

**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ATRELADO À REDUÇÃO
DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CONTEXTO DA UFRJ**

Charles dos Santos Gomes



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Charles dos Santos Gomes

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ATRELADO À REDUÇÃO DE
GASES DE EFEITO ESTUFA NO CONTEXTO DA UFRJ

Rio de Janeiro

2023



UFRJ

Charles dos Santos Gomes

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ATRELADO À REDUÇÃO DE
GASES DE EFEITO ESTUFA NO CONTEXTO DA UFRJ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Marcelo Mendes Viana, *D.Sc.*

Rio de Janeiro

2023

Gomes, Charles dos Santos.

Título: Aproveitamento Energético de Resíduos Atrelado à Redução de Gases de Efeito Estufa no Contexto da UFRJ / Charles dos Santos Gomes – 2023

f.167: il.: 70; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2022.

Orientador: Marcelo Mendes Viana

1. Aterro Industrial. 2. Gases de Efeito Estufa. 4. Curvas TGA-DTG-DSC. 5. Tratamento Térmico. 6. Aproveitamento Energético. 7. Logística de Transporte. 8. Equivalente de Gás Carbônico. 9. Avaliação de Impactos Potenciais. I. Viana, Marcelo Mendes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Aproveitamento Energético de Resíduos Atrelado à Redução de Gases de Efeito Estufa no Contexto da UFRJ.



UFRJ

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS ATRELADO À REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CONTEXTO DA UFRJ

Charles dos Santos Gomes

Orientador: Marcelo Mendes Viana, *D.Sc.*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovado pela banca:

Marcelo Mendes Viana

Presidente, Prof. Marcelo Mendes Viana, *D. Sc.*, UFRJ

Bianca Ramalho Quintaes

Prof.^a Bianca Ramalho Quintaes, *D. Sc.*, UFRJ

Bettina Susanna Hoffmann

Prof.^a Bettina Susanna Hoffmann, *D. Sc.*, UFRJ

Sara de Carvalho Zago

Prof.^a Sara de Carvalho Zago, *D. Sc.*, UFRJ

Rio de Janeiro

2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo equilíbrio necessário durante tantos momentos difíceis ao longo da caminhada que, por vezes, apresentaram-se através de questões aparentemente insolúveis, porém, a cada novo dia, faz-me acreditar ser possível superá-las, através de muita dedicação e empenho.

À minha família, pelo total apoio em todas as fases dessa caminhada.

Ao Professor Marcelo Mendes Viana, por ouvir-me e acreditar na viabilidade deste estudo, incentivar, compartilhar conhecimentos, retirar dúvidas e sugerir ideias, orientando no delineamento deste estudo até sua conclusão.

À equipe do Laboratório de Análises Térmicas da Escola de Química da UFRJ (LABAT-UFRJ), em especial às técnicas Maria Teresa e Wilsa Carla, sempre dispostas a ajudar e ensinar tudo o que fosse necessário sobre as práticas com os equipamentos aplicáveis aos experimentos desejados, além do laço de amizade que, a partir de então, permanecerá.

A importantes agentes envolvidos diretamente na gestão de resíduos sólidos no âmbito da UFRJ, fornecendo informações importantes ao presente conteúdo, em especial aos servidores: Vera do Carmo (PU-UFRJ); Lenir Gomes (PU-UFRJ); Edson Juvencio (PU-UFRJ); e Guilherme Rodrigues (*Campus Praia Vermelha* – PV-PU-UFRJ), além dos seguintes gestores de empresas terceirizadas: Eduardo Haddad (SANIPLAN); David Conti (FGP); André Ferraz (DELURB); e Bruna Nascimento (RODOCON).

RESUMO

GOMES, Charles dos Santos. Aproveitamento Energético de Resíduos Atrelado à Redução de Gases de Efeito Estufa no Contexto da UFRJ, 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Entende-se que os aterros sanitários sofrem saturação, necessitando do licenciamento de novos locais, e assim sucessivamente. Além disso, conforme a logística de transporte de resíduos baseada, majoritariamente, no transporte rodoviário, há consequente queima de combustíveis fósseis. Este estudo propõe, no âmbito da UFRJ, contribuir para menores emissões de GEE, alterando-se etapas da gestão atual de seus resíduos sólidos não recicláveis, propondo aproveitamento energético desses incinerando-os na Unidade de Recuperação Energética do Caju (URE-Caju). Inicialmente, entendeu-se a gestão, verificando-se tipologias e volumes anuais gerados. Coletou-se amostras de frações descartadas desses resíduos, caracterizando-as por Análise Térmica, estimando-se Entalpia (J/g) de queima de cada amostra e das misturas. Complementou-se o estudo comparando-se o Potencial de Aquecimento Global (PAG) da logística de transporte atual com a logística proposta, identificando-se seu balanço final em termos de kg eq.CO₂. Além de constatado que a massa de resíduos não recicláveis da UFRJ atende às condicionantes de uma URE, a Entalpia obtida dos resíduos não recicláveis poderia ser convertida em energia elétrica útil, que seria convertida ao atendimento de até 3100 habitantes ao ano. Pela análise do PAG, verificou-se que a gestão proposta possui potencial redução de GEE em torno de 75%, reduzindo-se o consumo de combustível em 52% e distâncias percorridas pela frota em 44%. Com a futura URE-Caju, este estudo poderá auxiliar em decisões dos gestores, melhorando-se continuamente ao atendimento do Plano Municipal de Saneamento da Cidade do Rio de Janeiro (2021) e da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010).

Palavras-chave: aterro sanitário, gases de efeito estufa, análise térmica, aproveitamento energético de resíduos, equivalente de gás carbônico, logística de transporte e disposição de resíduos.

ABSTRACT

GOMES, Charles dos Santos. Waste Thermal Energy (WtE) Related to Greenhouse Gases Reduction in the Context of UFRJ. Rio de Janeiro, 2022. Dissertation (Master's Degree) – Environmental Engineering Program, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

It's known that sanitary landfills saturate, require licenses of new sites, and so on. In addition, according to the waste transport logistics, based mainly on road transportation, there is a consequent burning of fossil fuels. This text proposes, within the management system of UFRJ, to contribute to lower GHG emissions, changing stages of the current management of its non-recyclable solid waste, proposing the energy usage of these applying incineration of them in a nearby WtE plant (Caju WtE plant). Initially, management was understood, verifying types and annual volumes generated. Samples of discarded fractions of these residues were collected, characterized by Thermal Analysis, estimating Enthalpy (J/g) of burning of each sample and of the mixtures. The study was complemented by comparing the Global Warming Potential (GWP) of the current transport logistics with the proposed logistics, identifying its final balance in terms of kg eq.CO₂. Beside the fact that the type of non-recyclable waste from UFRJ attends operational conditions of an WtE plant, its Enthalpy obtained from non-recyclable waste could be converted into useful electrical energy, which would be used to support up to 3100 inhabitants per year. If analyzed the PAG, it was verified that the proposed new management has a potential GHG reduction of approximately 75%, reducing fuel consumption by 52% and distances traveled by 44%. With the new WtE plant-Caju, this content will be able to help managers' decisions, improving continuously compliance with local regulations as the *Plano Municipal de Saneamento da Cidade do Rio de Janeiro* (2021) and the *Política Nacional de Resíduos Sólidos* (2010).

Keywords: landfill, greenhouse gases, thermal analysis, energy use, carbon dioxide equivalent, waste transport logistics and deposition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A recuperação energética de resíduos sólidos <i>versus</i> demais destinações.	23
Figura 2 - A recuperação energética em matrizes de gestão de resíduos sólidos pelo mundo.	24
Figura 3 - Aplicações da escória vitrificada no Japão	35
Figura 4 – Tecnologias utilizadas em plantas de Incineração de resíduos sólidos no mundo..	37
Figura 5 - URE <i>Copenhill</i> – Copenhague, Dinamarca.	41
Figura 6 - URE <i>Copenhill</i> internamente.....	41
Figura 7 – Esquematização de uma URE convencional de grelhas mecanizadas.	45
Figura 8 - Exemplo de análise térmica dinâmica e isotérmica (T indicada por linha cheia e β por linha tracejada).	49
Figura 9 - Curvas TG, DTG e DSC para amostra de carvão sub-betuminoso analisada em atmosfera em ar.....	52
Figura 10 - Análise Imediata para amostra de carvão sub-betuminoso.....	55
Figura 11 - Matriz gravimétrica de resíduos sólidos no Brasil.....	58
Figura 12 – Equipamento de análise térmica da <i>TA Instruments</i> , modelo <i>SDT Q600</i>	61
Figura 13 – Descrição das partes internas do equipamento de Análise Térmica da <i>TA Instruments</i>	62
Figura 14 – Detalhe dos cadinhos de amostra (madeira) e referência (vazio) antes da análise térmica.	62
Figura 15 – Detalhe dos cadinhos de amostra (Cinzas de madeira) e referência (vazio) após a análise térmica.	63
Figura 16 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Recicláveis e Extraordinários.	71
Figura 17 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Orgânicos (capina e poda).	72
Figura 18 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS). ..	73
Figura 19 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Químicos e Radioativos.....	74
Figura 20 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos de Construção Civil (RCC). ..	75
Figura 21 – Plásticos, papéis e pneus acumulados em praia do <i>Campus Ilha do Fundão</i> – lado Caju.....	77
Figura 22 – RCC acumulados em praia do <i>Campus Ilha do Fundão</i> - Lado CETEM.	77
Figura 23 – Recicláveis e RCC acumulados em áreas anexas ao HUCFF.....	77

Figura 24 – Lâmpadas contendo Hg e madeira acumulada no <i>Campus</i> Praia Vermelha – lado Rua Lauro Müller.	78
Figura 25 - Resíduos extraordinários (direita) e RCC (esquerda) armazenados no entorno do CT-UFRJ.	79
Figura 26 - Amostras de resíduos sólidos extraordinários e inertes levadas ao LABAT.	80
Figura 27 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de madeira analisada em ar.	82
Figura 28 - Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel branco A4 analisada em ar.	83
Figura 29 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de sacola de mercado (PEBD) analisada em ar.	84
Figura 30 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de sobras de comida analisada em ar. ..	86
Figura 31 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de aço galvanizado analisada em ar	87
Figura 32 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra vidro analisada em ar.	88
Figura 33 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de combinados baseada na matriz total analisada em ar.	94
Figura 34 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de combinados baseada na matriz de não recicláveis analisada em ar.	95
Figura 35 – Curvas TG, DTG e de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz total.	98
Figura 36 – Curvas TG, DTG e de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz não reciclável.	99
Figura 37 - Fluxograma para os resíduos sólidos recicláveis.	110
Figura 38 – Fluxograma para os resíduos sólidos extraordinários e RCC.	111
Figura 39 - Fluxograma para os resíduos químicos.	112
Figura 40 – Fluxograma para os RSS.	113
Figura 41 - Visão geral da ACV do fluxo atual de envio de resíduos ao CTR-Rio	121
Figura 42 – Localização da Prefeitura da UFRJ no <i>Campus</i> Ilha do Fundão e trajeto até a futura URE-Caju	122
Figura 43 – Novo fluxograma proposto de destinação aos resíduos sólidos extraordinários e RCC.	125
Figura 44 – Fluxograma da gestão proposta para os resíduos sólidos gerados pela UFRJ. ...	132
Figura 45 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de acetato de celulose analisada em ar.	146
Figura 46 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra vidro analisada em ar.	147

Figura 47 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel pardo analisada em ar.....	148
Figura 48 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de sabonete analisada em ar.	149
Figura 49 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de embalagem de suco/leite analisada em ar.Fonte: autoria própria.	151
Figura 50 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de papel de caderno escolar analisada em ar.	152
Figura 51 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de papel toalha analisada em ar.....	153
Figura 52 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de guardanapo analisada em ar.....	155
Figura 53 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papelão analisada em ar.....	156
Figura 54 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de copo plástico descartável (PP) analisada em ar.	157
Figura 55 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de EPS analisada em ar.	158
Figura 56 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de prato descartável (PS) analisada em ar.	160
Figura 57 - Curvas TG, DTG e DSC para amostra de embalagem plástica transparente (PEBD) analisada em ar.	161
Figura 58 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de tampa de tubo para creme dental (PP) analisada em ar.	162
Figura 59 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de tubo para creme dental analisada em ar.	163
Figura 60 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de borracha analisada em ar.	164
Figura 61 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de biscoito analisada em ar.	165
Figura 62 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de tampa de garrafa (PEAD) analisada em ar.	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas responsabilidades das equipes gestoras ambientais na UFRJ.....	29
Tabela 2 – <i>Campi</i> e unidades externas da UFRJ, localizados na capital e na região metropolitana.....	30
Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos conforme a NBR 10.004/2004.....	31
Tabela 4 – Limites de emissões atmosféricas para UREs, conforme definidos pela UE.....	34
Tabela 5 - Pressão, temperatura do Vapor, eficiência.	40
Tabela 6 – Características dos projetos de URE existentes no Brasil em 2022.....	44
Tabela 7 – Principais eventos térmicos que podem ocorrer com uma amostra durante uma análise térmica.....	48
Tabela 8 – Composição da amostra de combinados considerando a matriz gravimétrica total.	59
Tabela 9 – Composição da amostra de combinados considerando a matriz não reciclável..	59
Tabela 10 – Tipologia dos resíduos sólidos descartados anualmente pela UFRJ.....	68
Tabela 11 – Massa total, em toneladas, de resíduos sólidos descartados ao ano pela UFRJ (de 2017 a 2019).....	69
Tabela 12 – Classificação das amostras segundo a matriz gravimétrica nacional de resíduos.	81
Tabela 13 – Informações de interesse para todos os resíduos testados.....	91
Tabela 14 – Informações de interesse para os resíduos considerados não recicláveis.....	92
Tabela 15 – Informações de interesse para as amostras individuais e combinadas.	96
Tabela 16 – Resultados das análises imediatas para as amostras combinadas.	100
Tabela 17 – Dados de PCI, produção líquida de Energia Elétrica e habitantes atendidos....	102
Tabela 18 – Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Recicláveis.	105
Tabela 19 - Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Extraordinários e RCC	106
Tabela 20 – Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Químicos.	107
Tabela 21 - Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos de Serviços de Saúde (RSS).....	108

Tabela 22 - Total de Óleo Diesel consumido para a logística de transporte atual.	115
Tabela 23 - Total de distâncias percorridas da logística de transporte atual.	115
Tabela 24 - Equivalente em CO ₂ para a logística de resíduos não recicláveis descartados pela UFRJ.....	116
Tabela 25 - Equivalentes de CO ₂ com relação ao CH ₄ emitido no fluxo atual.	119
Tabela 26 - PAG relativo à gestão atual dos resíduos sólidos da UFRJ.....	119
Tabela 27 - Relação entre as novas distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Extraordinários e RCC.....	123
Tabela 28 - Total de Óleo Diesel consumido para a logística de transporte proposta	126
Tabela 29 - Total de distâncias percorridas da logística de transporte atual	126
Tabela 30 – PAG relativo ao CO ₂ gerado no trecho proposto	127
Tabela 31 – PAG relativo à gestão proposta para os resíduos sólidos da UFRJ.....	130
Tabela 32 - Balanço dos PAG calculados nas diferentes etapas do processo.	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Análise Crítica
ACV	Análise de Ciclo de Vida
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
Art.	Artigo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cd	Cádmio
CaO	Óxido de Cálcio
CCMN	Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
CCMN	Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
CCS	Centro de Ciências da Saúde
CDF	Certificado de Destinação Final
CFC	Clorofluorcarbono
CH ₄	Metano
CHNS	Análise elementar de Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S)
CHP	<i>Combined Heat & Power</i>
CIDUNI	Cidade Universitária
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COMLURB	Companhia Municipal de Lixo Urbano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CT	Centro de Tecnologia
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CTR	Certificado de Transporte de Resíduos

DLU/COUA/PU	Divisão de Limpeza Urbana / Coleta de Resíduos Sólidos e Controle de Vetores
DMR	Declaração de Movimentação de Resíduos
DRX	Difração de Raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
<i>ECOINVENT</i>	<i>Ecoinvent Centre – Swiss Centre for Life Cycle Inventories</i>
EEAN	Escola de Enfermagem Anna Neri
EEFD	Escola de Educação Física e Desportos
EEI	Escola de Educação Infantil
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protection Agency (USA)</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EQ	Escola de Química - UFRJ
Eq.CO ₂	Equivalentes de CO ₂
ETEI	Estação de Tratamento de Efluentes Industriais
ETP	Estudos Técnicos Preliminares
ETR	Estação de Transferência de Resíduos
FACC	Faculdade de Ciências Contábeis - UFRJ
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico
FRX	Fluorescência de Raios-X
<i>GWP</i>	<i>Global Warming Potential</i>
HCl	Ácido Clorídrico
HDPE	<i>High Density Poly Ethylene</i>
HESFA	Hospital Escola São Francisco de Assis
HF	Ácido Fluorídrico
Hg	Mercúrio
HUCFF	Hospital Universitário Clementino Fraga Filho
IDT	Instituto de Doenças do Tórax
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
IFCS	Instituto de Filosofia e Ciências Sociais
IG	Instituto de Ginecologia
IGEO	Instituto de Geociências

IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPPMG	Instituto de Puericultura e Pediatria Martagão Gesteira
Inst.	Instituto
K ₂ O	Óxido de Potássio
LABAT	Laboratório de Análises Térmicas
LADETEC	Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico
LDPE	<i>Low Density Poly Ethylene</i>
ME	Maternidade-Escola
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MgO	Óxido de Magnésio
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério das Minas e Energia
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
N ₂ O	Óxido Nitroso
Na ₂ O	Óxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NOP	Norma Operacional
NO _x	Óxidos Nitrosos
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PET	<i>Polyethylene Terephthlate</i> (Politereftalato de Etileno)
PGRS	Plano de Gestão de Resíduos Sólidos
pH	Potencial Hidrogeniônico
PM10	Material Particulado em diâmetro igual ou inferior a 10 µm
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PR6-UFRJ	Pró-reitora de Gestão e Governança – UFRJ
PU-UFRJ	Prefeitura Universitária – UFRJ
RCC	Resíduos da Construção Civil
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
RSS	Resíduo Sólido de Serviços de Saúde
RSUD	Resíduos Sólidos Urbanos Destinados

RSUT	Resíduos Sólidos Urbanos Transportados
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SINIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SiO ₂	Dióxido de Silício
TG	Termogravimetria
Tl	Tálio
TMA	Análise Termomecânica
TOC	Carbono Orgânico Total
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNE-EN	<i>Asociación Española de Normalización – Norma Europea</i>
URE	Unidade de Recuperação de Energia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	23
3. JUSTIFICATIVA	24
4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
5.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ	27
5.1.1. Programa de gestão de resíduos sólidos	27
5.1.2. Setores responsáveis, equipes gestoras e responsabilidades envolvidas	28
5.1.3. Unidades e Campi geradores de resíduos sólidos	30
5.1.4. Classificação dos resíduos sólidos gerados	30
5.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	32
5.2.1. Incineração de resíduos sólidos	32
5.2.2. Principais tecnologias para Incineração de resíduos sólidos	35
5.2.3. Conversão da Energia Térmica em Energia Elétrica Útil	37
5.2.4. Contextualização das Unidades de Recuperação de Energia (UREs)	42
5.2.4.1. <i>Unidade de Recuperação de Energia do Caju (URE-Caju)</i>	46
5.3. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POR ANÁLISE TÉRMICA	47
5.3.1. Termogravimetria (TG)	50
5.3.2. Termogravimetria Derivada (DTG)	50
5.3.3. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	51
5.3.4. Análise Imediata	53
6. METODOLOGIA	56
6.1. DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ	56
6.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	56
6.2.1. Seleção, coleta e preparação das amostras de resíduos sólidos	57
6.2.2. Preparação dos combinados (misturas) de amostras no LABTEC	58
6.2.3. Caracterização por análise térmica	60
6.2.3. Caracterização por análise imediata	63
6.2.4. Quantificação da Entalpia em energia elétrica útil	64
6.3. ESTIMATIVA DO PAG NA GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFRJ	65
6.3.1. PAG na gestão de resíduos atual	65

6.3.2. PAG na gestão de resíduos proposta	66
6.3.3. Comparação do PAG na gestão atual e na gestão proposta	67
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
7.1. DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ	68
7.1.1. Visão geral do sistema de gestão de resíduos da UFRJ.....	76
7.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	79
7.2.1. Seleção, coleta e preparação das amostras de resíduos sólidos	79
7.2.2. Caracterização por análise térmica	81
7.2.2.1 <i>Curvas TG, DTG e DSC para cada amostra coletada.....</i>	<i>81</i>
7.2.2.2 <i>Curvas TG, DTG e DSC da combinação (mistura) de todas as amostras coletadas.....</i>	<i>94</i>
7.2.2.3 <i>Curvas TG, DTG e DSC da combinação (mistura) apenas dos não recicláveis encontrados nas amostras coletadas.....</i>	<i>95</i>
7.2.3. Caracterização por análise imediata.....	98
7.2.3.1. <i>Caracterização por análise imediata da mistura de todas as amostras coletadas</i>	<i>98</i>
7.2.3.2. <i>Caracterização por análise imediata da mistura de não recicláveis encontrados nas amostras coletadas.....</i>	<i>99</i>
7.2.4. Cálculo da energia elétrica útil.....	101
7.3. ESTIMATIVA DO PAG NA GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFRJ	104
7.3.1. Distâncias entre origem e destinação dos resíduos na gestão atual	104
7.3.2. PAG na gestão de resíduos atual	109
7.3.3. Distâncias entre a origem e a destinação dos resíduos na gestão proposta ...	122
7.3.4. PAG na gestão de resíduos proposta	124
8. CONCLUSÕES.....	133
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE	146

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos são conceituados como todo e qualquer refugo, sobra ou detrito que resulte da atividade humana, podendo ser classificados de acordo com a sua natureza física, sendo seco ou molhado, de acordo com sua composição química, seja orgânico ou inorgânico, podendo ainda ser classificado por sua fonte geradora como domiciliar, industrial, hospitalar etc. (PETRY et al., 2015). Torna-se importante identificar a origem e as formas de gestão empregadas aos resíduos sólidos, considerando que são diversos os fatores que influenciam em sua composição, e, conseqüentemente, seus impactos.

Fatores como localização geográfica e propósito econômico são alguns dos aspectos que influenciam na variação do processo de destinação de resíduos sólidos, pois, seus reflexos são imediatamente percebidos nos locais de disposição e na percepção das necessidades de um tratamento adequado aos resíduos sólidos gerados. Dentre as formas mais adequadas que antecedem à disposição final de resíduos está o seu tratamento térmico visando à recuperação energética (*Waste to Energy – WtE*), capaz de gerar Eletricidade e/ou Calor pela Incineração controlada desses resíduos. Embora a Incineração não seja a melhor das destinações para os resíduos sólidos, ainda assim, é bem melhor do que depositá-los nos chamados “lixões” ou até mesmo em aterros sanitários. Isso é corroborado no Brasil, pois, a partir do início da última década, definiu-se que a gestão de resíduos sólidos deve seguir a hierarquia mencionada na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305 (PNRS, 2010), com a Incineração de resíduos sendo prioritária à disposição em aterros e “lixões”.

A Incineração é um tipo de tratamento térmico aplicável a resíduos sólidos que ocorre em temperaturas acima de 1000°C e em atmosfera oxidante. No processo os resíduos sofrem uma drástica redução de volume e são transformados em Cinzas, gases de Combustão e Energia Térmica. As Cinzas podem ser enviadas para aterros sanitários ou utilizadas na construção civil, conforme sua composição. A Energia Térmica pode ser convertida em elétrica para uso posterior, já os gases de Combustão possuem composição variada, destacando-se a presença de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa.

A utilização de Incineração impacta positivamente na logística de destinação de resíduos sólidos, aliviando, assim, os aterros e, até mesmo, os lixões, contribuindo para uma redução nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), redução de lixiviados que promovem a contaminação do solo e do lençol freático, além de aliviar as necessidades de licenciar novas áreas para novos aterros.

Em relação aos GEE presentes nos gases de Combustão, o dióxido de Carbono (CO_2) é o principal, sendo gerado devido à Combustão completa da fração orgânica presente nos resíduos. Como o CO_2 não é regulado, ele será emitido diretamente para a atmosfera, podendo então absorver fótons de radiação infravermelha (IV) e redistribuir a Energia como Calor para as moléculas vizinhas, aumentando a temperatura do ar e de sua vizinhança. Esse fenômeno de interceptação do IV emitido pelos constituintes atmosféricos e sua distribuição como Calor para aumentar a temperatura atmosférica é chamado de Efeito Estufa.

De acordo com Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA) a concentração atmosférica de CO_2 média para o mês de dezembro de 2022 foi de 418,95 ppm (NOAA, 2023). Essa concentração representa um aumento de quase 50%, se comparado com o valor base médio de 280 ppm presente antes da Revolução Industrial por volta do ano 1750, marco de um aumento expressivo da emissão de gases de efeito estufa, principalmente CO_2 , pela atividade humana (CHEN; SUZUKI; LACKNER, 2017).

Pela maior concentração atmosférica de GEE, consequente, maior retenção de Calor na Terra, a temperatura média do planeta está aumentando, constituindo um fenômeno que chamamos de Aquecimento Global, caracterizado pelos constantes registros de recordes de temperatura nos oceanos e crosta, inclusive das regiões polares. Esse fenômeno de aquecimento também está gerando as mudanças no clima, um termo mais amplo, pois inclui não somente a mudança de temperatura da superfície terrestre, mas também na precipitação, concentração de Oxigênio (O_2) dissolvido nos oceanos, seu pH, salinidade, além de eventos extremos como secas, ondas de Calor e intensidade de incêndios e velocidade dos ventos.

A contribuição positiva da Incineração para reduzir emissões de GEE em relação a ao uso de aterro se dá pela geração de gases como, por exemplo, o CO_2 na Incineração. No caso da digestão anaeróbia, típica dos aterros e lixões, ocorre a geração de gás Metano (CH_4), que possui *Global Warming Potential* (GWP) ou Potencial de Aquecimento Global (PAG) muito superior, comparado ao CO_2 .

A cada GEE é atribuído um PAG, que indica sua contribuição relativa para o aquecimento global por unidade de massa ao longo de um determinado período de tempo, sendo considerados seus valores ao longo de 100 anos (EPA, 2022a). O CO_2 , por exemplo, tem PAG igual a 1 (adimensional), sendo utilizado como base, com outros GEE possuindo PAG de valores superiores, devido a uma maior longevidade e comportamento de absorção radioativa na atmosfera (TAN, 2014; MILLER, 2015).

Para fins de quantificação e comparação, utiliza-se uma unidade para o PAG em quilogramas equivalentes de CO₂ (kg eq.CO₂), o qual pode ser calculado pelo produto entre a massa do gás e o valor do seu PAG, como mostrado na Equação 1:

$$\text{PAG (kg eq.CO}_2\text{)} = \text{PAG} \cdot \text{Massa do GEE (kg)} \quad (1)$$

Como o CH₄ possui PAG de 25 (EPA, 2022a), ou seja, é capaz de absorver e segurar 25 vezes mais Calor do que o CO₂, um processo de Incineração, por não gerar CH₄, é menos prejudicial em termos de aquecimento do planeta.

Além das emissões referentes aos processos de tratamento por aterramento ou Incineração, as questões envolvendo logística de transporte de resíduos também contribuem para o aumento de GEE, especialmente no Brasil, onde o transporte de cargas é majoritariamente rodoviário, consumidor de combustíveis fósseis, contribuindo para o aumento da concentração desses gases na atmosfera, fazendo-se necessária sua diminuição, seja pela redução ou modernização constante da frota, seja pela redução das distâncias percorridas.

Conforme sugerido por Araújo e Altro (2014), são pertinentes investigações mais profundas sobre como melhorar a gestão de resíduos sólidos, propondo fontes alternativas de tratamento ou de reaproveitamento dos resíduos não recicláveis. Levando-se em consideração o que menciona o Artigo 23 da Constituição Federal (BRASIL, 1988), sobre a proteção ao meio ambiente e o combate à poluição sob quaisquer formas, no Brasil, este desafio ainda se torna grande, considerando que os resíduos gerados são ainda enviados a diversos aterros e lixões espalhados país afora – adicionando-se a baixas práticas ou incentivos à redução, reciclagem e compostagem –, estando ainda bastante aquém do que fazem diversos países europeus, asiáticos e da América do Norte, os quais, há anos, implementam em suas matrizes de gestão, a recuperação energética dos resíduos, o que impacta diretamente, além de menor emissão de GEE, em questões como biodiversidade e saúde pública.

2. OBJETIVOS

Este estudo possui o objetivo de quantificar e analisar a fração não-reciclável dos resíduos sólidos gerados pela UFRJ, estimando o seu potencial energético, em MWh, e seu o PAG, em kg eq.CO₂, levando-se em consideração a gestão atual, propondo uma nova gestão à fração depositada em aterro industrial, passando a serem incinerados em Unidade de Recuperação Energética (URE) nas proximidades da universidade. A Incineração, além da recuperação energética, contribuirá – comparada à gestão atual de resíduos sólidos da UFRJ – diretamente para a redução de GEE, bem como na redução de lixiviado produzido, reduzindo-se a contaminação do solo e o lençol freático na região do aterro. Conforme já descrito neste texto, o tratamento por Incineração é prioritário à disposição de resíduos em aterros e “lixões”, conforme ilustrado na Figura 1:

Figura 1 - A recuperação energética de resíduos sólidos *versus* demais destinações.



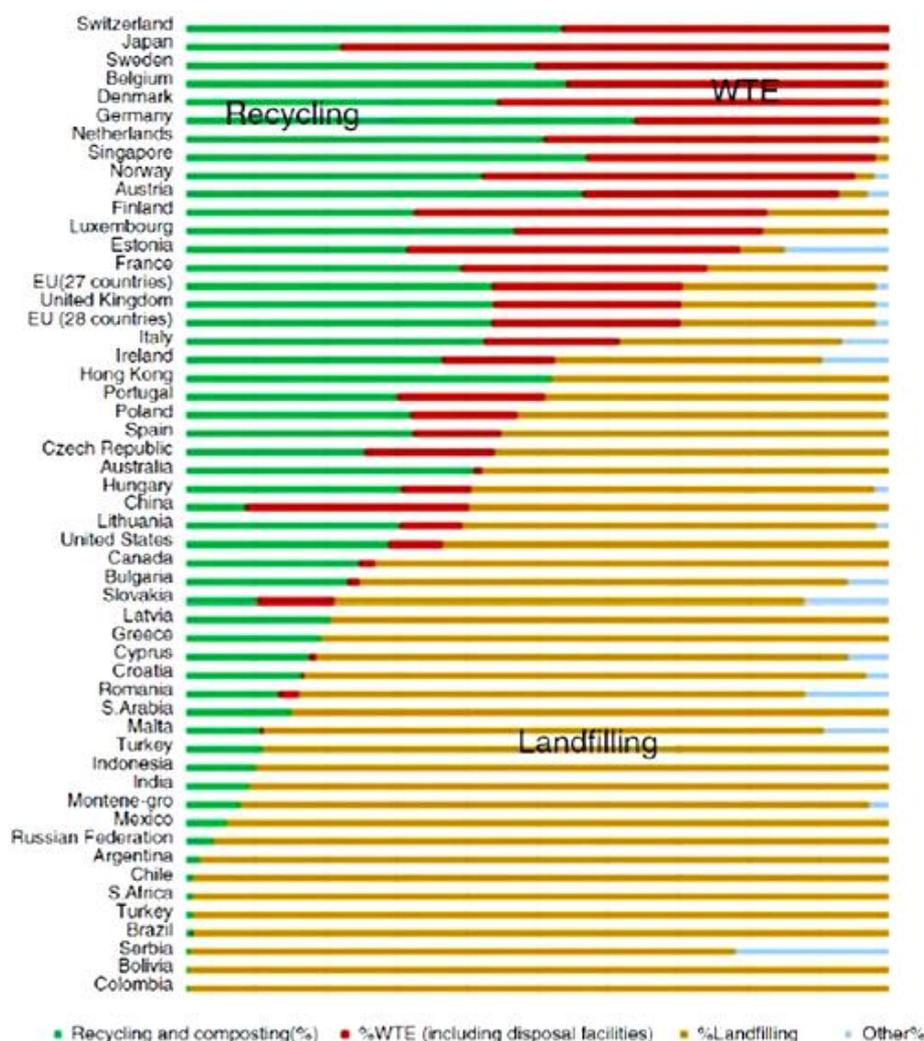
Fonte: Modificado de THEMELIS & BOURTSALAS (2019).

3. JUSTIFICATIVA

A justificativa para este estudo está na possibilidade de, através da Incineração, apresentar aos gestores ambientais da UFRJ uma opção para melhoria contínua com relação aos impactos oriundos das emissões de GEE na gestão de resíduos sólidos, contribuindo para o aproveitamento da fração não reciclável à geração de Energia Elétrica, a qual poderá ser captada por aparelhos públicos ou privados.

Em escala mundial, a prática do reaproveitamento energético (WtE) ainda é bem menor do que a disposição em aterros e lixões (*Landfilling*), sobretudo se compararmos o que ocorre em países asiáticos e europeus, sendo essa uma prática que vem assumindo lugar de destaque nas matrizes de gestão de resíduos sólidos, juntamente a práticas de reciclagem (*Recycling*), conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - A recuperação energética em matrizes de gestão de resíduos sólidos pelo mundo.



Fonte: modificado de THEMELIS & BOURTSALAS (2019).

Além disso, os subprodutos da Incineração são interessantes à construção civil, além ser reduzido o volume de resíduos transportados e destinados em aterro sanitário. Assim, este estudo justifica-se por adotar distâncias mais curtas percorridas pela frota de transporte atualmente em uso, pelo envio de um menor volume de resíduos para disposição no aterro sanitário, por uma quantidade menor de lixiviados gerados junto ao solo e, no balanço final, uma menor emissão de GEE. Esse conjunto de informações auxiliará na reflexão dos gestores de Meio Ambiente da UFRJ em suas futuras tomadas de decisões.

4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Após a apresentação dos **capítulos de 1 a 3**, referentes a **Introdução, Objetivos e Justificativas**, apresentamos neste item a subdivisão dos demais capítulos desta dissertação:

- **Capítulo 5** – Revisão Bibliográfica: será realizado um levantamento de informações a respeito de: (i) Gestão de resíduos nos Campus e unidades externas da UFRJ localizadas na capital e região metropolitana; (ii) Setores e responsabilidades envolvidas na gestão dos resíduos; (iii) Classificação dos resíduos sólidos gerados; (iv) Destinação final dos resíduos, empresas terceirizadas envolvidas e caracterização da frota de transporte; (v) Incineração de resíduos sólidos, principais tecnologias de Incineração e Unidades de Recuperação de Energia e conversão de Energia Térmica em Energia Elétrica útil; (vi) Caracterização de resíduos empregando Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Análise Imediata (percentuais de Umidade, material volátil, Carbono Fixo e Cinzas);
- **Capítulo 6** – Metodologia: descrição dos procedimentos realizados para: (i) Diagnosticar como é realizada a gestão dos resíduos sólidos na UFRJ; (ii) Seleção, coleta, preparo dos resíduos, caracterização dos resíduos por análise térmica e imediata, estimativa da Entalpia do processo de queima dos resíduos; (iii) Estimativa do PAG da gestão de resíduos atual e da gestão proposta;
- **Capítulo 7** – Resultados e Discussão: capítulo em que será feita a exposição e comentários a respeito dos resultados obtidos, incluindo: (i) Diagnóstico da gestão atual de resíduos sólidos nas unidades da UFRJ, com as tipologias encontradas e volumes coletados; (ii) Seleção e análise térmica dos resíduos, Estimativa da Entalpia do processo de queima dos resíduos (J/g) e sua conversão em Energia Elétrica útil (kWh); (iii) Estimativa do PAG (kg eq.CO₂) da gestão de resíduos atual e da gestão proposta, seguida de comparações;
- **Capítulo 8** – Conclusões;
- **Capítulo 9** – Referências Bibliográficas;
- **Apêndices.**

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ

A necessidade de coordenar as melhores práticas de coleta de todos os resíduos sólidos gerados surge do fato da UFRJ ser classificada como um Grande Gerador de resíduos sólidos, conforme definido no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro (PMGIRS, 2021), superando uma média de 120 litros de resíduos gerados ao dia, não permitindo, por exemplo, que a universidade seja atendida por empresas públicas locais, que, no caso do município do Rio de Janeiro, é a Companhia Municipal de Lixo Urbano (COMLURB).

Nesse caso, a instituição deve prover a coleta e armazenamento temporários de seus resíduos, de forma sistemática, padronizada e controlada – seja por meios próprios ou terceirizados – para locais de disposição autorizados pelos órgãos governamentais, seja para serem reciclados, reenviados à reindustrialização ou disposição final, gerando o menor impacto possível à natureza.

5.1.1. Programa de gestão de resíduos sólidos

Conforme definido na Lei Federal nº 12.305/2010 (PNRS, 2010), a gestão de resíduos sólidos deve ser realizada de maneira ambientalmente adequada, seguindo a seguinte ordem de preferência na gestão: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final dos rejeitos em aterros. Torna-se equilibrado, então, dizer que as atividades que norteiam uma adequada gestão de resíduos sólidos, em qualquer tipo de empreendimento, não devam ser isoladas, ou seja, planejadas sem prévia análise de impactos pela equipe responsável.

O reconhecimento do ambiente e todas as interações existentes devem ser mapeados, classificados e orientados a soluções tecnicamente viáveis. Neste contexto, as questões financeiras deverão ser paralelamente discutidas com os níveis hierárquicos superiores, analisados, para disponibilidade dos recursos necessários que permitirão a execução das ações planejadas, saindo do campo teórico e tornando-se realidade.

Desta forma, a existência de um Programa de Gestão de Resíduos Sólidos (PGRS) na UFRJ torna-se primordial para que estejam claros os objetivos e prioridades na gestão, para que todos os respectivos responsáveis do sistema estejam cientes de todos os impactos

ambientais, metodologias de controle, periodicidades necessárias de atuação, mão-de-obra a ser empregada, necessidades de reavaliação de medidas tomadas, sendo importantíssima a participação de todas as equipes envolvidas no tema, dentre todas as unidades e Campus. A Prefeitura Universitária da UFRJ (PU-UFRJ) informou que obedecerá a um calendário interno, ainda a ser definido, para reunião das equipes responsáveis de meio ambiente, definindo, assim, o seu PGRS. Ao menos até o final de 2021, a UFRJ ainda não contava com um PGRS documentado, formalizado e divulgado entre todas as suas equipes responsáveis no tema.

São observadas algumas ações localizadas na UFRJ, como, por exemplo, no Centro de Ciências (CCS-UFRJ), que segue um planejamento escrito, com fluxogramas para a correta gestão a cada tipologia de resíduos sólidos, o qual está disponível à consulta pública em seu portal na Internet. Esse planejamento, definido pela sua comissão interna de biossegurança não está compartilhado com demais setores da universidade, sendo uma exclusividade do CCS-UFRJ.

Para a elaboração desses fluxogramas de gestão, o CCS-UFRJ teve a participação de servidores e de terceiros, confirmando a importância de que visões distintas do sistema sejam levadas em consideração para a definição de ações consistentes e eficazes, com o consequente alcance dos objetivos ambientais pretendidos, a despeito de ser uma ação exclusiva apenas um departamento da universidade.

5.1.2. Setores responsáveis, equipes gestoras e responsabilidades envolvidas

A Pró-Reitora de Gestão e Governança da UFRJ (PR6-UFRJ) é o setor responsável pela gestão de contratos para serviços de coleta de resíduos sólidos no âmbito universitário. Conforme informa o seu portal da PR6-UFRJ na Internet, a Pró-reitora de Gestão e Governança é uma das sete áreas gerais da UFRJ, responsável pela operação dos processos administrativos relativos a licitações, contratos, materiais, serviços, gestão patrimonial e normatização dos respectivos procedimentos administrativos, apoiando as unidades com foco na publicidade e na transparência dos atos administrativos praticados, visando à garantia de integridade e o controle dos riscos inerentes às atividades da universidade.

Possui também competência em estabelecer, consolidar e dirigir sistemas para monitorar, avaliar e prover meios para a melhoria contínua dos processos administrativos relativos a licitações, contratos e gestão do patrimônio mobiliário e imobiliário da UFRJ, envolvendo suas unidades, os servidores e demais atores sociais e políticos intervenientes nos

processos da UFRJ. O acompanhamento *in loco* dos serviços prestados pelos terceirizados é uma responsabilidade dos respectivos gestores de cada *Campus* ou Unidade Externa, sendo todos pertencentes ao quadro de servidores da universidade, conforme identificados através do portal PR6-UFRJ, na Internet.

Conforme as informações obtidas junto à PU-UFRJ, os quesitos referentes à seleção e capacitação dos membros das equipes seguem programa interno definido entre as diferentes unidades da universidade. A partir da seleção de um novo membro da equipe, o mesmo é encaminhado ao cumprimento de um programa interno de capacitação, com duração variável, dependendo do enfoque pretendido pelos gestores, podendo durar alguns meses até sua conclusão. As equipes de gestão ambiental no âmbito da UFRJ possuem atuações específicas importantes, e algumas delas estão exemplificadas conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Algumas responsabilidades das equipes gestoras ambientais na UFRJ.

Responsabilidades	Agentes envolvidos (comissões)
Elaboração de estudos técnicos preliminares e termos de referência contratuais	<ul style="list-style-type: none"> • Prefeitura Universitária (PU-UFRJ) • Centro de Ciências Sociais (CCS-UFRJ) • Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF) • Pró-reitora de Gestão e Governança (PR6-UFRJ)
Formulação de editais, processos licitatórios e fiscalização administrativa	<ul style="list-style-type: none"> • Pró-reitora de Gestão e Governança (PR6-UFRJ)
Fiscalização operacional dos contratos	<ul style="list-style-type: none"> • Prefeitura Universitária (PU-UFRJ) • Centro de Ciências Sociais (CCS-UFRJ) • Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF) – através da Divisão de Limpeza Urbana e Coleta de Resíduos Sólidos e Controle de Vetores (DLU/COUA/PU-UFRJ)

Fonte: PU-UFRJ (2021).

Ressalta-se que, embora a gestão contratual técnico-administrativa de terceirizados seja de responsabilidade de cada *Campus* ou das chamadas Unidades Externas da UFRJ, a consolidação de informações deve ser centralizada na PU-UFRJ, PR6-UFRJ e CCS-UFRJ (esta última, excepcionalmente, com relação aos resíduos perigosos – químicos).

5.1.3. Unidades e *Campi* geradores de resíduos sólidos

A UFRJ é uma entidade pública de ensino fluminense de graduação e pós-graduação, mantida pelo governo federal, com diversas unidades localizadas neste estado. Em função da sua área ocupada, bem como dos seus diversos setores existentes, em mais de 9.400m² de área, o *Campus* da Ilha do Fundão (Cidade Universitária), localizado no bairro da Ilha do Governador, Rio de Janeiro, RJ, torna-se o principal gerador em volume mensal medido. Contribuem com os volumes totais de resíduos sólidos gerados, além do seu *Campus* principal, os seguintes *Campi* e Unidades Externas, conforme identificados na Tabela 2.

Tabela 2 – *Campi* e unidades externas da UFRJ, localizados na capital e na região metropolitana.

Identificação	Localização
<i>Campus</i> Duque de Caxias	Santa Cruz da Serra, Duque de Caxias, RJ
<i>Campus</i> Praia Vermelha	Urca, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Colégio Brasileiro de Altos Estudos	Flamengo, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)	Cidade Nova, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Escola de Música	Centro, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Faculdade de Direito	Centro, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – HESFA	Centro, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Inst. de Filosofia e Ciências Sociais (IFCS)	Centro, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Maternidade Escola	Laranjeiras, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Museu Nacional	São Cristóvão, Rio de Janeiro, RJ
Unidade Externa – Observatório do Valongo.	Gamboa, Rio de Janeiro, RJ

Fonte: PU-UFRJ (2021).

