes in Cement Production. Em: THEMELIS, N.; BOURTSALAS, A.C.: *Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes*. Ed. Springer. Nova Iorque, EUA, 2018.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.187 – Institui a Política sobre a Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências*. Brasília, 2009.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.305 – Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos e dá outras providências*. Brasília, 2010.

BRASIL. *Lei Federal nº 9.478 – 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*. Brasília, 1997.

BRIDGWATER, A.V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel*. v. 74, n. 5, p. 631–653, 1995.

BRUNNER, P.H. WTE: Thermal Waste Treatment for Sustainable Waste Management. Em: MEYERS, R. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* Ed. Springer, 2017,

ÇANKAYA, S. Investigating the environmental impacts of alternative fuel usage in cement production: a life cycle approach. *Environment, Development and Sustainability*. v. 22, 2020.

CEN – European Committee for Standardization. *EN ISO 21640:2021 – Solid recovered Fuels – Specifications and classes*. Bruxelas, 2021.

CHEN, T.; GUO, Y.; LI, X.; LU, S.; YAN, J. Emissions behavior and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans (PCDD/Fs) from cement kilns in China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 6, p. 4245-4253, 2014.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 316/2002: Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos..* Brasília, 2011.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 499/2020: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.* Brasília, 2020.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 499/2020: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos.* Brasília, 2020.

COPAM, Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais. *Deliberação Normativa nº 154/2010: Dispõe sobre o coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.* Belo Horizonte, 2010.

COPAM, Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais. *Deliberação Normativa nº 187/2013: Estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.* Belo Horizonte, 2013.

COPASA, Companhia de Saneamento de Minas Gerais. *Norma Técnica T 187/6 – Lançamento de efluentes não-domésticos no sistema de esgotamento sanitário da COPASA.* Belo Horizonte, 2018.

COSTA, L.E.B.; COSTA, S.K.; REGO, N.A.C.; DA SILVA JUNIOR, M.F. Gravimetria dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.3, 2012.

DEL ALAMO, G.; HART, A.; GRIMSHAW, A.; LUNDSTROM, P. Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGOS Plants. *Waste Management*. v. 32, p. 1835-1842. 2012.

FARIA D. G.; CARVALHO, M. M. O.; VAKKILAINEN, E. K.; CARDOSO, M. Waste-derived alternative fuels CO₂ emissions: cement clinkering process simulation. *Anais do I Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos*. Rio de Janeiro, 2019

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Mapa dos resíduos sólidos urbanos do estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2020.

FEAM. *Panorama da destinação dos resíduos sólidos urbanos no estado de Minas Gerais em 2018*. Belo Horizonte, 2019.

FIEMG – Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. *Diagnóstico Regional – Regional Zona da Mata*. Belo Horizonte, 2016.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Waste-to-Energy options in municipal solid waste management: A guide for decision makers in developing and emerging countries*. Bonn, Alemanha. 2017.

HAM, G.; MATSUTO, T. Comparison of energy recovery system from municipal solid waste in terms of energy balance and life cycle CO₂ emission. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. v.23, 2021.

HELSEN, L. *Low-temperature pyrolysis of CCA-treated wood waste*. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Aplicadas. Universidade Católica de Leuven. Bélgica. 2000

IEA, International Energy Agency. *World Energy Outlook 2022*. 2022.

INFIESTA, L. R.; FERREIRA, C. R. N.; TROVÓ, A. G.; BORGES, V. L.; CARVALHO, S. R. Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environment Management*. v. 236, 2019.

INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. *Patente nº BR 10 2018 003828 1 – Processo de Desidratação e Densificação de Resíduos Sólidos e Biomassa e Dispositivo*. 2018.

INTHARATHIRAT, Rotchana; ABDUL SALAM, P. Valorization of MSW-to-Energy in Thailand: Status, Challenges and Prospects. *Waste and Biomass Valorization*, v. 7, n. 1, p.31–57, 2016.

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.

KHADEMI, M. H.; ALIPOUR-DEHKORDI, A.; NALCHIFARD, F. Sustainable hydrogen and syngas production from waste valorization of biodiesel synthesis by-product: Green chemistry approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 175. 2023

KHUDAYKULOVA, M; YUANQIONG, H.; KHUDAYKULOV, A.. Economic Consequences and Implications of the Ukraine-Russia War. *International Journal of Management Science and Business Administration*. v.8, n. 4, p. 44-52. 2022.

KIM, W.; SOHN, I. Critical challenges facing low carbon steelmaking technology using hydrogen direct reduced iron. *Joule*. v.6, p.2228-2232. 2022.

KOSAJAN, V.; WEN, Z.; FEI, F.; DINGA, C. D.; WANG, Z.; ZHAN, J. The feasibility analysis of cement kiln as a MSW treatment infrastructure: from a life cycle environmental impact perspective. *Journal of Cleaner Production*. v. 267, 2020.

LIMA, P.G.; DESTRO, G.E.; BRAGA JUNIOR, S.S.; FORTI, J.C. Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos em um Aterro Sanitário. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v.12(4), 2018.

LONATI, G., ZANONI, F. Monte-Carlo human health risk assessment of Mercury emissions from a MSW gasification plant. *Waste Management*, v. 33, p. 347-355, 2013.

MENEZES, R.O.; CASTRO, S.R.; SILVA, J.B.G.; TEIXEIRA, G.P.; SILVA, M.A.M. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domésticos: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.24, n.2, 2019.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. Metcalf & Eddy Inc. 4^a ed. 2003.

MEYSTRE, J. A.; SILVA, R. J. The possibility of coprocessing municipal solid waste - MSW in clinker kilns to cement production. *Engenharia Térmica*. v.12, 2013.

MONARCA, D.; COLANTONI, A.; CECCHINI, M.; LONGO, L.; VECCHIONE, L.; CARLINI, M.; MANZO, A. Energy Characterization and Gasification of Biomass Derived by Hazelnut Cultivation: Analysis of Produced Syngas by Gas Chromatography. *Mathematical Problems in Engineering*. v.1. 2012

MUKHERJEE, C.; DENNEY, J. MBONIMPA, E.G.; SLAGLEY, J.; BHOWMIK, R. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Review*, v.119. 2020

PANAHANDAH, A.; ASADOLLAHFARDI, G.; MIRMOHAMMADI, M. Life cycle assessment of clinker production using refuse-derived fuel: A case study using refuse-derived fuel from Tehran municipal solid waste. *Environmental Quality Management*. v. 27, 2017.

PANEPINTO, D.; TADESCO, V.; BRIZIO, E.; GENON, G. Environmental Performances and Energy Efficiency for MSW Gasification Treatment. *Waste Biomass Valorization*, v. 6, p.123-135, 2015.

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). *Earth and Environmental Science*. v. 159, 2018.

PSALTIS, P.; KOMILIS, D. Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste. *Waste Management*. v. 83, 2019.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1718–1724, 2009.

PSOMOPOULOS, C. S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N. J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1718–1724, 2009.

PSOMOPOULOS, N. C. C. S.; THEMELIS, N. J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review. *Management of Environmental Quality*. v. 27, 2016.

REZAEI, H.; PANAHA, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood. *Sustainability*. v. 12, 2020.

REZAEI, H.; PANAHA, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of refuse-derived fuel with varying compositions of plastic, paper, organic and wood. *Sustainability*. v. 12, 2020a.

REZAEI, H.; PANAHA, F. Y.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization properties of refuse-derived fuel - Effects of particle size and moisture content. *Fuel Processing Technologies*. v. 205, 2020b.

SAMOLADA, M.C.; ZABANIOTOU, A.A. Energetic valorization of SRF in dedicated plants and cement kilns and guidelines for application in Greece and Cyprus. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 83, 2014.

SANTOS, S. M.; ASSIS, A. C.; GOMES, L.; NOBRE, C.; BRITO, P. Waste Gasification Technologies: A Brief Overview. *Waste*. v.1. p.140-165. 2023.

SHUMAL, M.; JAHROMI, A. R. T.; FERDOWSI, A.; DEHKORDI, S. M. M. N.; MOLOUDIAN, A. DEHNAVI, A. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refuse-Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. *Renewable Energy*. v. 146, 2020.