Verificou-se que, à exceção do *Campus* principal da Ilha do Fundão, todas as demais unidades da UFRJ contam com áreas consideravelmente menores destinadas à disposição temporária de resíduos, porém com sistema de coleta e destinação similares aos do *Campus* principal, conforme será detalhado ao longo do texto dessa dissertação.

5.1.4. Classificação dos resíduos sólidos gerados

Conforme as descrições do Art.13 do PNRS, Lei Federal nº 12.305/2010 (PNRS, 2010), os resíduos sólidos gerados pela UFRJ, quando classificados de acordo com a sua origem, podem receber as seguintes denominações: Resíduo Sólido Urbano (RSU), Resíduo de Serviço de Saúde (RSS), Resíduo da Construção Civil (RCC) e Resíduo de atividades acadêmicas-

industriais (Químicos e Radioativos). Os resíduos também são classificados quanto sua periculosidade, seguindo as definições da NBR 10.004/1004 (ABNT, 2004), descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos conforme a NBR 10.004/2004.

Classificação	Característica
Resíduo classe I (perigoso)	Resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar: a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.
Resíduos classe II (não perigoso)	Quaisquer resíduos sem enquadramento nas características da classe I, subdividindo-se nos subgrupos IIA (não inertes) e IIB (inertes).
Resíduos classe IIA (não inertes)	Aqueles que não se enquadram nas classificações da classe I ou da classe IIB, nos termos desta Norma. Os resíduos classe IIA podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em Água.
Resíduos classe IIB (inertes)	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007 ¹ , e submetidos a um contato dinâmico e estático com Água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006 ² , não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de Água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo G da ABNT NBR 10.004.

Fonte: modificado da NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Assim sendo, quanto à periculosidade, os resíduos gerados pela UFRJ podem ser classificados como perigosos (RSS, químicos e radioativos) e não perigosos (RSU e RCC), sendo os RSU classificados como não inertes e os RCC como inertes.

¹ Norma 10007 – Amostragem de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004).

² Norma 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004).

5.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

No contexto desta dissertação será enfatizado o tratamento térmico dos resíduos sólidos utilizando a Incineração com recuperação energética pela tecnologia de *Mass Burning*, a qual será detalhada a seguir, junto com outras informações relevantes ao tema.

Optou-se pela descrição dessa tecnologia específica porque é aquela que será utilizada na futura URE do Caju, bairro da zona portuária desta cidade, conforme está especificado no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do empreendimento, o qual teve a sua viabilidade ambiental atestada, já possuindo sua Licença Prévia (LP)³.

5.2.1. Incineração de resíduos sólidos

Conforme o divulga o Ministério das Minas e Energia (MME), em seu Balanço Energético Nacional (2022), cerca de 44,7% da nossa oferta de Energia interna é de origem renovável, com a participação de fontes como a biomassa da cana, hidráulica, lenha, carvão vegetal, solar, eólica, entre outras. Algumas dessas fontes de Energia, como hidráulica, solar e eólica, possuem caráter intermitente, ou seja, a geração de Energia Elétrica depende das condições atmosféricas e climáticas da região para atender a demanda planejada.

Essa situação de caráter intermitente, quando somada ao Decreto nº 11.043/2022, a qual regulamentou o PNRS (2010), propõe, até 2040, a reciclagem ou recuperação energética de quase a metade do lixo gerado no Brasil (48%), fazendo emergir o uso de tratamentos térmicos com recuperação energética como oferta na geração de Energia Elétrica no Brasil. Segundo Themelis & Bourtsalas (2019), a maior parte dos resíduos sólidos pós-reciclagem são compostos químicos orgânicos contendo Carbono-C, Oxigênio-O₂, Hidrogênio-H₂, Nitrogênio-N₂, Enxofre-S, dentre outros, os quais podem ser utilizados como combustível em processos de Incineração.

Segundo Youcai (2017), a Incineração é um processo de transferência de Calor e massa que pode ser subdividido em três subprocessos: secagem, decomposição térmica e Combustão:

³ Licença Prévia (LP) – Concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação (Resolução CONAMA 237/97).

- i. Secagem: processo no qual a Umidade (Água Livre) do resíduo é Vaporizada pelo Calor na câmara de Combustão. Quanto maior o teor de Água do resíduo, maior será a duração da fase de secagem e mais Energia Térmica será consumida, o que irá afetar negativamente todo o processo de Incineração, visto que a Vaporização é um processo endotérmico;
- ii. Decomposição térmica: craqueamento e volatilização das substâncias combustíveis no resíduo, devido à alta temperatura, gerando uma variedade de hidrocarbonetos voláteis e outros materiais com Carbono. A velocidade de decomposição térmica está relacionada à composição dos componentes combustíveis, à taxa de transferência de Calor e massa e ao tamanho das partículas dos sólidos orgânicos. O processo de decomposição também é endotérmico;
- iii. Combustão: processo que ocorre em altas temperaturas ($800^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$), onde as substâncias combustíveis gasosas e sólidas produzidas por secagem e decomposição térmica, em contato com o ar no incinerador, tornam-se chamas e iniciam a Combustão. A Incineração de resíduos é um processo misto de Combustão em fase gasosa e sólida.

Na Incineração os resíduos são submetidos a um ambiente fortemente oxidante, em alta temperatura e por um determinado intervalo de tempo. Os resíduos sofrem secagem, decomposição térmica e Combustão, formando poluentes atmosféricos e gases estufa, além de Cinzas e Energia Térmica que pode ser reaproveitada.

Os poluentes atmosféricos resultantes do processo de Incineração devem ser tratados antes da sua emissão para a atmosfera pois são legislados conforme a Resolução CONAMA 491/2018, a qual estabelece os padrões da qualidade do Ar. Normalmente os principais poluentes gerados são o Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), Materiais Particulados, Dioxinas, Furanos, Metais Pesados, entre outros (CHENG & HU, 2010). A Tabela 4 apresenta alguns dados de concentração de poluentes atmosféricos emitidos por UREs da União Europeia (UE), os quais podem ser comparados com os limites de emissões que também são apresentados. Verifica-se que as concentrações medidas de poluentes atmosféricos nas UREs da UE estão dentro da faixa limite permitida, o que se deve ao fato da utilização de controle da poluição atmosférica eficiente, o que é essencial para preservação da saúde humana e do meio ambiente como um todo.

Tabela 4 – Limites de emissões atmosféricas para UREs, conforme definidos pela UE.

Limites de emissões atmosféricas em mg/m ³ – exceto para dioxinas e furanos (ng/m ³)									
Poluente	PM10	SO ₂	CO	NO _x	HCl	HF	Hg	Cd e Tl	Dioxinas e Furanos
Limite UE	10	50	100	200	10	2	0.05	0.05	0.1
Medições	0.2-3.33	0.1-12.9	1.72-33	28-180	0.3-7.1	0.097-0.13	0.0009-0.03	0.0005-0.01	0.003-0.021

Fonte: Whiting et al. (2013).

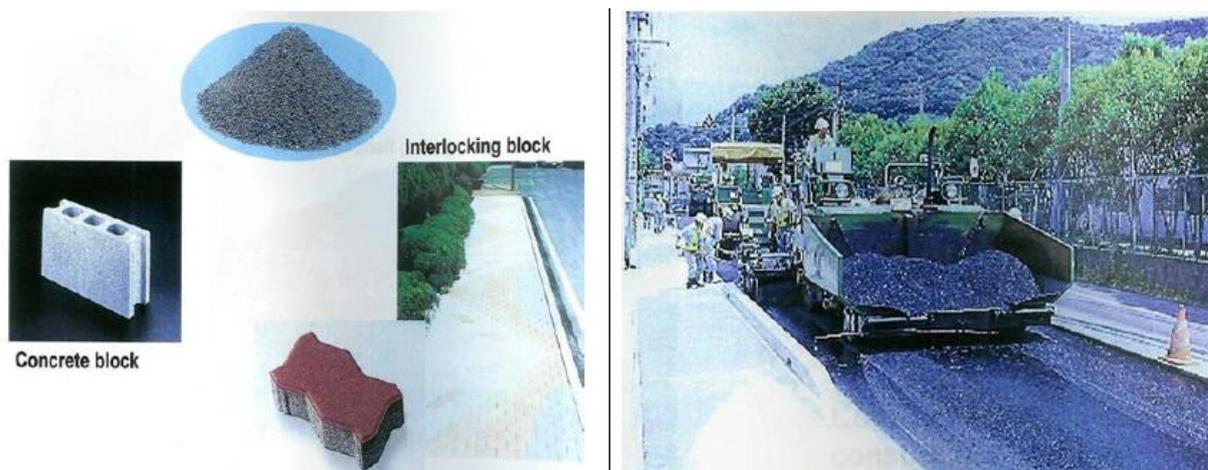
Segundo Vehlow (2015), os mecanismos de controle típicos referem-se à lavadores com sistemas dosadores de Cal para controle de SO_x, dosadores de Amônia (ou Ureia) para controle de NO_x por redução catalítica seletiva, uso de Carvão Ativado para controle de Dioxinas, Furanos e metais, e por fim, a utilização de filtros ou precipitadores eletrostáticos para remoção dos particulados.

As Cinzas que sobram do processo de Incineração referem-se às Cinzas Volantes (finas e leves que foram arrastadas pelos gases de Combustão) e Cinzas de Fundo (grossas e mais pesadas que se depositam nas superfícies da fornalha ou grelha). Elas são compostas majoritariamente por metais e óxidos de elementos químicos como SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, dentre outros, os quais podem ser dispostas em aterro sanitário ou solidificadas/estabilizadas em matrizes cerâmicas ou cimentícias.

Segundo Whiting et al. (2013), as Cinzas são armazenadas em pilhas ou leiras e deixadas por um período para quarentena. Em seguida, é processada e classificada em frações de diferentes tamanhos que podem ser usadas para diferentes usos, inclusive disposição em aterros sanitários. Normalmente esse material é utilizado na construção civil como aterro para estradas, confecção de blocos e outros projetos de infraestrutura, onde se mostrou particularmente eficaz quando ligada com cimento ou asfalto, reduzindo seus desgastes, sendo uma prática comum na Europa e na Ásia.

Dependendo da tecnologia empregada em uma URE, ou mediante parceria com empresas de interesse, as Cinzas poderão ainda serem fundidas, as quais produzirão um material de escória amorfa vitrificada, além de uma fração de metal. Essa fração metálica poderá ser recuperada e reciclada. A escória amorfa vitrificada poderá ser utilizada na construção civil (Figura 3), possuindo baixíssima lixiviabilidade, sendo um material relativamente homogêneo (WHITING et al., 2013).

Figura 3 - Aplicações da escória vitrificada no Japão



Fonte: Whiting et al. (2013).

No Reino Unido, por exemplo, há uma forte demanda ao uso dessas Cinzas, tendo, inclusive, sido levantado que riscos de sua utilização são muito baixos, constatando-se que a concentração de Dioxinas não era superior à dos solos circundantes e todos os outros poluentes ambientais estavam dentro de limites aceitáveis conforme a legislação local (WHITING et al., 2013).

5.2.2. Principais tecnologias para Incineração de resíduos sólidos

Segundo o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), as principais tecnologias para Incineração existentes no mercado são as de *Mass Burning*, forno rotativo e leito fluidizado (INEA, 2017), as quais são as seguir caracterizadas:

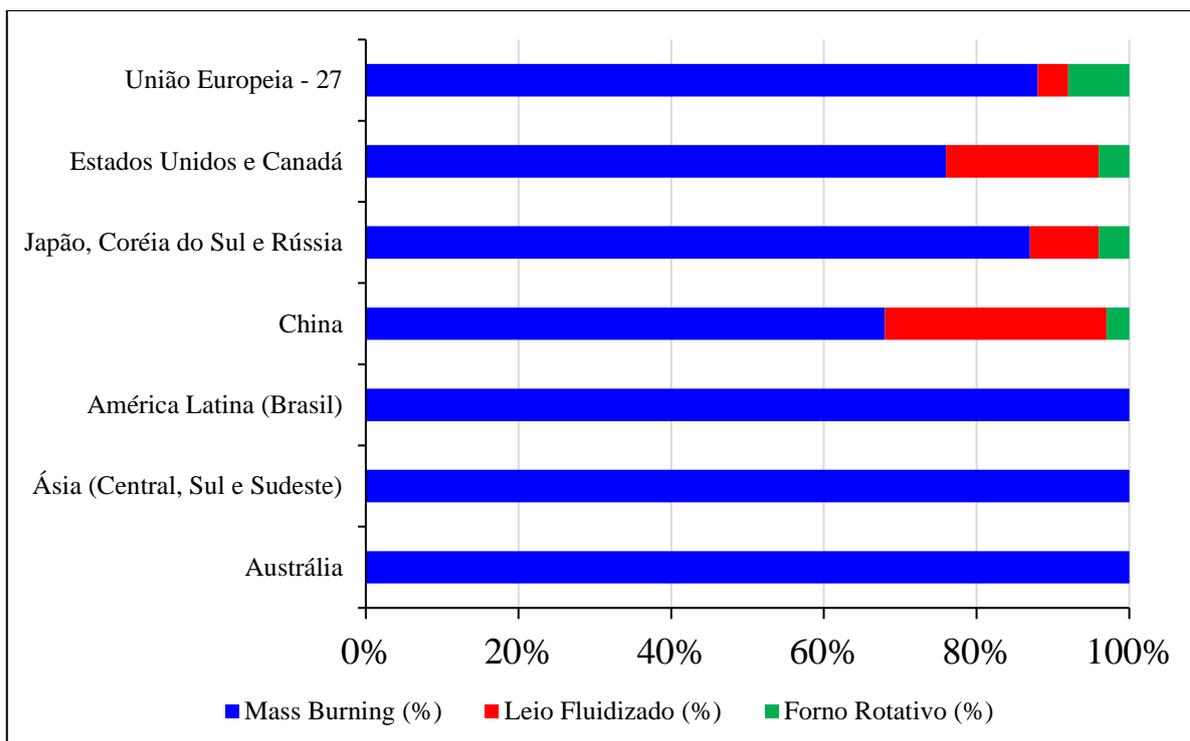
- i. *Mass Burning*: tecnologia que utiliza os resíduos sólidos como combustível em Caldeiras dotadas de grelhas mecanizadas (móveis) que revolvem a massa de resíduos durante o processo de queima. A Energia Térmica gerada é aproveitada para geração de Vapor que, por sua vez, é utilizado para a produção de Energia Elétrica por meio de um conjunto turbogerador. É a tecnologia mais utilizada em Unidades de Recuperação de Energia (URE) em todo o mundo, com mais de 750 plantas em operação na Europa, Ásia e América do Norte. A imensa maioria dos resíduos direcionados para tratamento térmico no mundo são processados por *Mass Burning*;

- ii. Leito fluidizado: sistema no qual os resíduos são queimados sobre uma grelha que possui leito composto por partículas inertes como areia ou Cinzas. Quando o ar é bombeado através do leito, o material se comporta como um fluido. Essa tecnologia é mais adequada para quantidades reduzidas de resíduos pré-selecionados por tamanho;
- iii. Forno rotativo: a inclinação do forno permite que os resíduos caminhem ao longo de sua seção, enquanto o movimento rotativo das paredes origina uma circulação constante da carga que facilita a sua Combustão completa. Os resíduos são carregados na extremidade do forno no mesmo ponto em que podem ser utilizados queimadores auxiliares para fornecerem a Energia necessária ao processo. Como a Combustão na câmara rotativa não é geralmente completa, estes incineradores possuem normalmente uma segunda câmara de Combustão, dita pós-Combustão, onde os gases acabam de ser queimados permitindo uma elevação da sua temperatura.

Conforme pode ser verificado na Figura 4, a tecnologia de Incineração por *Mass Burning* é a predominante em todas as regiões do mundo que utilizam recuperação energética de resíduos. Os incineradores de grelha mecanizada, utilizados na tecnologia de *Mass Burning*, empregam uma abordagem de alimentação que requer um pré-processamento mínimo dos resíduos, utilizando peneiramento ou outra forma de separação. Os incineradores de leito fluidizado só podem lidar com resíduos que sofreram trituração e redução de tamanho, além da separação básica (MAKARICHI, JUTIDAMRONGPHAN E TECHATO, 2018).

Devido à sua capacidade de lidar com grandes volumes de resíduos que foram submetidos a um pré-processamento mínimo, a tecnologia de *Mass Burning* é dada como superior as demais tecnologias. Esse pré-processamento mínimo refere-se à retirada de materiais volumosos, perigosos ou explosivos que podem danificar os equipamentos. Além dessas vantagens, a Incineração por *Mass Burning* também é capaz de acomodar grandes variações na composição e no poder Calorífico dos resíduos, apresentando estabilidade operacional (MAKARICHI, JUTIDAMRONGPHAN E TECHATO, 2018).

Figura 4 – Tecnologias utilizadas em plantas de Incineração de resíduos sólidos no mundo.



Fonte: Modificado de Makarichi, Jutidamrongphan e Techato (2018).

5.2.3. Conversão da Energia Térmica em Energia Elétrica Útil

Todas as tecnologias WtE permitem a recuperação de Energia a partir de resíduos, mas os meios pelos quais a Energia é recuperada são diferentes. Para praticamente todas as instalações de Combustão existentes, a queima de resíduos produz gases de Combustão em altas temperaturas, que são utilizados para gerar Vapor, o qual irá acionar uma Turbina e um gerador para gerar Eletricidade. Segundo WSP (2013a), uma parte da Eletricidade gerada é utilizada para satisfazer as necessidades internas da instalação, a chamada "carga parasitária" ou "*the parasitic load*", sendo o restante exportado para a rede. O Calor também pode ser exportado sob a forma de Vapor ou na geração de Água quente.

A recuperação energética de resíduos em plantas que utilizam a Incineração poderá ter as seguintes configurações em termos de Energia recuperada:

- recuperação somente de Energia Elétrica;
- recuperação de Energia Elétrica e Calor, conhecida como Produção Combinada de Calor e Energia Elétrica (CHP);
- Somente Calor.

Dentre as configurações, a mais utilizada é aquela que gera somente Energia Elétrica, apesar de sua eficiência máxima atingível ser consideravelmente inferior à das centrais que fornecem Calor, ou Calor com Energia Elétrica. Essa situação ocorre porque a Eletricidade é mais valiosa do que o Calor, não requer que o gerador esteja localizado próximo do utilizador final e porque as unidades são financiadas, em parte, pelas vendas de Energia Elétrica, o que é necessário para dar confiança aos investidores (WSP, 2013).

Nota-se que, ao utilizar o termo eficiência, ela pode se referir à líquida ou à bruta. A eficiência líquida refere-se à proporção da Energia Elétrica exportada pela usina (excluindo a Energia consumida pela própria usina), em relação ao total de Energia consumida pela usina; já a eficiência bruta refere-se à proporção da Energia Elétrica produzida pela usina em relação a Energia total fornecida à mesma. Nesse contexto, a conversão da Energia Térmica em Energia Elétrica em plantas de URE, que promovem a Incineração de resíduos com grelhas móveis (tipo *Mass Burning*), equipadas com Caldeira, Trocadores de Calor e Turbina a Vapor, será descrita adiante no texto.

Nesse tipo de instalação, a recuperação de Energia começa pelas paredes que envolvem a grelha de Combustão dos resíduos. Estas paredes possuem tubos que transportam Água pressurizada, captando o Calor ou a Energia Térmica gerada pela queima, que é transportada. Assim sendo, a Água recebe Calor através da superfície de aquecimento e, com o aumento da temperatura, o seu ponto de ebulição é atingido, transformando-se em Vapor sob uma determinada pressão, superior à atmosférica. A Água fervente sobe pelos tubos da parede d'Água e entra em um tambor acima da câmara de Combustão, onde a Água e o Vapor são separados, com a Água retornando através de tubos de queda para a Caldeira. O Vapor do tambor é passado para um Trocador de Calor, chamado Superaquecedor, que aumenta ainda mais a temperatura do Vapor antes que o fluido quente entre na Turbina a Vapor (BREEZE, 2018). Na Turbina, o Vapor d'Água é direcionado para um conjunto de palhetas que estão fixadas em uma roda, realizando assim, um trabalho mecânico, desse modo, a Energia Térmica do Vapor é convertida em Energia mecânica dentro da Turbina. No funcionamento de uma Turbina a Vapor, o Vapor será direcionado para as palhetas, onde dentro das mesmas ocorre uma pressão maior e por fora, uma pressão menor do Vapor. Essa diferença de pressão ajudada pela Força de Ação e Reação de Newton, cria uma espécie de força de sustentação, e é essa força a responsável por fazer o rotor girar (TURBIVAP, 2023). O Vapor que sai da Turbina é então condensado de volta, e essa Água retorna à Caldeira, passando por um Trocador de Calor

de baixa temperatura, chamado Economizador, que captura o último Calor nos gases de Combustão antes que eles entrem nos sistemas de controle de emissão da planta.

A eficiência de uma Turbina a Vapor depende da temperatura e da pressão do Vapor. A temperatura é particularmente crucial para um motor térmico, porque a eficiência depende da queda de temperatura através da Turbina de Vapor. Para uma Turbina de Condensação, a temperatura de saída será fixada à temperatura ambiente, tendo em vista que a única forma de aumentar a eficiência é aumentar a temperatura do Vapor de entrada (WSP, 2013).

Segundo Breeze (2018), a natureza corrosiva dos gases de Combustão gerados numa URE significa que tanto as temperaturas como as pressões devem ser limitadas, caso contrário ocorrerá uma corrosão excessiva nos elementos de captação de Energia, tais como os Superaquecedores no percurso dos gases de Combustão. Isto limita inevitavelmente a temperatura e pressão do Vapor que pode ser alcançado. Em consequência, a maioria das URE são relativamente ineficientes segundo as normas modernas e as características reais do Vapor que podem ser utilizadas dependerão do tipo de resíduos a serem queimados. Por exemplo, na Ásia, as características do Vapor têm sido tradicionalmente limitadas a 40 bar e 400°C, devido ao elevado teor de plásticos e ao elevado teor de Água de grande parte dos resíduos, o que encoraja a corrosão. Estas condições de Vapor limitam a eficiência a cerca de 22% a 25%.

Segundo WSP (2013), a eficiência bruta de uma planta de recuperação energética por Incineração geralmente varia de 15 a 25%, dependendo do tamanho da planta e das características do Vapor. As eficiências são relativamente baixas em comparação com as usinas fósseis (grandes usinas de combustíveis fósseis com Turbina a Vapor podem atingir eficiências líquidas superiores a 40%), devido ao menor Poder Calorífico Inferior⁴ (PCI) dos resíduos e às limitações já citadas, referentes às condições corrosivas geradas pelos gases ácidos provenientes da Combustão. Apesar disso, eficiências de até 30% (para unidades que produzem somente Eletricidade) são alcançáveis usando técnicas de recuperação de Energia mais avançadas.

Segundo WSP (2013), um número significativo de plantas nos EUA e na Europa que operam Caldeiras a alta pressão (em torno de 60 bar) recentemente implementaram Caldeiras de alta pressão semelhantes visando ao aumento da eficiência térmica geral das plantas de

⁴ Calor liberado durante o processo de Incineração, estando toda a Água resultante no estado gasoso, a qual será arrastada pelo mecanismo de exaustão do processo.

recuperação energética. No desenvolvimento de técnicas visando aumentar a eficiência energética, destacam-se:

- introdução de reaquecimento de Vapor em múltiplas Turbinas, de modo que o Vapor que sai de uma primeira Turbina a Vapor de alta pressão seja aquecido novamente antes de entrar na próxima Turbina de média ou baixa pressão. Esta é uma opção de custo relativamente alto;
- controle avançado do processo para garantir a queima completa dos resíduos orgânicos, utilização de menor quantidade de excesso de ar e a recirculação dos gases de Combustão;
- aumento da pressão e da temperatura do Vapor, o que aumentará sua Entalpia e permitirá que maior Energia seja recuperada na Turbina a Vapor;
- operação Combinada de Calor e Energia (CHP), onde a recuperação de Calor e Eletricidade pode produzir o maior aumento de eficiência. O Vapor pode ser extraído da Turbina e usado diretamente para aquecimento de processo na indústria ou usado para produzir Água quente para uma rede de aquecimento urbano.

A Tabela 5 apresenta dados de pressão do Vapor, temperatura do Vapor e eficiência bruta para algumas URE que operam em alta pressão.

Tabela 5 - Pressão, temperatura do Vapor, eficiência.

Localização da planta	Pressão do Vapor (bar)	Temperatura do Vapor (°C)	Eficiência bruta (%)
Amsterdam (Holanda)	130	440	30,0
Brescia (Itália)	73	450	27,0
Herigen (Alemanha)	81	520	29,7
Nápoles (Itália)	90	500	30,2
Rüdersdorf (Alemanha)	90	420	29,9
Reno Nord (Dinamarca)	50	425	26,5
Riverside (Reino Unido)	50	427	27,0

Fonte: WSP (2013).

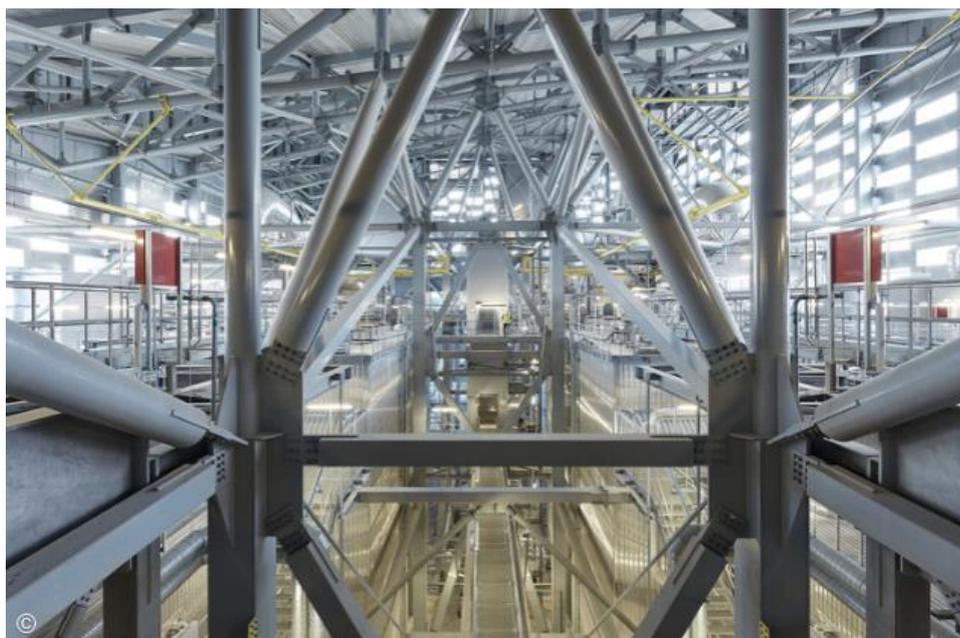
Para exceder uma eficiência global de 30%, sem a entrada de uma fonte externa de Calor, as plantas, geralmente, precisam exportar Calor combinado com Eletricidade. Quando uma URE é configurada para exportar Calor e Eletricidade (CHP), eficiências de cerca de 70% são teoricamente alcançáveis (WSP, 2013). Esse é o caso da Usina *Amager Bakke* (em Dinamarquês) – ou *Copenhill* (em Inglês), ilustrada nas Figuras 5 e 6, a qual gera Calor e Energia Elétrica à cidade de Copenhague, na Dinamarca.

Figura 5 - URE *Copenhill* – Copenhague, Dinamarca.



Fonte: Edo (2021).

Figura 6 - URE *Copenhill* internamente.



Fonte: ArchDaily (2019).

A URE *Copenhill* opera 24 horas por dia, durante 365 dias por ano, extraindo Energia Calorífica de até 11.5 GJ por tonelada de resíduos sólidos não recicláveis, através da Incineração de 430 mil a 560 mil toneladas/ano (EDO, 2021), sendo considerada por muitos, uma “URE-padrão”, seja pela quantidade de resíduos processados, pela eficiência energética ou pelos seus baixos indicadores de emissões atmosféricas – dentre eles: PM₁₀, SO₂, CO, NO_x, HCl, HF, Hg, Cd, Tl, Dioxinas e Furanos.

Segundo a *Power Technology* (2020), a quantidade total de resíduos e Biomassa queimada na *Copenhill* foi de 357.000 t e 443.000 t em 2017 e 2018, respectivamente. A produção total de Energia foi de 900.000 MWh e 1.259.000 MWh em 2017 e 2018, respectivamente. A instalação inclui duas linhas de fornalha conectadas a uma Caldeira e um sistema conjunto de Turbina e Gerador. Cada linha de combustível tem capacidade para queimar 35t de resíduos por hora. Segundo Edo (2021), a Turbina e o Gerador da usina de *Copenhill* são alimentados com Vapor a 440°C, a 70 bar, com eficiência térmica líquida da planta em 107%, com base no PCI dos resíduos.

Quando o PCI é calculado, a Energia necessária para a evaporação da Umidade no combustível é subtraída da Energia total liberada no processo de queima. Assim sendo, em uma planta com condensação de gases de Combustão, parte dessa Energia de evaporação é recuperada, o que, pelas definições, pode resultar em uma eficiência maior que 100%.

5.2.4. Contextualização das Unidades de Recuperação de Energia (UREs)

Segundo relatório *Global Waste-to-Energy 2021-2026*, as UREs possuem os objetivos de saneamento, eliminação de odores, evitar a propagação de doenças, além da recuperação do máximo possível de Energia dos resíduos. Essas instalações vêm buscando continuamente maior eficiência, tornando-se aptas à concorrência na substituição ao uso de combustíveis fósseis para geração de Energia. Além da geração de Energia Elétrica, recuperação de metais para reciclagem e redução das emissões de GEE em comparação as unidades fósseis, essas instalações contribuem significativamente para uma economia verde nas comunidades em que atuam (MORDOR INTELLIGENCE LLP, 2020).

Segundo Themelis & Bourtsalas (2019), os fatores de aquecimento global dos RSU, quando normalizados em função da Energia gerada (kg eq.CO₂/MWh), são menores do que aqueles dos combustíveis fósseis, o que é um fator importante para tomada de decisão. Esse fato deve-se ao conteúdo de Carbono derivado de biomassa presente nos resíduos sólidos, o

qual possui balanço de Carbono igual a zero. Já o Carbono existente nos combustíveis fósseis não pertence ao ciclo natural desse elemento e está sendo adicionado na atmosfera por ações humanas, contribuindo diretamente para o aquecimento global e demais consequências.

Segundo Yuri Schmitke, Presidente da Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), a utilização de UREs ao redor do mundo tem sido cada vez mais adotada por países desenvolvidos, sendo um setor que apresenta as seguintes características (PORTAL BRASIL SOLAR, 2021):

- i. Existem atualmente 2.448 UREs em todo o mundo;
- ii. Cerca de 35% estão localizadas na Europa e 54% localizadas na Ásia;
- iii. O Japão lidera com 1.063 usinas, seguido pela China (419), Coréia do Sul (298), França (127), Alemanha (98), Estados Unidos (75), Reino Unido (54), Itália (39), Suécia (34) e Dinamarca (27);
- iv. Em torno de 98% dessas plantas utilizam a Incineração, sendo os 2% restantes referentes a unidades que utilizam gaseificação e pirólise no tratamento de resíduos sólidos;
- v. As UREs estão localizadas nos centros de muitas cidades ao redor do mundo, sendo consideradas mais limpas que termoelétrica que utilizam combustíveis fósseis. Essas unidades reduzem em oito vezes as emissões de GEE, comparando-se com aterros sanitários (que capturam CH₄), eliminam a contaminação da Água potável causada pelos lixiviados de aterros e reduzem significativamente o gasto associado com a saúde pública decorrente de contato inadequado com o RSU.

Segundo a ABREN (2022), no Brasil temos uma projeção de potência instalada de 206 MW nas UREs que estão em diferentes estágios de licenciamento. A Tabela 6 apresenta esses projetos de UREs e suas características.

Tabela 6 – Características dos projetos de URE existentes no Brasil em 2022.

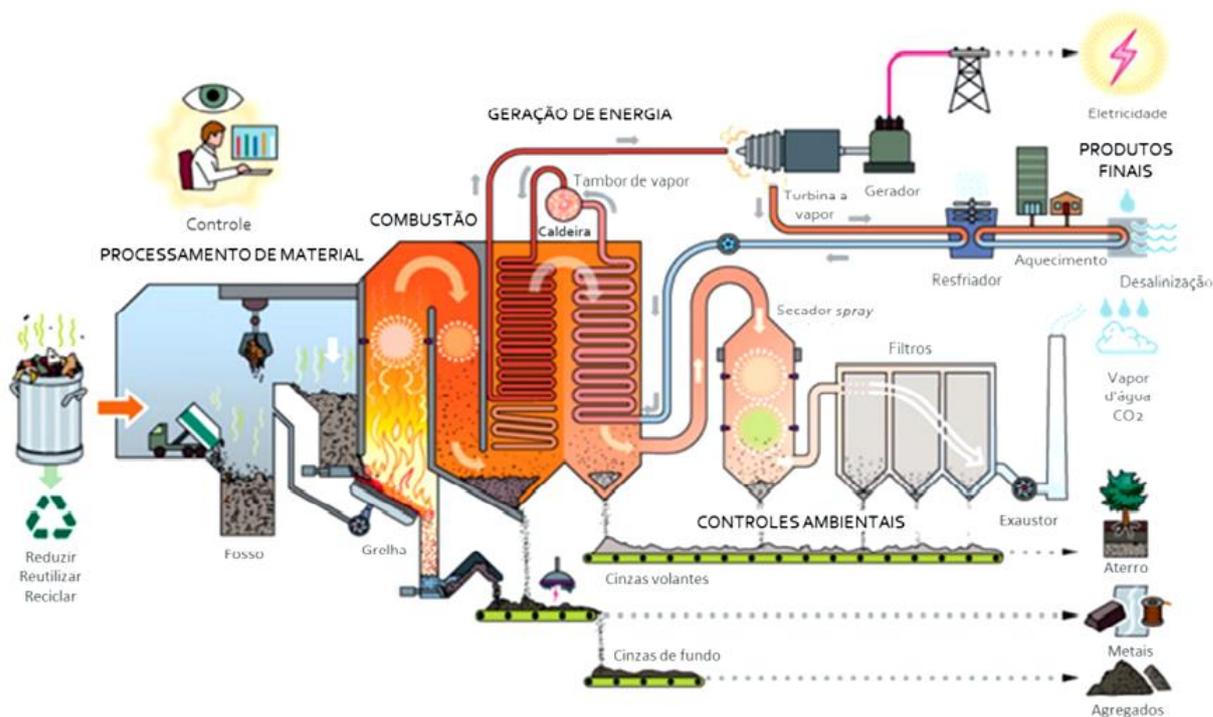
URE	Localidade	Potência instalada	Capacidade de processamento	Tecnologia	Fase do licenciamento
Mauá	Mauá, SP	80 MW	3.000 toneladas/dia	<i>Mass Burning</i>	Possui LP
Barueri	Barueri, SP	20 MW	875 toneladas/dia	<i>Mass Burning</i>	Possui LI
Caju/RJ	Rio de Janeiro, RJ	31 MW	1.300 toneladas/dia	<i>Mass Burning</i>	Possui LP
Consimares	Região metropolitana de Campinas, SP	20 MW	700 toneladas/dia	<i>Mass Burning</i>	Possui LP
Brasília	Brasília, DF	55 MW	2.000 toneladas/dia	<i>Mass Burning</i>	Em busca da LP

Fonte: Modificado de Schmitke (2021).

Segundo ABREN (2022), há questões que envolvem os projetos de URE, como a finalização do licenciamento ambiental e financiamento para começarem as obras, o que é uma expectativa de mercado. No caso dos investimentos se realizarem e essas usinas entrarem em operação, entre 2027 e 2028, as plantas terão capacidade de tratamento de mais de 7,8 mil toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos. Atualmente não existe nenhum projeto de URE operando no Brasil, no entanto a ABREN indica um potencial de construir 120 usinas, o que daria a capacidade de suprir 3% da demanda nacional de Eletricidade.

A configuração básica de uma URE por Incineração utilizando grelhas mecanizadas está ilustrada na Figura 7. Nesse tipo de URE, é realizado o tratamento térmico dos resíduos sólidos não-recicláveis em torno de 850°C, gerando Vapor Superaquecido, o qual possui Energia suficiente para sofrer expansão no interior de grupos turbogeradores, gerando Energia Elétrica com capacidade de abastecer a própria URE e/ou instalações públicas e privadas nas proximidades. Além disso, o Vapor que entregou Energia ao turbogerador poderá ainda passar por uma Caldeira de recuperação (resfriador), ainda com Energia Térmica suficiente para gerar Água quente ou Vapor a ser aproveitado (CNI, 2019).

Figura 7 – Esquemática de uma URE convencional de grelhas mecanizadas.



Fonte: CNI (2019).

Segundo Yin, Rosendahl e Kaer (2008), o sistema de Incineração com grelhas é constituído por quatro partes principais: recepção dos resíduos e alimentação do incinerador, câmara de Combustão com a grelha mecanizada, sistema de ar e sistema de descarte de Cinzas. Na modalidade *Mass Burning*, no qual os resíduos são incinerados com pré-processamento mínimo, referente à remoção de partes de grande dimensão.

Por acionamento mecânico os resíduos são introduzidos na câmara de Combustão e imediatamente são sujeitos a um fluxo forçado de ar ascendente, as partículas de menor dimensão entram em Combustão na própria atmosfera da fornalha, enquanto as partículas de maior dimensão se depositam na superfície da grelha, onde são também queimadas. A grelha pode ser inclinada ou fixa, favorecendo a sucessiva exposição dos resíduos ao ambiente térmico, mediante o deslizamento gravitacional dos mesmos, desde o ponto de entrada na câmara de Combustão, até o compartimento de recolhimento das Cinzas (YIN, ROSENDAHL & KAER, 2008).

5.2.4.1. Unidade de Recuperação de Energia do Caju (URE-Caju)

Na cidade do Rio de Janeiro, o projeto da URE-Caju é proveniente da iniciativa privada, sendo a empresa CICLUS AMBIENTAL, responsável pelo empreendimento. Esse projeto é localizado na planta da ETR do Caju, na zona portuária da cidade, distante a, aproximados, 13 km do *Campus* Ilha do Fundão, distância esta que será considerada mais adiante no texto, com relação aos impactos da alteração da gestão atual para uma nova que passe a considerar o envio de parte dos resíduos não recicláveis da UFRJ para esta futura URE.

A URE-Caju possui desde 2019 a licença prévia concedida pelo INEA e poderá ser a primeira URE do país, com previsão de capacidade de processamento de cerca de 1.300 toneladas de resíduos/dia, gerando 31 MW de Energia Elétrica, o que é suficiente para abastecer, aproximados, 200 mil habitantes (CICLUS AMBIENTAL, 2022).

Segundo a CICLUS AMBIENTAL (2022), além do reaproveitamento energético a URE irá gerar um impacto positivo na gestão de resíduos tendo em vista a menor quantidade de viagens de carretas que são necessárias para levar os resíduos até o CTR-Rio. Como consequência da menor quantidade de resíduos recebida o aterro irá ter tempo de vida útil aumentado, além de gerar menos lixiviados e gases estufa. Outra consequência será a melhoria das condições de trânsito na cidade, além de menor emissão de poluentes atmosféricos e gases estufa no transporte rodoviário dos resíduos.

O projeto dessa URE refere-se à uma planta WtE, onde os resíduos coletados e geridos pela COMLURB serão tratados por Incineração. Está prevista uma vida útil do empreendimento de 20 anos, capacitada com a tecnologia de *Mass Burning* para atender a variações de carga e poder calorífico dos RSU (INEA, 2017).

A URE será caracterizada por incinerar, aproximadamente, 54,17 t/h de RSU para a geração de Energia Térmica de 120 MW, associado a uma Caldeira de Recuperação de Calor para geração de Vapor, que por sua vez alimentará um Turbogenerador a Vapor, de potência unitária bruta de 31 MW. Estima-se, assim, uma eficiência energética do ciclo completo da URE em, aproximadamente, 25% (INEA, 2017).

A Energia Térmica produzida pela queima dos RSU na fornalha da Caldeira será recuperada através da produção de Vapor. O sistema de Vapor e Condensado engloba a Caldeira, a Turbina Geradora e os demais equipamentos ligados a elas. Considerando o PCI de projeto (8 MJ/kg) estima-se que se produza cerca de 140 t/h de Vapor Superaquecido na Caldeira. Este será gerado a 420° C, a 65 bar, e seguirá para a Turbina Geradora de Eletricidade (INEA, 2017).

Em relação as emissões atmosféricas, levando em consideração o estudo de simulação da pluma de emissões previstas na fase de operação, a Área de Influência Direta (AID) da URE foi delimitada por um raio de 3,0 km no seu entorno, a qual encontra-se, em sua maior parte, ocupada por áreas construídas de todos os tipos – residências, comércio, indústrias ou infraestrutura pública. A estimativa de emissão dos poluentes considera que, durante a operação, os poluentes atmosféricos resultantes da Combustão serão submetidos a tratamento específico, composto por sistemas dosadores de Cal para controle de SO_x, Amônia (ou Ureia) para controle de NO_x, Carvão Ativo para controle de metais, Dioxinas e Furanos, além da utilização de filtros mangas, de tecido, para remoção dos particulados (INEA, 2017).

5.3. CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POR ANÁLISE TÉRMICA

A caracterização de um material refere-se ao processo de avaliação de suas propriedades (físicas, químicas, biológicas) e de seu comportamento, de modo a compreender suas qualidades e/ou defeitos. A partir do momento em que essas características e propriedades são conhecidas, pode-se aplicar o material em determinado processo, conhecendo antecipadamente seu comportamento, objetivando usos específicos (DENARI, 2013).

A análise térmica consiste em um conjunto de técnicas nas quais se acompanha a variação em uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura (IUPAC, 2014).

Em uma análise térmica, o Calor (trânsito de Energia Térmica) quando retirado ou fornecido de inúmeras substâncias como resíduos sólidos, combustíveis, alimentos, polímeros, fármacos, explosivos, entre outros, pode provocar mudanças, as quais podem ser de extrema importância, sendo úteis ou indesejáveis.

Quando determinada amostra é aquecida, podem ocorrer eventos térmicos referentes a mudanças físicas e químicas em sua estrutura. No caso de ocorrerem mudanças químicas, a quantidade de Calor fornecida é maior que a Energia das ligações químicas entre os átomos que compõem a amostra. No caso de mudanças físicas, o Calor fornecido não é suficiente para romper as ligações químicas, mas é superior à Energia de coesão, provocando, por exemplo, o amolecimento de um material inicialmente rígido.

A Tabela 7 resume os principais eventos térmicos que podem ocorrer com uma amostra durante uma análise térmica.

Tabela 7 – Principais eventos térmicos que podem ocorrer com uma amostra durante uma análise térmica.

Reagentes	Produtos	Evento Térmico
$A_{1(s)} \rightarrow$	$A_{2(s)}$	Mudança de fase
	$A_{(L)}$	Fusão
	$A_{(g)}$	Sublimação
	$B_{(s)} + \text{gases}$	Decomposição
	Gases	Decomposição
$A_{(v\u00edtreo)} \rightarrow$	$A_{(borrachoso)}$	Transição vítrea
$A_{(s)} + B_{(g)} \rightarrow$	$C_{(s)}$	Oxidação
		Redução
$A_{(s)} + B_{(g)} \rightarrow$	Gases	Combustão
		Volatilização/Sublimação
$A_{(s)} + \text{gases}_1 \rightarrow$	$A_{(s)} + \text{gases}_2$	Catálise heterogênea
$A_{(s)} + B_{(s)} \rightarrow$	$AB_{(s)}$	Adição
$AB_{(s)} + CD_{(s)} \rightarrow$	$AD_{(s)} + CB_{(s)}$	Decomposição dupla

Fonte: Denari (2013).

Segundo Brown (2011), as técnicas de análise térmica possuem como princípio básico a medição da variação de um dado parâmetro em função de uma programação controlada de temperatura e/ou tempo, sendo que os principais parâmetros são a massa (%), derivada da massa (%/min), diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{mg}$) e Entalpia (W/g).

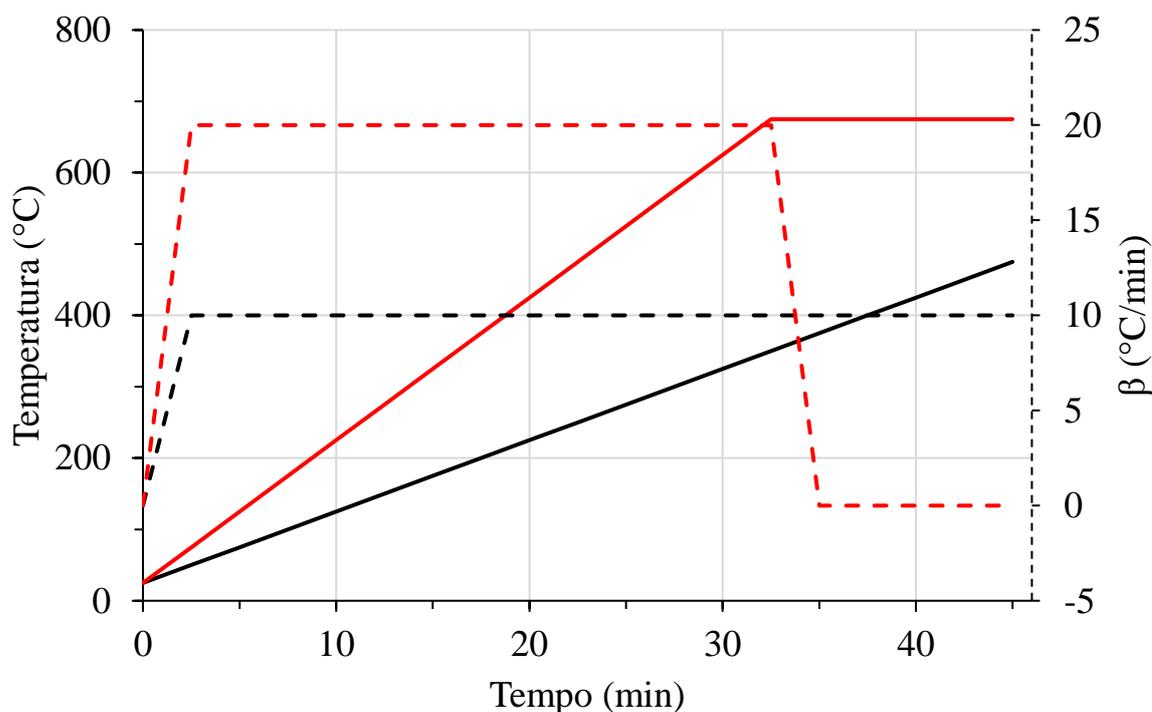
Dependendo do tipo de controle de temperatura a análise térmica poderá ser dinâmica, isotérmica ou modulada. Nesse estudo as análises dinâmica e isotérmica serão utilizadas e são descritas a seguir:

- i. **Análise Dinâmica:** pode ser representada por: $T = T_i + \beta t$ (sendo $\beta > 0$ ou < 0). É a mais convencional. Baseia-se em processar a amostra de uma temperatura inicial “ T_i ” até a temperatura de interesse “ T ”, aplicando-se uma razão de aquecimento ou um incremento da temperatura por tempo “ β ”, a qual é escolhida pelo operador do equipamento. A temperatura pode ser dada em $^{\circ}\text{C}$ e a razão de aquecimento em $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;

- ii. Análise Isotérmica: nesse caso a temperatura é uma constante, ou seja, a razão de aquecimento “ β ” é igual a zero. Normalmente esse tipo de análise é feito em conjunto com a análise dinâmica.

A análise dinâmica e a isotérmica serão referenciais às análises imediatas, as quais serão abordadas mais adiante neste texto. A Figura 8 apresenta um exemplo gráfico de análises dinâmicas e isotérmicas, onde a curva preta representa uma análise dinâmica de 25°C até 475°C, utilizando-se β de 10°C/min. Já a curva vermelha apresenta uma parte sendo dinâmica de 25°C até 675°C, utilizando β de 20°C/min, seguida de uma parte isotérmica com duração de 10 minutos onde β é igual a zero.

Figura 8 - Exemplo de análise térmica dinâmica e isotérmica (T indicada por linha cheia e β por linha tracejada).



Fonte: Viana (2020).

Dentro da análise térmica, as técnicas mais conhecidas são a Termogravimetria (TG), a Termogravimetria Derivada (DTG), a Análise Térmica Diferencial (DTA), a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a Análise de Gás Liberado (EGA), entre outras. Neste estudo, as técnicas utilizadas foram a TG, a DTG e a DSC, as quais estão descritas a seguir.

5.3.1. Termogravimetria (TG)

A Termogravimetria é uma técnica da análise térmica que mede e registra a perda ou ganho de massa de uma amostra quando ela é submetida a uma programação controlada de temperatura (IONASHIRO, 2004). Os experimentos são executados por meio de uma termobalança de elevada sensibilidade, reprodutibilidade e resposta rápida às variações de massa. Plotando-se os dados de variação de massa em função da temperatura é obtida a curva TG, a qual fornece informações relativas à composição, estabilidade térmica da amostra, dos produtos intermediários e do resíduo que sobra no final do experimento.

Nas análises termogravimétricas os fatores instrumentais e as características relacionadas às amostras podem influenciar a natureza, a precisão e a exatidão dos resultados experimentais. Os principais fatores experimentais são a razão de aquecimento β ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), atmosfera ou gás de arraste (Ar, Nitrogênio, Hélio, Dióxido de Carbono, etc.), vazão do gás de arraste (tipicamente 100 mL/min), composição do cadinho (alumina, platina, alumínio, cobre, ouro, safira, etc.), dimensões do cadinho e geometria do porta-amostra. Os principais fatores relacionados às características da amostra referem-se à quantidade, granulometria, forma cristalina, empacotamento, condutividade térmica, solubilidade dos gases liberados da amostra e Calor de reação envolvido (SILVA et al., 2007).

5.3.2. Termogravimetria Derivada (DTG)

A Termogravimetria Derivada refere-se à derivada primeira dos dados de termogravimetria (TG) em relação ao tempo, ou seja, é uma taxa de variação da massa com o tempo, ou $\frac{dm}{dt}$. Plotando-se os dados dessa derivada em função da temperatura é obtida a curva DTG. Nessa curva, os "degraus" correspondentes às variações de massa da curva TG são substituídos por picos que determinam áreas proporcionais às variações de massa, tornando as informações, visualmente, mais acessíveis e com melhor resolução.

Apesar da curva DTG trazer as mesmas informações que a TG, ela permite: verificar o número de etapas de perda de massa por meio do número de picos DTG; a partir da altura do pico, a qualquer temperatura, obter a variação de massa naquela temperatura; obter as temperaturas correspondentes ao início e final da reação com maior exatidão; e calcular a variação de massa no caso de sobreposição de reações (SILVA et al., 2007).

5.3.3. Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Calorimetria exploratória diferencial é uma técnica na qual se mede a diferença nos fluxos de Calor ($W = J/s$) em uma amostra e uma referência inerte, em função da temperatura, enquanto ambos estão submetidos a uma programação controlada de temperatura (IONASHIRO, 2004). Plotando-se os dados de fluxo de Calor em função da temperatura é obtida a curva DSC.

Quando uma amostra sofre algum tipo de mudança no estado físico ou químico, ocorre a liberação ou absorção de Calor, o que pode ser medido pela curva DSC, que permite avaliar as variações de Entalpia que ocorrem com a amostra durante o processamento térmico. Assim, pela área de um pico existente na curva DSC é obtida a Entalpia do evento térmico respectivo, sendo ele exotérmico ou endotérmico.

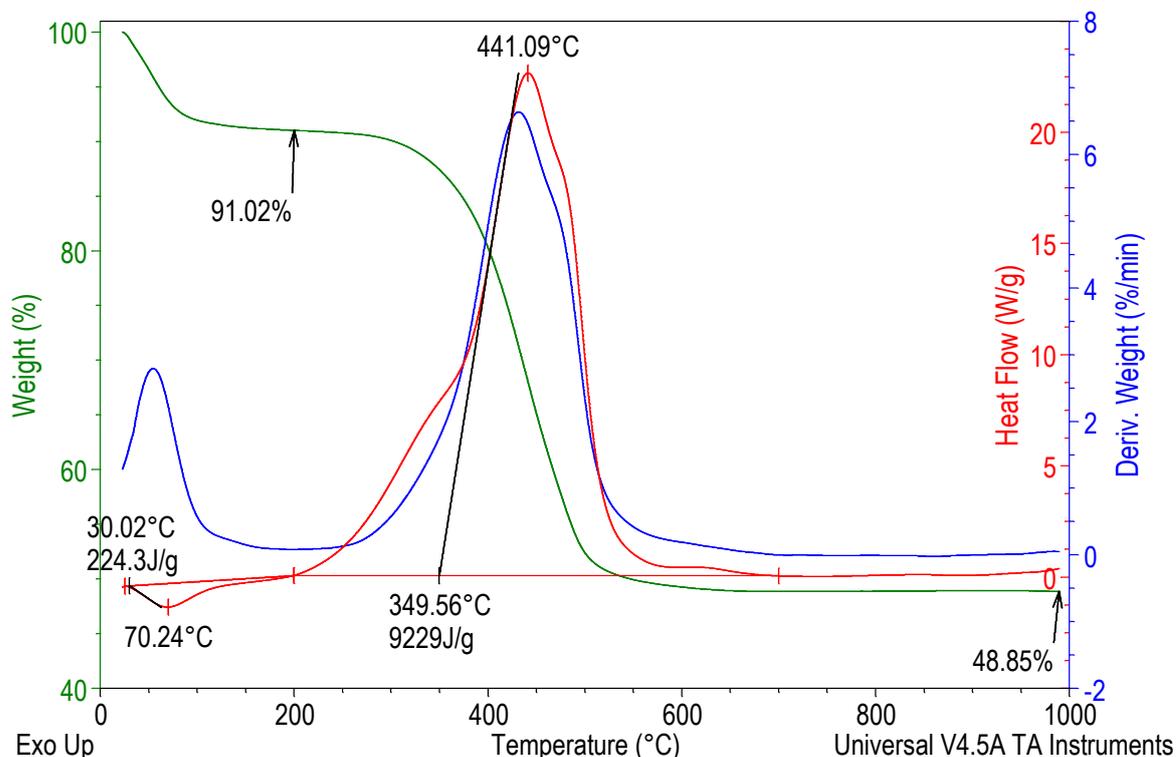
Segundo Silva et al. (2007), os equipamentos de DSC funcionam baseados em duas diferentes configurações:

- i. DSC por fluxo de Calor: a amostra e referência são aquecidas por uma única fonte de Calor e a temperatura é medida de forma individual por termopares. A variação de temperatura, em um dado momento, é proporcional à variação de Entalpia;
- ii. DSC por compensação de potência: a amostra e referência são aquecidas por fontes idênticas, mas separadas, em condições isotérmicas. Quando a amostra sofre alteração de temperatura em eventos endotérmicos ou exotérmicos, os termopares detectam a diferença e o equipamento modifica a potência de entrada de um dos fornos de modo a igual a temperatura de ambos.

Ainda conforme Silva et al. (2007), é importante a associação de dados provenientes dos ensaios de TG, DTG e DSC, para melhor caracterização de materiais, visto que a TG e a DTG indicam eventos térmicos relacionados a variações de massa, enquanto a DSC detecta a Entalpia de eventos endotérmicos ou exotérmicos associados ou não à perda de massa. Por exemplo, eventos térmicos de origem física, como mudança de estado físico (fusão), podem ser inequivocamente atribuídos a partir da curva DSC, desde que na mesma faixa de temperatura não forem observados, nas curvas TG e DTG, eventos de perda de massa.

Como exemplificação da caracterização utilizando análise térmica, na Figura 9 são apresentadas as curvas TG, DTG e DSC para uma amostra aleatória de carvão (tipo sub-betuminoso⁵, extraído da região de Candiota⁶, RS) analisada em atmosfera em ar.

Figura 9 - Curvas TG, DTG e DSC para amostra de carvão sub-betuminoso analisada em atmosfera em ar.



Fonte: Viana (2020).

Conforme a Figura 9, as curvas TG, DTG e DSC foram plotadas utilizando nas ordenadas, respectivamente, %, $\frac{\%}{\text{min}}$ e $\frac{\text{W}}{\text{g}}$, em função da temperatura. Conforme a curva DTG são verificados dois picos, ou seja, duas etapas de perda de massa, sendo a primeira referente a perda de Umidade do carvão e a segunda referente a Combustão do carvão. Conforme a curva

⁵ Os diversos estágios de carbonificação, do menor para o maior rank, são dados pelo esquema: turfa → sapropelito → linhito → carvão sub-betuminoso → carvão betuminoso → antracito. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito (BORBA, p.1, 2001).

⁶ Somente a Jazida de Candiota (RS) possui 38% de todo o carvão nacional. Como se trata de um carvão de qualidade inferior, é utilizado apenas na geração de Energia termoelétrica e no próprio local da jazida, conforme informa o Serviço Geológico do Brasil-SGB (BRASIL, 2022).

DSC, a perda de Água gera um pico endotérmico de Entalpia de $224,3 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ e a Combustão gera um pico exotérmico de Entalpia de $9229,0 \text{ J/g}$, o que resulta numa Entalpia de queima do carvão de: $\left(9229,0 \frac{\text{J}}{\text{g}} - 224,3 \frac{\text{J}}{\text{g}}\right) = 9.004,7 \frac{\text{J}}{\text{g}}$. Pela curva TG é possível afirmar que o material sofre perda de massa relevante no intervalo entre 30°C e 700°C , além disso possui Umidade de 8,98% e massa de Cinzas (material que sobra, a 1000°C) de 48,85%.

Nesta dissertação será utilizada a análise térmica para caracterização e estimativa da Entalpia do processo de queima dos resíduos. Optou-se por utilizar o termo “processo de queima” e não Combustão ou Incineração. Essa escolha foi feita porque durante a queima dos resíduos podem ocorrer a secagem, decomposição e a Combustão em si, ou seja, é um processo subdividido onde a Combustão faz parte de um conjunto de eventos. Além disso, o termo Incineração não foi escolhido porque este tipo de tratamento térmico é aplicado em larga escala, uma situação bem diferente daquela que ocorre durante uma análise térmica, quando são utilizados apenas miligramas de material, neste caso os resíduos.

Apesar dessa diferença de escala, o fato de os resíduos terem sido coletados, preparados e analisados por TG, DTG e DSC – com a posterior interpretação das curvas para estimar a Entalpia do processo de queima – é preferível em relação a utilizar dados da literatura. Além disso, os dados obtidos servirão como uma previsão de como os resíduos irão se comportar quando utilizados em uma Unidade de Recuperação Energética, o que é necessário e importante para segurança do empreendimento.

5.3.4. Análise Imediata

Quando se considera a conversão térmica de amostras sólidas com potencial de geração de Energia por Incineração, como o carvão, a biomassa e resíduos sólidos, a análise imediata é um dos métodos de caracterização mais importantes. Na análise imediata são determinados os percentuais Umidade, material volátil, Carbono Fixo e Cinzas. Essas características afetam o comportamento térmico de combustíveis sólidos e de projetos de plantas industriais de conversão térmica que os utilizam.

Nesse sentido, altos teores de Umidade diminuem o rendimento da Incineração e influenciam propriedades como o Poder Calorífico Inferior (PCI), pois esse decresce com o aumento da Umidade. Altos teores de material volátil se relacionam com o aumento da reatividade do combustível, pois quanto maior for seu valor, maior será a reatividade, ou seja, a amostra irá queimar com maior facilidade (GARCÍA et al., 2013).

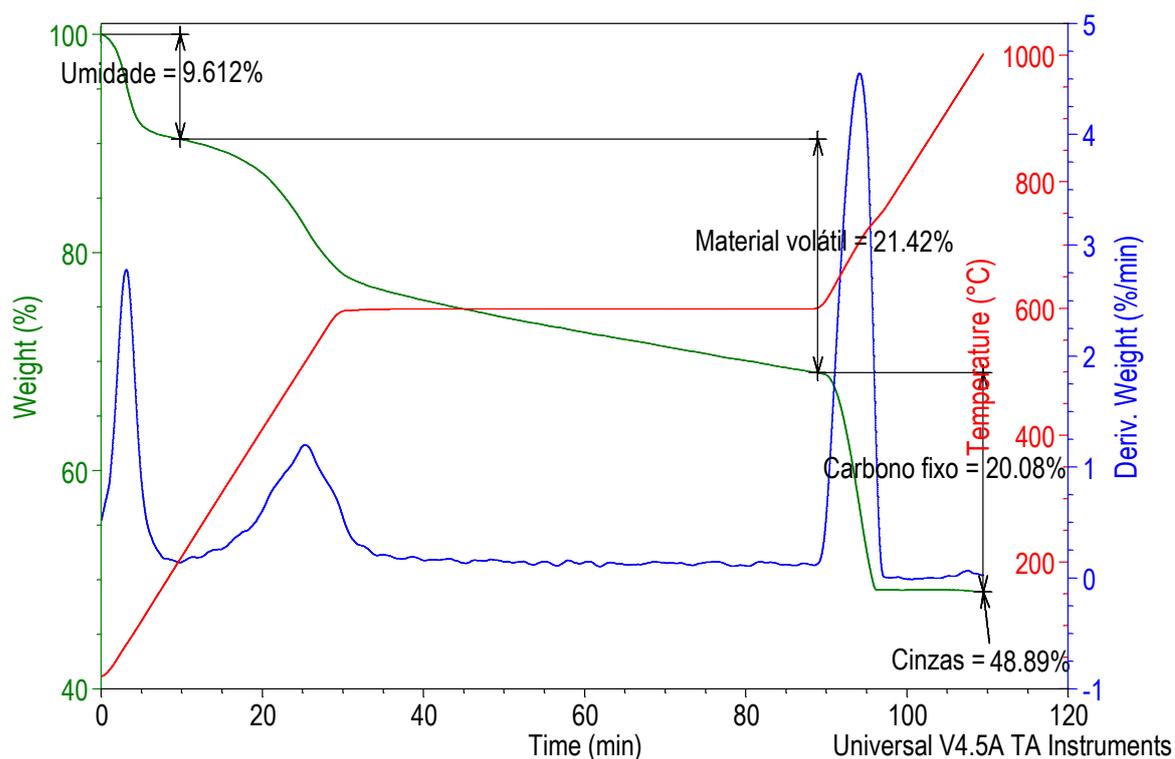
O Carbono Fixo é o resíduo combustível deixado após a liberação da Umidade e do material volátil, o qual consiste principalmente de material carbonáceo mais estável e pesado, embora contenha ainda alguns elementos voláteis não liberados (Oxigênio-O₂, Hidrogênio-H₂, Nitrogênio-N₂, Enxofre-S, etc.). As Cinzas englobam todos os minerais incombustíveis e são compostas basicamente de KCl, NaCl, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, dentre outros óxidos. O seu teor influencia profundamente os custos de transporte, manuseio e gerenciamento do processo (GARCÍA et al., 2013).

Tradicionalmente a Análise Imediata é realizada seguindo os procedimentos descritos nas normas da ASTM (ASTM E-871, para Umidade; ASTM E-830, D-1102 e UNE-EN 14775, para Cinzas; ASTM E-872 e ASTM E- 1755, para material volátil), sendo o Carbono Fixo obtido por diferença (DEMIRBAS, 2004; KHALIL et al., 2008). Como todos esses métodos são demorados, e baseiam-se no aquecimento de uma amostra em diferentes condições específicas, sendo os percentuais obtidos por diferença de massa, a utilização de Termogravimetria é uma opção útil e rápida (MAYORAL et al., 2001; WARNE, 1991; SADEK & HERRELL, 1984).

Em termos práticos, a análise térmica é utilizada para obtenção dos percentuais da Análise Imediata, com experimentos conduzidos em atmosfera inerte para medir Umidade e material volátil, e em atmosfera oxidante para medir Carbono Fixo e Cinzas (GARCÍA et al., 2013).

Um exemplo de análise imediata para uma amostra aleatória de carvão (amostra cuja caracterização por análise térmica já foi apresentada na Figura 9) é apresentado na Figura 10. Nesta figura são exibidas as curvas TG, DTG e de temperatura, em função do tempo. Os parâmetros de análise utilizados levaram em consideração a proposição de García et al. (2013), com a utilização de atmosfera de nitrogênio para estimar Umidade e material volátil, e atmosfera em ar para estimar o Carbono Fixo e as Cinzas.

Figura 10 - Análise Imediata para amostra de carvão sub-betuminoso.



Fonte: Viana (2020).

Como o experimento foi conduzido em atmosfera inerte (até o final da isoterma em 600°C), é possível estimar a Umidade (9,6%) e o material volátil (21,4%) existente na amostra. Após a isoterma em 600°C, a atmosfera do experimento foi modificada para ar, provocando a imediata Combustão do Carbono Fixo (20,1%) no material residual, sobrando ao final do teste as Cinzas (48,9%), um material estável constituído, majoritariamente, por óxidos inorgânicos.

6. METODOLOGIA

Os subitens a seguir descrevem a metodologia utilizada nesta dissertação, o que irá incluir o diagnóstico do sistema de gestão de resíduos sólidos na UFRJ, a coleta, o preparo e a caracterização dos resíduos por análise térmica e imediata, a estimativa da Entalpia do processo de queima dos resíduos, a conversão da Entalpia para Energia Elétrica útil, além da estimativa do PAG da gestão de resíduos atual e da gestão proposta.

6.1. DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ

Primeiramente, foi feita pesquisa de campo sobre quais são os resíduos gerados, seus percentuais, formas de destinação e disposição final ambientalmente adequada, além da logística de transporte dos mesmos.

Verificou-se junto aos respectivos departamentos de gestão de resíduos sólidos da UFRJ quais os tipos de resíduos e em quais unidades são gerados, quais são suas frações recicláveis ou não, especificando suas quantidades geradas no triênio de 2017 a 2019, contabilizados entre os meses de janeiro a dezembro.

Buscou-se pelo respectivo Plano de Gestão de Resíduos Sólidos (PGRS), conhecer as medidas previamente elencadas pelo setor responsável, visando à melhor disposição de cada tipo de resíduo sólido gerado, com foco nas formas de coleta, acondicionamento temporário, locais internos reservados à disposição e quais as etapas empregadas posteriormente.

Em síntese, analisou-se qual a hierarquia de gestão adotada, e a comparação com a hierarquia descrita na PNRS, estabelecida pela Lei 12.305, nesta ordem: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento dos resíduos sólidos; e disposição final adequada dos resíduos sólidos.

6.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

Inicialmente fez-se a seleção das amostras de resíduos sólidos, depois elas foram coletadas, preparadas e caracterizadas por análise térmica e imediata. Para finalizar, a Entalpia do processo de queima dos resíduos, obtida por DSC em $\frac{J}{g}$, foi convertida para Energia Elétrica em kWh.

6.2.1. Seleção, coleta e preparação das amostras de resíduos sólidos

Após a realização do diagnóstico da gestão de resíduos na UFRJ, conhecendo-se as tipologias dos resíduos sólidos gerados, foram identificadas aquelas frações que poderiam ser amostradas para posteriores análises, térmica e imediata, em laboratório. Analisou-se, nessa etapa, as questões envolvendo a segurança operacional dos agentes diretamente envolvidos que, conforme critérios normativos e legais, poderiam inviabilizar a seleção das amostras. Assim sendo, foram selecionadas amostras de resíduos que apresentavam parâmetros seguros à sua manipulação – por exemplo, nos casos específicos relativos aos RSS e aos resíduos com carga radioativa, a coleta e, por consequência, as ações posteriores não foram realizadas.

A coleta das amostras de resíduos sólidos foi realizada na Ilha do Fundão, de modo manual, com apoio de objetos simples como alicate e de luvas de segurança, sendo colocadas e lacradas em pequenos sacos plásticos tipo *zip lock*, e depois levadas para o laboratório.

Anteriormente as análises, as amostras foram preparadas com o mínimo de manipulação direta manual, utilizando-se pinças ou similares para que a gordura das mãos não ficasse impregnada, causando interferências nos testes. Auxiliaram no preparo das amostras uma tesoura, um pulverizador, uma estufa e uma balança de precisão para pesagem prévia de cada material.

Cada amostra de resíduo sólido foi preparada e analisada individualmente e, além disso, para compor uma amostra o mais representativa possível da realidade, em termos percentuais de cada tipologia, os resíduos também foram preparados e analisados na forma combinada.

Com esse intuito, adotou-se como composição para amostra de resíduos combinados aquela indicada na matriz gravimétrica nacional de resíduos sólidos publicada pela ABRELPE (2020), conforme informa o Panorama do Resíduos Sólidos no Brasil, ou seja, uma amostra contendo: matéria orgânica (45,3%), recicláveis secos (16,8% de plásticos; 10,4% de papel e papelão; 2,70% de vidros; 2,3% de metais e 1,4% de embalagens multicamadas) e não recicláveis (5,6% de resíduos têxteis, couros e borrachas e 15,5% de rejeitos diversos).

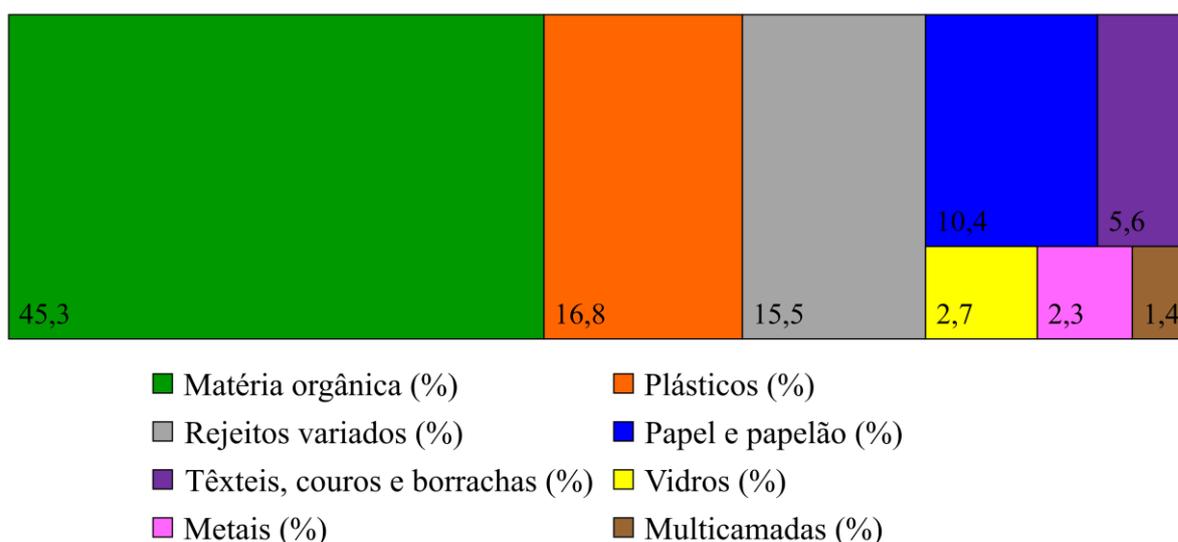
No contexto de promover a recuperação energética da fração não reciclável dos resíduos, uma amostra de resíduos combinados (mistura) composta por não recicláveis também foi analisada. Durante a preparação das misturas foi necessário utilizar pedaços bem pequenos dos resíduos coletados, o que foi feito empregando tesoura e pinça. Para o caso do resíduo de sobras de comida, o material foi seco em estufa a 105°C até peso constante e pulverizado para posterior utilização. As demais amostras não necessitaram de preparo prévio.

Assim sendo, as amostras de resíduos sólidos coletadas e preparadas foram analisadas individualmente e combinadas, tendo nesse último caso uma composição baseada na matriz gravimétrica total de resíduos e na matriz de não recicláveis.

6.2.2. Preparação dos combinados das amostras em laboratório

Para essa preparação adotou-se a composição gravimétrica indicada na Matriz Gravimétrica (MG) nacional de resíduos sólidos (Figura 11) extraída da publicação sobre o panorama dos resíduos sólidos no Brasil da ABRELPE (2020). A escolha dessa matriz para compormos os percentuais das misturas, em detrimento à matriz da UFRJ, deveu-se, principalmente, por ser oriunda de consolidação de dados dos 10 anos no país, após o surgimento do PNRS (2010), bem como não estar disponibilizada, **até a conclusão deste estudo**, uma série histórica similar na universidade relativa à sua própria matriz.

Figura 11 - Matriz gravimétrica de resíduos sólidos no Brasil.



Fonte: modificado de ABRELPE (2020).

De acordo com a ABRELPE (2020), a matéria orgânica refere-se às sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras; os têxteis, couros e borrachas podem ser retalhos no geral, peças de roupas, calçados, mochila, tênis, pedaços de couro e a borracha em si; as embalagens multicamadas são aquelas compostas por mais de um tipo de material; os rejeitos variados são os resíduos sanitários, outros materiais que não foram passíveis de identificação, bem como recicláveis contaminados que não permitiram a separação; os outros são resíduos

identificados e que não deveriam estar no fluxo dos RSU⁷, como RSS, eletroeletrônicos, pilhas e baterias, resíduos perigosos, resíduos de construção e demolição, pneus, óleos e graxas, embalagens de agrotóxico e outros resíduos perigosos.

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados, respectivamente, os cálculos de composição de uma amostra combinada com todos os resíduos coletados (baseada na matriz total) e outra amostra combinada somente de não recicláveis, com ambas totalizando uma massa em torno de 10 mg. Optou-se por utilizar essa massa por ser uma quantidade razoável para os ensaios de análise térmica e imediata.

Tabela 8 – Composição da amostra de combinados considerando a matriz gravimétrica total.

Combinado baseado na matriz total	MG (%)	Para 10 mg no cadinho (mg)
Matéria orgânica	45,30	4,53
Plásticos	16,80	1,68
Rejeitos	15,50	1,55
Papel e papelão	10,40	1,04
Têxteis, couros e borrachas	5,60	0,56
Vidros	2,70	0,27
Metais	2,30	0,23
Multicamadas	1,40	0,14
Total	100,00	10,00

Fonte: autoria própria.

Tabela 9 – Composição da amostra de combinados considerando a matriz não reciclável.

Combinado com não recicláveis	MG (%)	Para 10 mg no cadinho (mg)
Matéria orgânica	45,30	6,68
Rejeitos	15,50	2,29
Têxteis, couros e borrachas	5,60	0,83
Multicamadas	1,4	0,20
Total	67,80	10,00

Fonte: autoria própria.

Como exemplificação, no caso de medir a massa de 6,68 mg de matéria orgânica, fez-se a divisão desse valor entre os resíduos que receberam essa classificação, ou seja, foram

⁷ Ressalta-se que, na UFRJ, não foram detectados RSS, eletrônicos, pilhas, baterias, perigosos, óleos, graxas e agrotóxicos junto aos RSU (Extraordinários), porém a MG considerou a realidade junto aos aterros do país.

pesados 3,34 mg de madeira e 3,34 mg restos de comida, os quais foram colocados dentro do cadinho para compor parte da amostra de não recicláveis. Esse procedimento foi repetido para todas as demais tipologias na composição das amostras combinadas.

Na intenção de escolher a fração não reciclável, optou por excluir as tipologias de metais, vidros, plásticos, papel e papelão, sendo consideradas não recicláveis as frações de matéria orgânica, rejeitos, têxteis, couros, borrachas e as embalagens multicamada. Quando somadas, essas tipologias totalizam 67,8% da matriz gravimétrica nacional.

Pelas suas características, a matéria orgânica é reciclável, podendo ser transformada em composto orgânico por compostagem, sem gerar poluentes atmosféricos como ocorre na Incineração, por exemplo. O motivo pelo qual optou-se por estudar sua Incineração se deu pelos seguintes fatos:

- a. Aquisição de conhecimento a respeito do comportamento térmico de uma amostra o mais representativa possível;
- b. Na prática, esse resíduo não é coletado pelos catadores e acaba sofrendo disposição em aterros ou lixões, onde sofre decomposição, gerando os lixiviados de aterro e GEEs como o metano, um gás com PAG maior que o do dióxido de Carbono gerado na Incineração;
- c. Com os futuros incentivos ao tratamento térmico, tendo em vista o Decreto nº 11.043/2022, que propõem até 2040 a reciclagem ou recuperação energética de quase a metade do lixo gerado no Brasil (48%), evita-se o conflito com catadores, os quais coletam somente as frações recicláveis dos resíduos e não coletam os orgânicos.

6.2.3. Caracterização por análise térmica

Todas as amostras de resíduos sólidos coletadas e preparadas foram analisadas individualmente e combinadas (uma amostra baseada na matriz gravimétrica total e a outra na matriz de resíduos não recicláveis).

Foi utilizada a estrutura disponível no Laboratório de Análises Térmicas (LABAT) do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química da UFRJ, no *Campus* Ilha do Fundão. O equipamento utilizado foi um analisador simultâneo TG-DSC da *TA Instruments*, modelo *SDT Q600*, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Equipamento de análise térmica da *TA Instruments*, modelo *SDT Q600*.



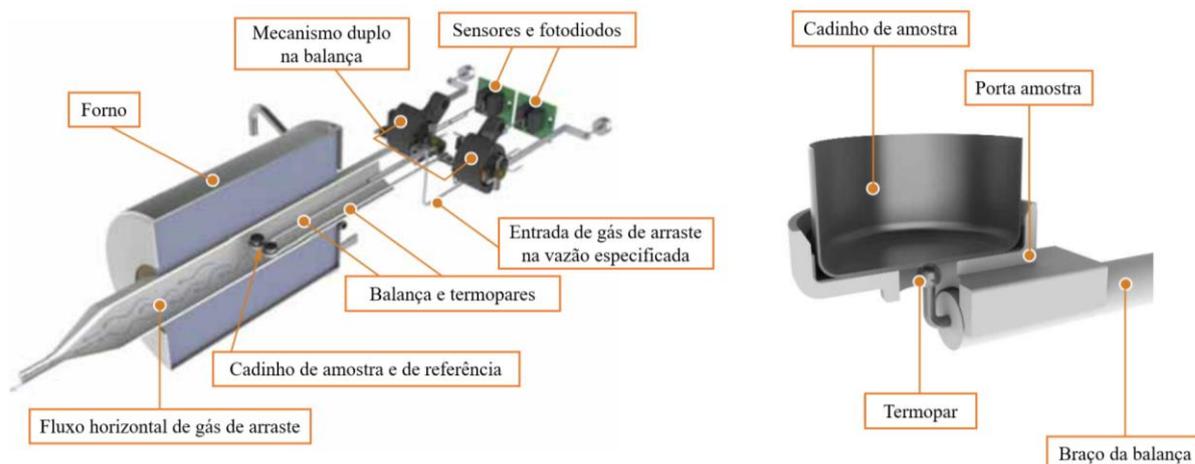
Fonte: Elaboração própria.

Os parâmetros de análise utilizados foram: razão de aquecimento de 20°C/min da temperatura ambiente até 1000°C, atmosfera em ar na vazão de 100 ml/min, massa de amostra na faixa de 4,0 mg a 10,0 mg, disposta em cadinho de alumina (Al_2O_3), com o cadinho de referência do mesmo material. Especificou-se o uso de ar (com 21% O_2 e 78% N_2) como gás de arraste para simular o que acontece no processo Incineração dos resíduos na URE, ou seja, o processo de queima.

Internamente, esse equipamento constitui-se em um forno, com sistema composto por balança, termopares e controle do gás de arraste que são aplicados na mensuração da massa, temperatura e Entalpia de processos de queima diversos como Combustão (atmosfera em ar) ou pirólise (atmosfera de nitrogênio).

A Figura 13 ilustra as partes internas desse equipamento, conforme documento técnico do fabricante.

Figura 13 – Descrição das partes internas do equipamento de Análise Térmica da *TA Instruments*.



Fonte: Modificado de *TA Instruments* (2010).

No manuseio do equipamento, inicialmente os cadinhos de amostra e referência foram colocados e encaixados no porta-amostra. Logo depois o equipamento foi tarado e então a amostra foi adicionada no cadinho, conforme é apresentado na Figura 14, onde também é visualizado o porta-amostra com o cadinho de referência (vazio). Nesta exemplificação foi utilizado o caso de um resíduo de madeira, uma das amostras que foram coletadas em campo.

Figura 14 – Detalhe dos cadinhos de amostra (madeira) e referência (vazio) antes da análise térmica.



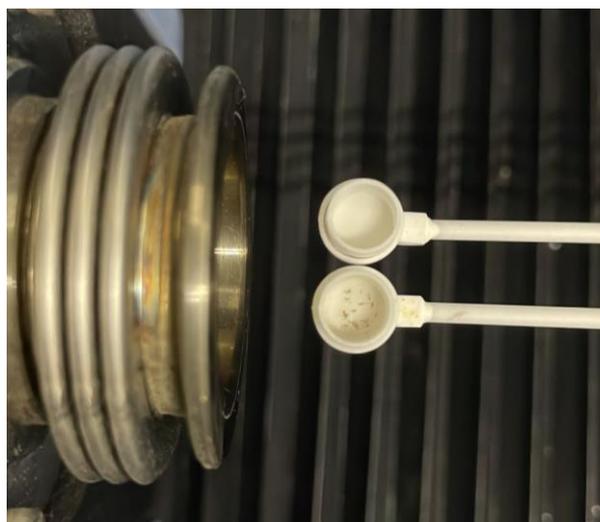
Fonte: autoria própria.

Com a amostra colocada no cadinho, fechou-se o equipamento e acionou-se o seu *software*, dando início ao experimento. Durante a análise térmica, o *software* “*Universal*

Analysis” registra, em tempo real, as curvas TG, DTG e DSC, armazenando os dados na memória do computador ao final da análise.

Após o resfriamento do equipamento o forno do mesmo pode ser aberto, permitindo observar o que restou da amostra, ou sua massa de Cinzas, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Detalhe dos cadinhos de amostra (Cinzas de madeira) e referência (vazio) após a análise térmica.



Fonte: autoria própria.

Pela interpretação das curvas TG, DTG e DSC de cada amostra, foram obtidas informações de interesse ao estudo, como os dados de Umidade (%), Cinzas (%) e da Entalpia resultante do processo de queima (ΔH_{queima}) em $\frac{\text{J}}{\text{g}}$.

6.2.3. Caracterização por análise imediata

As duas amostras combinadas (baseada na composição da matriz total e na matriz não reciclável) de resíduos foram analisados por essa técnica. Optou-se por utilizar a análise térmica nesse procedimento, ou seja, os experimentos foram conduzidos em atmosfera inerte para medir Umidade e material volátil, e em atmosfera oxidante para medir Carbono Fixo e Cinzas (GARCÍA et al., 2013).

Utilizou-se o mesmo equipamento de análise térmica descrito no item 6.2.2. Os parâmetros de análises foram:

- i. Em atmosfera de nitrogênio na vazão de 100 ml/min: rampa com razão de aquecimento de 20°C/min da temperatura ambiente até 600°C, mantendo-se em 600°C por 60 minutos, obtendo-se a Umidade e o material volátil;
- ii. Após troca do gás de arraste para ar na vazão de 100 ml/min: rampa com razão de aquecimento de 20°C/min de 600°C até 1000°C, obtendo o Carbono Fixo que sofre Combustão devido ao teor de 21% de O₂ no ar, e as Cinzas como o material que sobra ao chegar a 1000°C.

Pela análise das curvas TG, DTG e de temperatura, ambas em função do tempo, são obtidos os percentuais de Umidade, material volátil, Carbono Fixo e Cinzas.

6.2.4. Quantificação da Entalpia em energia elétrica útil

A partir das áreas dos picos DSC foram obtidas as Entalpias, em J/g, dos processos de queima dos resíduos sólidos e seus combinados. Objetivamente, converteu-se a Entalpia do processo de queima dos resíduos em Mega Joules por quilograma (MJ/kg), para Energia Elétrica útil, em Mega Watt-hora (MWh). Essa Energia, descontando-se as perdas médias de rendimento do seu respectivo ciclo energético, conforme estimativas da literatura, possui potencial benéfico para aproveitamento pelas populações de entorno ou mesmo em instalações dos próprios geradores dessa Energia.

Visando tornar a estimativa da geração de Energia Elétrica pela conversão de Energia Térmica na futura URE do Caju, o mais próxima possível da realidade, foram levadas em consideração algumas informações presentes no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do empreendimento:

- i. Conforme o balanço energético adotado pela empresa projetista, a URE do Caju irá incinerar $54,17 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$ de RSU, com PCI de cerca de $8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$, para gerar 120 MW de Energia Térmica;
- ii. Essa Energia irá alimentar um turbogerador a Vapor com potência de 31 MW, ou seja, a eficiência energética do ciclo completo da URE será 25%;
- iii. O projeto de implantação da URE-Caju prevê a produção bruta de 31 MW de Energia Elétrica, que após o consumo interno irá injetar cerca de 28 MW na rede elétrica. A

capacidade de valorização energética prevista para a URE-Caju permitirá assim injetar anualmente na rede cerca de 245 GWh de Energia Elétrica.

Assim sendo, partindo-se da Entalpia do processo de queima dos resíduos, a qual será obtida experimentalmente por DSC, e levando em consideração as informações do processo presentes no EIA do empreendimento, será obtida a quantidade de Energia Elétrica injetada na rede pela queima dos resíduos provenientes da UFRJ. A partir do dado de consumo de Energia Elétrica por habitante (kWh/habitante), será possível estimar a quantidade de moradias que poderão ser atendidas pela Eletricidade gerada na URE.

6.3. ESTIMATIVA DO PAG NA GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFRJ

A estimativa do PAG na gestão de resíduos da UFRJ foi realizada duas vezes: a primeira para a gestão atual de resíduos e a segunda para uma gestão alternativa que será proposta. Na gestão atual os resíduos são submetidos a transporte rodoviário e disposição final em aterros sanitários, emitindo GEEs como CO₂, CH₄ e N₂O. Na gestão alternativa fez-se a proposta de Incineração dos resíduos, diminuindo a quantidade de resíduos transportada, além de sua quantidade aterrada, o que irá impactar positivamente na geração de GEE, apesar da Combustão completa dos resíduos na Incineração.

6.3.1. PAG na gestão de resíduos atual

Após a coleta dos resíduos, eles são armazenados temporariamente, sendo então transportados e logo depois aterrados. Assim sendo, o PAG da gestão atual de resíduos levou em consideração as emissões de GEEs no transporte rodoviário (CO₂, CH₄ e N₂O) e nos processos de decomposição no aterro sanitário (CO₂ e CH₄).

Conhecendo-se satisfatoriamente cada tipo de resíduo gerado, bem como seus respectivos pontos de origem e destinação, foram analisados dados sobre o seu transporte, abordando questões sobre a queima de Óleo Diesel utilizado pela frota transportadora atualmente em operação. Para tanto, quantificou-se todas as distâncias relativas das origens até os pontos de destinação dos resíduos sólidos coletados, calculando-se suas respectivas médias, tabelando-as para cada tipologia pesquisada. Com as respectivas distâncias médias obtidas, bem como já conhecendo os dados técnicos de rendimento do motor da frota de

caminhões utilizada por cada terceirizada da UFRJ, foi possível quantificar o volume médio de diesel consumido anualmente por toda a frota. A partir da relação entre as distâncias *versus* o consumo anual médio de combustível, calculou-se, com base em dados da literatura disponível, a quantidade de GEEs atualmente emitidos por essa frota, relativos aos três principais GEE conhecidos, ou seja, CO₂, CH₄ e N₂O. Especificamente com relação a CH₄ e N₂O, foram utilizados fatores de emissão de indicados pelo *GHG Emission Factors Hub*, da EPA. Esses fatores levam em consideração a geração destes GEEs dentro do ciclo de vida do Óleo Diesel, ou seja, ao longo das etapas desde a extração do petróleo, passando por refino, estocagem e distribuição do referido combustível, não considerando o seu uso (EPA, 2022a). As emissões de GEE em aterro sanitário foram calculadas levando em consideração o volume da fração de resíduos sólidos não recicláveis enviados ao aterro sanitário. A massa potencial de CH₄ gerada anualmente foi calculada através de equações presentes no documento de diretrizes para inventários nacionais de GEEs na gestão de resíduos, publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996). A massa potencial de CO₂ gerada em aterro foi estimada segundo dados da literatura. Após obtenção das emissões para GEE, o PAG foi calculado utilizando a Equação 1, conforme referenciada no capítulo de introdução deste estudo, somando-se suas quantidades em kg eq. CO₂ para cada GEE.