SHUMAL, M.; JAHROMI, A. R. T.; FERDOWSI, A.; DEHKORDI, S. M. M. N.; MOLOUDIAN, A. DEHNAVI, A. Comprehensive analysis of municipal solid waste rejected fractions as a source of Refuse-Derived Fuel in developing countries (case study of Isfahan-Iran): Environmental Impact and sustainable development. *Renewable Energy*. v. 146, 2020.

SILVA, R. J.; FRANCISCO, R. V. C. S. G.; LOPES, A. O. Co-processing of scrap tires and waste from re-refining of used lube oil in cement kilns. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. v. 4, 2017.

SILVA, V.; CONTRERAS, F.; BORTOLETO, A. P. Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasilia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*. v. 279, 2021.

SIMA. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo. *Resolução SIMA nº 047/2020*. São Paulo, 2020.

SIQUEIRA, H.; DINIZ E SOUZA, A.; BARRETO, A.C.; ABDALA, V.L. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Nova Ponte (MG). *Revista DAE*, p.39-52, 2016.

SMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente de São Paulo. *Resolução SMA nº 038/2017*. São Paulo, 2017.

SNIC. *Roadmap Tecnológico do Cimento*. Rio de Janeiro, 2019.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento, Ministério do Desenvolvimento Regional. *Diagnóstico Temático – Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Ano de Referência 2020*. Brasília, 2021.

SUPELCO. *Safety Data Sheet – 48 Component Indoor Air Standard 40353-U*. Versão 7.2. 2022. Disponível em <https://www.sigmaaldrich.com/BR/en/sds/supelco/40353-u>. Acessado em 18/03/2023.

TIBURCIO, R. S.; MALPELI JUNIOR, M.; LEITE, J. T. C.; YAMAJI, F. M.; NETO, A. M. P. Physicochemical and thermophysical characterization of reject waste and evaluation of their use as refuse-derived fuel. *Fuel*. v. 293, 2021.

TÔRRES FILHO, Artur. *Aplicação do processo de pirólise para valoração, cogeração de energia e tratamento de resíduos*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

TOSTI, S.; SOUSA, M.A.; BUCETI, G.; MADEIRA, L.M.; POZIO, A. Process analysis of refuse derived fuel hydrogasification for producing SNG. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 44, 2019.

U.E., União Europeia. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. Bruxelas, 2008.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. *EMC – NSPS Methods (40 CFR Part 60 Appendix A)*. 1979.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. 1984.

VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Volume 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Ed. UFMG. 2018.

WANG, T.; HOU, H.; YE, Y.; RONG, H.; LI, J.; XUE, Y. Combustion behavior of refuse-derived fuel produced from sewage sludge and rice husk/wood sawdust using thermogravimetric and mass spectrometric analyses. *Journal of Cleaner Production*. v. 222, 2019.

WZOREK, M. Solar drying of granulated waste blends for dry biofuel production. *Environmental Science and Pollution Research*. v. 28, 2021.

YANG, Y.; LIEW, R. K.; TAMOTHRAN, A. M.; FOONG, S. Y.; YEK, P. N. Y.; CHIA, P. W.; TRAN, T. V.; PENG, W.; LAM, S. S. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: a review. *Environmental Chemistry Letters*. v.19, 2021.

ZAMAN, B.; SAMADIKUN, B. P.; HARDYANTI, N.; PURWONO, P. Waste to energy: calorific improvement of municipal solid waste through biodrying. *Environmental and Climate Technologies*. v. 25, 2021.

ZHAO, J.; XIE, D.; WANG, S.; ZHANG, R.; WU, Z., MENG, H.; CHEN, L.; WANG, T.; GUO, Y. Hydrogen-rich syngas produced from co-gasification of municipal solid waste and wheat straw in an oxygen-enriched air fluidized bed. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 46. 2021.

ZHENG, X.; YING, Z.; WANG, B.; CHEN, C. Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂. *Applied Thermal Engineering*, v. 144, p.242-247, 2018.