6.3.2. PAG na gestão de resíduos proposta

A gestão alternativa proposta neste estudo, propõe o envio de uma fração dos resíduos gerados para um processo de Incineração com recuperação energética na futura URE do Caju, logisticamente muito mais próxima que o aterro sanitário atualmente em uso, o CTR-Rio, localizado no município de Seropédica, RJ. Isso irá possibilitar menores massas de resíduos transportadas aos pontos de destinação, menores consumo de Óleo Diesel pela frota e, conseqüentemente, menores taxas de emissões de GEE na atmosfera, apesar da Combustão completa dos resíduos na Incineração. Assim, o PAG da gestão de resíduos proposta levou em consideração as emissões de GEEs no transporte rodoviário (CO₂, CH₄ e N₂O) e no processo de Incineração na URE-Caju (CO₂ e N₂O). As massas de CO₂ e N₂O emitidos pelos resíduos sólidos que se propõe incinerar na URE-Caju, foram calculadas através de equações presentes no documento de orientação de boas práticas e gestão de incertezas em inventários nacionais de GEE na gestão de resíduos (IPCC, 1996a). Após obtenção das emissões para GEE, similar ao subitem anterior, o PAG foi calculado utilizando a Equação 1, conforme referenciada no

capítulo de introdução deste estudo, somando-se suas quantidades, em kg eq.CO₂ para cada GEE.

6.3.3. Comparação do PAG na gestão atual e na gestão proposta

Nesta última parte do trabalho foi realizada a comparação entre o PAG da gestão atual com o PAG da gestão proposta, expondo os dados em um quadro com os PAG contribuintes de cada GEE analisado, bem como do somatório de suas parcelas. Além disso, os dados também foram expostos numa figura com a visão geral do processo pós-adoção do envio da fração de resíduos para Incineração, sendo indicada a possível redução do PAG pela adoção da nova gestão.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. DIAGNÓSTICO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA UFRJ

Conforme a pesquisa de campo realizada junto à PU-UFRJ, ao CCS-UFRJ e às terceirizadas envolvidas, são verificadas as tipologias dos resíduos sólidos descartados pela universidade, conforme caracterizadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Tipologia dos resíduos sólidos descartados anualmente pela UFRJ.

Tipologia	Amostragem atual
Recicláveis	Vidro, sucata metálica, eletrônicos obsoletos ou danificados, madeira rígida, pilhas e baterias, todos secos e sem nenhum tipo de contaminação. Obs.: há frações de papel, papelão, plástico, vidro e metal porém uma parte é descartada como resíduo extraordinário.
Extraordinários (misturados a Recicláveis e Orgânicos)	Papéis, papelões, plásticos, couros, tecidos e outros materiais impregnados com alimentos, sujos ou úmidos; resíduos de sanitários; resíduos orgânicos oriundos de comida dos restaurantes (“bandejões”) e <i>trailers</i> ; resíduos orgânicos oriundos de capina/jardinagem/poda/varrição.
RSS	Grupo A (subgrupos A1 e A4) e Grupo E, conforme RDC ANVISA 222/2018-Anexo I: <ul style="list-style-type: none"> •Subgrupo A1 – culturas e estoques de micro-organismos; resíduos de fabricação de produtos biológicos; descarte de vacinas de microrganismos vivos, atenuados ou inativados; resíduos de laboratórios de manipulação genética etc. •Subgrupo A4 – kits de linhas arteriais, endovenosas e dialisadores, quando descartados; membrana filtrante de equipamento médico-hospitalar e de pesquisa, entre outros similares; Peças anatômicas, provenientes de procedimentos cirúrgicos ou de estudos anatomopatológicos ou de confirmação diagnóstica etc. •Grupo E – materiais perfurocortantes ou escarificantes, tais como: lâminas de barbear, agulhas, escalpes, ampolas de vidro, brocas, limas endodônticas, pontas diamantadas, lâminas de bisturi, lancetas; tubos capilares; ponteiras de micropipetas; lâminas e lamínulas; espátulas; e todos os utensílios de vidro quebrados no laboratório (pipetas, tubos de coleta sanguínea e placas de Petri) e outros similares.
Químicos	Recipientes com reagentes usados ou nunca abertos, fora da validade, mas ainda lacrados, por exemplo: conteúdos com Formol, Hexano com Diclorometano, Hexano com Acetonitrila etc. Materiais não perfurocortantes, contaminados com produtos químicos, por exemplo: papéis, frascos plásticos vazios, Equipamentos de Proteção Individual usados, filtros etc. Sólidos perfurocortantes contaminados com reagentes químicos, em geral, vidraria de laboratório sem viabilidade de remoção de seus contaminantes.
Radioativos	Fármacos utilizados em tratamentos terapêuticos e em testes de laboratórios acadêmico-industriais; eventuais sucatas de equipamentos contendo fontes radioativas.
RCC	Entulhos de obras da construção civil (restos de tijolos, blocos de concreto, madeira, reboco, telhas, metais retorcidos, pedaços de fio, plásticos e papéis de embalagens de areia e cimento, restos de argamassa, restos de concreto, restos de brita etc.)

Fonte: autoria própria.

Os dados dos volumes de resíduos sólidos gerados no âmbito da UFRJ foram obtidos em três etapas: a primeira junto aos responsáveis pela gestão, lotados na PU-UFRJ; a segunda juntamente com responsáveis do CCS-UFRJ, via e-mail; e a terceira em consulta com os terceirizados, via e-mail e telefone. Os dados quantitativos pesquisados estão apresentados na Tabela 11, e são referentes às quantidades, em toneladas, de resíduos sólidos gerados de janeiro de 2017 a dezembro 2019, sendo esses os três últimos anos de pleno funcionamento de todas as instalações da universidade, antes do período de pandemia de COVID-19, conforme decretado pelos órgãos governamentais, a partir do 1º bimestre do ano de 2020.

Tabela 11 – Massa total, em toneladas, de resíduos sólidos descartados ao ano pela UFRJ (de 2017 a 2019).

Período	Resíduos Extraordinários ⁸	RSS	Resíduos Químicos	RCC	Resíduos Recicláveis ⁹
2017	5.698,00	3.031,25	35,60	1.053,00	171,55
2018	2.263,84	2.982,85	35,30	617,59	195,27
2019	4.158,15	3.402,08	29,20	191,06	148,42
Média anual	4.040,00	3.138,73	33,37	620,55	171,75
Média anual (%)	50,47	39,21	0,42	7,75	2,15

Fonte: PU-UFRJ (2021); SANIPLAN (2022); Coleta Seletiva UFRJ (2022).

Levando-se em conta cada tipologia de resíduo, entendeu-se não ser seguro a coleta de amostras de RSS e de resíduos com carga radioativa, devido às suas características insalubres e perigosas associadas.

Embora haja potencial de aproveitamento energético oriundo de resíduos recicláveis, atualmente essa fração residual é parte de programa definido pelo Decreto Federal nº 10.936 (BRASIL, 2022), pois leva em conta o apoio a cooperativas de reciclagem, majoritariamente compostas por diversas pessoas de baixa renda, incluindo parte oriunda de comunidades carentes e até mesmo moradores de rua, sendo o desvio dessa fração conflitante às finalidades

⁸ Misturado a resíduos recicláveis e orgânicos.

⁹ Não estão inclusas as massas de recicláveis eventualmente misturadas às demais tipologias.

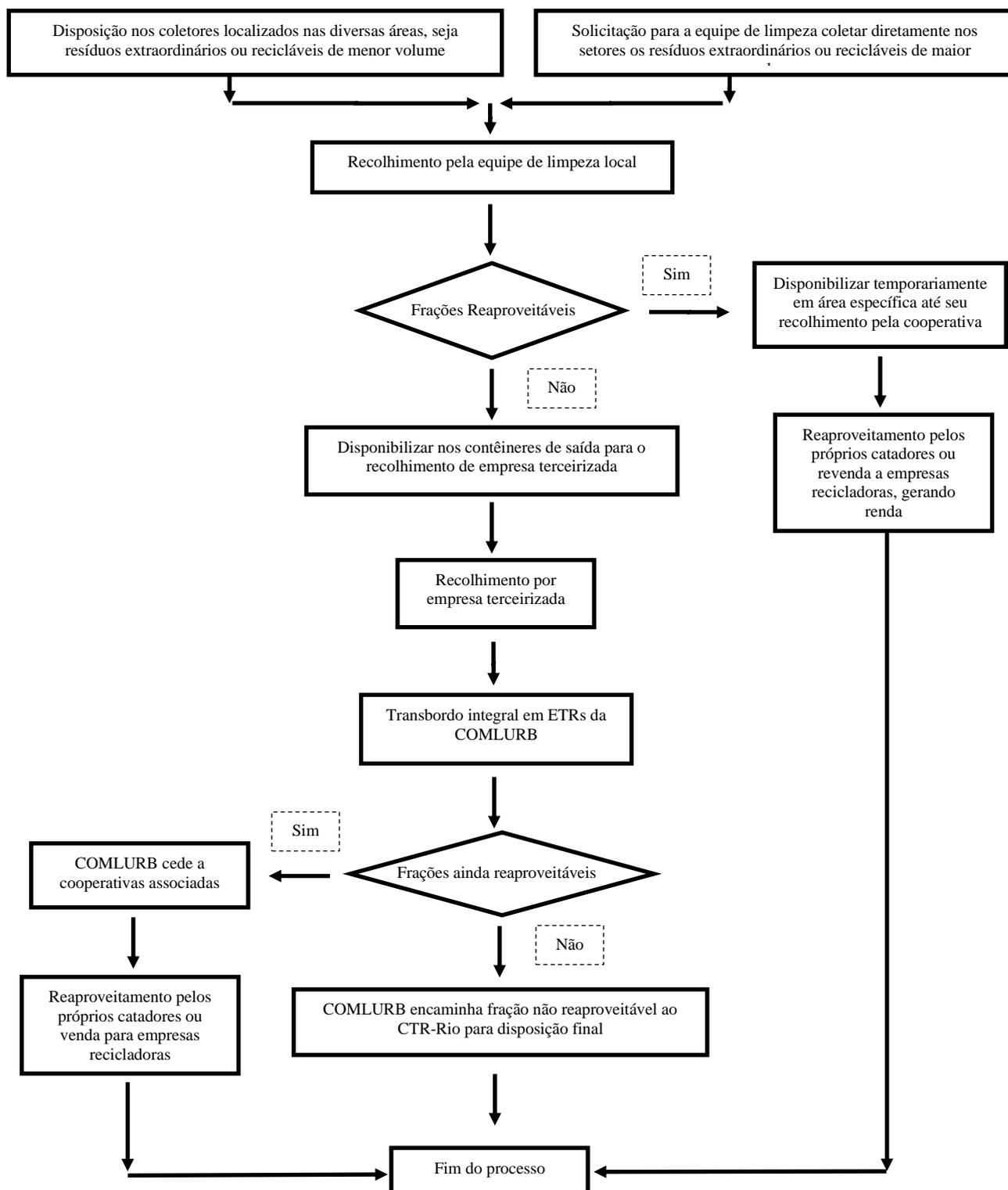
sociais atreladas, reduzindo-se uma importante fonte de renda a essa parcela significativa da população. Seguindo a mesma ideia, os resíduos químicos – mais especificamente as frações sólidas reaproveitáveis pelo CCS-UFRJ – também são recolhidos por cooperativas, igualando-se à questão social anterior.

Desta forma, segundo o que se observa na matriz de resíduos descartados, há viabilidade técnica, segurança operacional e ausência de impactos sociais negativos para coletas e análises de potencial energético nas amostras oriundas das frações de resíduos classificados como extraordinários e RCC.

Segundo o PMGIRS (2021), a massa total de resíduos extraordinários e RCC destinada ao CTR-Rio correspondente a 95,48% para os extraordinários e 0,59% para RCC. Desta forma, pela quantidade total média anual de resíduos extraordinários e de RCC da UFRJ, referentes ao triênio 2017-2019, conforme a Tabela 12, temos que essa massa enviada ao CTR-Rio será $[(0,95 \times 4.040) + (0,0059 \times 620,55)]$, correspondente a **3.861,05 toneladas anuais**, em média, ou 83% do total de resíduos gerados na fonte.

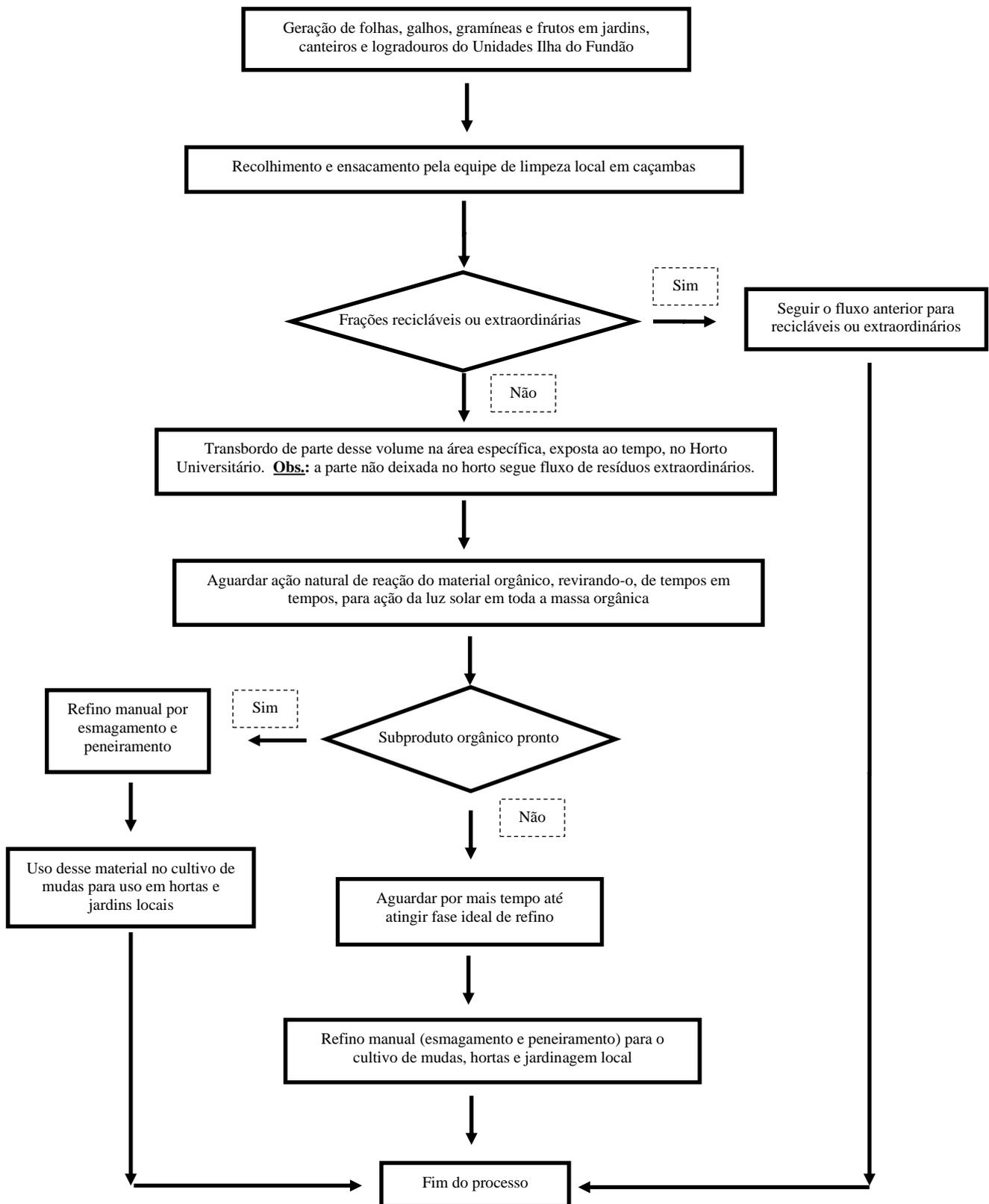
Conforme as informações obtidas pelas diversas fontes, a gestão dos resíduos sólidos gerados na UFRJ (Recicláveis, Extraordinários, Orgânicos, Químicos, RSS, Radioativos e RCC) pode ser representada pelos fluxogramas apresentados nas Figuras de 16 a 20.

Figura 16 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Recicláveis e Extraordinários.



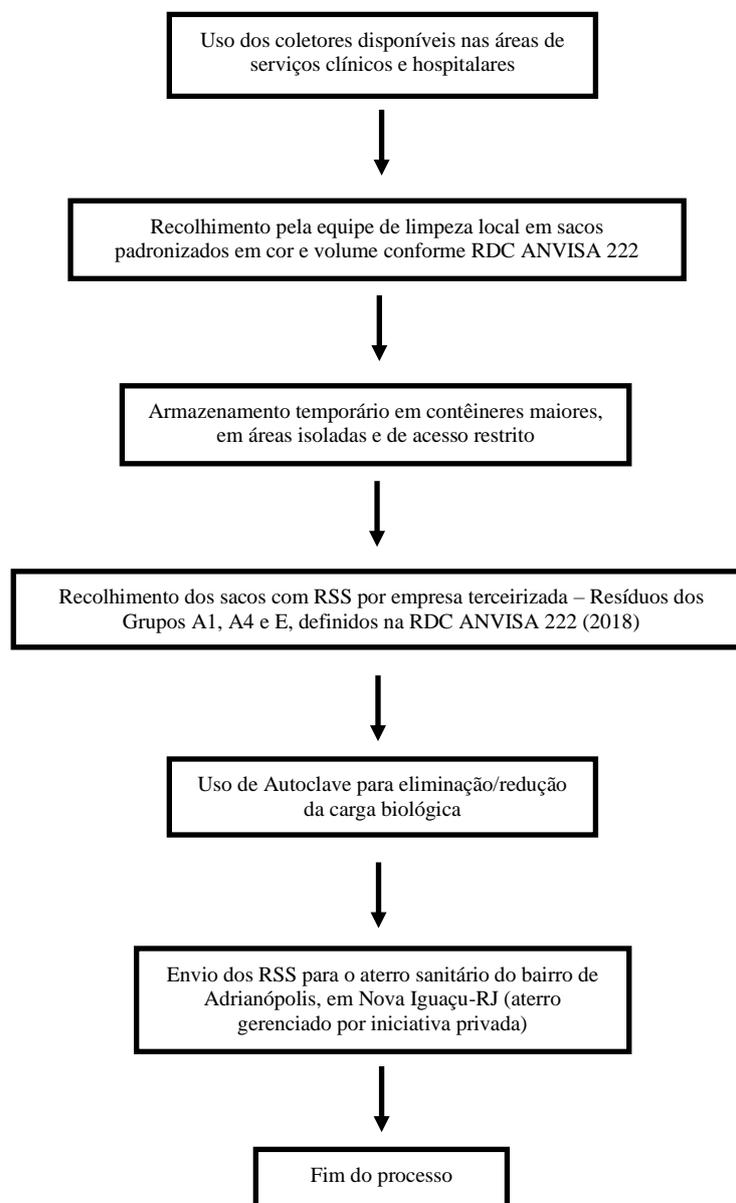
Fonte: autoria própria; PU-UFRJ (2021).

Figura 17 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Orgânicos (capina e poda).



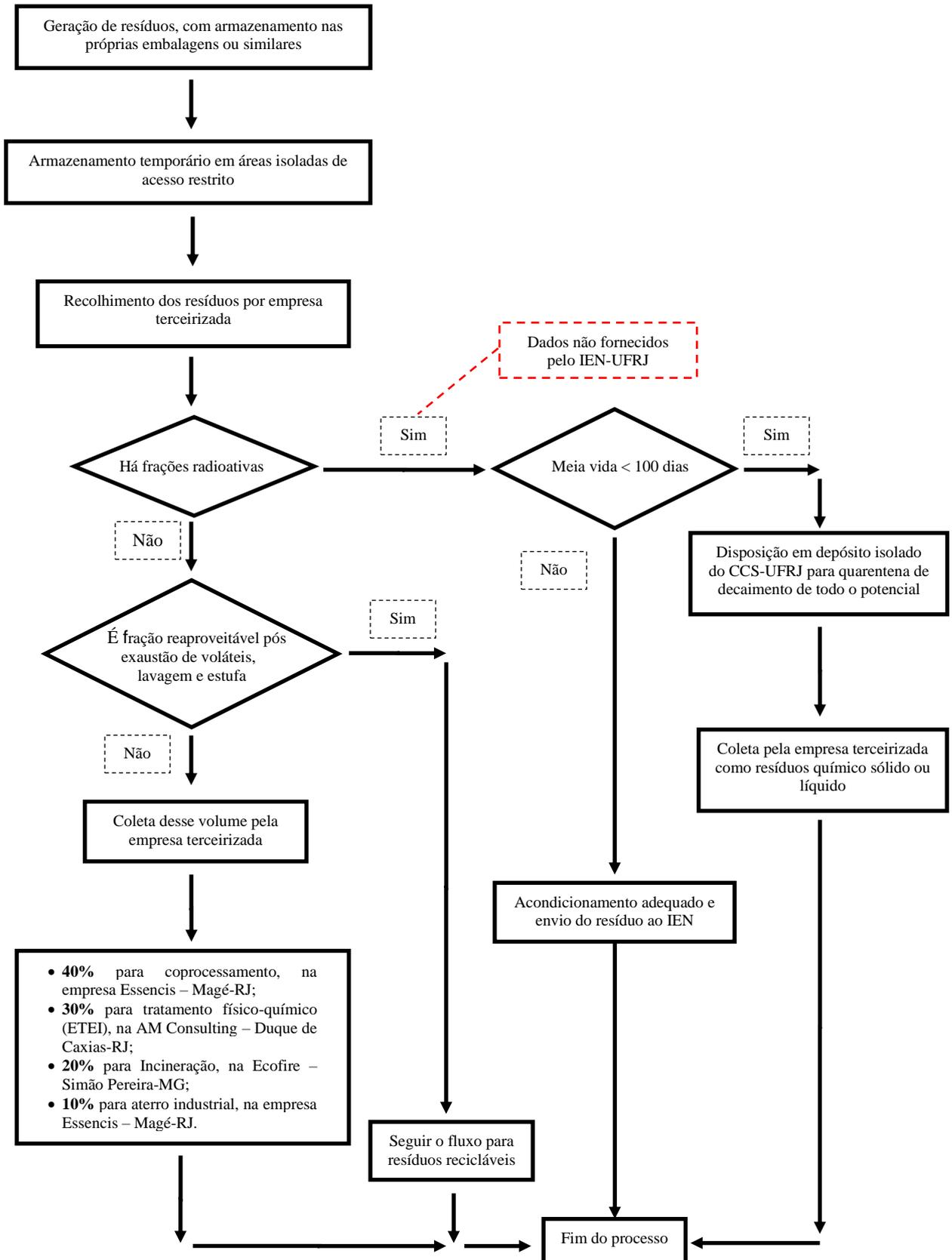
Fonte: autoria própria; PU-UFRJ (2021).

Figura 18 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS).



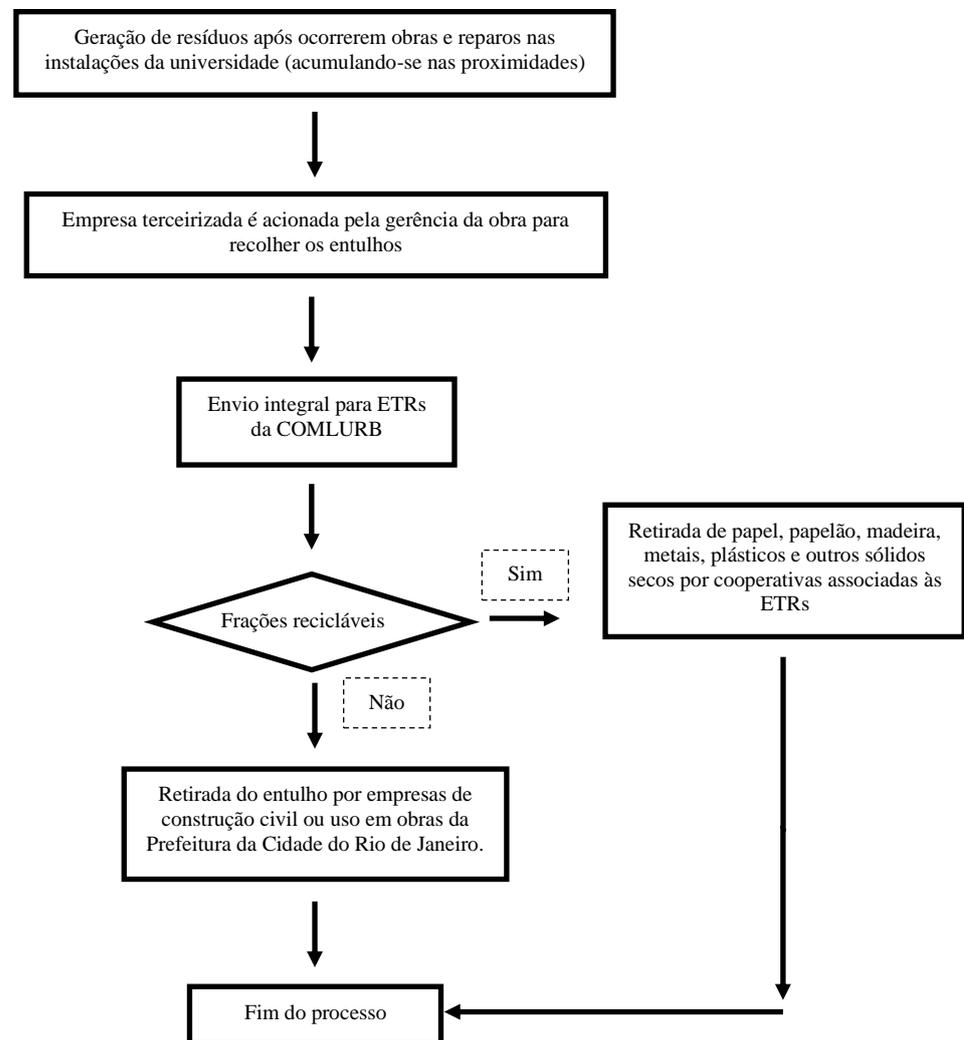
Fonte: autoria própria; PU-UFRJ (2021); RODOCON (2022).

Figura 19 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos Químicos e Radioativos.



Fonte: autoria própria; CCS-UFRJ (2021); SANIPLAN (2022).

Figura 20 - Fluxograma representativo da gestão de Resíduos de Construção Civil (RCC).



Fonte: autoria própria; PU-UFRJ; FGD (2021).

7.1.1. Visão geral do sistema de gestão de resíduos da UFRJ

Embora seja consenso, entre os agentes responsáveis diretos consultados, de que há muito a evoluir, a pesquisa realizada em campo verificou que o sistema de gestão de resíduos sólidos da UFRJ possui planejamento e ações internas visando à operacionalização de alguns bons programas ambientais, com foco na redução da pressão sobre recursos naturais e ações envolvendo biossegurança, a partir dos quais, ao longo dos anos, são esperados bons índices de sua melhoria contínua.

A despeito de suas próprias responsabilidades – como: criar regras internas de gestão; selecionar agentes capacitados ao seu cumprimento e fiscalização; monitorar indicadores; buscar constante melhoria no processo; etc. – verifica-se que a equipe responsável direta pela gestão (centralizada na PU-UFRJ) organiza e estimula, por meio de reuniões periódicas internas interdepartamentais, ações que demandam estudos técnicos, tanto para intervenções inéditas, como para melhorias das medidas ambientais já existentes. Desses encontros, participam os técnicos lotados na PU-UFRJ, com a participação de técnicos ambientais de outros Campi e demais Unidades Externas. Adicionalmente, a equipe técnica da PU-UFRJ informa que faz parte de seu planejamento a busca por uma integração cada vez maior entre as equipes de meio ambiente e o corpo acadêmico universitário, como uma das ações de maior potencial em termos de melhorias significativas na gestão, em médio prazo.

Com base na hierarquia de gestão definida pelo PNRS (2010), as etapas relativas a “não geração” e a “redução” são as que mais carecem de ações efetivas, por ser uma questão ainda desafiadora, sobretudo com relação a resíduos sólidos como papel, papelão e plástico gerados no âmbito da universidade, com boa parte desses, inclusive, ainda descartada como resíduo extraordinário, os quais poderiam passar por triagem mais rigorosa com destino à reciclagem.

De forma similar, observou-se que boa parte dos resíduos orgânicos produzidos nos Campi – oriundos de sobras de alimentos e boa parte dos orgânicos de atividades de capina/jardinagem/poda/varrição – são também descartados como resíduos extraordinários, podendo ser reavaliada a abrangência de programas correntes e bem-sucedidos de compostagem existentes no *Campus* Ilha do Fundão, para que tais práticas alcancem demais *Campi* e unidades externas.

Não menos importante é a necessidade de melhoria na coleta e triagem de resíduos que ainda se acumulam em áreas pontuais dos *Campi*, como os exemplos ilustrados nas Figuras de

21 a 24, e que também poderão contribuir para o aumento das frações de recicláveis e de extraordinários geradas anualmente.

Figura 21 – Plásticos, papéis e pneus acumulados em praia do *Campus* Ilha do Fundão – lado Caju.



Fonte: autoria própria.

Figura 22 – RCC acumulados em praia do *Campus* Ilha do Fundão - Lado CETEM.



Fonte: autoria própria.

Figura 23 – Recicláveis e RCC acumulados em áreas anexas ao HUCFF.



Fonte: autoria própria.

Figura 24 – Lâmpadas contendo Hg e madeira acumulada no *Campus* Praia Vermelha – lado Rua Lauro Müller.



Fonte: autoria própria.

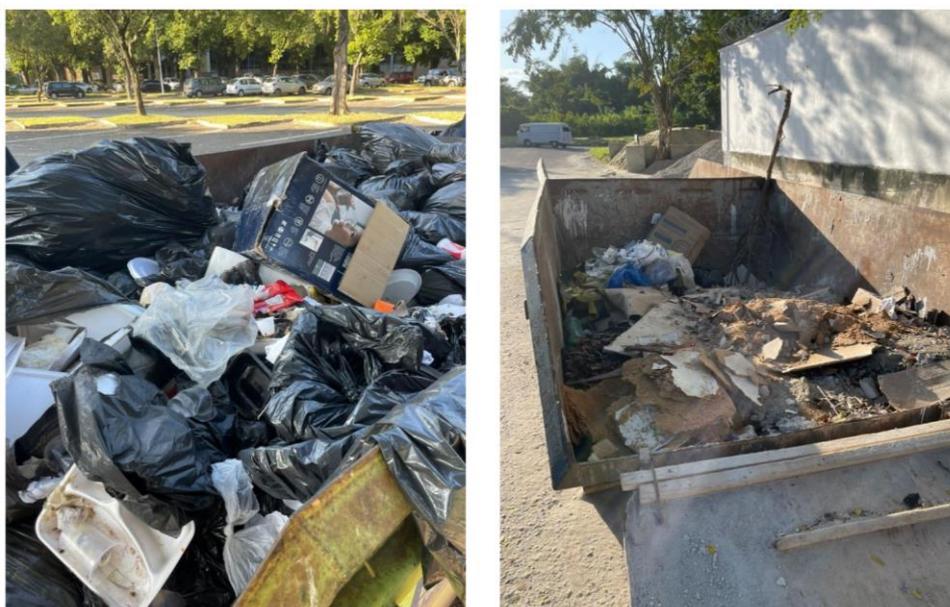
São observadas algumas lacunas observadas ao longo da pesquisa, inclusive reconhecidos pelos próprios gestores entrevistados, como: a ausência de um PGRS, informações não centralizadas e, por vezes, incompletas; ações não programadas ao acompanhamento em campo dos terceiros; necessidade de melhorias no processo de coleta de resíduos em áreas pontuais dos *Campi*; necessidade de melhorias do processo de triagem das frações recicláveis; e maior alcance para alguns bons programas em curso, como os programas de compostagem existentes no *Campus* Ilha do Fundão. No entanto, o sistema de gestão de resíduos sólidos consegue atender, com eficácia parcial, as necessidades mais imediatas, com o presente estudo indo de encontro aos objetivos de sua melhoria contínua, mediante uma proposta de menores volumes de resíduos sólidos não recicláveis depositados nos aterros sanitários atualmente em uso, associado ao seu potencial de aproveitamento energético e, conseqüente, a diminuição nas emissões de GEE.

7.2. TRATAMENTO TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

7.2.1. Seleção, coleta e preparação das amostras de resíduos sólidos

A seleção das amostras de resíduos sólidos a serem testadas foi feita aos fundos do CT do *Campus* Ilha do Fundão, em 24/05/2022, por volta das 16h, onde encontravam-se armazenados Resíduos Extraordinários e RCC (Figura 25) considerados com boa diversificação, compatíveis às tipologias pesquisadas junto à PU-UFRJ, geradas ao longo de todo o período operacional dos *Campi* e demais Unidades Externas da UFRJ, disponíveis em quantidades suficientes à realização dos testes propostos em laboratório.

Figura 25 - Resíduos extraordinários (direita) e RCC (esquerda) armazenados no entorno do CT-UFRJ.



Fonte: autoria própria.

Após coleta, as amostras foram armazenadas e lacradas em plásticos *zip lock* (Figura 26), sendo depois levadas para o laboratório de análises térmicas.

Figura 26 - Amostras de resíduos sólidos extraordinários e inertes levadas ao LABAT.



Fonte: autoria própria.

Conforme o Artigo 6º da Portaria Interministerial 274 (BRASIL, 2019), podem ser enviados para o aproveitamento energético os resíduos oriundos de limpeza de vias públicas, resíduos domiciliares, resíduos de estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços, desde que não perigosos, incluindo RCC, Classe C, conforme Resolução CONAMA 307 (CONAMA, 2002), para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação. Partindo-se das premissas acima, analisamos a Entalpia dos resíduos combinados e, para tanto, as amostras da foram compostas da forma mais próxima possível da realidade, em termos percentuais a cada tipologia. Na Tabela 12 estão identificadas as amostras coletadas, dentre os resíduos extraordinários e RCC encontrados em campo.

Tabela 12 – Classificação das amostras segundo a matriz gravimétrica nacional de resíduos.

Nomenclatura popular	Nomenclatura técnica	Tipologia	Classificação MG
Madeira para escoras, calços	Biomassa Lignocelulósica	RCC	Matéria orgânica
Canaleta para eletrodutos	Aço Galvanizado	RCC	Metal
Ponta de cigarro	Acetato de Celulose	Extraordinário	Plástico
Vidro de uso indefinido	Barrilha, Calcário e Areia	RCC	Vidro
Luva de segurança de vaqueta	Couro animal curtido ao Cromo	RCC	Têxteis, couros e borrachas
Sobras de comida	Combinado de grãos, carnes, frutas, legumes, cascas	Extraordinário	Matéria orgânica
Papel pardo	Papel gramatura 120-240 g/m ²	Extraordinário	Papel e Papelão
Embalagem de sabonete	Papel gramatura 40-100 g/m ² + polipropileno (PP)	Extraordinário	Multicamadas
Embalagem de suco/leite	Papel gramatura 50-65 g/m ² + polietileno + folha de Al	Extraordinário	Multicamadas
Papel de caderno escolar	Papel gramatura de 75-120 g/m ²	Extraordinário	Papel e Papelão
Papel toalha usado	Papel gramatura 18-25 g/m ²	Extraordinário	Rejeito
Guardanapo usado	Papel gramatura de 17-19 g/m ²	Extraordinário	Rejeito
Papel branco tamanho A4	Papel gramatura de 75-120 g/m ²	Extraordinário	Papel e Papelão
Papelão	Papelão micro ondulado	Extraordinário	Papel e Papelão
Copo plástico descartável	Polipropileno (PP)	Extraordinário	Plástico
Isopor para marmitas	Poliestireno Expandido (EPS)	Extraordinário	Plástico
Prato descartável de plástico	Poliestireno (PS)	Extraordinário	Plástico
Embalagem plástica transparente	Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	RCC	Plástico
Sacola de mercado	Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	Extraordinário	Plástico
Tampa de tubo para creme dental	Polipropileno (PP)	Extraordinário	Plástico
Tubo para creme dental	Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) + alumínio	Extraordinário	Multicamadas
Borracha para revestimento de piso	Poli-Isopreno	RCC	Têxteis, couros e borrachas
Embalagem para biscoitos e salgados	Polipropileno com filme metalizado	Extraordinário	Multicamadas
Tampa para garrafa PET	Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	Extraordinário	Plástico

Fonte: autoria própria.

7.2.2. Caracterização por análise térmica

7.2.2.1 Curvas TG, DTG e DSC para cada amostra coletada

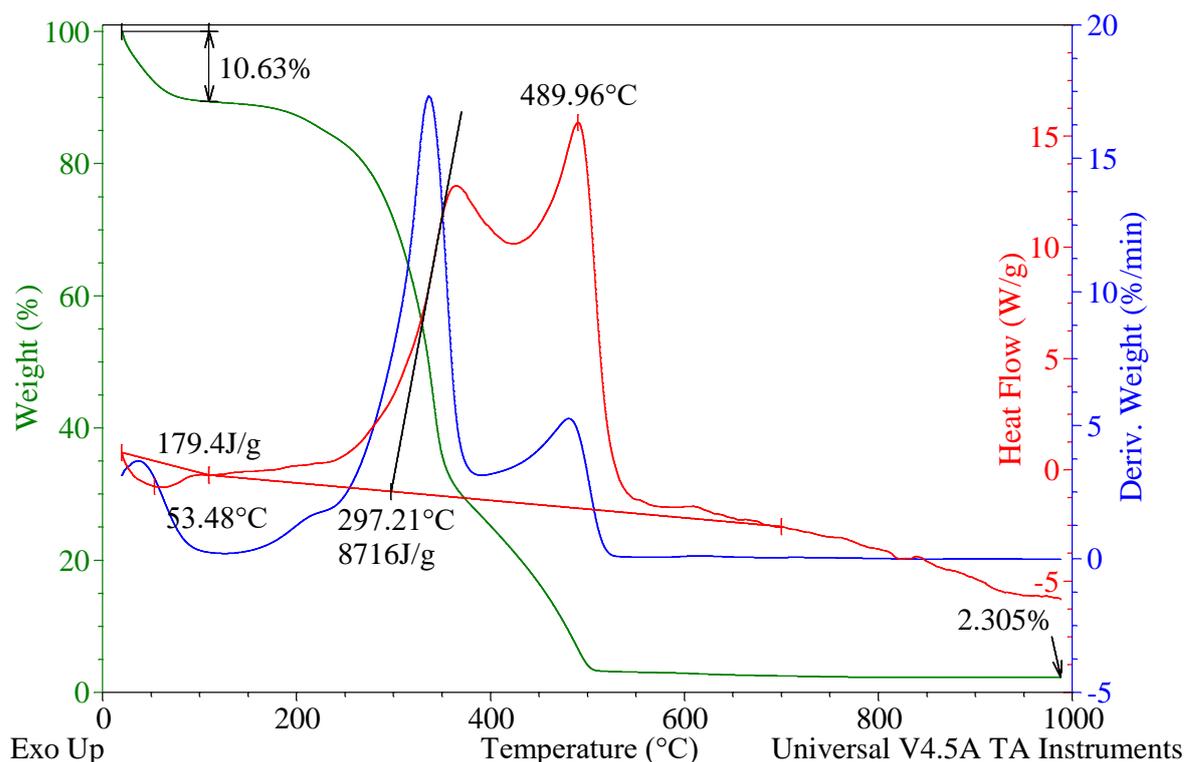
São apresentadas e discutidas, conforme Viana (2023), as curvas TG, DTG e DSC de cada amostra recolhida em campo, sendo analisadas individualmente, com algumas delas ilustradas nas curvas das Figuras de 27 a 32, ilustrando o comportamento de materiais como:

madeira, papel, plástico, orgânico, metal e vidro. Todas as demais curvas geradas estão disponíveis nos Apêndices deste estudo.

i. Amostra de madeira (Biomassa Lignocelulósica)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de madeira são apresentadas na Figura 27.

Figura 27 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de madeira analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado, a curva DTG apresenta três picos principais, os quais identificam três etapas de perda de massa. A primeira etapa refere-se à Vaporização da Água presente no material, a qual gera um pico DSC endotérmico cuja Entalpia é de 179,4 J/g. Logo depois o material seco sofre e Combustão em duas etapas, gerando dois picos DSC exotérmicos de Entalpia de 8716 J/g. Nessa etapa os componentes estruturais orgânicos (hemicelulose, celulose e lignina) da madeira são queimados, restando as Cinzas inorgânicas ao final do processo. O somatório da Entalpia de Vaporização com a de Combustão fornece a Entalpia resultante do processo de queima da madeira, ou seja: $\Delta H_{\text{queima}} = -179,40 + 8.716,00 = 8.536,60$ J/g. Pela curva TG é possível afirmar que durante o processo de queima ocorre uma perda de massa de 97,69%, restando ao final do experimento um teor de Cinzas de 2,31%. Durante a

Vaporização e a Combustão ocorrem, respectivamente, as perdas de massa são de 10,63% e 87,06%.

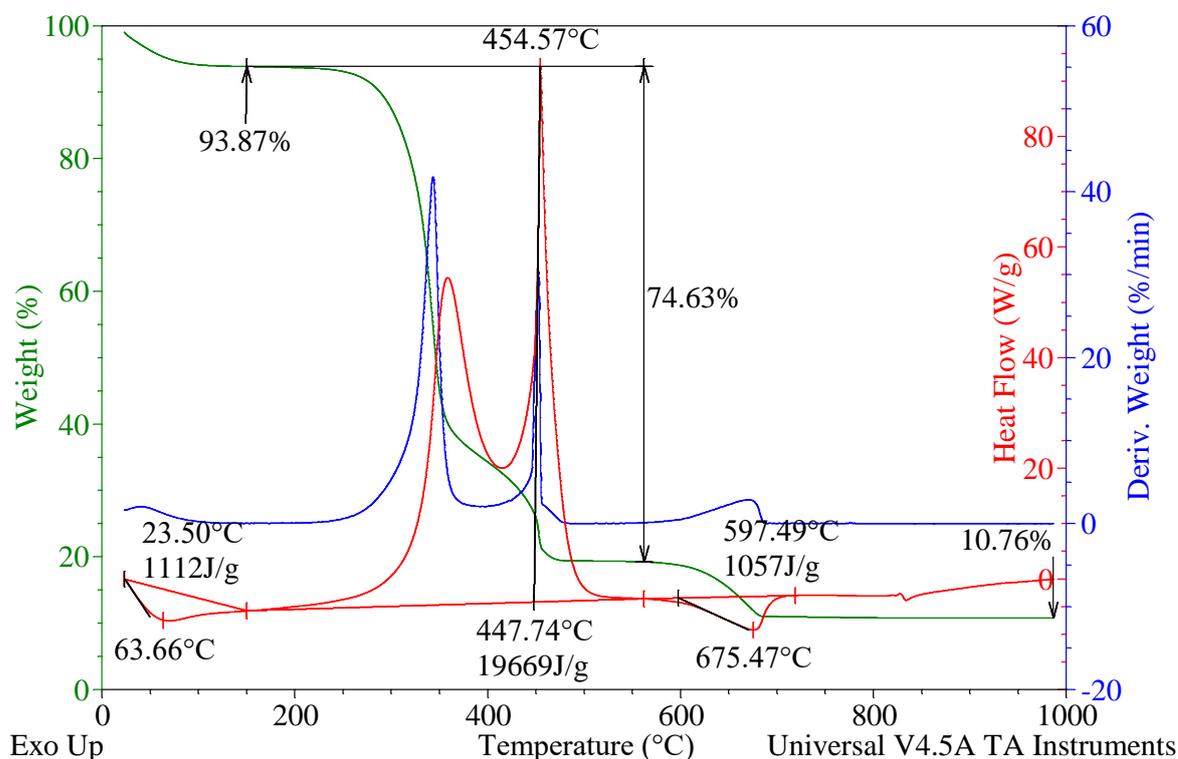
Desta forma, os dados de interesse obtidos para a amostra de madeira foram os seguintes:

- Umidade (%) = 10,63;
- Cinzas (%) = 2,31;
- ΔH_{queima} (J/g) = 8.536,60.

xiii. Amostra de papel branco A4 (papel com gramatura de 75-120 g/m² e tamanho A4)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel branco A4 são apresentadas na Figura 28.

Figura 28 - Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel branco A4 analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

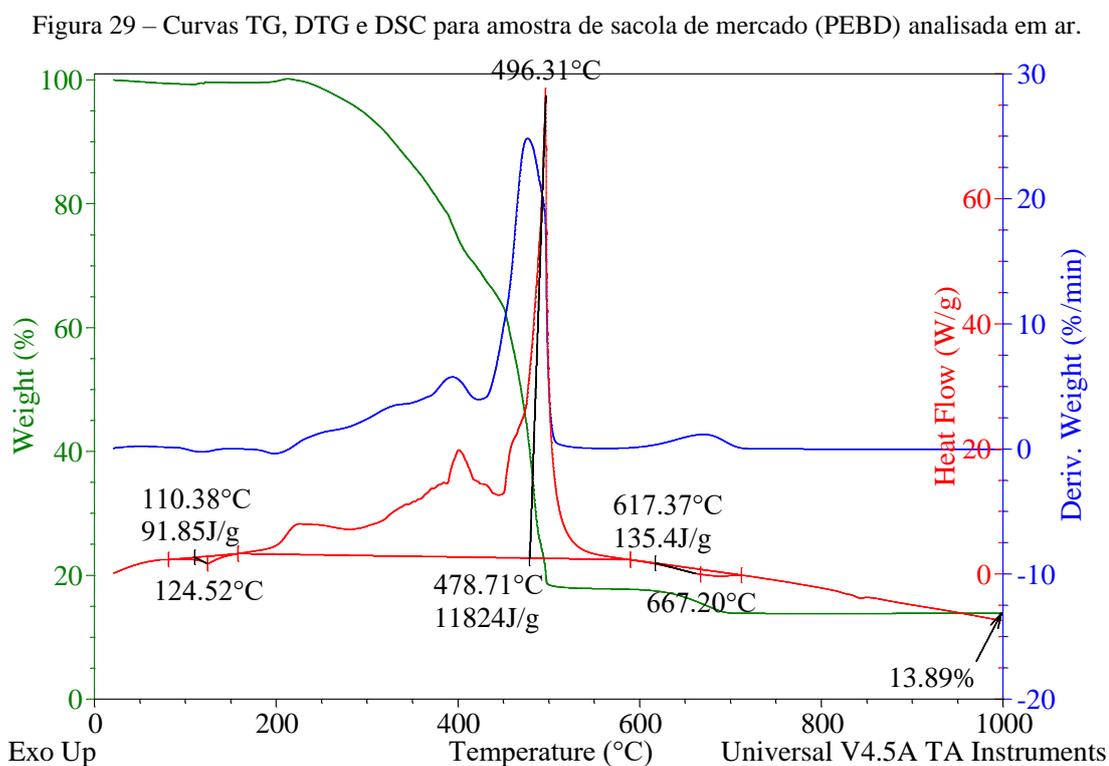
De acordo com a curva DTG o papel A4 possui quatro etapas de perda de massa que totalizam uma diminuição de 89,24% da massa da amostra, restando ao final do processo de

queima cerca de 10,76% de Cinzas. A primeira etapa refere-se à Vaporização de Água, sendo caracterizada por um pico DSC endotérmico com Entalpia de 1.112 J/g. As duas etapas posteriores referem-se à Combustão da amostra, gerando picos DSC exotérmicos com Entalpia de 19.669 J/g. A quarta etapa refere-se à decomposição do carbonato de cálcio existente no papel, o que gera um pico endotérmico na curva DSC cuja Entalpia é de 1057 J/g. Pela curva TG é possível verificar que a Vaporização da Água e a Combustão da amostra provocam, respectivamente, perdas de massa de 6,13% e 74,63%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de papel A4 foram:

- Umidade (%) = 6,13;
- Cinzas (%) = 10,76;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 1.112,00 + 19.669,00 - 1.057,00 = 17.500,00$.

xix. Amostra de sacola de mercado (PEBD)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de sacola de mercado (PEBD) são apresentadas na Figura 29.



Fonte: autoria própria.

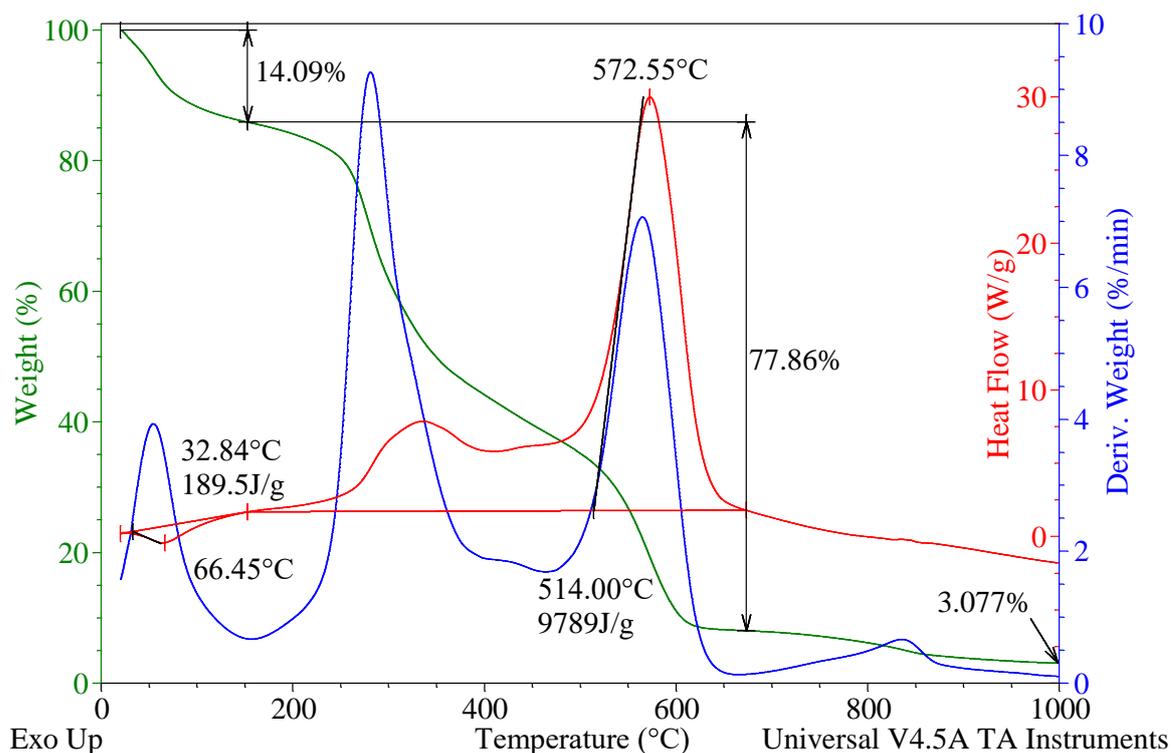
Pela curva DTG são verificadas quatro etapas de perda de massa, sendo as três primeiras referentes a Combustão (150°C a 600°C) e a terceira referente a decomposição de algum material mais estável existente na amostra. Pela curva DSC pode ser observada a fusão do material, o que gera um pico endotérmico com Entalpia de 91,85 J/g. Logo depois a amostra sofre Combustão em três etapas, o que gera três picos DSC exotérmicos com Entalpia de 11.824 J/g. Após 600°C o material residual sofre decomposição, a qual é caracterizada por gerar um pico DSC endotérmico com Entalpia de 135,4 J/g. Pela curva TG nota-se que o processo de queima é responsável pela perda de massa de 86,11%, restando massa de Cinzas de 13,89%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de sacola de mercado foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 13,89;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 91,85 + 11.824,00 - 135,40 = 11.596,75$.

ii. **Amostra de sobras de comida (combinado de grãos, frutas, carnes, legumes e cascas)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de sobras de comida são apresentadas na Figura 30.

Figura 30 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de sobras de comida analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado pela curva DTG, a amostra possui quatro etapas principais de perda de massa. A primeira etapa refere-se à perda de Umidade presente na amostra, a qual é responsável pelo pico endotérmico na curva DSC, cuja Entalpia é de 189,5 J/g. As duas etapas posteriores são referentes a Combustão do resíduo, a qual gera dois picos DSC exotérmicos de Entalpia de 9789 J/g. Em seguida, a mistura de sais inorgânicos presentes na amostra (NaCl e KCl) sofre Vaporização, restando ao final do processo cerca de 3,08% de Cinzas. A Entalpia de Vaporização dos sais não foi levada em consideração por não gerar um pico DSC bem definido, o que impossibilitou estimá-la.

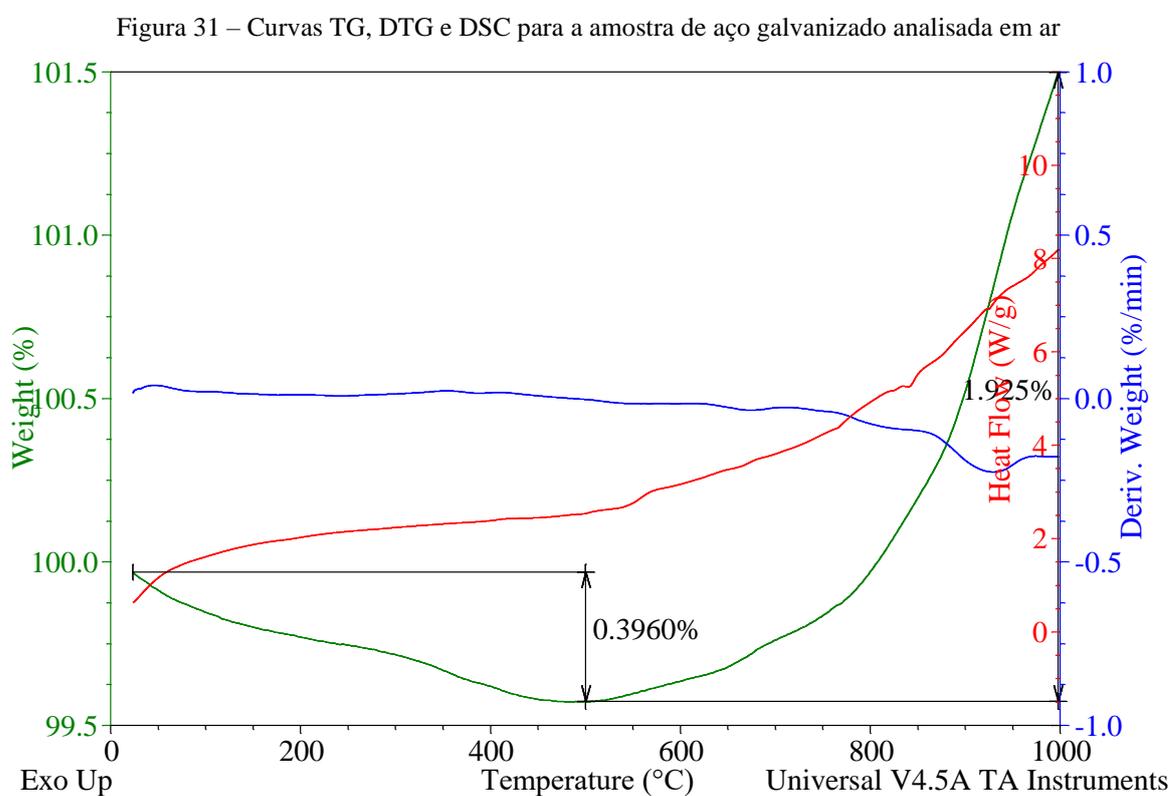
Pela curva TG, pode-se verificar que a amostra perdeu 96,92% de massa durante o processo de queima, sendo 14,09% da perda referente a Vaporização da Água e 77,86%

referente a Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de sobras de comida foram:

- Umidade (%) = 14,09;
- Cinzas (%) = 3,08;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 189,50 + 9789,00 = 9.599,50$.

iii. Amostra de canaleta para eletrodutos (aço galvanizado)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de aço galvanizado são apresentadas na Figura 31.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pela curva TG, o aço galvanizado perde 0,39% de massa até 500°C e logo depois ele ganha 1,92% de massa quando aquecido até 1000°C. A perda de massa verificada deve-se a contaminação da amostra, tanto antes de sua coleta, quando durante seu manuseamento no laboratório. O acréscimo da massa é dado pela oxidação do ferro presente no material, o que gera um efeito exotérmico após 500°C, devido ao deslocamento da

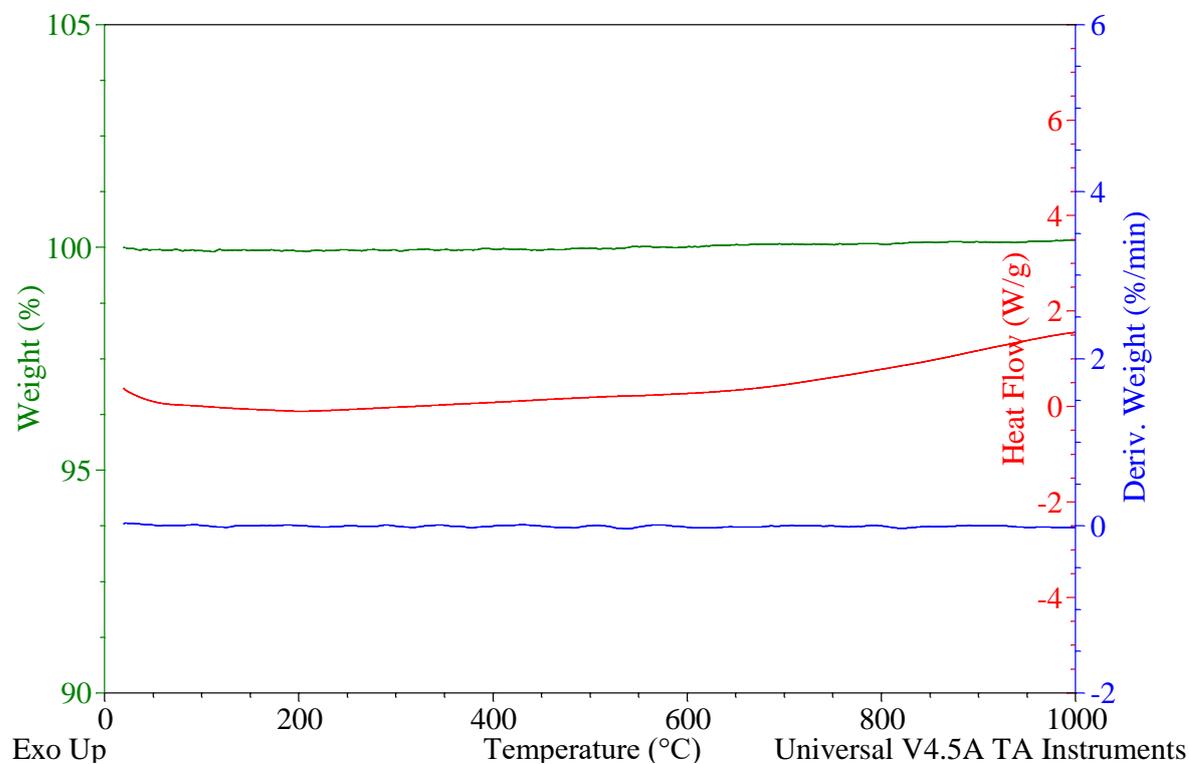
curva DSC para cima. Pelo fato da curva DSC não gerar picos (exotérmicos ou endotérmicos) bem definidos, os efeitos térmicos do processo de queima do aço galvanizado não serão considerados. Como essa amostra não é orgânica, quanto maior for seu percentual na massa de resíduos, menores serão os ganhos energéticos num processo real de Incineração. Isso ocorre porque não é energeticamente efetivo aquecer a amostra até 500°C, para somente depois o processo se tornar exotérmico, gerando um efeito inferior ao gerado pela Combustão de resíduos orgânicos, por exemplo. Desta forma, os dados de interesse obtidos para a amostra de aço galvanizado foram os seguintes:

- Umidade (%): não verificada;
- Cinzas (%) = 101,5;
- ΔH_{queima} (J/g) = não verificado.

iv. Amostra de vidro (Areia, Barrilha e Calcário)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de vidro são apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra vidro analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado pelas curvas TG, DTG e DSC, a amostra de vidro não sofreu perda de massa e nem gerou efeito térmico relevante. Assim sendo, quanto maior for o seu percentual na massa de resíduos incinerada, menores serão as taxas de recuperação de Energia, tendo em vista que tal amostra ocupará o volume de um material com possível potencial energético. Apesar da tecnologia de Incineração por *Mass Burning* se diferenciar das demais por requerer um pré-processamento mínimo da massa de resíduos, a remoção da fração vidro é recomendada.

Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de vidro foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 100;
- ΔH_{queima} (J/g) = 0,00;

Na Tabela 13 são agrupadas as informações de interesse para todos os resíduos testados, especificando sua nomenclatura técnica, a classificação de acordo com a MG, o percentual do resíduo na MG, além dos dados de Umidade, Cinzas e Entalpia de queima. A Tabela 14 segue a mesma proposição da tabela anterior, porém somente com os resíduos, de fato, não recicláveis. Na intenção de escolher a fração não reciclável, optou por excluir as tipologias de metais, vidros, plásticos, papel e papelão, sendo consideradas não recicláveis as frações de matéria orgânica, rejeitos, têxteis, couros, borrachas e as embalagens multicamada. Esse conjunto de tipologias não recicláveis totalizam 67,8% da MG nacional.

Por questões naturais, a matéria orgânica é reciclável, podendo ser transformada em composto orgânico por compostagem, sem gerar poluentes atmosféricos como ocorre na Incineração. O motivo pelo qual optou-se por estudar sua Incineração se deu pelos seguintes fatos:

- a. aquisição de conhecimento a respeito do comportamento térmico de uma amostra o mais representativa possível;
- b. na prática, esse resíduo não é coletado pelos catadores e acaba sofrendo disposição em aterros ou lixões, onde sofre decomposição, gerando os lixiviados de aterro e GEEs como o Metano, um gás com PAG maior que o do Dióxido de Carbono gerado na Incineração;
- c. com os futuros incentivos ao tratamento térmico, tendo em vista o Decreto nº 11.043/2022, que regulamentou a PNRS (2010), o qual propõe que, até 2040, haja

a reciclagem ou a recuperação energética de quase a metade dos resíduos gerados no Brasil (48%), evitando-se, inclusive, conflitos com associações de catadores, os quais coletam as frações recicláveis dos resíduos, e não frações orgânicas.

Tabela 13 – Informações de interesse para todos os resíduos testados.

Nomenclatura técnica - Nomenclatura popular	Classificação pela MG	MG (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)	ΔH queima (J/g)
Combinado de grãos, carnes, frutas, legumes, cascas - Sobras de comida	Matéria orgânica	45,30	14,09	3,08	9599,50
Biomassa Lignocelulósica - Madeira para escoras, calços	Matéria orgânica	45,30	10,63	2,31	8536,60
Acetato de celulose - Ponta de cigarro	Plástico	16,80	2,96	2,94	5973,14
Polipropileno (PP) - Copo plástico descartável	Plástico	16,80	0,00	4,20	6150,65
Polipropileno (PP) - Tampa de tubo para creme dental	Plástico	16,80	0,00	0,75	6837,99
Poliestireno expandido (EPS) - Isopor para marmitas	Plástico	16,80	1,86	2,47	12317,46
Poliestireno (PS) - Prato descartável de plástico	Plástico	16,80	0,00	4,51	21470,37
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) - Embalagem plástica transparente	Plástico	16,80	0,00	0,20	15461,13
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) - Sacola de mercado	Plástico	16,80	0,00	13,89	11596,75
Polietileno de Alta Densidade - Tampa para garrafa PET	Plástico	16,80	0,00	1,22	21868,50
Papel gramatura 18-25 g/m2 - Papel toalha usado	Rejeitos variados	15,50	5,40	11,03	7259,02
Papel gramatura de 17-19 g/m2 - Guardanapo usado	Rejeitos variados	15,50	12,27	1,05	7203,80
Papel gramatura 120-240 g/m2 - Papel pardo	Papel e Papelão	10,40	11,64	0,40	7840,10
Papel gramatura 75-120 g/m2 - Papel de caderno escolar	Papel e Papelão	10,40	6,19	4,93	24249,10
Papel gramatura de 75-120 g/m2 - Papel branco tamanho A4	Papel e Papelão	10,40	6,13	10,76	17500,00
Papelão micro ondulado tipo E - Papelão	Papel e Papelão	10,40	8,91	5,12	6555,70
Couro animal curtido ao Cromo - Luva de vaqueta	Têxteis, couros e borrachas	5,60	17,67	7,13	27619,00
Poli-Isopreno - Borracha para revestimento de piso	Têxteis, couros e borrachas	5,60	0,00	4,09	11076,00
Barrilha, Calcário e Areia - Vidro de uso indefinido	Vidro	2,70	0,00	100,00	0,00
Aço Galvanizado - Canaleta para eletrodutos	Metal	2,30	-	101,50	-
Papel gramatura 40-100 g/m ² + Polipropileno - Embalagem de sabonete	Multicamadas	1,40	3,43	5,26	7572,20
Papel gramatura 50-65 g/m ² + Polietileno + Folha de Al - Embalagem de suco/leite	Multicamadas	1,40	5,64	10,58	34931,70
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e Al - Tubo de creme dental	Multicamadas	1,40	0,00	18,91	9467,57
Polipropileno com filme metalizado - Embalagem para biscoitos e salgados	Multicamadas	1,40	0,00	2,06	23940,29
Média ponderada baseada na MG	-	-	6,08	5,56	11.544,53

Fonte: autoria própria.

Tabela 14 – Informações de interesse para os resíduos considerados não recicláveis.

Nomenclatura técnica - Nomenclatura popular	Classificação pela MG	MG (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)	ΔH queima (J/g)
Combinado de grãos, carnes, frutas, legumes, cascas - Sobras de comida	Matéria orgânica	45,30	14,09	3,08	9599,50
Biomassa Lignocelulósica - Madeira para escoras, calços	Matéria orgânica	45,30	10,63	2,31	8536,60
Papel gramatura 18-25 g/m ² - Papel toalha usado	Rejeitos variados	15,50	5,40	11,03	7259,02
Papel gramatura de 17-19 g/m ² - Guardanapo usado	Rejeitos variados	15,50	12,27	1,05	7203,80
Couro animal curtido ao Cromo - Luva de vaqueta	Têxteis, couros e borrachas	5,60	17,67	7,13	27619,00
Poli-Isopreno - Borracha para revestimento de piso	Têxteis, couros e borrachas	5,60	0,00	4,09	11076,00
Papel gramatura 40-100 g/m ² + Polipropileno - Embalagem de sabonete	Multicamadas	1,40	3,43	5,26	7572,20
Papel gramatura 50-65 g/m ² + Polietileno + Folha de Al - Embalagem de suco/leite	Multicamadas	1,40	5,64	10,58	34931,70
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e Al - Tubo de creme dental	Multicamadas	1,40	0,00	18,91	9467,57
Polipropileno com filme metalizado - Embalagem para biscoitos e salgados	Multicamadas	1,40	0,00	2,06	23940,29
Média ponderada baseada na MG	-	-	10,88	3,94	9.889,51

Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado pelas médias ponderadas apresentadas nas Tabelas 13 e 14, o processo de queima das amostras não recicláveis gerou uma menor Entalpia, o que já era previsto, tendo em vista a ausência dos plásticos que possuem altos potenciais de geração de Energia. Além disso, o teor de Umidade das amostras não recicláveis é maior, o que irá impactar negativamente na geração de Energia dado o caráter endotérmico da Vaporização da Água.

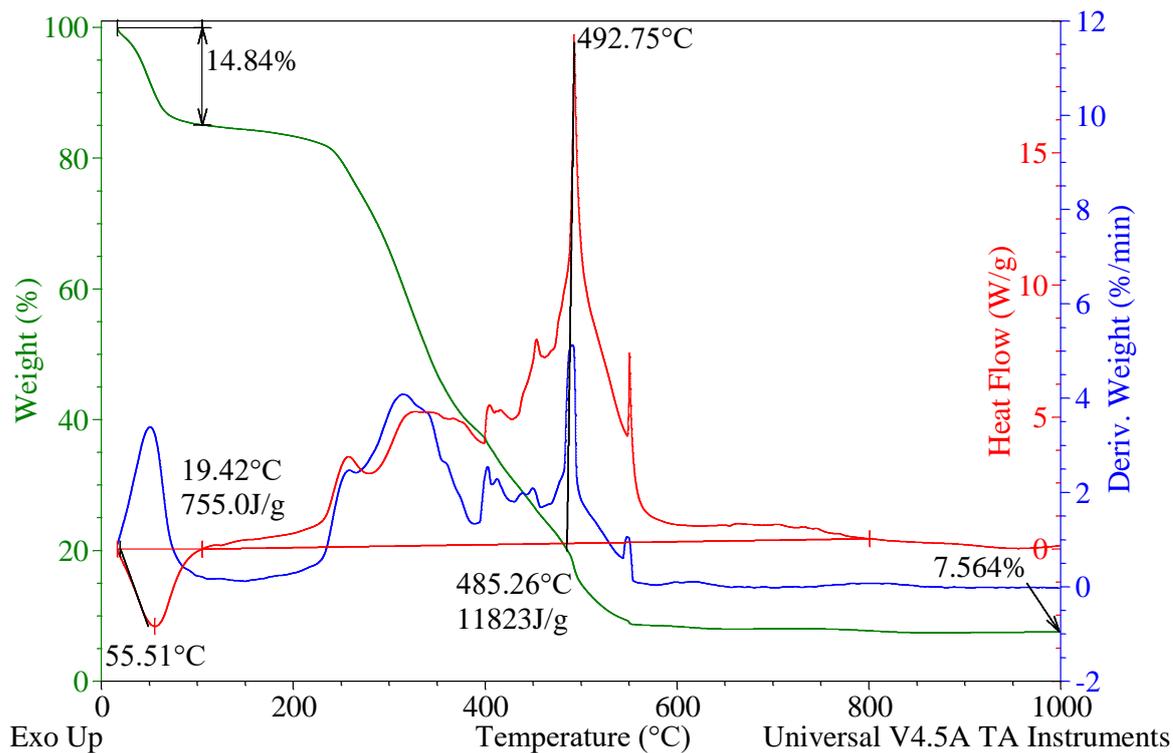
Ao se comparar o teor de Cinzas, a média ponderada para a matriz não reciclável é menor, o que também já era esperado porque alguns materiais recicláveis como os metais e os vidros constituem materiais não combustíveis e, no caso dessa dissertação, contribuem com, respectivamente, 100% e 101,5% de Cinzas. O vidro não ganhou e nem perdeu massa, já o aço galvanizado ganhou massa por oxidação.

Em estudo a respeito da avaliação técnico-econômica de uma planta de Incineração de resíduos sólidos no bairro do Caju, Andretti (2021) estimou o PCI para os resíduos coletados no município do Rio de Janeiro, encontrando 9.832 J/g, um valor próximo às médias ponderadas das Entalpias de queima apresentadas nas Tabelas 17 e 18, as quais equivalem ao PCI dos resíduos.

7.2.2.2 Curvas TG, DTG e DSC da combinação (mistura) de todas as amostras coletadas

Conforme metodologia descrita no subitem 6.2.2, após a preparação das misturas de todos os resíduos coletados em campo, foram obtidas as curvas TG, DTG e DSC, sendo apresentadas e discutidas, conforme Viana (2023), na Figura 33.

Figura 33 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de combinados baseada na matriz total analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme a curva DTG, a amostra apresentou uma etapa inicial de perda de Água por Vaporização até cerca de 110°C, logo depois a amostra sofreu Combustão, em inúmeras etapas de perda de massa, que se estendeu até cerca de 600°C. Pela curva DSC é possível verificar um pico endotérmico de Vaporização com Entalpia de 755 J/g, além de inúmeros picos exotérmicos de Combustão, que totalizaram uma Entalpia de 11.823 J/g. Observando a curva TG verifica-se que a amostra perde 14,84% de massa pela Vaporização da Água, além de 77,60% pela Combustão de seus constituintes orgânicos, restando ao final do processo de queima cerca de 7,56% de Cinzas.

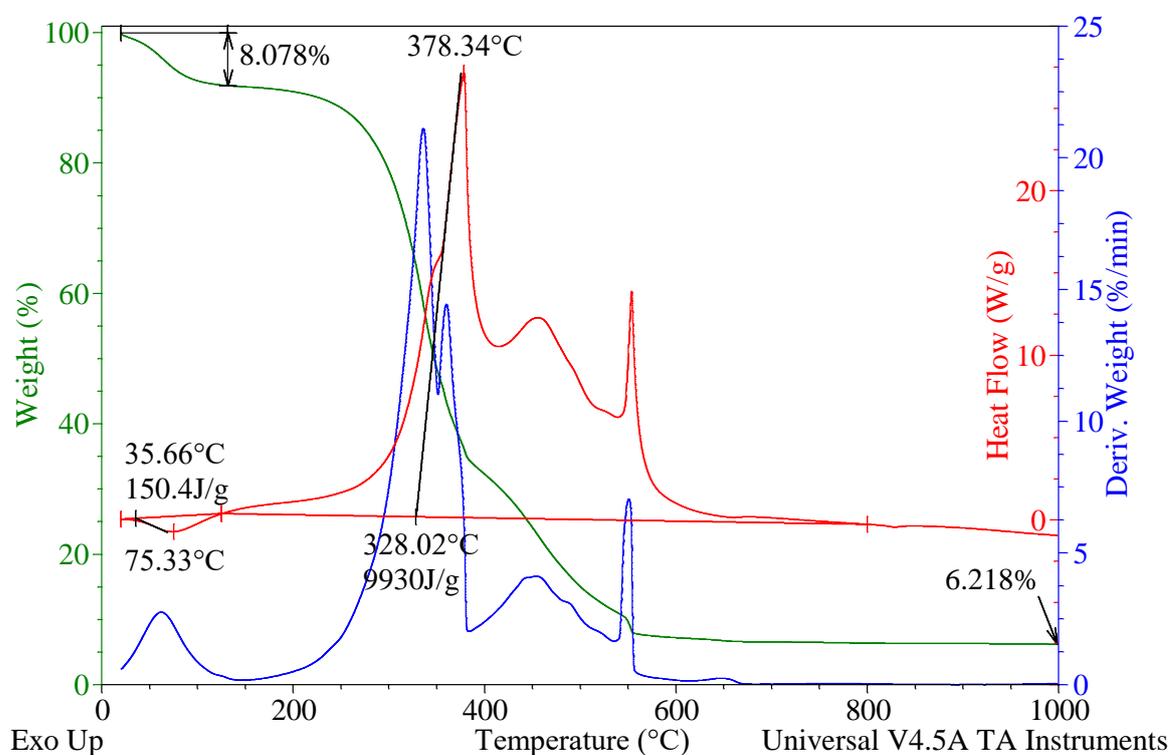
Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra combinados baseados na matriz total foram:

- Umidade (%) = 14,84;
- Cinzas (%) = 7,56;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 755,00 + 11.823,00 = 11.068,00$.

7.2.2.3 Curvas TG, DTG e DSC da combinação (mistura) apenas dos não recicláveis encontrados nas amostras coletadas

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de combinados baseada na matriz de não recicláveis são apresentadas e discutidas, conforme Viana (2023), na Figura 34.

Figura 34 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de combinados baseada na matriz de não recicláveis analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser visto na curva DTG, a amostra apresentou uma perda inicial de Água por Vaporização até cerca de 150°C e logo depois sofreu Combustão, um processo que ocorreu em quatro etapas de perda de massa, que se estendeu até cerca de 600°C. Pela curva DSC é possível verificar um pico endotérmico de Vaporização com Entalpia de 150,4 J/g, além de três picos exotérmicos de Combustão que totalizaram uma Entalpia de 9.930 J/g.

Pela curva TG pode-se visualizar que a perda de massa na Vaporização da Água e na Combustão dos orgânicos presentes na amostra foram de, respectivamente, 8,08% e 85,70%, restando cerca de 6,22% de Cinzas ao final do processo de queima. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra combinados baseados na matriz de não recicláveis foram:

- Umidade (%) = 8,08;
- Cinzas (%) = 6,22;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 150,40 + 9.930,00 = 9.779,60$.

Na Tabela 15 são apresentados os dados Umidade, Cinzas e Entalpia de queima para as amostras individuais (média ponderada) e amostras combinadas, levando em consideração a matriz gravimétrica total (Grupos I e II) e a de não recicláveis (Grupos III e IV).

Conforme pode ser verificado, os valores de Entalpia dos grupos com amostras de todos os resíduos (I e II) são superiores aqueles das amostras de resíduos não recicláveis (III e IV). Essa situação ocorre pela ausência dos plásticos nas amostras de resíduos não recicláveis, o que diminui o potencial geração de Energia nesses casos.

Tabela 15 – Informações de interesse para as amostras individuais e combinadas.

Grupo	Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	$\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)}$
I	Média ponderada de todos os resíduos coletados	6,08	5,56	11.544,53
II	Combinado de todos os resíduos coletados	14,84	7,56	11.068,00
III	Média ponderada dos resíduos não recicláveis	10,88	3,94	9.889,51
IV	Combinado dos resíduos não recicláveis	8,08	6,22	9.779,60

Fonte: autoria própria.

Já quando as amostras do grupo I são comparadas com a do II, os valores correspondentes à Entalpia de queima são relativamente próximos entre si. A mesma situação ocorreu ao se comparar as amostras do grupo III e IV, o que indica que os combinados produzidos retrataram de um modo muito próximo a média ponderada da Entalpia do total de resíduos que foram coletados.

Pelos dados da Tabela 15, também pode ser notado que a ausência de metais e vidros nas amostras de resíduos não recicláveis (III e IV), diminui a quantidade de Cinzas, uma vez que são materiais não combustíveis.

Nota-se também que para todas as amostras as diferenças mais acentuadas são atribuídas à Umidade, o que se deve, possivelmente, à estrutura não homogênea dos materiais

coletados, erros no momento de preparação das amostras de combinados, além de outras possíveis contaminações durante o armazenamento e manuseamento.

Apesar dessas diferenças e limitações, todas as amostras de resíduos (totais ou não recicláveis) atendem às premissas para um de projeto de uma URE, conforme o guia para Recuperação energética de resíduos sólidos da CNI, ou seja: Umidade menor que 45%, teores de Cinzas menores que 35% e poder Calorífico mínimo de 1.200 kcal/kg, ou 5.024 J/g. Em URE com grelhas mecanizadas, especifica-se utilizar resíduos com poder Calorífico de 7.800 J/g a 12.500 J/g (CNI, 2019).

Como referencial para os cálculos de conversão em Energia Elétrica útil, serão consideradas as Entalpias das amostras de resíduos combinados (Grupos II e IV da Tabela 19), ou seja 11.068 J/g para o caso de incinerar todos os resíduos e 9.779,60 J/g para o caso de incinerar somente a fração não reciclável.

É importante complementar que os dados de Entalpia resultantes das análises térmicas em atmosfera em ar são uma medida da quantidade de Energia Térmica liberada no processo de queima completa dos resíduos, ou seja, equivale ao Poder Calorífico dos mesmos. Assim, quando se determina o Poder Calorífico de uma substância pelo método convencional utiliza-se a bomba Calorimétrica.

Pela utilização da bomba Calorimétrica, o que se mede é o Poder Calorífico Superior (PCS), que considera o Calor gerado por unidade de massa de amostra, na queima de todos os seus orgânicos, acrescido do Calor de condensação da Água em fase Vapor presente, pois está é condensada pelo resfriamento promovido pela camisa d'Água que envolve a câmara de Combustão e que está a temperaturas próximas a do ambiente.

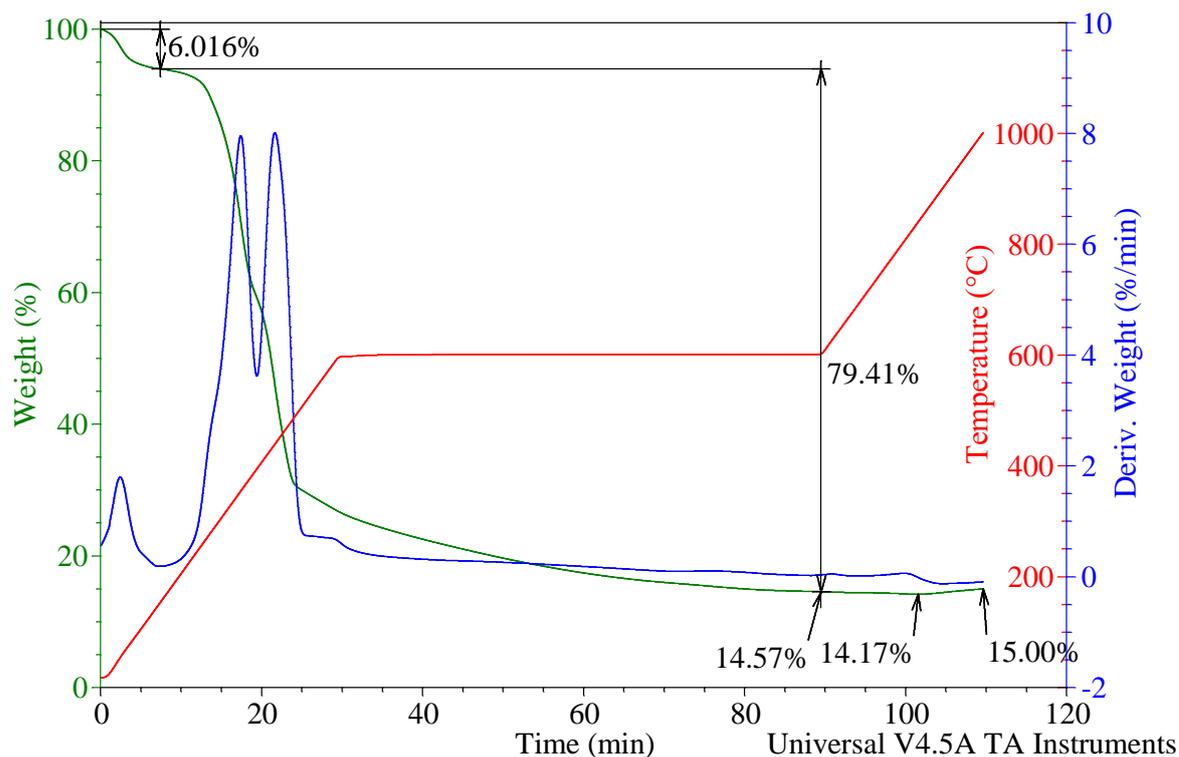
Já o Poder Calorífico Inferior (PCI) considera que a Água gerada e ou volatilizada no processo de queima fica como Vapor na fase gasosa, não sendo computado o Calor de sua condensação. Assim sendo, uma análise térmica estima a Entalpia que se refere ao PCI, visto que o Vapor d'Água gerado no processo de queima não condensa ao encontrar as paredes do forno, que estão em alta temperatura, sendo levado pelo gás de arraste (ar na vazão de 100 ml/min) para o mecanismo de exaustão do equipamento.

7.2.3. Caracterização por análise imediata

7.2.3.1. Caracterização por análise imediata da mistura de todas as amostras coletadas

As curvas TG, DTG e de variação de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz total são apresentadas e discutidas, conforme Viana (2023), na Figura 35.

Figura 35 – Curvas TG, DTG e de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz total.



Fonte: autoria própria.

Conforme a metodologia, o experimento foi conduzido em atmosfera inerte (N_2) para medir Umidade e material volátil, e em atmosfera oxidante (Ar) para medir Carbono Fixo e Cinzas. Nesse contexto, conforme pode ser observado na Figura 76, a perda de massa inicial se refere a Umidade. O material volátil é a massa perdida após a secagem e sua estimativa se estende até o final da isoterma em $600^\circ C$, quando o gás de arraste é trocado para ar. Logo depois o Carbono Fixo é queimado, restando no final a massa de Cinzas. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de combinados baseada na matriz total foram:

- Umidade (%) = 6,02;
- Material volátil (%) = 79,41;
- Carbono Fixo (%) = 0,40;

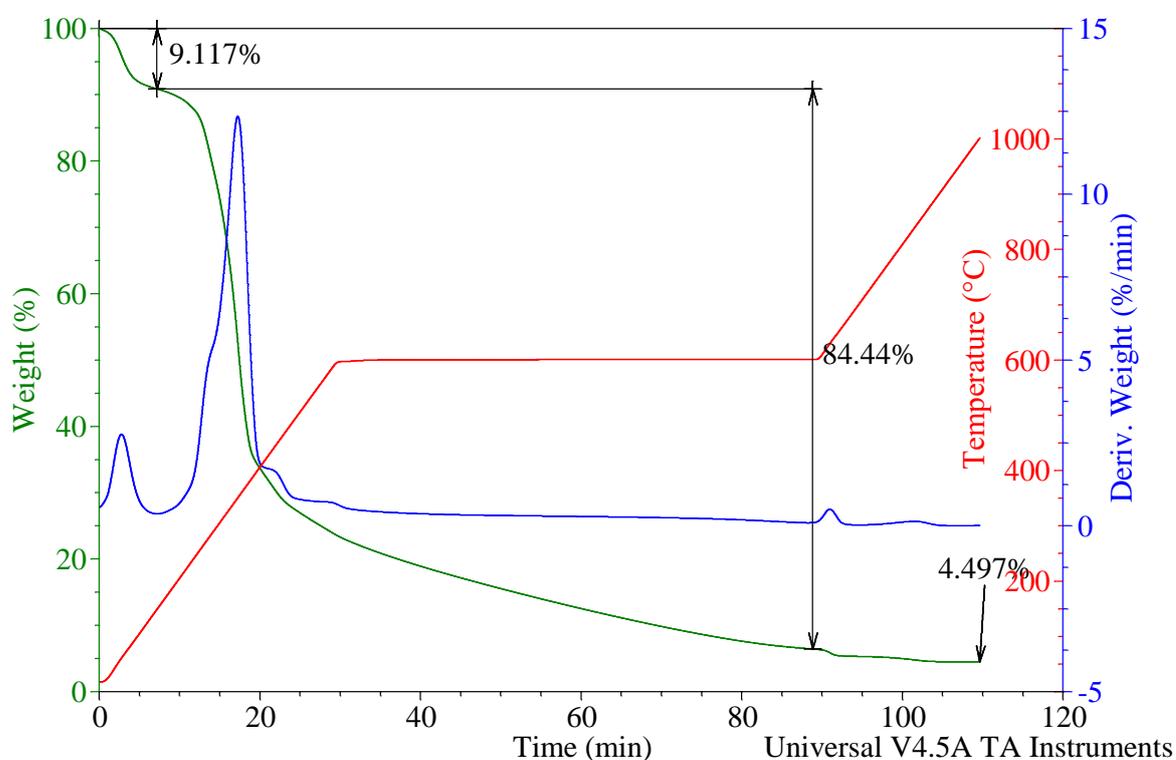
- Cinzas (%) = 15,00.

Nota-se que após a perda de Carbono Fixo o material oxidou, ganhando 0,83% de massa, sendo por isso que a somatória dos percentuais foi de 100,83%.

7.2.3.2. Caracterização por análise imediata da mistura de não recicláveis encontrados nas amostras coletadas

As curvas TG, DTG e de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz de não recicláveis são apresentadas e discutidas, conforme Viana (2023), na Figura 36.

Figura 36 – Curvas TG, DTG e de temperatura para a amostra de combinados baseada na matriz não reciclável.



Fonte: autoria própria.

Pela análise da figura acima, pode-se observar que os dados de interesse obtidos para a amostra de combinados baseada na matriz de não recicláveis foram:

- Umidade (%) = 9,12;
- Material volátil (%) = 84,44;
- Carbono Fixo (%) = 1,94;

- Cinzas (%) = 4,50.

Diferentemente do caso da matriz total, nesse caso a somatória dos percentuais deu 100%, tendo em vista que desta vez não ocorreu a oxidação, típica da fração reciclável dos metais, os quais não fazem parte da composição dessa amostra testada.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das análises imediatas para as amostras combinadas.

Tabela 16 – Resultados das análises imediatas para as amostras combinadas.

Amostra	Umidade (%)	Material volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Baseada na matriz total	6,02	79,41	0,40	15,00
Baseada na matriz não reciclável	9,12	84,44	1,94	4,50

Fonte: autoria própria.

Conforme os dados apresentados, foram observados menores percentuais de Umidade, material volátil e Carbono Fixo na amostra baseada na matriz gravimétrica total, o que pode ser explicado pelos seguintes motivos:

- Os plásticos se decompõem antes de 600°C, não compactuando com a geração de Carbono Fixo, o qual é determinado após essa temperatura;
- Os resíduos recicláveis como metais e vidros não são materiais combustíveis e não perdem massa, assim sendo, a presença desses resíduos tende a aumentar a quantidade de Cinzas e a diminuir os percentuais de Umidade, material volátil e Carbono Fixo;

Observou-se também que as duas amostras de combinados atendem às condições mínimas para um projeto de URE por Incineração, o qual aponta as seguintes exigências: Umidade menor que 45%, material volátil maior que 40%, Carbono Fixo menor que 15% e teor de Cinzas menor que 35% (CNI, 2019).

7.2.4. Cálculo da energia elétrica útil

A conversão da Entalpia do processo de queima dos resíduos (J/g) para Energia Elétrica útil (MWh) será realizada para os casos das amostras combinadas, conforme apresentado a seguir.

i. Conversão para os resíduos combinados baseados na matriz gravimétrica total

Conforme já visto na Tabela 19, o PCI dos resíduos combinados baseados na matriz total é de 11.068 J/g, o que equivale a 3,07 MWh/tonelada de resíduos. Segundo Rodriguez (2011), assumindo que as perdas energéticas na Caldeira, Cinzas e gases exaustão são cerca de 10%, então o Calor de entrada na Turbina é equivalente a 2,77 MWh/t de resíduos.

De acordo com o INEA (2017), a URE-Caju irá gerar Vapor Superaquecido a 420°C e a 65 bar, o qual seguirá para uma Turbina geradora de Eletricidade com eficiência térmica de 25%. Assim, podem ser produzidos cerca de 0,69 MWh/t dos resíduos. Como o projeto prevê um consumo interno de Energia Elétrica de 9,7%, a URE poderá injetar cerca de 0,62 MWh/t de resíduos na rede elétrica.

Conforme verificado no item 7.1, as frações classificadas como extraordinários e RCC, totalizaram, no triênio de 2017 a 2019, uma geração média de 3.861,05 toneladas anuais. Assim sendo, no caso desses resíduos serem incinerados na URE-Caju, a produção líquida de Energia Elétrica é estimada em 2.394 MWh/ano.

Considerando que para um habitante da região sudeste, durante o ano de 2021, foram consumidos em média cerca de 770 kWh (EPE, 2022), o potencial energético dos resíduos analisados poderia atender até 3.109 habitantes ao ano, 1.036 unidades habitacionais com três moradores ou mesmo 777 unidades com quatro moradores.

ii. Conversão para os resíduos combinados na matriz gravimétrica não reciclável

Conforme já visto na Tabela 19, o PCI dos resíduos combinados baseados na matriz não reciclável é de total é de 9.779,6 J/g, o que equivale a 2,72 MWh/t de resíduos. Segundo Rodriguez (2011), assumindo que as perdas energéticas na Caldeira, Cinzas e gases exaustão são cerca de 10%, então o Calor de entrada na Turbina é equivalente a 2,44 MWh/t de resíduos.

Seguindo a mesma lógica para a matriz gravimétrica total, de acordo com o INEA (2017), a URE-Caju irá gerar Vapor Superaquecido a 420°C a 65 bar, o qual seguirá para uma Turbogenerador com eficiência de 25%, produzindo-se, então, cerca de 0,61 MWh/t de resíduos.

Como o projeto prevê um consumo interno de Energia Elétrica de 9,7%, a URE poderá injetar cerca de 0,55 MWh/t de resíduos na rede elétrica.

Conforme verificado no item 7.1, as frações classificadas como extraordinários e RCC, totalizaram, no triênio de 2017 a 2019, uma média de 3.861,05 toneladas anuais. Dessa quantidade, 66,4%, ou 2.563,74 toneladas anuais¹⁰, são dadas como não recicláveis (incluindo matéria orgânica); assim sendo, caso somente os resíduos, de fato, não recicláveis sejam incinerados na URE-Caju, a produção líquida de Energia Elétrica está estimada em 1.415 MWh/ano.

Considerando que para um habitante da região sudeste, durante o ano de 2021, foram consumidos em média cerca de 770 kWh (EPE, 2022), o potencial energético dos resíduos analisados poderia atender até 1.838 habitantes ao ano, 613 unidades habitacionais com três moradores ou mesmo 460 unidades com quatro moradores.

A Tabela 17 resume os dados de interesse para de conversão de Entalpia de queima dos resíduos em Energia Elétrica útil.

Tabela 17 – Dados de PCI, produção líquida de Energia Elétrica e habitantes atendidos

Amostra	PCI (MJ/kg)	Produção líquida de Energia Elétrica por massa de resíduo (MWh/t)	Massa de resíduos a ser direcionada para URE-Caju (t/ano)	Produção líquida de Energia Elétrica (MWh/ano)	Habitantes atendidos/ano	Unidades habitacionais com três (3) moradores	Unidades habitacionais com quatro (4) moradores
Baseada na matriz total	11,07	0,62	3.861,05	2.394,00	3.109	1.036	777
Baseada na matriz não reciclável	9,78	0,55	2.563,74	1.415,37	1.838	613	460

Fonte: elaboração própria.

¹⁰ Valor com base em 66,4% da Matriz Gravimétrica ABRELPE (2020), apresentada no subitem 6.2.2 – somando-se: 45,30% de Matéria orgânica; 5,60% de resíduos têxteis, couros e borrachas; e 15,50% rejeitos. Como a massa total média anual enviada ao CTR-Rio é de 3.861,05 toneladas, temos: $0,664 \times 3.861,05 = 2.563,74$ toneladas ao ano.

Em termos comparativos, Andretti (2021) estimou a Energia Elétrica útil gerada pela Combustão de RSU no município do Rio de Janeiro. Nessa estimativa ele considerou uma composição média do RSU com um PCI estimado em 9,83 MJ/kg. Além disso, foram assumidos 10% de perdas de Energia Térmica antes do Vapor entrar nas Turbinas, a qual operou na temperatura de 400°C, sob pressão de 40 bar, possibilitando alcançar uma eficiência de recuperação energética de 28%. Assim, o autor estimou que podem ser produzidos cerca de 0,7 MWh de Eletricidade por tonelada de resíduos, sendo 15% para consumo interno da URE-Caju, podendo ser exportada para rede, como Energia Elétrica útil, cerca de 0,6 MWh/t de RSU.

Henriques (2004) pesquisou o reaproveitamento energético de resíduos sólidos e verificou uma produção de Energia Elétrica bruta de 0,7 MWh/t de RSU.

Assim, pode-se verificar que os dados obtidos pela literatura corroboram com os dados que foram estimados por DSC, o que indica a possibilidade de aplicação dessa técnica analítica em uma eventual futura tomada de decisão.

7.3. ESTIMATIVA DO PAG NA GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFRJ

Após os cálculos sobre a recuperação energética dos resíduos, os tópicos seguintes serão dedicados à análise do PAG gerado pela redução das distâncias percorridas pela frota de caminhões de transporte, comparando-se a gestão atualmente empregada, com transporte rodoviário até o aterro sanitário de Seropédica (CTR-Rio), seguido de sua disposição final, com uma gestão alternativa considerando o transporte dos resíduos para as futuras instalações da URE-Caju, seguido de sua Incineração.

7.3.1. Distâncias entre origem e destinação dos resíduos na gestão atual

A seguir, estão identificadas as distâncias que cada tipo de resíduo sólido gerado pela UFRJ percorre até chegar ao seu ponto de destinação final, refletindo-se acerca do impacto ambiental causado pelos veículos de carga das empresas terceirizadas, cooperativas da UFRJ e da COMLURB, em termos de poluição atmosférica gerada pela queima de Óleo Diesel. Pela pesquisa junto à PU-UFRJ e aos terceirizados envolvidos no transporte de resíduos, as distâncias percorridas, os veículos automotores e o consumo médio de combustível, desde a origem até o ponto de destinação final, foram descritos das Tabelas 18 a 21, respectivamente para os resíduos recicláveis, extraordinários, RCC, químicos e de RSS. Conforme informado pelas empresas contratadas DELURB e FDG, as ETR para onde os resíduos extraordinários e RCC são normalmente transportados são as do Caju, Jacarepaguá e Marechal Hermes, em razão do seu raio de proximidade com cada ponto de origem identificado no subitem 5.1.3 deste texto. Parte dos resíduos químicos e a totalidade dos RSS possuem destinação para dois aterros sanitários particulares, respectivamente, nas cidades de Magé e Nova Iguaçu.

Ressalta-se que os resíduos perigosos radioativos não foram computados pois, além de dispostos diretamente no IEN-CNEN, nenhum dado fora cedido para este estudo, a despeito do seu setor responsável ter sido contactado por diversas oportunidades.

Tabela 18 – Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Recicláveis.

Origem	Armazenamento temporário	Destinação	Km percorridos até a Cooperativa Rede Recicla Verde	Frota utilizada	Consumo de Óleo Diesel por trecho até a Cooperativa (litros)
Campus Ilha do Fundão	Centros de triagem no CCS e no CT (somente os resíduos oriundos do Campus Ilha do Fundão)		16,20		2,49
Campus Praia Vermelha	-		31,80		4,89
Campus Duque de Caxias	-		5,70		0,88
Instituto de Filosofia e Ciências Sociais (IFCS)	-		24,60	FORD CARGO 1119 – Capacidade de carga 7,0 toneladas – Rendimento motor de 3 km/litro – fabricado a partir de 2013 – Diesel	3,78
Faculdade de Direito	-		23,30		3,58
Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)	-	Cooperativa de reciclagem – Rede Recicla Verde – Avenida Monte Castelo, 155 – Jardim Gramacho, Duque de Caxias, RJ	23,50	+	3,61
Maternidade Escola	-		27,10	KIA BONGO 2500 TCI – Capacidade de carga 2,0 toneladas – Rendimento motor de 10 km/litro – fabricado antes de 2013 – Diesel	4,17
Museu Nacional	-		21,10	OBSERVAÇÃO: para o cálculo do consumo de Óleo Diesel até a Cooperativa, considerou-se a média de consumo da frota atuando em conjunto, ou seja, $(3+10) / 2 = 6,5$ km/l de Diesel.	3,25
Hospital Escola São Francisco de Assis (HESFA)	-		23,50		3,61
Escola de Música	-		27,60		4,25
Observatório do Valongo	-		24,70		3,80
Colégio Brasileiro de Altos Estudos	-		32,10		4,94

Fonte: *Google Maps*; PU-UFRJ (2021).

Tabela 19 - Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Extraordinários e RCC

Origem	Armazenamento temporário (km da origem)	Km média até uma ETR	Frota utilizada	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel até uma ETR	Km percorridos da ETR ao CTR-Rio	Km média percorrida até o CTR-Rio	Frota utilizada (COMLURB)	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel das ETR até o CTR-Rio
Campus Ilha do Fundão	ETR Caju (12,80)	28,43		9,48				
	ETR Jacarepaguá (48,50)							
	ETR Marechal Hermes (24,00)							
Campus Praia Vermelha	ETR Caju (15,80)	32,87		10,96				
	ETR Jacarepaguá (47,90)							
	ETR Marechal Hermes (34,90)							
Campus Duque de Caxias	ETR Caju (36,30)	42,23		14,08				
	ETR Jacarepaguá (60,80)							
	ETR Marechal Hermes (29,60)							
Instituto de Filosofia e Ciências Sociais (IFCS)	ETR Caju (12,50)	28,77	Volkswagen CONSTELLATION 24280 – Capacidade de carga 19 toneladas – Rendimento motor 3km/litro – fabricado a partir de 2013 – Diesel	9,59				
	ETR Jacarepaguá (43,80)							
	ETR Marechal Hermes (30,00)							
Faculdade de Direito	ETR Caju (7,00)	26,03		8,68			Mercedes Benz – AXOR 2540 – Capacidade de carga 30 toneladas – Rendimento motor 2km/litro – fabricado antes de 2013 – Diesel	
	ETR Jacarepaguá (42,40)							
	ETR Marechal Hermes (28,70)							
Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)	ETR Caju (7,30)	26,30		8,77				
	ETR Jacarepaguá (42,70)							
	ETR Marechal Hermes (28,90)							
Maternidade Escola	ETR Caju (10,80)	29,43	OBSERVAÇÃO: no cálculo do consumo médio de Óleo Diesel da origem até as ETR utilizou-se a distância média das distâncias de cada origem até o armazenamento temporário.	9,81				74,37
	ETR Jacarepaguá (45,00)							
	ETR Marechal Hermes (32,50)							
Museu Nacional	ETR Caju (8,60)	24,70		8,23				37,18
	ETR Jacarepaguá (39,00)							
	ETR Marechal Hermes (26,50)							
Hospital Escola São Francisco (HESFA)	ETR Caju (7,20)	26,27		8,76				
	ETR Jacarepaguá (42,70)							
	ETR Marechal Hermes (28,90)							
Escola de Música	ETR Caju (11,50)	28,90		9,63				
	ETR Jacarepaguá (44,50)							
	ETR Marechal Hermes (30,70)							
Observatório do Valongo	ETR Caju (8,30)	28,83		9,61				
	ETR Jacarepaguá (48,20)							
	ETR Marechal Hermes (30,00)							
Colégio Brasileiro de Altos Estudos	ETR Caju (17,00)	33,34		11,11				
	ETR Jacarepaguá (44,80)							
	ETR Marechal Hermes (38,30)							

Fonte: *Google Maps*; DELURB; FGP; PU-UFRJ (2021).

Tabela 20 – Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Químicos.

Origem	Armazenamento temporário	Km percorrida até a SANIPLAN	Frota utilizada	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel até a SANIPLAN	Destinação (três pontos distintos)	Km da SANIPLAN até cada um de seus pontos de destinação	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel até cada ponto de destinação
Campus Ilha do Fundão		38,40	Ford 816 baú – Capacidade de carga 4 toneladas – Rendimento motor 4,5km/litro – fabricado a partir de 2013 – Diesel	7,43	1. Central de Tratamento de Resíduos ESSENCIS (GRUPO SOLVIS) – Rodovia Santos Dumont s/nº Km 121,5 – Magé, RJ	32,50	6,29
Museu Nacional		37,60		7,28			
			+				
Campus Praia Vermelha		47,10	Volkswagen 10160 baú – Capacidade de carga 6 toneladas – Rendimento motor 7km/litro – fabricado a partir de 2013 – Diesel	9,12	2. AM CONSULTING – Av. Carneiro Campos, - Chácara Rio-Petrópolis - Duque de Caxias, RJ	5,20	1,00
Campus Duque de Caxias		8,70		1,68			
			+				
Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)	SANIPLAN – Avenida Mascarenhas de Moraes, 2409 - Chácara Rio-Petrópolis, Duque de Caxias, RJ	38,90	Volkswagen 17250 baú – Capacidade de carga 8 toneladas – Rendimento motor 4km/litro – fabricado antes de 2013 – Diesel	7,53	3. ECOFIRE – Rodovia Br 040, S/N, Zona Rural - Km: 822; Simão Pereira/MG	127,00	24,58
Maternidade Escola		49,30		9,54			
			OBSERVAÇÃO: conhecidas as distâncias entre as origens e a destinação temporária, utilizou-se, no cálculo do consumo de Óleo Diesel até a SANIPLAN, a média de consumo de diesel pela frota em conjunto, ou seja, $(4,5+7+4) / 3 = 5,17$ km/l de Diesel.	7,53			
Hospital Escola São Francisco de Assis (HESFA)		38,90					
						OBSERVAÇÃO: conhecidas as distâncias acima, da SANIPLAN até um dos três pontos, para o cálculo do consumo de Óleo Diesel até cada um deles, também se utilizou a média de consumo de Diesel da frota, em conjunto, ou seja, 5,17 km/l de Diesel.	

Fonte: CCS; *Google Maps*; PU-UFRJ; SANIPLAN (2022).

Tabela 21 - Relação entre distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos de Serviços de Saúde (RSS)

Origem	Armazenamento temporário	Km percorrida até a RODOCON	Frota utilizada	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel até a RODOCON	Destinação (CTR-Orizon)	Km da RODOCON até o CTR-ORIZON	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel até o CTR-ORIZON
Campus Ilha do Fundão		39,10		13,03	ORIZON, Central de Tratamento de Resíduos, Nova Iguaçu – Estrada de Adrianópolis, 5213, Jardim Cachoeira, Nova Iguaçu, RJ	26,40	8,80
Campus Praia Vermelha		45,80	Mercedes Benz – ATEGO 1419 – Capacidade 14 toneladas – Consumo médio 3km/litro – fabricado a partir de 2013 – Diesel	15,27			
Campus Duque de Caxias	RODOCON – Estrada Velha do Pilar, 1945 - Chácara Rio-Petrópolis, Duque de Caxias – RJ	6,10		2,03			
Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)		37,60		12,53		OBSERVAÇÃO: conhecida a distância, no cálculo do consumo de Óleo Diesel até a ORIZON, utilizou-se como referência o consumo de Diesel pela frota, ou seja, 3 km/litro.	
Maternidade Escola		44,30	OBSERVAÇÃO: conhecidas as distâncias, no cálculo do consumo de Óleo Diesel até a RODOCON, utilizou-se o consumo de Diesel pela frota, ou seja, 3 km/litro.	14,77			
Hospital Escola São Francisco de Assis (HESFA)		37,50		12,50			

Fonte: CCS; *Google Maps*; PU-UFRJ; RODOCON (2022).

7.3.2. PAG na gestão de resíduos atual

Os dados quantitativos indicados nos fluxogramas foram obtidos dos volumes de resíduos descartados, descritos no Item 7.1 (Tabela 11), bem como da média das distâncias e dos rendimentos dos motores da frota, conforme apresentado nas Tabelas 18 a 21.

Considerando-se os dados do subitem 7.3.1, foram feitos fluxogramas das diferentes cadeias de transporte dos diferentes tipos de resíduos sólidos, desde sua origem até os pontos de destinação, os quais são apresentados nas Figuras 37 a 41. Tais fluxogramas descrevem a situação atualmente em curso, ou seja, sem a aplicação da proposta de tratamento térmico de frações da massa total descartada e diminuição da quilometragem percorrida pela frota. Posteriormente, com base na proposta deste estudo, os fluxogramas serão revisados, indicando os benefícios que seriam gerados ao processo.

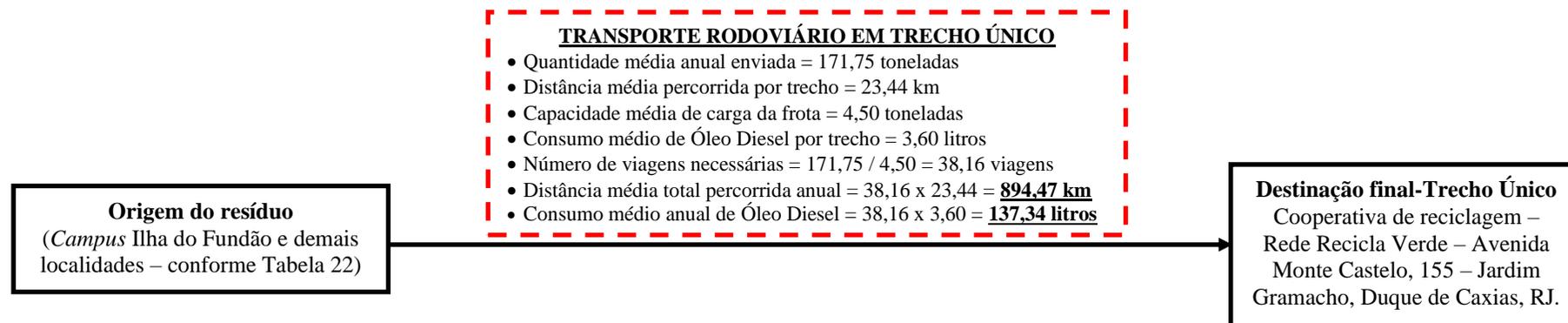
Na Figura 37, está ilustrado o fluxograma de transporte dos resíduos sólidos recicláveis, resumido em TRECHO ÚNICO conforme a média das distâncias entre as unidades geradoras da UFRJ e a cooperativa de reciclagem.

O fluxograma dos resíduos extraordinários e RCC são similares, sendo primeiramente depositados nas ETR (TRECHO 1) e, logo em seguida, destinados no CTR-Rio, em Seropédica-RJ (TRECHO 2), conforme ilustra a Figura 38 - ressaltando que, conforme descrito no Item 5.12 deste estudo, o percentual que segue ao CTR-Rio corresponde a correspondente a 95,48% para os extraordinários e 0,59% para RCC.

A figura 39 ilustra o fluxograma dos resíduos químicos, sendo primeiramente depositados nas dependências da terceirizada SANIPLAN (TRECHO 1) e, posteriormente, sendo fracionada para destinações distintas ao volume total coletado (TRECHO 2).

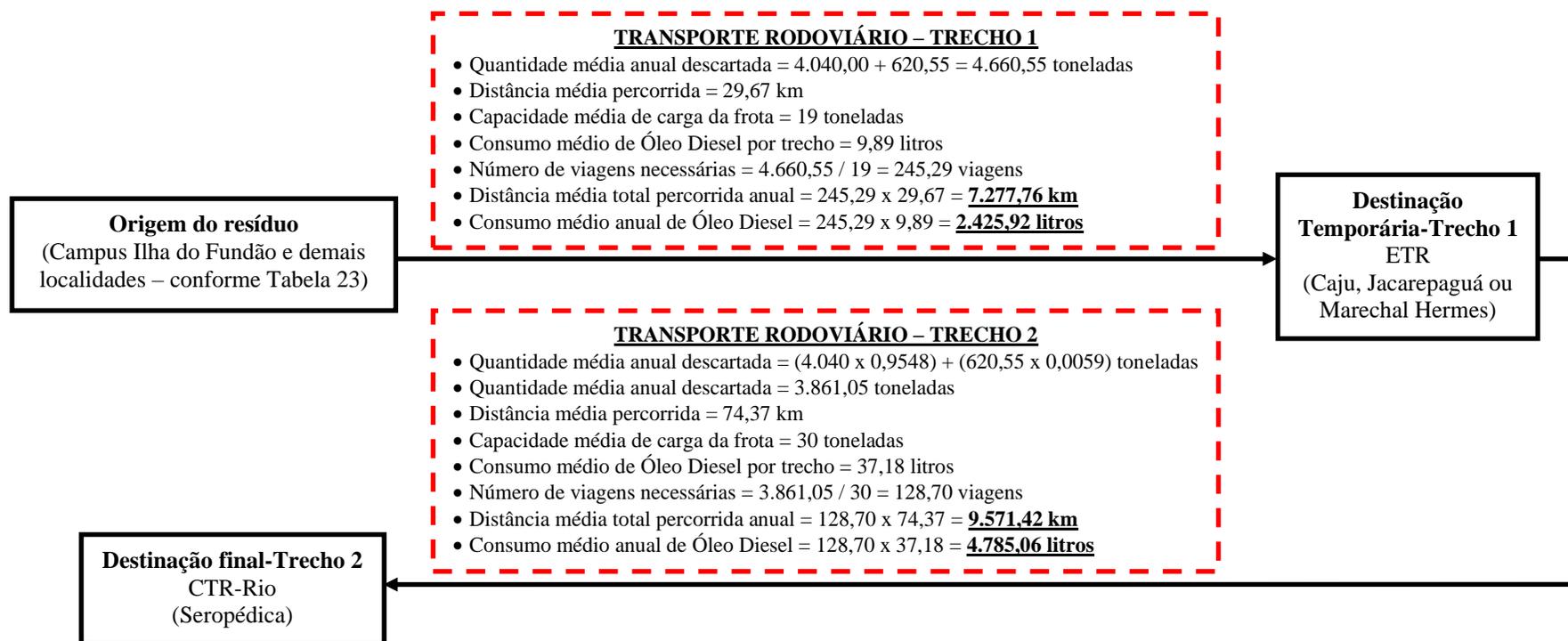
A Figura 40 ilustra o fluxograma dos RSS, em dois trechos, sendo primeiramente depositados nas dependências da terceirizada RODOCON (TRECHO 1) e, posteriormente, sua totalidade destinada a aterro industrial privado (CTR-ORIZON), em Nova Iguaçu-RJ (TRECHO 2).

Figura 37 - Fluxograma para os resíduos sólidos recicláveis.



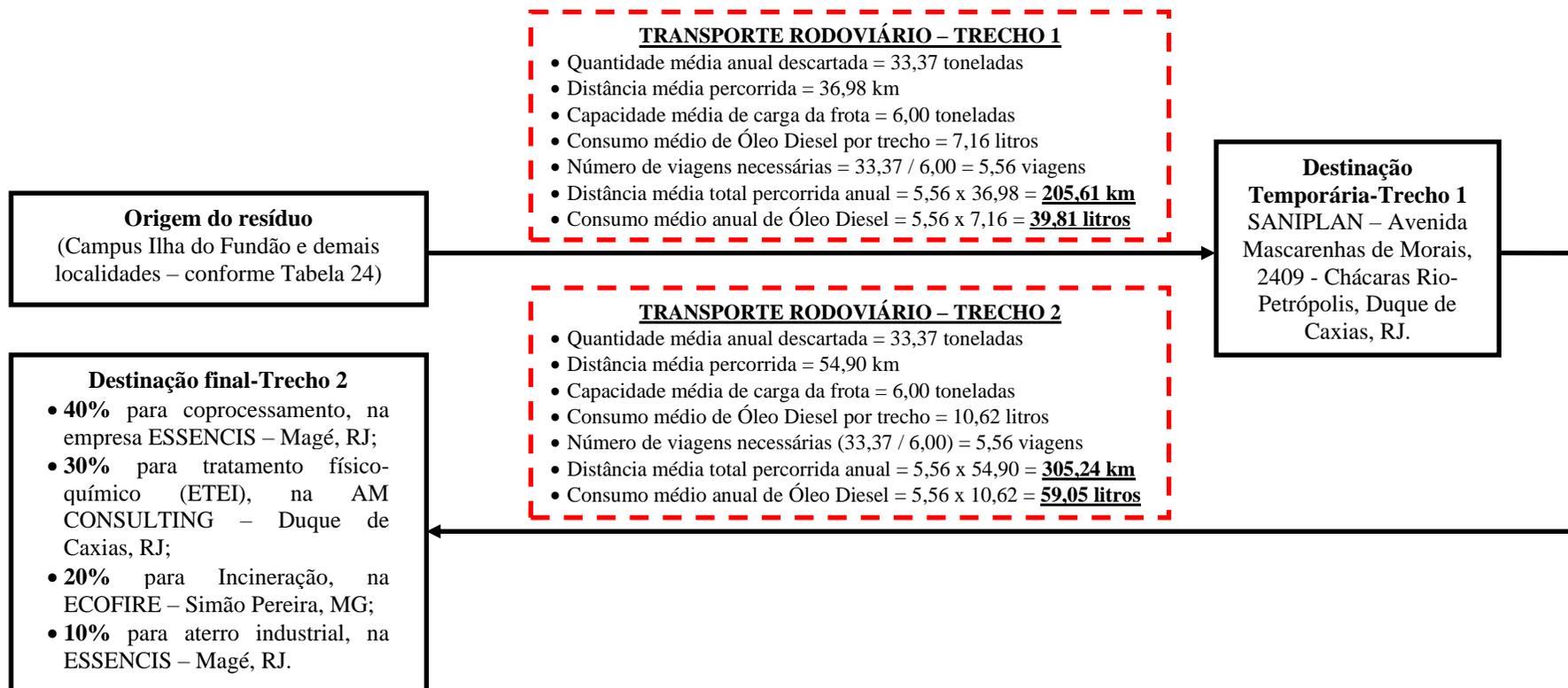
Fonte: autoria própria.

Figura 38 – Fluxograma para os resíduos sólidos extraordinários e RCC.



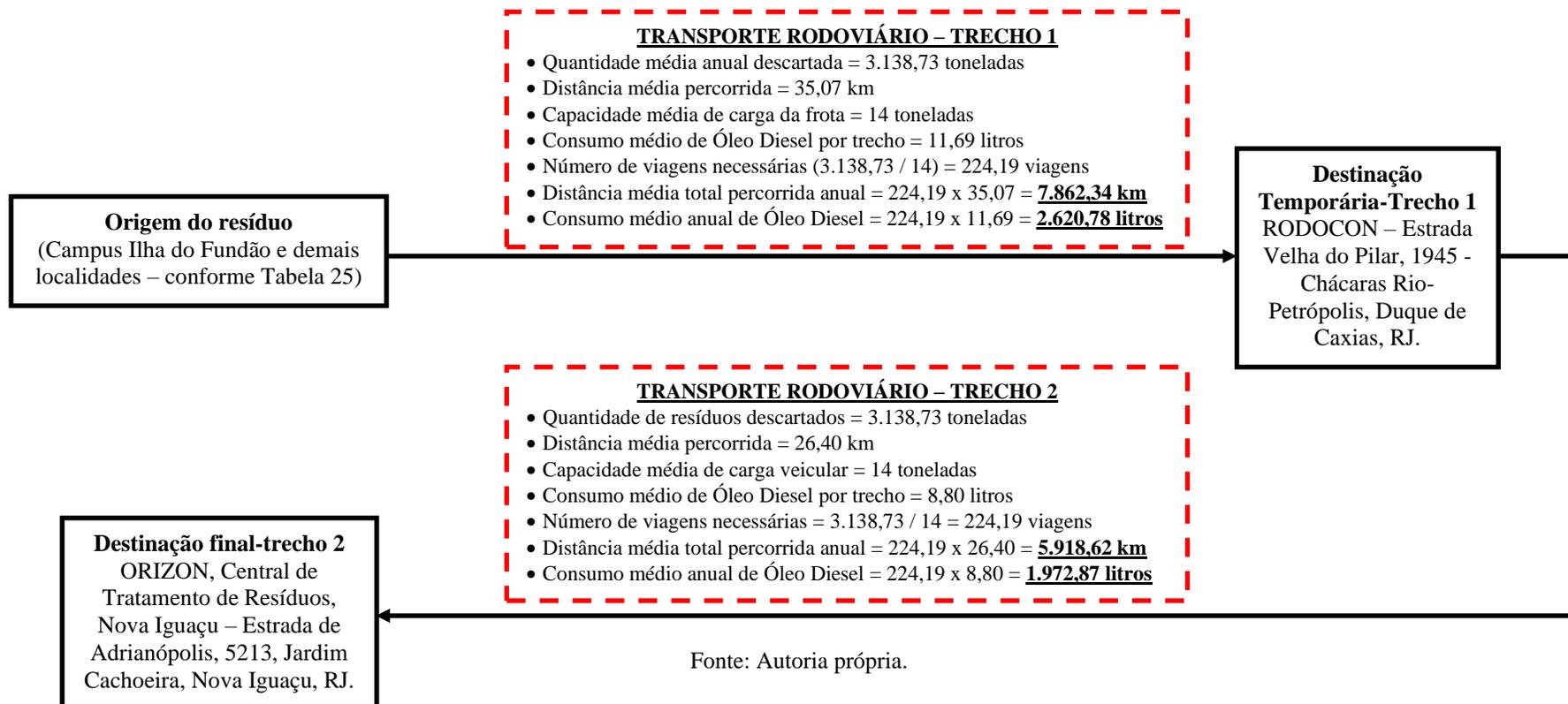
Fonte: autoria própria.

Figura 39 - Fluxograma para os resíduos químicos.



Fonte: autoria própria.

Figura 40 – Fluxograma para os RSS.



Após a coleta dos resíduos, eles são armazenados temporariamente, sendo então transportados e logo depois aterrados, conforme já apresentado nos fluxogramas. Assim sendo, o PAG da gestão atual de resíduos levou em consideração as emissões de GEEs associados ao transporte rodoviário (CO₂, CH₄ e N₂O) e aos processos de decomposição no aterro sanitário (CO₂ e CH₄).

i. PAG gerado pelo CO₂ na logística atual

A partir das informações sobre os trechos percorridos pela frota de transporte, podemos calcular a quantidade média gerada de CO₂ em cada trecho, com o objetivo de comparar com a sua quantidade gerada após a proposta de tratamento térmico dos resíduos sólidos gerados pela UFRJ.

Conforme proposto pelo IPEA (2011), utilizou-se um fator de emissão médio de 2,60 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado, somado a um valor médio de 0,50 kg de CO₂ emitidos no fluxo de produção e distribuição desse combustível no Brasil, chegando-se a uma taxa total de emissão em torno de 3,20 kg de CO₂/l de Diesel.

Há na literatura variações dessa proporção – por exemplo, 2,69 kg de CO₂/l de Diesel, conforme *Calculations and References, Gallons of Diesel consumed* (EPA, 2022), no entanto, foi usado o valor anterior por ser uma referência brasileira, ou seja, representa uma realidade mais próxima para o fator de emissão para o CO₂ no transporte rodoviário nacional.

Outro fator que corroborou com a escolha do fator de emissão de 3,20 kg CO₂/l de Diesel está relacionado com a consideração das emissões de CO₂ nas etapas de produção, distribuição e uso do diesel no cálculo do fator. A carga ambiental anterior, que está presente intrinsecamente no produto diesel, necessita ser levada em consideração para uma estimativa mais correta, não se limitando unicamente as emissões atmosféricas que ocorrem durante o uso do combustível no transporte rodoviário dos resíduos.

Considerando-se os trechos percorridos para o transporte de resíduos sólidos, desde a sua origem até os locais finais de disposição, com base nos dados descritos nos fluxogramas das Figuras 69 a 72, foram somadas as quantidades consumidas de Óleo Diesel em cada trecho, conforme é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Total de Óleo Diesel consumido para a logística de transporte atual.

Resíduo	Consumo médio de Óleo Diesel (da origem à disposição final)
Recicláveis	134,34 litros/ano
Extraordinários RCC	7.210,98 litros/ano
Químicos	98,86 litros/ano
RSS	4.593,65 litros/ano
Total	12.037,83 litros/ano

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 23 são descritas as distâncias médias percorridas para o cumprimento do fluxo pertencente a cada tipologia de resíduo:

Tabela 23 - Total de distâncias percorridas da logística de transporte atual.

Resíduo	Distâncias médias percorridas a cada tipologia (da origem à disposição final)
Recicláveis	894,47 km/ano
Extraordinários RCC	16.849,18 km/ano
Químicos	510,85 km/ano
RSS	13.780,96 km/ano
Total	32.035,46 km/ano

Fonte: autoria própria.

A Tabela 24 descreve os potenciais de aquecimento global (PAG), em kg eq.CO₂, gerado pelo CO₂ emitido na logística de transporte de cada tipologia de resíduo sólido gerado pela UFRJ. Considerou-se o PAG em relação ao CO₂ igual a 1 kg eq.CO₂, conforme o *Overview of Greenhouse Gases* (EPA, 2020), chegando-se a um valor de PAG de **38.521,70 eq.CO₂**.

Tabela 24 - Equivalente em CO₂ para a logística de resíduos não recicláveis descartados pela UFRJ

Resíduo	Período	GEE	Fator de CO ₂ (kg/l de Diesel)	PAG (kg eq.CO ₂)	Consumo médio de Óleo Diesel (litros/ano)	Emissão anual de CO ₂ (kg)	PAG anual (kg eq. CO ₂)	
			A	D	B	C = A x B	C x D	
Recicláveis	2017- 2019	CO ₂	3,20	1,00	134,34	429,89	429,89	
Extraordinários	RCC	2017- 2019	CO ₂	3,20	1,00	7.210,98	23.075,14	23.075,14
Químicos	2017- 2019	CO ₂	3,20	1,00	98,86	316,35	316,35	
RSS	2017- 2019	CO ₂	3,20	1,00	4.593,85	14.700,32	14.700,32	
Total						12.037,83	38.521,70	38.521,70

Fonte: IPEA (2011); EPA (2022); autoria própria.

ii. PAG do N₂O na logística atual

Nesta etapa será feito o cálculo do potencial de geração de N₂O relativo ao uso do Óleo Diesel como combustível da frota. Foi utilizado um fator de emissão de N₂O (0,0431 g/milha) conforme indicado pelo *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a) ou 0,000027 kg N₂O/km.

Essa emissão de N₂O na logística de transporte deve-se a carga ambiental que o diesel carrega anteriormente ao seu uso, ou seja, é uma emissão de N₂O que ocorreu dentro do ciclo de vida do Óleo Diesel, durante as etapas de extração do petróleo, passando pelo refino, estocagem, até a distribuição do referido combustível. Considerou-se o PAG em relação a N₂O igual a 298 kg eq.CO₂, conforme o *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a).

De acordo com a Tabela 27, temos uma distância percorrida pela frota estimada em 32.035,46 km anuais, significando que a quantidade total de N₂O gerada no período foi de $0,000027 \times 32.035,46 = 0,865$ kg N₂O anuais, o que equivale a um **PAG = 298 x 0,865 = 257,76 kg eq.CO₂**.

iii. PAG do CH₄ na logística atual

Nesta etapa será feito o cálculo do potencial de geração de CH₄ relativo ao uso do Óleo Diesel como combustível da frota. Foi utilizado um fator de emissão de CH₄ (0,0095 g/milha

ou 0,0000059 kg CH₄/km) conforme indicado pelo conforme indicado pelo *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a).

Essa emissão de CH₄ na logística de transporte deve-se à carga ambiental que o Diesel carrega anteriormente ao seu uso, ou seja, é uma emissão de CH₄ que ocorreu dentro do ciclo de vida do Óleo Diesel, durante as etapas de extração do petróleo, passando pelo refino, estocagem, até a distribuição desse combustível. Considerou-se o PAG em relação ao CH₄ igual a 25 kg eq.CO₂, conforme o *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a).

De acordo com a Tabela 27, temos uma distância percorrida pela frota estimada em 32.035,46 km anuais, significando que a quantidade total de CH₄ gerada no período foi de 0,0000059 x 32.035,46 = 0,189 kg CH₄ anuais, o que equivale a um **PAG = 25 x 0,189 = 4,73 kg eq.CO₂**.

iv. **PAG gerado pelo CH₄ emitido por aterro sanitário**

Nesta etapa será feito o cálculo do potencial de geração de CH₄ de uma massa de resíduos com teor de Carbono Orgânico Degradável (DOC), conforme metodologia adotada pelo IPCC (1996), a partir dos Resíduos Sólidos Depositados (MSW) da UFRJ atualmente no CTR-Rio. Como não são disponibilizados dados técnicos precisos sobre o aterro sanitário em questão, recomenda-se que a geração anual de CH₄ seja feita a partir da metodologia ilustrada na Equação 2 – extraída do *Module 6, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook*, IPCC (1996) –, a qual fornece uma estimativa razoável, considerando a quantidade e a composição dos resíduos depositados como constantes, ou variando lentamente ao longo de várias décadas.

$$\text{Emissões de CH}_4 \text{ (Gg/ano)} = (\text{MSW}_T \cdot \text{MSW}_F \cdot \text{MCF} \cdot \text{DOC} \cdot \text{DOC}_F \cdot F \cdot 16/12 - R) \cdot (1 - \text{OX}) \quad (2)$$

A massa anual de resíduos gerada na origem (resíduos extraordinários e RCC) é de 4.660,55 toneladas (**MSW_T** – *total Municipal Solid Waste* ou Resíduos sólidos produzidos totais), conforme descrito no item 7.1 (Tabela 12) deste estudo, ou **MSW_T = 4,66 Gg/ano**.

Igualmente conforme o item 7.1, é enviada ao CTR-Rio uma fração dos resíduos sólidos produzidos correspondente a um **MSW_F** (Fração destinada dos resíduos sólidos produzidos ao aterro) = $\frac{3861,05 \text{ t}}{4660,55 \text{ t}} = \mathbf{0,83}$.

De acordo com o IPCC (1996), para o valor do MCF (Fator de correção de Metano), considerando o CTR-Rio um aterro industrializado, temos um valor de **MCF = 1,0**. Para o Brasil, o IPCC (1996) sugere um **DOC** (Fração de Carbono Orgânico Degradável) = **0,12**.

Considerando que a decomposição do DOC não ocorre completamente, e parte do material potencialmente degradável sempre permanece no local, mesmo por um período de tempo muito longo (IPCC, 1996), devemos encontrar a Fração de DOC dissociada (DOC_f). Mendes e Sobrinho (2007) utilizaram em seu estudo a Equação 3, com a temperatura $T(^{\circ}C)$ do resíduo na zona (de digestão) anaeróbia igual a $50^{\circ}C$. Assim:

$$DOC_F = (0,014 \times T) + 0,28 \quad (3)$$

Temos, então, que:

$$DOC_F = (0,014 \times 50) + 0,28.$$

Assim:

$$DOC_F = 0,98.$$

O IPCC (1996) considera o valor padrão **F** (fração de metano em gás de aterro) = **0,5**. Considerou-se o valor de recuperação de CH_4 igual a zero, ou **R = 0**, conforme recomenda o IPCC (1996). Este valor só deverá ser alterado se houver referências que documentem a quantidade de recuperação de CH_4 . Conforme ainda recomenda o IPCC (1996), o uso de estimativas não documentadas do potencial de recuperação de gás de aterro sanitário, caso fossem usadas, não é apropriado, pois iria superestimar essa quantidade de recuperação.

O valor de **OX** (fator de oxidação) é **igual a 0**, valor padrão, conforme indicado na mesma metodologia IPCC (1996).

Desta forma:

$$CH_4 \text{ (Gg/ano)} = (4,66 \times 0,83 \times 1,0 \times 0,12 \times 0,98 \times 0,5 \times 16/12 - 0,00) \times (1 - 0) = 0,30 \text{ Gg/ano.}$$

Temos, então, que:

$$CH_4 \text{ (Gg/ano)} = 303.323,55 \text{ kg/ano.}$$

A Tabela 25 ilustra a conversão do volume de CH_4 gerado pela massa de resíduos sólidos emitidos ao CTR-Rio, convertidos em kg eq.CO₂, considerando-se o PAG em relação ao CH_4 igual a 25 kg eq.CO₂, conforme o *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a), chegando-se a um valor de **PAG de 7.580.888,50 kg eq.CO₂**.

Tabela 25 - Equivalentes de CO₂ com relação ao CH₄ emitido no fluxo atual.

Resíduo	Período	GEE	PAG (kg eq.CO ₂)	Referência	Emissão anual de CH ₄ (Gg)	Emissão anual de CH ₄ (kg)	PAG anual (kg eq.CO ₂)	
			A		B	B'	A x B'	
Extraordinários	RCC	2017- 2019	CH ₄	25	EPA (2022)	0,30	303.323,55	7.583.088,75

Fonte: autoria própria.

v. PAG gerado pelo CO₂ emitido no aterro sanitário

Em termos quantitativos, com relação ao gás produzido em aterro sanitário, com referência aos estudos de Alhassan et al (2019), admitimos uma proporção de CO₂ no volume do gás de aterro produzido em torno de 40%. Desta forma, considerando-se os 303.323,55 kg CH₄/ano, conforme os dados da Tabela 29, iguais a, aproximadamente, 50% do total do gás de aterro, calcula-se a massa relativa ao CO₂ em 242.658,84 kg CO₂/ano, ou um **PAG anual de 242.658,84 kg eq.CO₂**.

vi. Balanço do PAG resultante na gestão atual

O PAG relativo a cada um dos GEE analisados – CO₂, CH₄ e N₂O –, seja pela queima de Óleo Diesel, seja pela carga ambiental anterior ao uso, ou pela deposição de massa de resíduos em aterro sanitário, está detalhado na Tabela 26, a qual inclui o seu somatório total.

Tabela 26 - PAG relativo à gestão atual dos resíduos sólidos da UFRJ

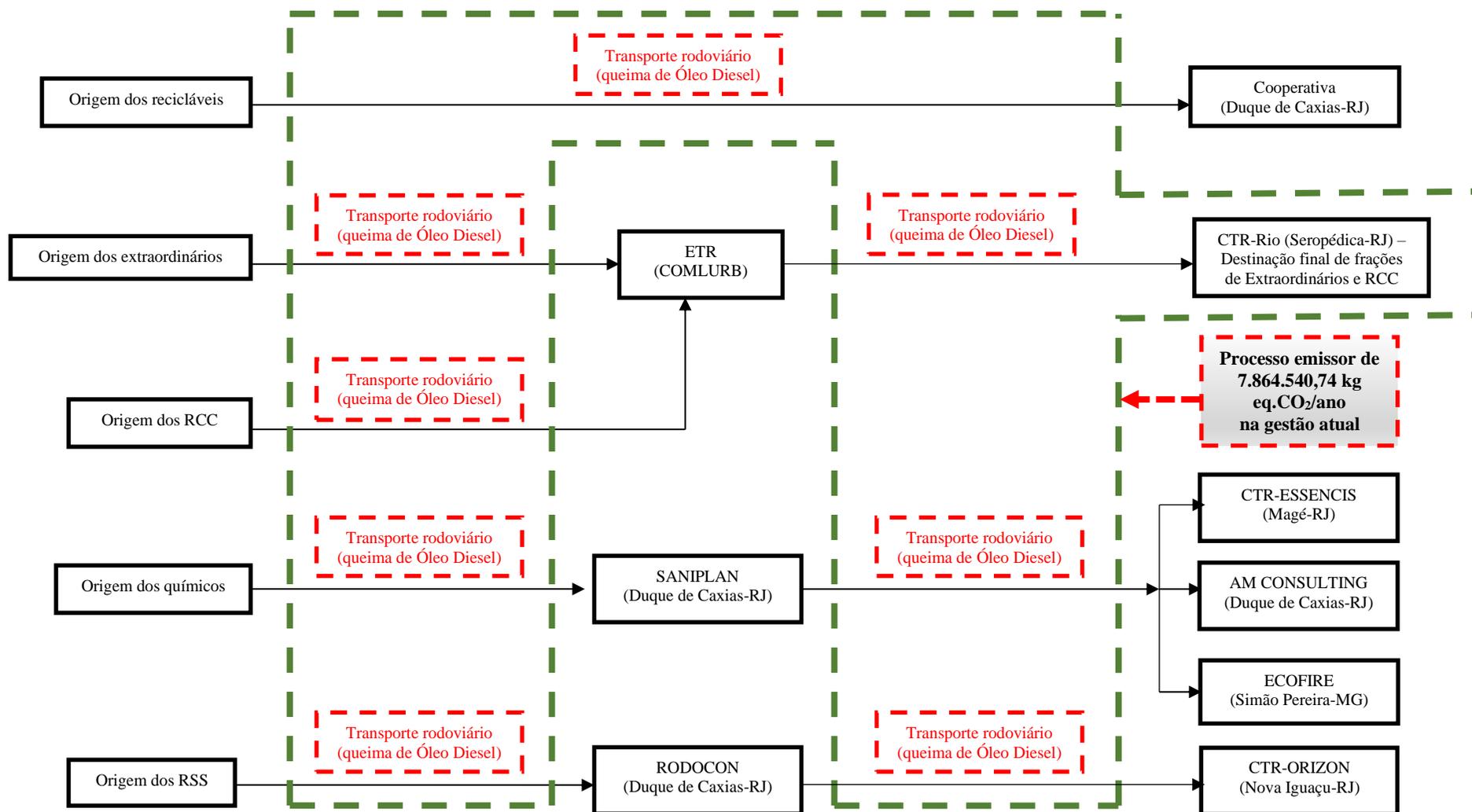
PAG relativo à gestão atual de resíduos sólidos	
Etapa	PAG correspondente (kg eq.CO ₂ /ano)
Logística de transporte	38.530,66 (queima do Óleo Diesel – emissão de CO ₂)
Logística de transporte	257,76 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do N ₂ O)
Logística de transporte	4,73 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do CH ₄)
Disposição no CTR-Rio	7.583.088,75 (formação de CH ₄ no aterro)
Disposição no CTR-Rio	242.658,84 (formação de CO ₂ no aterro)
PAG atual total	7.864.540,74 kg eq.CO₂/ano

Fonte: autoria própria.

Resumindo, na gestão atual de resíduos da UFRJ estima-se um PAG de **7.864.540,74 kg eq.CO₂**, o qual se subdivide em 38.793,15 kg eq.CO₂ gerados pela logística de transporte dos resíduos e 7.825.747,59 kg eq.CO₂ gerados pela disposição final dos resíduos no CTR-Rio.

Em forma de fluxograma, com base no eq.CO₂ emitido anualmente pela gestão atual dos resíduos sólidos na UFRJ, sintetizamos todas as informações na Figura 41, destacando-se os focos contribuintes do PAG emitido (**delimitados pela linha tracejada verde**), envolvendo a logística de transporte para todas as tipologias de resíduos, bem como a disposição final da fração de resíduos extraordinários e RCC no CTR-Rio.

Figura 41 - Visão geral da ACV do fluxo atual de envio de resíduos ao CTR-Rio



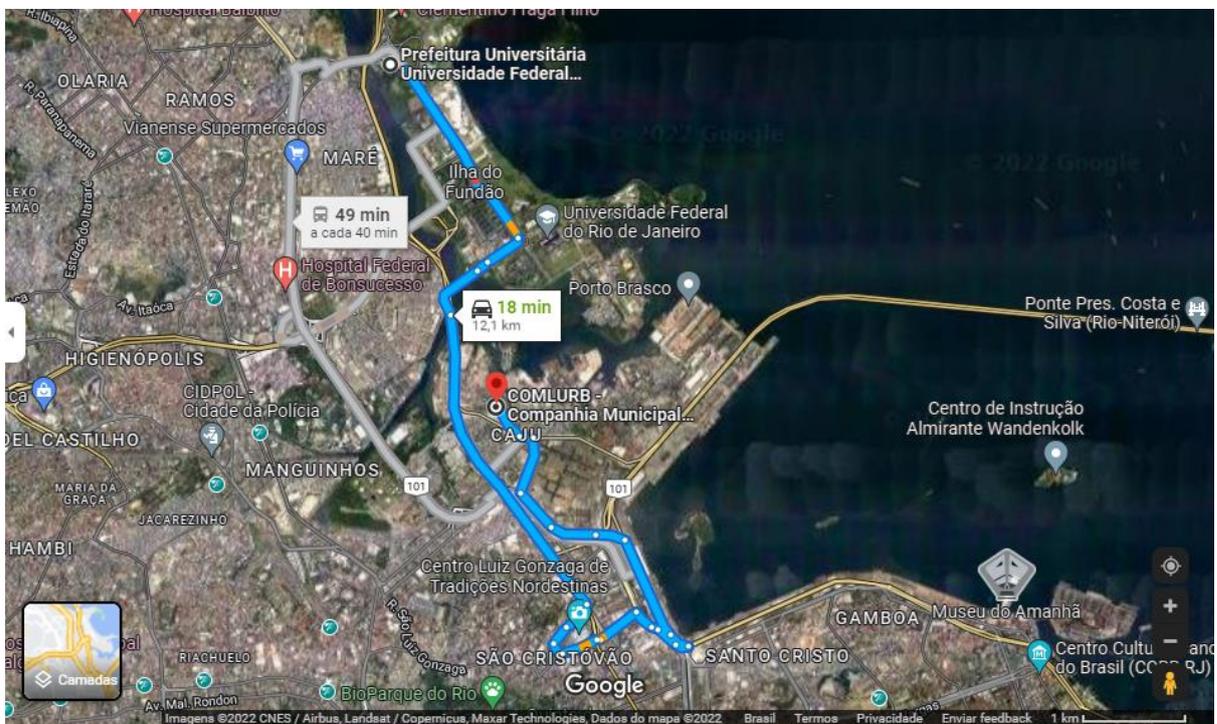
Fonte: autoria própria.

7.3.3. Distâncias entre a origem e a destinação dos resíduos na gestão proposta

Considerando uma nova destinação para os resíduos sólidos extraordinários e inertes, ou seja, o seu encaminhamento para URE-Caju, atualmente com licença prévia emitida pelo INEA, as novas distâncias a serem consideradas entre a origem e a destinação, bem como a quantidade de Óleo Diesel necessária para percorrer tais distâncias estão descritas na Tabela 27.

A Figura 42 apresenta a localização da prefeitura da UFRJ no *Campus* da Ilha do Fundão e o trajeto atual até a URE-Caju.

Figura 42 – Localização da Prefeitura da UFRJ no *Campus* Ilha do Fundão e trajeto até a futura URE-Caju



Fonte: Google Maps (2022).

Tabela 27 - Relação entre as novas distâncias e consumo de Óleo Diesel, com relação aos Resíduos Extraordinários e RCC.

Origem	NOVA destinação proposta	Km percorridos até a URE-Caju	Frota utilizada	Consumo médio (litros) de Óleo Diesel por trecho até a URE-Caju
Campus Ilha do Fundão		12,10		4,27
Campus Praia Vermelha		15,80		5,27
Campus Duque de Caxias		48,50		16,17
Instituto de Filosofia e Ciências Sociais (IFCS)		12,50		4,17
Faculdade de Direito		7,00		2,33
Escola de Enfermagem Anna Neri (EEAN)	Unidade de Recuperação Energética (URE) do Caju – COMLURB /	7,30	Volkswagen CONSTELLATION	2,43
Maternidade Escola	CICLUS AMBIENTAL – Rua Carlos Seidl, 1388 - Caju, Rio de Janeiro - RJ	10,80	24280 – Capacidade de carga 19 toneladas – Rendimento motor 3 km/litro – fabricado a partir de 2013	3,60
Museu Nacional		8,60		2,87
Hospital Escola São Francisco de Assis (HESFA)		7,20		2,40
Escola de Música		12,90		4,30
Observatório do Valongo		8,30		2,77
Colégio Brasileiro de Altos Estudos		16,10		5,37

Fonte: Prefeitura Universitária (2021); *Google Maps*; FGP (2022).

7.3.4. PAG na gestão de resíduos proposta

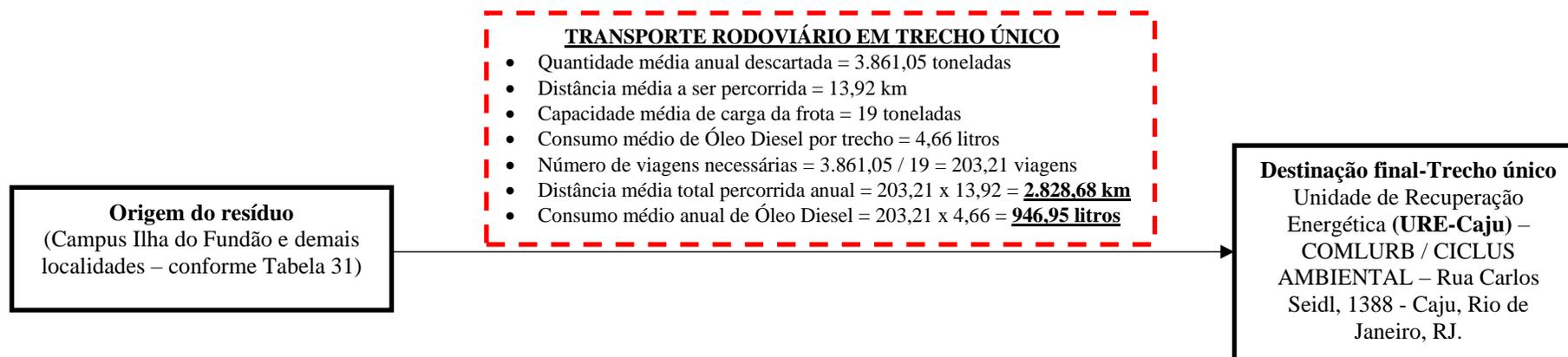
Conforme já comentado neste estudo, os resíduos sólidos não recicláveis com viabilidade técnica, econômica e social para serem enviados ao tratamento térmico são os extraordinários e os inertes. Desta forma, a logística foi replanejada, com novas distâncias entre as origens e a destinação final, propondo a Incineração com recuperação energética na URE-Caju.

Levando-se em consideração dados extraídos dos itens 7.3.3, foi refeito o fluxograma para a cadeia de transporte dos resíduos extraordinários e de RCC, desde sua origem até a URE-Caju como destinação final, conforme apresentado na Figura 43.

Esse fluxograma ilustra a destinação proposta aos resíduos extraordinários e RCC, com a mesma massa descartada anualmente no CTR-Rio, de **3.861,95 toneladas**, no mesmo período trienal considerado neste estudo (de 2017 a 2019), a qual irá ser destinada à futura URE-Caju, considerando-se um **TRECHO ÚNICO** resumido pela média das distâncias entre as unidades da UFRJ e a referida unidade de tratamento térmico.

Nessa nova gestão proposta, uma fração dos resíduos gerados será transportada para posterior tratamento térmico na URE-Caju. Assim sendo, nas próximas etapas deste estudo, o PAG da nova gestão proposta levará em consideração as emissões de GEE (CO₂, CH₄ e N₂O) no transporte rodoviário, bem como no PAG de GEE gerados no processo de Incineração em si (CO₂, N₂O).

Figura 43 – Novo fluxograma proposto de destinação aos resíduos sólidos extraordinários e RCC.



Fonte: autoria própria.

i. PAG gerado pelo CO₂ na logística proposta

Considerando-se o novo trecho percorrido para o transporte dos resíduos extraordinários e RCC, desde a sua origem até a URE-Caju, somam-se as quantidades consumidas de Óleo Diesel em cada trecho, conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Total de Óleo Diesel consumido para a logística de transporte proposta

Resíduo	Consumo médio de Óleo Diesel (da origem à disposição final)
Recicláveis	137,34 litros/ano
Extraordinários RCC	946,95 litros/ano
Químicos	98,86 litros/ano
RSS	4.593,65 litros/ano
Total	5.776,80 litros/ano

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 29 são descritas as distâncias médias percorridas para o cumprimento do fluxo proposto a cada tipologia de resíduo.

Tabela 29 - Total de distâncias percorridas da logística de transporte atual

Resíduo	Distâncias médias percorridas a cada tipologia (da origem à disposição final)
Recicláveis	894,47 km/ano
Extraordinários RCC	2.828,68 km/ano
Químicos	510,85 km/ano
RSS	13.780,96 km/ano
Total	18.014,96 km/ano

Fonte: autoria própria.

A Tabela 30 descreve os potenciais de aquecimento global (PAG), em kg eq.CO₂, para a logística de transporte considerando o novo trecho a ser percorrido somente para os resíduos extraordinários e RCC.

Tabela 30 – PAG relativo ao CO₂ gerado no trecho proposto

Resíduo	Período	GEE	Fator de	PAG	Consumo	Emissão	PAG anual
			CO ₂ (kg/l de Diesel)	(kg eq.CO ₂)	médio de Óleo Diesel (litros/ano)	anual de CO ₂ (kg)	(kg eq. CO ₂)
			A	B	C	D = A x C	B x D
Recicláveis	2017-2019	CO ₂	3,20	1,00	137,34	439,49	439,49
Extraordinários	2017-2019	CO ₂	3,20	1,00	946,95	3.030,24	3.030,24
RCC							
Químicos	2017-2019	CO ₂	3,20	1,00	98,86	316,35	316,35
RSS	2017-2019	CO ₂	3,20	1,00	4.593,65	14.699,68	14.699,68
Total					5.776,80	18.485,76	18.485,76

Fonte: IPEA (2011); EPA (2022); autoria própria.

ii. PAG do N₂O na logística proposta

Segundo Svododa, Baxter e Martinec (2006), as maiores fontes antrópicas de emissão de N₂O para atmosfera são as atividades agrícolas, as plantas industriais de ácido nítrico, além das unidades de Incineração de combustíveis fósseis e resíduos. Por esse motivo o PAG desse gás também será considerado.

De forma similar ao item 7.3.2, foi utilizado um fator de emissão de N₂O (0,0431 g/milha) conforme indicado pelo *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a) ou 0,000027 kg N₂O/km. Considerou-se o PAG em relação ao N₂O igual a 298 kg eq.CO₂, conforme o *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a). Novamente é importante mostrar que essa emissão de N₂O na logística de transporte deve-se a carga ambiental que o diesel carrega anteriormente ao seu uso.

De acordo com a Tabela 33, a nova distância a ser percorrida pela frota é estimada em 18.014,96 km anuais, significando que a quantidade total de N₂O gerada no período foi de $0,000027 \times 18.014,96 = 0,486$ kg N₂O anuais, o que equivale a um **PAG = 298 x 0,486 = 144,95 kg eq.CO₂**.

iii. PAG do CH₄ na logística proposta

De forma similar ao item 7.3.2, foi utilizado um fator de emissão de CH₄ (0,0095 g/milha ou 0,0000059 kgCH₄/km) conforme indicado pelo *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a). Considerou-se o PAG em relação ao CH₄ igual a 25 kg eq.CO₂, conforme o *GHG Emission Factors Hub* (EPA, 2022a). Novamente, essa emissão de CH₄ na logística de transporte deve-se à carga ambiental que o Diesel carrega anteriormente

ao seu uso, ou seja, é uma emissão de CH₄ que ocorreu dentro do ciclo de vida do Óleo Diesel, durante as etapas de extração do petróleo, passando pelo refino, estocagem, até a distribuição desse combustível.

De acordo com a Tabela 33, a nova distância percorrida pela frota é estimada em 18.014,96 km anuais, significando que a quantidade total de CH₄ gerada no período foi de $0,0000059 \times 18.014,96 = 0,106$ kg CH₄ anuais, o que equivale a um **PAG = 25 x 0,11 = 2,66 kg eq.CO₂**.

iv. **PAG gerado pelo CO₂ emitido na URE-Caju (no processo de Incineração)**

Nesta etapa será feito o cálculo do potencial de emissão de CO₂ pela massa de resíduos sólidos que se propõe incinerar na URE-Caju, conforme metodologia descrita no *Chapter 5 – Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 1996a), através da Equação 4.

$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ (Gg/ano)} = \sum i \text{ (IW}_i \cdot \text{CCW}_i \cdot \text{FCF}_i \cdot \text{EF}_i \cdot 44/12) \quad (4)$$

Onde *i* são os resíduos sólidos municipais, os quais são subdivididos em: HW (resíduos perigosos), CW (resíduos de serviços de saúde) e SS (resíduo de tratamento de esgoto). IW_{*i*} refere-se à quantidade incinerada de resíduos do tipo *i* (Gg/ano), CCW_{*i*} refere-se à quantidade de Carbono no resíduo do tipo *i*, FCF_{*i*} é a fração de Carbono fóssil no resíduo do tipo *i*, EF_{*i*} refere-se à eficiência de Combustão dos incineradores e a fração 44/12 refere-se à conversão de Carbono em CO₂.

Para a aplicação da Equação 4, não são consideradas as massas relativas a SS (resíduos de serviços de tratamento de esgoto), CW (resíduos de origem clínica / RSS) e HW (resíduos perigosos), considerando-se, apenas as massas relativas aos resíduos extraordinários e sobras de RCC.

Assim sendo, para a massa total de resíduos a serem incinerados pela URE-Caju (IW_{*i*}) teríamos 3.861,05 toneladas/ano (conforme discutido no item 7.1) ou **IW = 3,86 Gg/ano**.

Para a fração de Carbono total contida na massa de resíduos incinerada (CCW), conforme o IPCC (1996), para resíduos sólidos urbanos, temos uma estimativa de 40% do total dessa massa, sendo, então, o **CCW = 0,40**.

Para a fração de Carbono fóssil contido na massa incinerada (FCF), conforme o IPCC (1996), para resíduos sólidos urbanos, temos, igualmente, uma estimativa de 40% do total dessa massa, sendo, então, o **FCF = 0,40**.

Sobre a eficiência do processo de Incineração da URE (EF), conforme indica o guia CNI para recuperação energética de resíduos, para uma planta geradora de Calor e Eletricidade, estima-se uma eficiência de queima em até 85% (CNI, 2019). Desta forma, adotamos o **EF = 0,85**.

Finalmente, para a estimativa da quantidade anual de CO₂ emitida, teremos:

$$\text{CO}_2 \text{ (Gg/ano)} = 3,86 \times 0,40 \times 0,40 \times 0,85 \times 44/12.$$

$$\text{CO}_2 \text{ (Gg/ano)} = 1,92 \text{ Gg/ano, } 1.925,38 \text{ toneladas/ano ou } 1.925.376,93 \text{ kg/ano.}$$

Consequentemente, teremos um **PAG em kg eq.CO₂ de 1.925.376,93 kg/ano**.

v. PAG gerado pelo N₂O emitido na URE-Caju (no processo de Incineração)

Nesta etapa será feito o cálculo do potencial de emissão de óxido nitroso (N₂O), também passível de ser gerado pela massa de resíduos sólidos que se propõe incinerar na URE-Caju, conforme metodologia descrita no *Chapter 5 – Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 1996), através da Equação 5.

$$\text{Emissões de N}_2\text{O (Gg/ano)} = \sum_i (\text{IW}_i \cdot \text{EF}_i) \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

Onde: IW_i refere-se à quantidade incinerada de resíduos do tipo i (Gg/ano) e EF_i refere-se ao fator de emissão para N₂O (kg N₂O/Gg) na Incineração do resíduo i.

Para a aplicação da Equação 5, não serão consideradas as massas relativas a SS (resíduos de serviços de tratamento de esgoto), CW (resíduos de origem clínica / RSS) e HW (resíduos perigosos), considerando-se, apenas as massas relativas aos resíduos extraordinários e sobras de RCC.

Assim sendo, para a massa total de resíduos a serem incinerados pela URE-Caju (IW), temos 3.861,05 toneladas/ano ou **IW = 3,86 Gg/ano**.

Para o fator de emissão de N₂O agregado à massa de resíduos a ser incinerada (EF), conforme o IPCC (1996), para resíduos sólidos urbanos, estimamos o **EF = 30 kg N₂O/Gg** de resíduos – adotando, para o Brasil, os mesmos valores atribuídos ao Reino Unido, tendo em vista que as futuras UREs brasileiras utilizarão praticamente as tecnologias das plantas europeias.

Finalmente, para a estimativa da quantidade anual de N₂O emitida, teremos:

$$\text{N}_2\text{O (Gg/ano)} = 3,86 \times 30 \times 10^{-6};$$

$$\text{N}_2\text{O (Gg/ano)} = 0,0001158 \text{ Gg/ano ou } 0,1158 \text{ toneladas/ano};$$

$$\text{N}_2\text{O (Gg/ano)} = 115,83 \text{ kg/ano.}$$

Considerando-se que o impacto de uma molécula de N_2O possui um PAG equivalente a 298 moléculas de CO_2 (EPA, 2022a), conseqüentemente, teremos um PAG de $115,80 \times 298 = 34.517,79 \text{ kg/ano}$.

vi. Balanço do PAG resultante na gestão proposta

O PAG relativo a cada um dos GEE analisados (CO_2 , CH_4 e N_2O), seja pela queima de Óleo Diesel, seja pela carga ambiental anterior ao uso, ou pela queima na URE-Caju está detalhado na Tabela 31, a qual inclui o seu somatório total.

Tabela 31 – PAG relativo à gestão proposta para os resíduos sólidos da UFRJ.

PAG relativo à gestão proposta para os resíduos sólidos	
Etapa	PAG correspondente (kg eq.CO₂/ano)
Logística de transporte	18.485,76 (queima do Óleo Diesel – emissão de CO_2)
Logística de transporte	144,95 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do N_2O)
Logística de transporte	2,66 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do CH_4)
Incineração na URE-Caju	1.925.376,93 (Incineração – emissão de CO_2)
Incineração na URE-Caju	34.517,79 (Incineração – emissão de N_2O)
PAG resultante da proposta	1.978.528,09 kg eq.CO₂/ano

Resumindo, na gestão proposta para os resíduos gerados pela UFRJ estima-se um PAG de **1.978.528,09 kg eq.CO₂**, o qual se subdivide em 18.633,37 kg eq.CO₂ gerados pela logística de transporte dos resíduos e 1.959.894,72 kg eq.CO₂ gerados pela Incineração dos resíduos na URE-Caju.

vii. Balanço de PAG resultante da logística atual *versus* a logística proposta

Calculados todos os valores de PAG, nas etapas de logística de transporte atual, potencial de geração de GEE no CTR-Rio, logística modificada para transporte de fração dos resíduos à futura URE-Caju, e Incineração dessa fração de resíduos na futura URE-Caju, podemos fazer o balanço do PAG resultante, conforme descrito na Tabela 32:

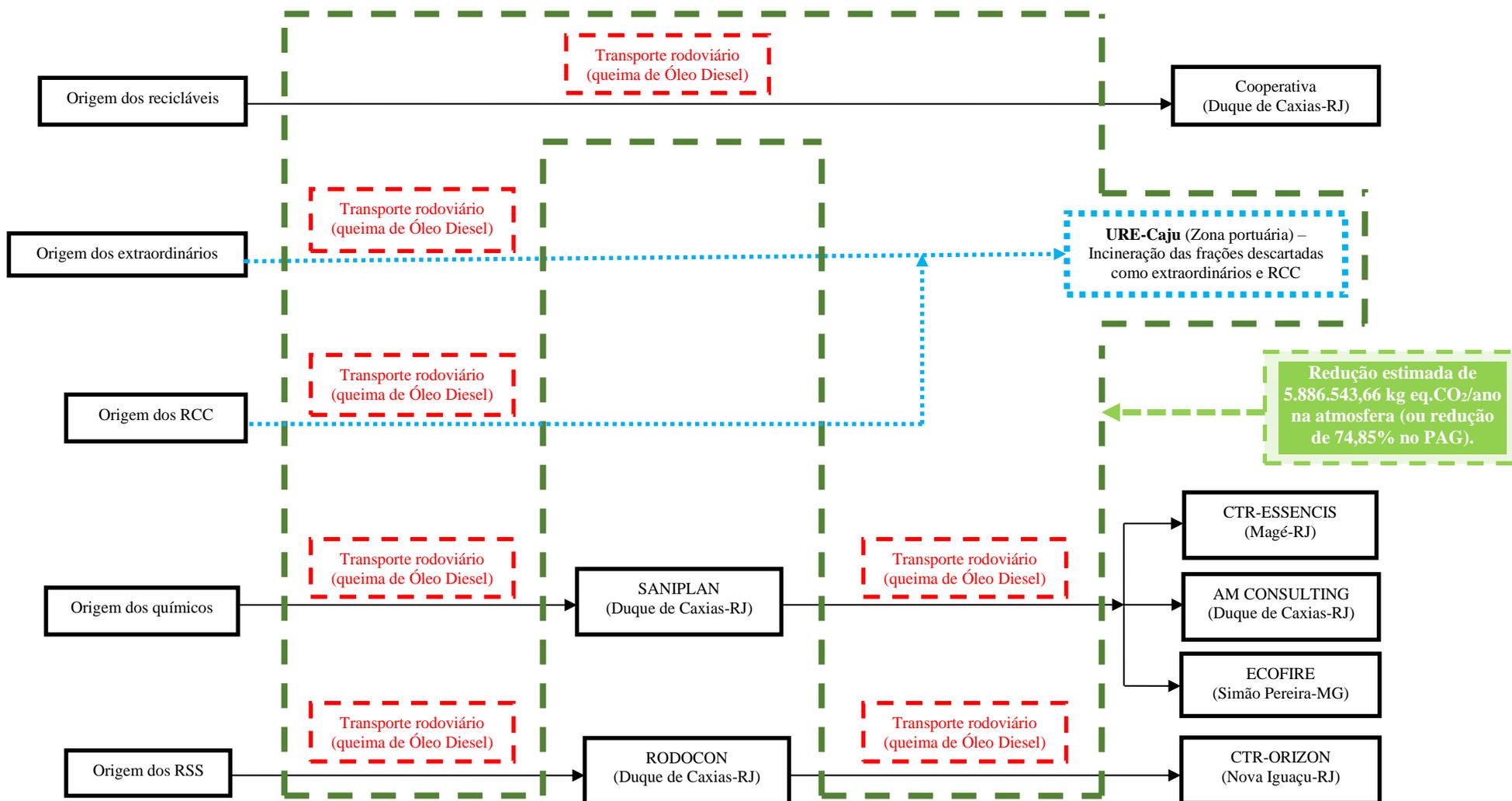
Tabela 32 - Balanço dos PAG calculados nas diferentes etapas do processo.

Fluxo atual ao CTR-Rio	
Movimento	PAG (kg eq.CO₂/ano)
Logística de transporte	38.530,66 (queima do Óleo Diesel – emissão de CO ₂)
Logística de transporte	257,76 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do N ₂ O)
Logística de transporte	4,73 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do CH ₄)
Disposição no CTR-Rio	7.583.088,75 (formação de CH ₄ no aterro)
Disposição no CTR-Rio	242.658,84 (formação de CO ₂ no aterro)
PAG atual total	7.864.540,74 kg eq.CO₂/ano
Proposta deste estudo	
Movimento	PAG (kg eq.CO₂/ano)
Nova logística de transporte	18.485,76 (queima do Óleo Diesel – emissão de CO ₂)
Nova logística de transporte	144,95 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do N ₂ O)
Nova logística de transporte	2,66 (ciclo de vida do Óleo Diesel – carga ambiental do CH ₄)
Disposição na URE-Caju	1.925.376,93 (Incineração – emissão de CO ₂)
Disposição na URE-Caju	34.517,79 (Incineração – emissão de N ₂ O)
PAG resultante da proposta	1.978.528,09 kg eq.CO₂/ano
Resultados estimados deste estudo	
Parâmetros	PAG (kg eq.CO₂/ano)
Diferença entre os PAG (= atual - proposto)	5.886.012,65 kg eq. CO₂/ano (queda)
Redução do PAG (%)	74,85

Fonte: autoria própria.

Semelhante à Figura 41, e com base no eq.CO₂ emitido com a proposta deste estudo, ilustrou-se na Figura 44 todos os contribuintes ao novo PAG, considerando uma nova logística de transporte de resíduos, bem como a disposição final da fração de resíduos extraordinários e RCC na futura URE-Caju.

Figura 44 – Fluxograma da gestão proposta para os resíduos sólidos gerados pela UFRJ.



Fonte: autoria própria.

8. CONCLUSÕES

Acerca do sistema de gestão de resíduos sólidos da UFRJ, observou-se interrelação das ações ambientais promovidas na universidade, incluindo planejamentos internos visando à melhoria contínua dessa gestão, com foco na redução da pressão sobre recursos naturais e ações envolvendo biossegurança. Tem-se buscado, ao longo dos anos, uma interação cada vez mais próxima entre as equipes de meio ambiente e o corpo acadêmico. Apesar de algumas lacunas observadas ao longo da pesquisa, o sistema de gestão de resíduos sólidos da UFRJ consegue ser eficaz em parte da hierarquia proposta no PNRS (2010), atendendo, com boas evidências de campo, as etapas de reciclagem, tratamento de resíduos (sobretudo os perigosos) e disposição final, considerando, ainda nos dias atuais, os aterros sanitários uma forma aceitável de destinação no Brasil.

Atualmente, os resíduos apropriados a serem coletados e destinados para tratamento térmico seriam aqueles atualmente destinados às ETR da COMLURB, sendo aqueles classificados pela UFRJ como extraordinários e RCC, sem quaisquer fatores de risco inerentes, selecionando-se tais amostras para análise térmica, incluindo suas misturas.

Após a realização de todas as análises térmicas, constatou-se que a massa residual não reciclável da UFRJ atende plenamente às condições mínimas previstas a um projeto de URE por tecnologia de incineração – considerando-se seus teores de umidade, material volátil, carbono fixo, cinzas e entalpia de queima. No caso da análise da entalpia de queima relativa ao aproveitamento de toda a matriz coletada, o valor foi de 11.068 J/g, enquanto o valor da entalpia para a fração não reciclável associada à matriz coletada foi de 9.779,60 J/g. Como a massa anual de resíduos enviada ao CTR-Rio é de 3.861,05 toneladas, convertemos os dois valores anteriores de entalpia em energia elétrica útil, assumindo-se todas as perdas energéticas no conjunto caldeira-turbogerador, conforme dados da literatura (INEA, 2017), observando que a URE-Caju poderá injetar na rede elétrica, cerca de 0,62 MWh/t e 0,55 MWh/t, respectivamente, para a matriz total e a matriz de não recicláveis. Assim, levando em consideração esses valores de energia injetados na rede elétrica, verificou-se essa energia poderia atender até 3.109 habitantes/ano (pela Entalpia da matriz total) ou 1838 habitantes/ano (pela Entalpia da matriz de não recicláveis). Embora sejam resultados relativamente modestos, ressalta-se que estes números são apenas devidos aos resíduos oriundos da UFRJ, não considerando outras fontes, como as regiões de entorno da URE-Caju.

Quando analisamos a logística de transporte, com o envio da fração dos resíduos sólidos para as futuras instalações da URE-Caju, observamos que haveria um impacto positivo quanto à redução das emissões de GEE, tendo em vista que a nova distância, em média de 14 km, a ser percorrida da origem até a futura URE-Caju, evitando-se percorrer os 74 km médios atualmente percorridos até o CTR-Rio. Considerando-se a massa referencial de resíduos de 3.861,05 toneladas anuais enviados ao CTR-Rio, e obedecendo-se a cadeia atual de logística de transporte, verificou-se que a frota atual de caminhões consome, em média, 12.037,83 litros de Diesel/ano, enquanto, no caso do envio dessa mesma massa à URE-Caju, seriam consumidos 5.776,80 litros de Diesel/ano, representando (apenas neste aspecto) uma redução em torno de 52% do consumo desse combustível. Considerando-se, a incineração da fração analisada de resíduos em URE, a redução total do PAG associado (com foco nos três principais GEE conhecidos: CO₂, CH₄ e N₂O) cairia de 7.864.540,74 kg eq.CO₂/ano para 1.978.528,09 kg eq.CO₂/ano, o que significa uma redução de, praticamente, 75%, tornando a proposta deste estudo uma das alternativas a serem consideradas em futuras tomadas de decisões por parte dos agentes diretamente responsáveis pelo saneamento ambiental no âmbito da UFRJ.

As constatações deste estudo, bem como suas reflexões, buscaram agregar melhorias definitivas no saneamento ambiental relativo aos resíduos sólidos gerados pela universidade, representando, simultaneamente, menos emissões de eq.CO₂ na atmosfera, aproveitamento energético de resíduos que atualmente são destinados em aterros sanitários, redução de valores do frete por quilometragem e uma maior conscientização de cada agente envolvido (aluno, visitante, servidor ou terceirizado) a continuar e melhorar sua contribuição nesse processo, o que impactará positivamente o seu fluxo, sendo convergente às ações propostas de saneamento propostas pelo PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro e, conseqüentemente, pela PNRS (2010).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACADEMIC RANKING OF WORLD UNIVERSITIES (ARWU) – **Shanghai Ranking's Academic Ranking of World Universities 2022 Press Release**. Disponível em: <<https://www.shanghairanking.com/news/arwu/2022>>. Acesso em 27/08/2022.

AHN, D. G; LEE, S. H; YANG, D. Y. – **A study on the influence of the sloped cutting angle on kerfwidth and part quality in the hotwire cutting of EPS foam for the VLM-s rapid prototyping process**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(14), 1447–1464.

ALHASSAN, K. A.; ABDULLAHI, B. T.; SHAH, M. MANJUR – **A review on biogas production as the alternative source of fuel** – Journal of Applied and Advanced Research, 2019: Phoenix Research Publishers. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/331473386_A_review_on_biogas_production_as_the_alternative_source_of_fuel/figures?lo=1>. Acesso em: 04/08/2022. DOI: 10.21839/jaar.2019.v4i2.266

ANDRETTI, F. A. – **Avaliação técnico-econômica de uma planta de Incineração de resíduos sólidos urbanos e os principais desafios para sua utilização - uma simulação aplicada a cidade do Rio de Janeiro, Brasil**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2021. Área de Concentração: Tecnologias de Tratamento da Poluição Ambiental. Rio de Janeiro, RJ.

ARAÚJO, Fernando; ALTRO, John – **Análise das práticas de gestão de resíduos na escola de engenharia da Universidade Federal Fluminense em observância ao Decreto 5940/2006 e à Lei 12.305/2010 - Sistemas & Gestão (Revista Eletrônica)**, 2014. Disponível em: <<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/V9N3A8>>. Acesso em: 27/03/2021. DOI: 10.7177/sg.2014.v9.n3.a8

ARCH DAILY – **CopenHill: The Story of BIG's Iconic Waste-to-Energy Plant**, 2019. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/925966/copenhill-the-story-of-bigs-iconic-waste-to-energy-plant>>. Acesso em: 30/07/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE) – **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 14/07/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/marcelabarquet/nbr-abnt-10.004-resduos-slidos-classificao>>. Acesso em 28/07/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 7500: Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos**, 2021. Disponível em:

<<http://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-7500-03-Transporte-de-Produto-Perigoso.pdf>>. Acesso em: 05/03/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS ABREN – **Saneamento energético o Brasil. Apresentação institucional da ABREN**, 2022. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1OM9YrZEoC4Bof9g9mX1xvkqCLuw8WDK_/view>. Acesso em: 30/11/2022.

BAIRD, Colin; trad. Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera – **Química Ambiental**. 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, p.246-260, 2002.

BORATO, V. R.; SANTOS, C. G.; OLIVEIRA, V. A. – **Hidrogéis superabsorventes a base de acetato de celulose modificado por dianidrido 3,3', 4,4' benzofenona tetracarboxílico (BTDA): síntese, caracterização e estudos físico-químicos de absorção**. Scielo Brasil, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000400006>>. Acesso em: 31/07/2022.

BORBA, Roberto Ferrari – **Balanco Mineral Brasileiro, 1º Distrito do Departamento Nacional de Produção Mineral**, DNPM-RS, 2001. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-carvao-mineral>> . Acesso em: 04/11/2022.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) – **Resolução do Ministério da Saúde Agência Nacional de Vigilância Sanitária da Diretoria Colegiada - RDC nº 222**, de 28 de março de 2018 – Regulamenta as Boas Práticas de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde e dá outras providências. DOU, Brasília, DF, p.61, de 29 de março de 2018. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2018/rdc0222_28_03_2018.pdf>. Acesso em 04/03/2022.

BRASIL. Câmara dos Deputados – **Decreto Federal nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022** – Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2022/decreto-10936-12-janeiro-2022-792233-publicacaooriginal-164412-pe.html>>. Acesso em: 08/03/2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) – **Resolução CONAMA nº 237**, de 19 de dezembro de 1997 – **Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental**, Publicada no DOU no 247, de 22 de dezembro de 1997, Seção 1, páginas 30841-30843. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_237_1997.pdf>. Acesso em: 30/07/2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) – **Resolução CONAMA nº 307**, de 5 de julho de 2002 – **Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Disponível

em : <<https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2012/09/Resolucao-Conama-nº-307.pdf>>. Acesso em: 30/07/2022.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia (MME) – **Balanco Energético Nacional. Relatório Síntese de 2022.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>. Acesso em 30/12/2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA) – **Portaria do Ministério do Meio Ambiente (MMA) nº 280**, de 29 de junho de 2020. Regulamenta os arts. 56 e 76 do Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, e o art. 8º do Decreto nº 10.388, de 5 de junho de 2020, institui o Manifesto de Transporte de Resíduos - MTR nacional, como ferramenta de gestão e documento declaratório de implantação e operacionalização do plano de gerenciamento de resíduos, dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos e complementa a Portaria nº 412, de 25 de junho de 2019. DOU: seção 1, Brasília, DF, nº 123, p. 953, de 30 de jun 2020. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-280-de-29-de-junho-de-2020-264244199>>. Acesso em 04/03/2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Portaria interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019 – Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos.** Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>>. Acesso em: 30/07/2022.

BRASIL. Presidência da República (Casa Civil) – **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)** – Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 21/03/2021.

BRASIL. Presidência da República (Casa Civil) – **Constituição da República Federativa do Brasil** – DOU: Brasília, DF, p.1, 05 out. 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 31/03/2021.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (SGB). **Carvão Mineral.** Disponível em: <<https://cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>>. Acesso em: 04/11/2022.

BREEZE, P. – **Energy from Waste.** Chapter 6 - Traditional Waste Combustion Technologies. Academic Press, 2018. ISBN 9780081010426, Doi: 10.1016/B978-0-08-101042-6.00006-6.

BROWN, M. E. – **Thermal Analysis Techniques and Applications.** Chemistry Department, Rhodes University, Grahamstown, South Africa, 2011. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS. ISBN: 0-306-48404-8.

CHEN, W; SUZUKI, T; LACKNER, M. – **Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation.** 2. ed. Cham, 2017: Springer.

CHENG, H; HU, Y. – **Curbing dioxin emissions from municipal solid waste incineration in China: Re-thinking about management policies and practices.** *Environmental Pollution*. V.158, n.9, p. 2809–2814, 2010. DOI:10.1016/j.envpol.2010.06.014.

CICLUS AMBIENTAL – **Unidade de Recuperação Energética (URE)**. Disponível em: <<https://ciclusambiental.com.br/>>. Acesso em 07/06/2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN) – **Apostila educativa, Radioatividade**. Disponível em: <https://portalnuclear.cnem.gov.br/Material_didatico/apostilas/radio.pdf>. Acesso em 30/07/2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN) – **Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) - Apresentação**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/ien/pt-br>>. Acesso em 07/03/2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN) – Norma CNEN NN 8.01 Resolução CNEN, Resolução 167, 2014 – **Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. Disponível em: <<http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=8>>. Acesso em 06/07/2022.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN) – Norma CNEN NN 8.02 Resolução CNEN, Resolução 168, 2014 – **Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**. Disponível em: <<http://appasp.cnem.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=8>>. Acesso em 06/07/2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI) – **Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão, 2019**. Brasília. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/f3/e7/f3e751fc-c9a0-44f0-a769-f3a665e3a0f4/recuperacao_energetica_de_residuos_solidos_um_gui_a_para_tomadores_de_deciso.es.pdf>. Acesso em 06/06/2022.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA (CRQ-IV Região, São Paulo, SP), CRQ – **Química Viva – Plásticos**. Disponível em: <https://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos>. Acesso em: 30/07/2022.

DA SILVA, Elton Clementino; DE PAOLA, Maria V. R. Velasco; MATOS, Jivaldo do Rosário. **Análise térmica aplicada à cosmetologia** – Instituto de Química, Universidade de São Paulo - Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* vol. 43, n. 3, jul./set., 2007. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcf/a/wYGk8Zvf6J4yTXtBJ8qZgFm/?lang=pt#>>. Acesso em: 15/10/2022.

DE SOUSA, C. C. M; BARATA, T. Q. F. – Material de Aula, Disciplina AUT 2518 Materiais e processos de produção I – **Papelão: Composição, tipos, características, processos de fabricação e aplicações**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Departamento de Tecnologia da Arquitetura (AUT), Universidade de São Paulo (USP), 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5330784/mod_resource/content/2/AULA%208_AUT%202518_PAPELÃO%20E%20SUAS%20APLICAÇÕES%20NO%20DESIGN.pdf. Acesso em: 30/07/2022.

DELURB AMBIENTAL – **Serviços de Transporte de resíduos**. Disponível em: <http://engeseed.com.br/servicos/>. Acesso em 04/03/2022.

DEMIRBAS, A – Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 30, p. 219-230, 2004.

DENARI, G. B. – **Contribuições ao Ensino de Análise Térmica**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. Instituto de Química de São Carlos/SP, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado.pdf. Acesso em: 30/07/2022.

EDO, M. – IEA Bioenergy. **Waste-to-Energy and Social Acceptance: Copenhill Waste-to-Energy plant in Copenhagen**, 2021. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/03/T36_WtE-and-Social-Acceptance_Copenhill-WtE-plant-in-Copenhagen.pdf. Acesso em: 30/07/2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) – **Anuário Estatístico de Engenharia Elétrica**, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>. Acesso em 06/06/2022.

FGP, Andrade Transportes e Locação Ltda. (FGP) – **Transporte de resíduos**. Disponível em: <https://www.fgptransportes.com.br/>. Acesso em 04/03/2022.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. **Biomass proximate analysis using thermogravimetry**. Bioresource Technology, v. 139, p. 1-4, 2013.

GLOBAL CHANGE.GOV – U.S. Global Change Research Program, **Annual Greenhouse Gas Index**, 2020. Disponível em: <https://www.globalchange.gov/browse/indicators/annual-greenhouse-gas-index>. Acesso em: 30/07/2022.

GOOGLE MAPS – **Localizações e distâncias entre Campi, unidades externas UFRJ, empresas terceirizadas, ETR, aterros industriais utilizados e futuras instalações da URE-Caju**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-22.9131323,-43.242477,15z?hl=pt-BR>. Acesso em: 30/07/2022.

HENRIQUES, R. M. – **Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA (IPEA) – **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**, 2011. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>. Acesso em: 20/05/2022.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA) – **Norma Operacional para o Sistema Online de Manifesto de Transporte de Resíduos nº 35 – NOP INEA 35**. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zew/mtu0/~edisp/inea0154181.pdf>. Acesso em: 04/03/2022.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA) – **Sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR)**, 2022. Disponível em: <<http://mtr.inea.rj.gov.br/>>. Acesso em: 30/04/2022.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA) – **EIA-Rima URE-Caju CICLUS**, 2017. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/downloads/EIA-RIMA/2017/E_07_511.415_2010%20Rio%20de%20Janeiro%20URE%20Caju%20CICLUS.7z>. Acesso em 10/10/2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) – **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing** – Chapter 8, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf>. Acesso em: 06/08/2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) – **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**, 1996a, revised – Chapter 5 – Waste. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste-1.pdf>. Acesso em: 15/07/2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) – **Guidelines for Greenhouse Gas inventory: reference Manual**, 1996, revised – Module 6 – Waste. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6wb1.pdf>>. Acesso em: 15/07/2022.

IONASHIRO, E. Y. – **Fundamentos da termogravimetria e análise térmica diferencial/Calorimetria exploratória diferencial**, 2014, p.2-6. São Paulo, Ed. Giz. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2314642>>. Acesso em: 30/07/2022.

KHALIL, R. A.; MESZAROS, E.; GRONLI, M. G.; VÁRHEGYI, G.; MOHAI, I.; MAROSVOLGYI, B.; HUSTAD, J. E. **Thermal analysis of energy crops Part I: the**

applicability of a macro-thermodynamic balance for biomass studies. J. Anal. Appl. Pyrolysis, v. 81, p. 52-59, 2008.

KLÖPFER, Walter; BIRGIT, Grahl – **Life Cycle Assessment, a Guide to Best Practice.** 1st Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p.1-3, 2014.

MAKARICHI, L; JUTIDAMRONGPHAN, W; TECHATO, K. – **The evolution of waste-to-energy incineration: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91(), 812–821, 2018. DOI:10.1016/j.rser.2018.04.088

MAYORAL, M. C.; IZQUIERDO, M. T.; ANDRÉS, J. M.; RUBIO, B. **Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis.** Thermochim. Acta, v. 370, p. 91-97, 2001.

MEINKE, W. Wayne – **Characterization of Solids – Chemical Composition.** Part of the Treatise on Solid State Chemistry (TSSC), vol. 1. Springer, New York, NY. N. B. Hannay, p.387-388, 1973.

MENDES, L. G. G; SOBRINHO, P. M. S. – **Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário** – Departamento de Energia - Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007. Disponível em: <<http://revistas.unitau.br/ojs/index.php/biociencias/article/view/200/166>>. Acesso em: 30/07/2022.

MILLER, B. – **Fossil Fuel Emissions Control Technologies: Stationary Heat and Power Systems.** 1. ed. Waltham: Elsevier, 2015.

MORDOR INTELLIGENCE LLP – **Industry reports, consulting – Global Waste-to-Energy (WTE) Market,** 2020. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-waste-to-energy-market-industry>>. Acesso em: 01/07/2022.

MUNDO EDUCAÇÃO – **Constituição das embalagens cartonadas longa vida.** Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/constituicao-das-embalagens-cartonadas-longa-vida.htm>>. Acesso em: 30/07/2022.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) – **Global monitoring laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide.** Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>. Acesso em 11/janeiro/2023.

NOGUEIRA, L. A. H; NOGUEIRA, F. J. H; ROCHA, C. R. – **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** ELETROBRAS, PROCEL. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf>. Acesso em 15/10/2022.

PETRY, David; PILATTI, Citania; SEHNEM, Simone; ORO, Ieda – **Gestão de Resíduos Sólidos: um estudo em uma empresa que atua na cidade de Xanxerê e região.** Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria,

v. 19, n. 2, 2015, p. 682-702. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/14783/pdf>>. Acesso em: 27/03/2021. DOI: 105902/2236117014783.

PORTAL BRASIL SOLAR – **Entrevista com Yuri Schimitke, Presidente da ABREN**, 2021. Disponível em: <<http://www.portalEnergiasolar.com.br/Energiasolar/resultadonoticias.asp?id=2006>>. Acesso em: 30/07/2022.

POWER TECHNOLOGY – **Amager Bakke Waste-to-Energy Plant**, 2020. Disponível em: <https://www.power-technology.com/projects/amager-bakke-waste-energy-plant/>, acesso em 11/10/2022.

PREFEITURA MUNICIPAL DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO – **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da Cidade do Rio de Janeiro (PMGIRS)**. (2021). Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/13305794/4334422/PMGIRSVERSAO12_08_21.pdf. Acesso em 01/03/2022.

PROJETA SUSTENTÁVEL – **Consultoria ambiental**, 2022. Disponível em: <<https://www.projetasustentavel.com/dmr-declaracao-de-movimentacao-de-residuos/>>. Acesso em 04/03/2022.

RODOCON CONSTRUÇÕES RODOVIÁRIAS LTDA (RODOCON) – **Transporte de resíduos**. Disponível em: <<https://gruporodocon.com.br/residuos/>>. Acesso em 30/04/2022.

RODRIGUEZ, M. E. D. B. – **Cost-benefit analysis of a waste to energy plant for Montevideo; and waste to energy in small islands**. 2011. M.S. degree in Earth Resources Engineering - Department of Earth and Environmental Engineering Columbia University.

SADEK, F. S.; HERRELL, A. Y. **Methods of proximate analysis by thermogravimetry**. *Thermochim. Acta*, v. 81, p. 297-303, 1984.

SANIPLAN ENGENHARIA E SERVIÇOS AMBIENTAIS LTDA (SANIPLAN) – **Transporte de resíduos**. Disponível em: <<https://www.saniplanengenharia.com.br/>>. Acesso em: 30/04/2022.

SILVA, R. W. C., PAULA, B. L. – **Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural**. *Terra Didática*, 5(1): p. 42-49, 2009. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>>. Acesso em 31/03/2022.

SILVA, T.; CAMPOS, L. – **Avaliação da Produção e Qualidade do Gás de Aterro para Energia no Aterro Sanitário dos Bandeirantes - SP**. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.13, n. 1, p.88-96, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000100012>>. Acesso em: 29/08/2022.

SIMONI, T.; DETMER, A. – **Pirólise de resíduo de couro curtido ao Cromo em reator de leito fluidizado** – XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0814-23597-175016.pdf>>. Acesso em: 31/07/2022. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-0814-23597-175016

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SINIS) – **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos – Recuperação estimada de RSU coletado seletivamente, 2017, 2018 e 2019**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-residuos-solidos>>. Acesso em: 30/07/2022.

SVOBODA, K; BAXTER, D; MARTINEC, J. – **Nitrous oxide emissions from waste incineration**, 2006. Chemical Papers, 60(1). DOI:10.2478/s11696-006-0016-x.

TA INSTRUMENTS – **Brochure, SDT Q600 Specifications**, 2010. Disponível em: <<https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/sdt.pdf>>. Acesso em: 30/07/2022.

TA INSTRUMENTS – **Software TA Instruments Universal Analysis 2000**, version 4.5A. Disponível em: <<https://www.tainstruments.com/support/software-downloads-support/downloads/#tab-1442864986189-3-2>>. Acesso em: 30/07/2022.

TAN, Z. – **Air Pollution and Greenhouse Gases: From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control**, 2014, 1. ed. Waterloo: Springer.

THE INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC) – **Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")**, 2014. Disponível em: <<https://goldbook.iupac.org/terms/view/T06295>>. Acesso em: 30/07/2022.

THEMELIS, Nickolas J.; BOURTSALAS, A.C – **Recovery of Materials and Energy from Urban Wastes – A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology**. 2ª Ed. Springer Reference, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7850-2>.

TURBIVAP – **Funcionamento de uma Turbina a Vapor**, 2020. Disponível em: <https://turbivap.com.br/funcionamento-Turbina-a-Vapor/>. Acesso em 12/01/2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) – **Greenhouse Gas Emissions, Overview of Greenhouse Gases**, 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Acesso em: 30/07/2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) – **Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References, Gallons of Diesel consumed**, 2022. Disponível em: <<https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>>. Acesso em: 30/07/2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) – **GHG Emission Factors Hub**, 2022-a. Disponível em: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/ghg_emission_factors_hub.pdf>. Acesso em: 07/08/2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ) – **Fatos e números**, 2022. Disponível em: <<https://ufrj.br/aceso-a-informacao/institucional/fatos-e-numeros/>>. Acesso em 04/03/2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ) – **Plano de Logística Sustentável na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coleta Seletiva, Relatório Parcial**, 2022. Disponível em: <<https://ufrj.br/wp-content/uploads/2022/01/pls-coleta-seletiva.pdf>>. Acesso em 31/07/2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Centro de Ciências da Saúde (CCS-UFRJ). Disponível em: <<https://ccs.ufrj.br/>>. Acesso em 04/03/2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Prefeitura Universitária (PU-UFRJ). **Assuntos relativos à gestão de resíduos sólidos na UFRJ** (A/C: Departamento de Gestão Ambiental da Prefeitura Universitária - PU-UFRJ). Mensagem recebida de Vera do Carmo, através de contato por e-mail: vera@pu.ufrj.br, para charlesgomes.gm Engenharia@gmail.com, em 09/12/2021. Acesso em: 10/12/2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, **Pró-Reitoria de Gestão e Governança** (PR6-UFRJ). Disponível em: <<https://gestao.ufrj.br/index.php>>. Acesso em 04/03/2022.

USIMECA INDÚSTRIA MECÂNICA, USIMECA – **Fabricação de acessórios de veículos de carga**. Disponível em: <<https://www.usimeca.com.br/project/coletor-de-carga-traseira-mid-range-alpha/>>. Acesso em: 04/03/2022.

VIANA, M. M. – Materiais das Aulas nº 2 e 6, Disciplina EEA 712 do Programa de Engenharia Ambiental (PEA), Escola de Química – **Caracterização, Tratamento Térmico e Solidificação/Estabilização de Resíduos Sólidos** – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2020.

VIANA, M. M. – Apontamentos de aulas, Disciplina EEA 712 do Programa de Engenharia Ambiental (PEA), Escola de Química – **Caracterização, Tratamento Térmico e Solidificação/Estabilização de Resíduos Sólidos** – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2023.

WARNE, S. S. J. **Proximate analysis of coal, oil shale, low quality fossil fuels and related materials by thermogravimetry**. Trends Anal. Chem, v. 10, n.6, p. 195-199, 1991.

WHITING, K.; FANNING, M.; WOOD, S. – **Waste Technologies: Waste to Energy Facilities**, 2013. Waste Management Branch Department of Environment and Conservation, Perth, Australia. Disponível em:

<<http://large.stanford.edu/courses/2017/ph240/kim-d2/docs/wsp-may13.pdf>>. Acesso em: 30/07/2022.

WSP GLOBAL – Review of State-of-the-Art Waste-to-Energy Technologies: Stage Two-Case Studies. Prepared by WSP Environmental Ltd for the Waste Management Branch of the Department of Environment and Conservation, Australia, 2013. Disponível em: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf. Acesso em 12/01/2023.

YIN, C; ROSENDAHL, L; KAER, S. – **Grate-firing of biomass for heat and power production.** Progress in Energy and Combustion Science, 2008. V.34, n.6, p. 725–754. DOI:10.1016/j.pecs.2008.05.002.

YOUCAI, Z. – **Pollution Control and Resource Recovery: Municipal Solid Wastes Incineration: Bottom Ash and Fly Ash,** 2017. Elsevier.

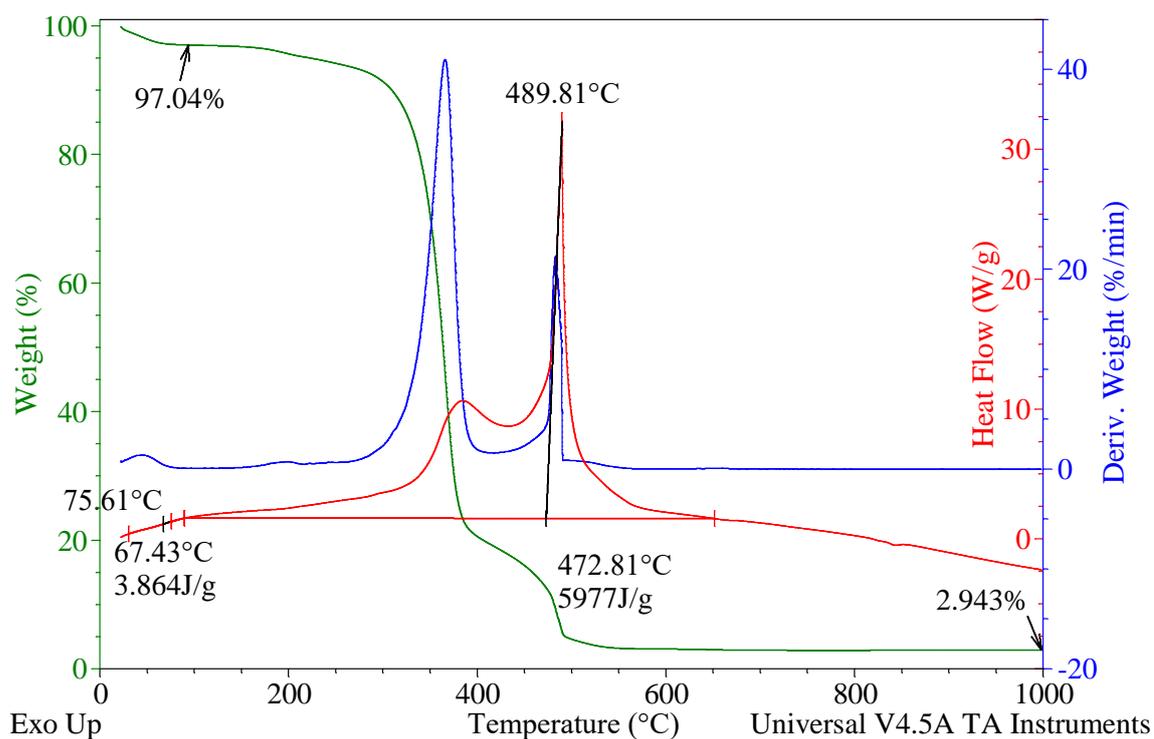
ZANEL. Equipamentos de proteção individual. **Luva de Raspa e de Vaqueta: Desvendando Produtos de Raspa e Vaqueta.** Disponível em: <<https://zanel.com.br/luva-de-raspa-e-luva-de-vaqueta/>>. Acesso em: 30/07/2022.

APÊNDICE – Curvas TG, DTG e DSC das amostras coletadas em campo (complementar ao subitem 7.2.2)

i. Amostra de filtro de cigarro (Acetato de Celulose)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de filtro de cigarro são apresentadas na Figura 45.

Figura 45 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de acetato de celulose analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pelas curvas DTG, a amostra possui três etapas de perda de massa, sendo a primeira referente a Vaporização da Água, a qual é caracterizada por um pequeno pico endotérmico na curva DSC cuja Entalpia é de 3,86 J/g. A segunda e terceira etapas de perda de massa referem-se à Combustão, a qual ocorre em duas etapas exotérmicas que totalizam uma Entalpia de 5977 J/g.

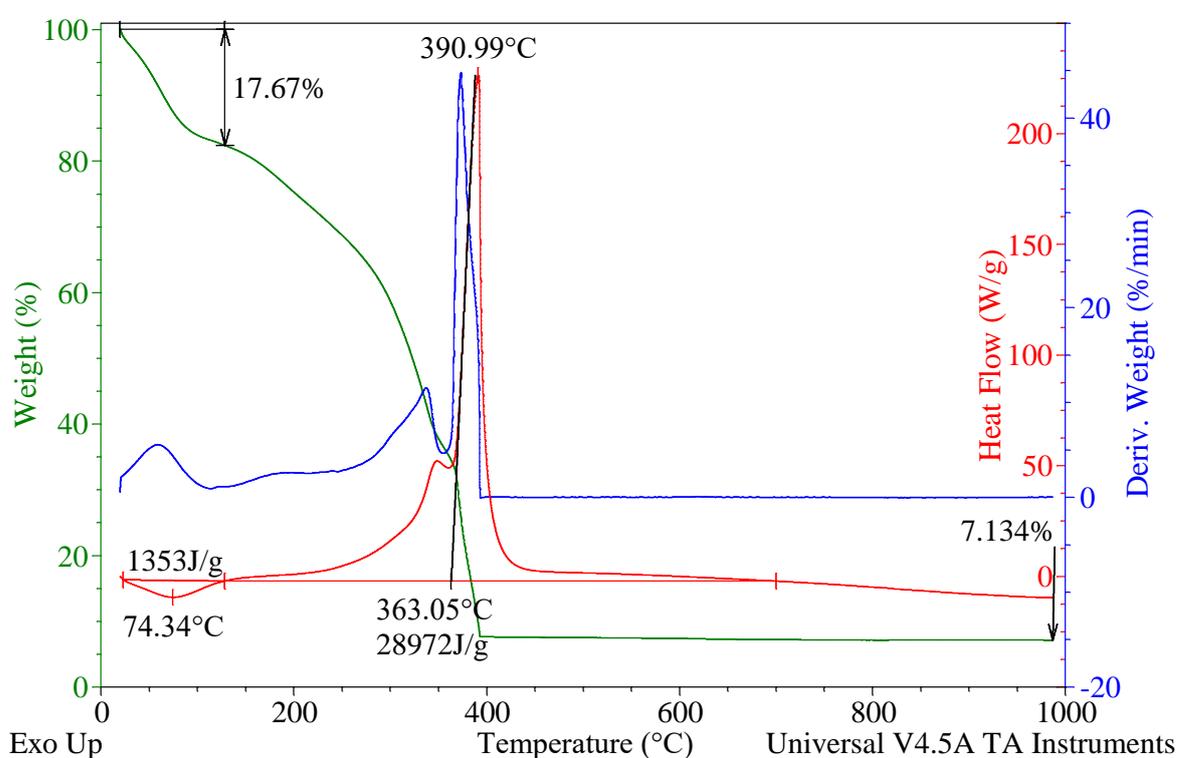
Pela curva TG a amostra perde 97,06% de massa, restando ao final do processo de queima uma massa de Cinzas de 2,94%. O percentual de Umidade da amostra é de 2,96%, e a perda de massa durante a Combustão foi de 94,10%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de filtro de cigarro foram as seguintes:

- Umidade (%) = 2,96;
- Cinzas (%) = 2,94;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 3,86 + 5.977,00 = 5.973,14$.

ii. **Amostra de couro animal curtido ao Cromo (Luva de Vaqueta)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de couro são apresentadas na Figura 46.

Figura 46 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra vidro analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

De acordo com a curva DTG são verificadas três etapas de perda de massa, sendo a primeira referente a Vaporização da Água presente do material e as duas seguintes à sua Combustão. Conforme a curva DSC, a Entalpia de Vaporização é de 1353 J/g e a Entalpia de Combustão é de 28972 J/g.

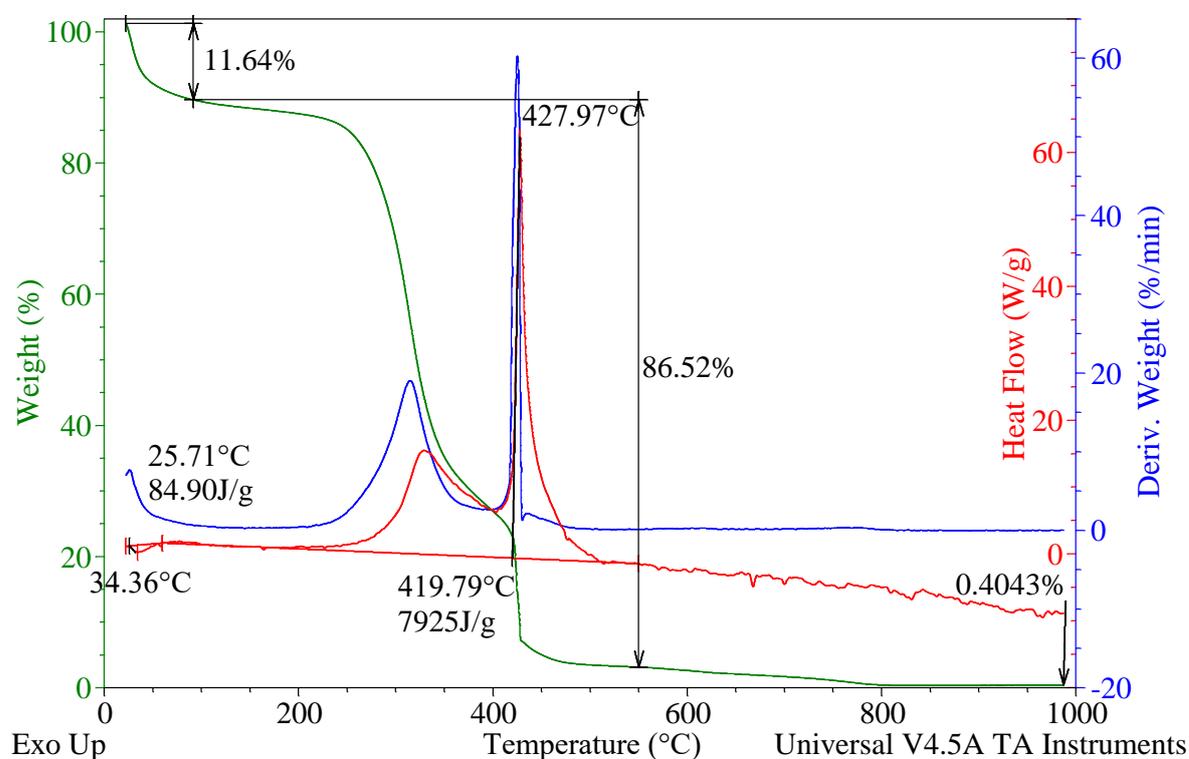
Pela curva TG a amostra sofreu perda de 92,87% de sua massa durante o processo de queima, restando ao final cerca de 7,13% de Cinzas. O percentual de Umidade da amostra é de 17,67%, e a perda de massa durante a Combustão foi de 75,20%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de couro foram as seguintes:

- Umidade (%) = 17,67;
- Cinzas (%) = 7,13;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = -1353,00 + 28972,00 = 27.619,00$.

iii. **Amostra de papel pardo (papel com gramatura de 120-240 g/m²)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel pardo são apresentadas na Figura 47.

Figura 47 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel pardo analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pela curva DTG, a amostra possui três etapas principais de perda de massa. A primeira etapa é referente a Vaporização da Água, o que gerou um efeito endotérmico na curva DSC de Entalpia de 84,90 J/g. As duas etapas posteriores são referentes a Combustão do material, sendo caracterizadas por dois picos DSC exotérmicos que totalizam uma Entalpia de 7925 J/g. Após 550°C é verificada outra perda de massa menos evidente, que não é visualizável pela curva DTG, sendo essa a decomposição do Carbonato de Cálcio existente no papel. Pela curva TG é possível afirmar que a amostra perde 99,60% de sua massa, gerando no final do processo cerca de 0,40 % de Cinzas. Desse total de perda de massa, 11,64%

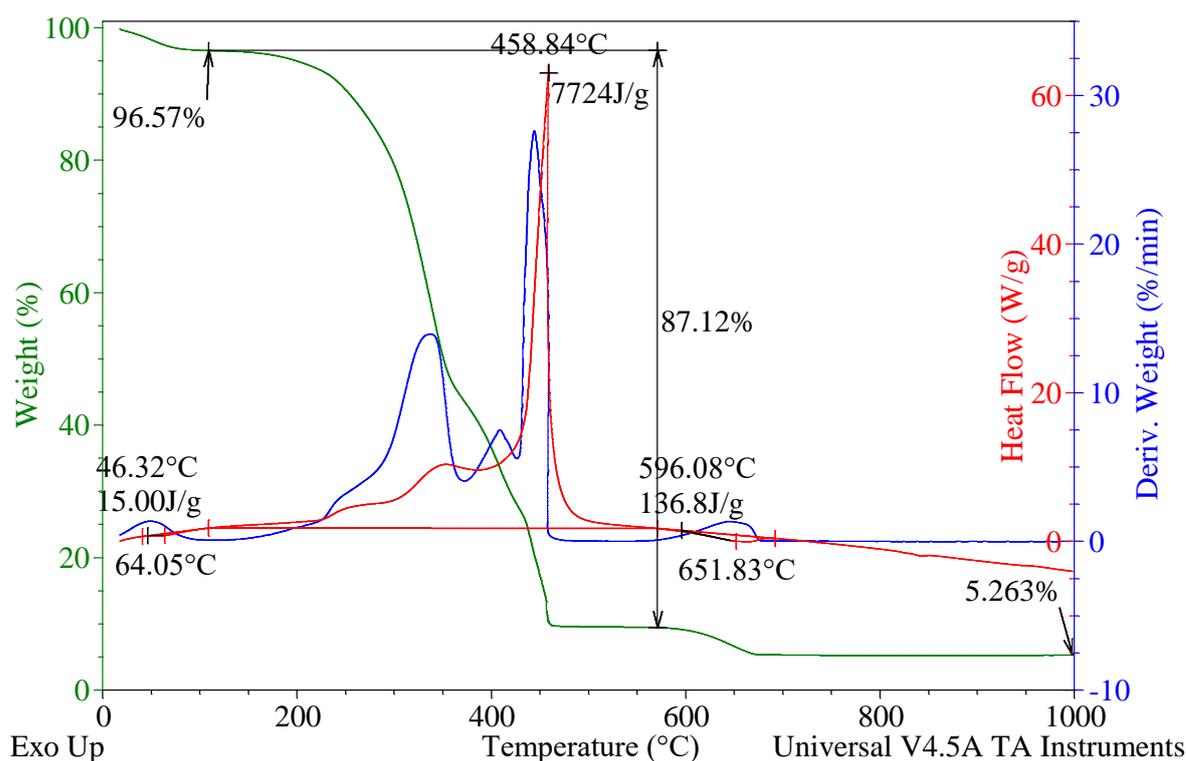
é referente a perda de Água, que vaporiza, e 86,52% refere-se à perda de massa por Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de papel pardo foram:

- Umidade (%) = 11,64;
- Cinzas (%) = 0,40;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 84,90 + 7925,00 = 7.840,10$.

iv. **Amostra de embalagem de sabonete (papel com gramatura de 40-100 g/m² + polipropileno)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de sabonete são apresentadas na Figura 48.

Figura 48 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de sabonete analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Essa amostra apresentou cinco principais etapas de perda de massa, conforme pode ser visto pelos picos na curva DTG. A primeira perda de massa refere-se à Vaporização da Água, a qual apresentou Entalpia de 15 J/g, conforme verificado pelo pico DSC endotérmico. A

segunda, terceira e a quarta etapas referem-se à Combustão da amostra, a qual gerou picos DSC exotérmicos que apresentaram Entalpia de 7724 J/g. A última etapa de perda de massa refere-se à decomposição do carbonato de cálcio presente na fração papel da embalagem, um processo que gerou um pico DSC endotérmico de Entalpia de 136,8 J/g.

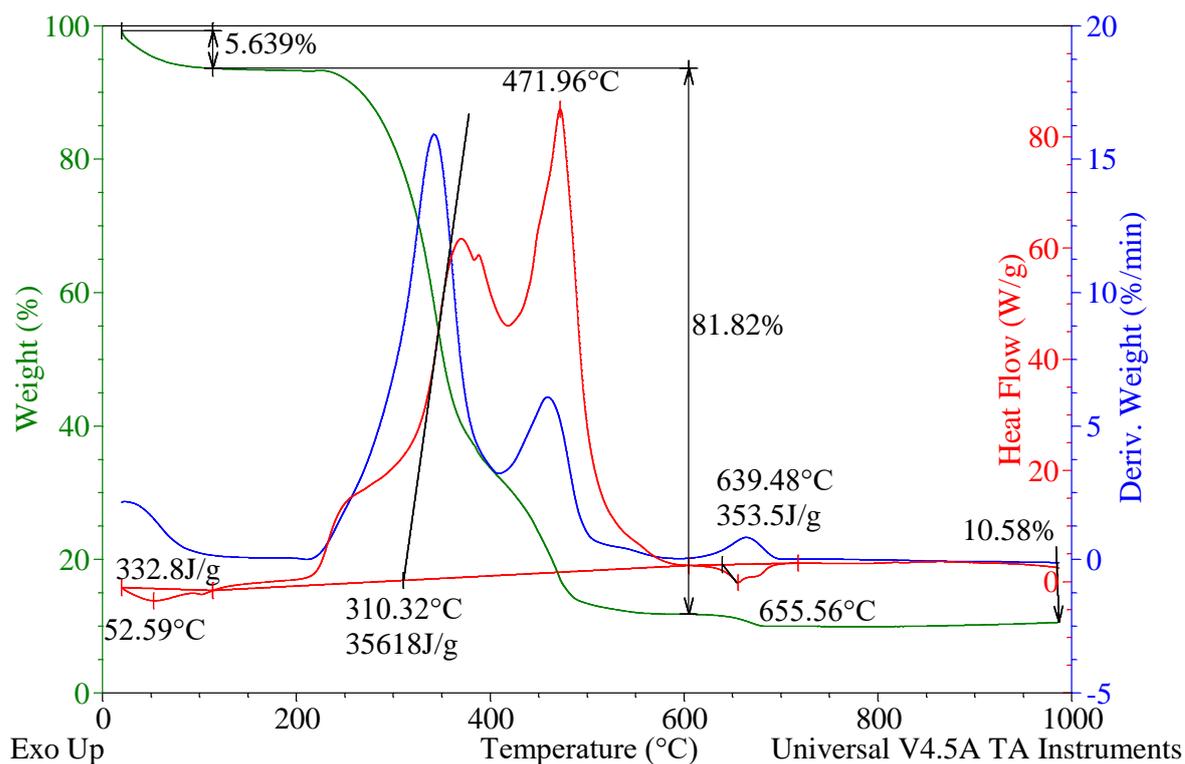
Pela curva TG é possível verificar que a amostra perde 97,74% de sua massa, restando ao final do processo de queima uma massa de Cinzas de 5,26%. Do total de perda de massa, cerca de 3,43% são referentes a Água Vaporizada e 87,12% são referentes as perdas por Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de embalagem de sabonete foram:

- Umidade (%) = 3,43;
- Cinzas (%) = 5,26;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 15,00 + 7724,00 - 136,80 = 7.572,20.$

v. **Amostra de embalagem de suco/leite (papel com gramatura de 50-60 g/m² + polietileno + folha de alumínio)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de suco/leite são apresentadas na Figura 49.

Figura 49 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de embalagem de suco/leite analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Pela curva DTG são verificadas quatro etapas de perda de massa que são responsáveis por diminuir em 89,42% a massa do material, restando ao final do experimento cerca de 10,58% de Cinzas. A primeira etapa refere-se à Vaporização da Umidade, a qual gera um pico DSC endotérmico de Entalpia de 332,8 J/g. As duas etapas posteriores referem-se à Combustão do resíduo, sendo caracterizadas pela geração de picos exotérmicos na curva DSC que totalizam uma Entalpia de 35.618 J/g. A última etapa refere-se à decomposição do carbonato de cálcio existente na fração de papel da amostra, a qual gera um pico endotérmico na curva DSC. Nota-se que a fração de Alumínio da amostra sofre fusão em torno de 660°C, na mesma faixa de temperatura de decomposição do Carbonato de Cálcio. Por essa razão o pico DSC endotérmico cuja Entalpia é de 353,5 J/g refere-se à esses dois processos. A fração de PE da amostra não apresentou pico DSC endotérmico de fusão visualizável (entre 120 e 130°C) e sofreu Combustão junto com a fração de papel, contribuindo para a Entalpia do processo. Pela análise

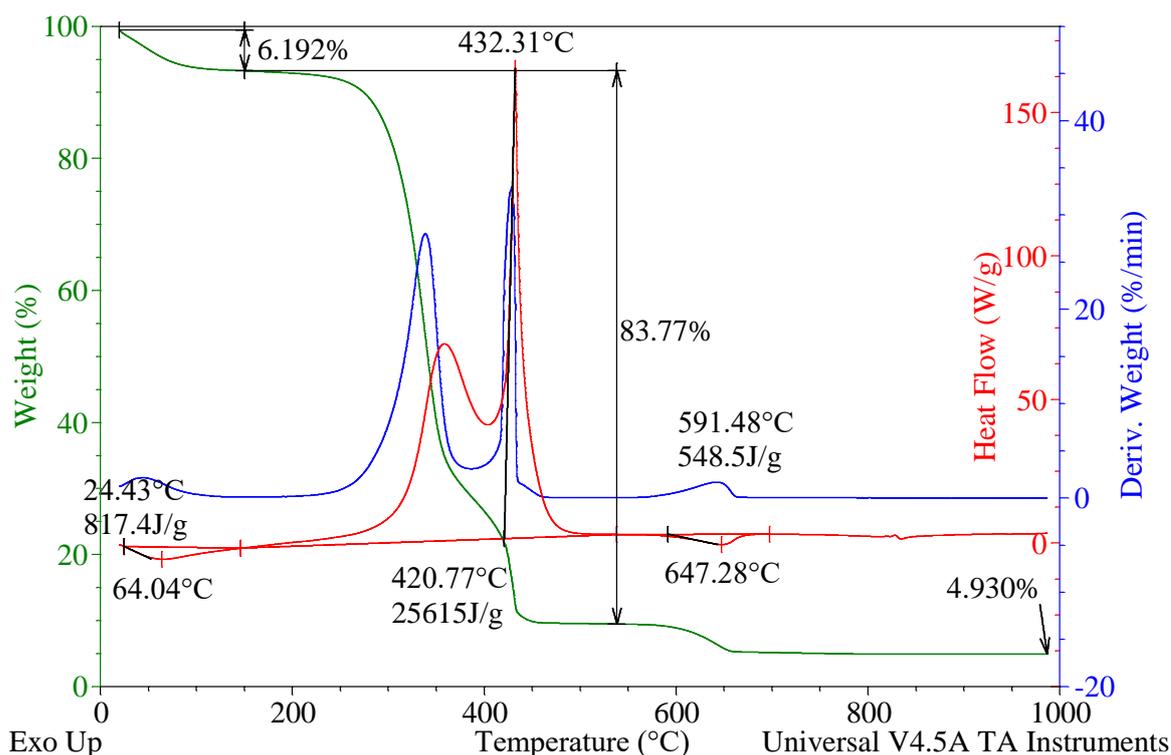
da curva TG, nota-se que a amostra perde 5,64% de sua massa na Vaporização da Água, além de 81,82% na Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de embalagem de suco/leite foram:

- Umidade (%) = 5,64;
- Cinzas (%) = 10,58;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 332,80 + 35.618,00 - 353,50 = 34.931,70$.

vi. **Amostra de papel de caderno escolar (papel com gramatura de 75-120 g/m²)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel de caderno escolar são apresentadas na Figura 50.

Figura 50 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de papel de caderno escolar analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pela curva DTG, a amostra possui quatro etapas de perda de massa que totalizam uma perda de 95,07%, restando 4,93% de Cinzas. A primeira etapa refere-se à Vaporização da Água, a qual gera um pico DSC endotérmico cuja Entalpia é de 817,4 J/g. As duas etapas posteriores referem-se à Combustão do papel, as quais geram dois

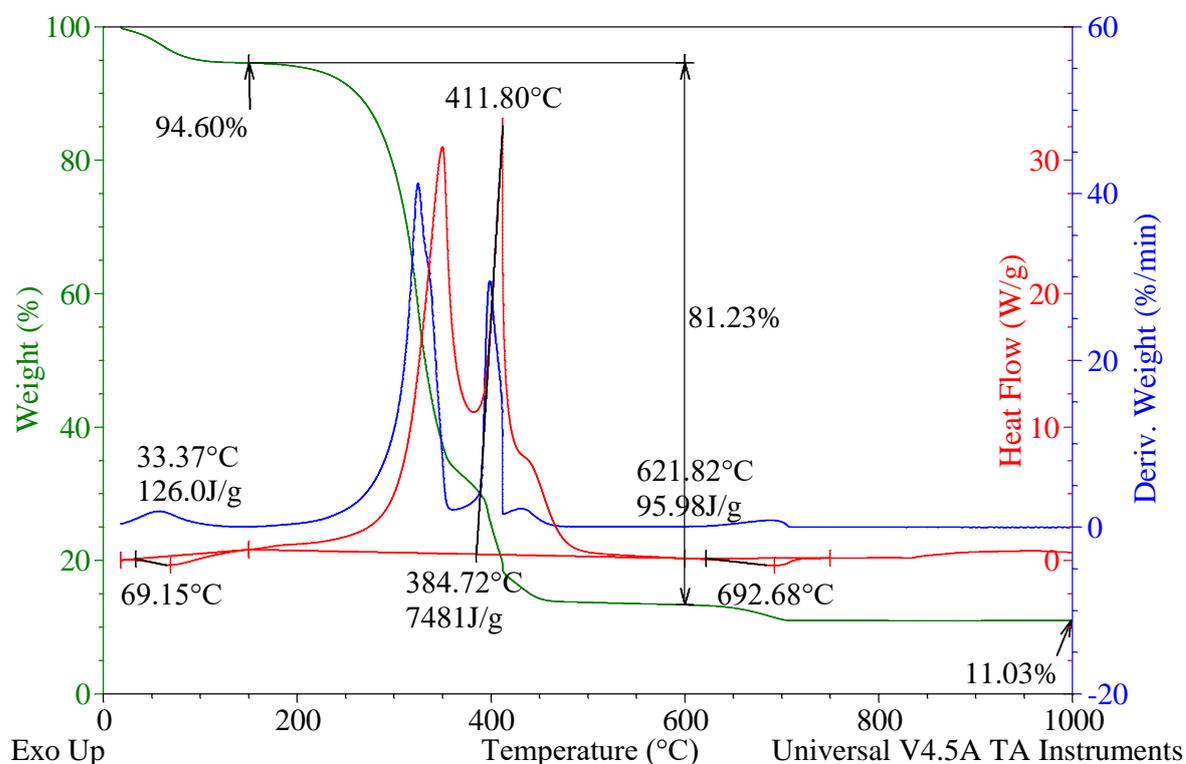
picos DSC exotérmicos com Entalpia de 25.615 J/g. A quarta etapa de perda de massa refere-se à decomposição do Carbonato de Cálcio presente no papel, a qual é responsável por um pico endotérmico na curva DSC, cuja Entalpia é de 548,5 J/g. Pela curva TG é possível verificar que a amostra perde 6,19% de sua massa no processo de Vaporização da Água, além de 83,77% quando sofre a Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de papel de caderno foram:

- Umidade (%) = 6,19;
- Cinzas (%) = 4,93;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 817,40 + 25.615,00 - 548,50 = 24.249,10$.

vii. **Amostra de papel toalha (papel com gramatura de 18-25 g/m²)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papel toalha são apresentadas na Figura 51.

Figura 51 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de papel toalha analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

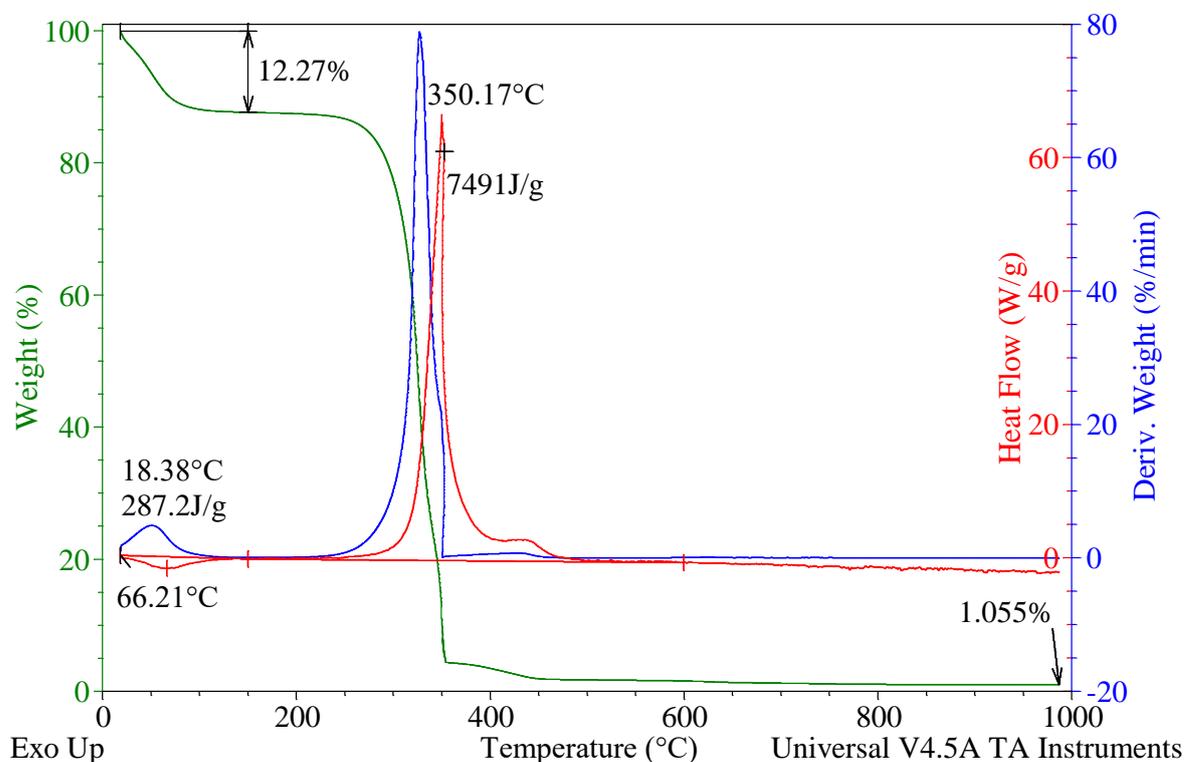
Pela visualização da curva DTG podem ser verificadas cinco etapas de perda de massa que totalizam uma redução de 88,97 % da massa da amostra, restando ao final do processo de queima uma massa de Cinzas de 11,03%. A primeira etapa refere-se à Vaporização da Água, sendo caracterizada por um pico DSC endotérmico de Entalpia de 126 J/g. As três etapas posteriores referem-se à Combustão do papel toalha, a qual gera picos DSC exotérmicos que totalizam uma Entalpia de 7481 J/g. A última etapa de perda de massa refere-se à decomposição do carbonato de cálcio presente no papel, a qual é responsável pelo pico endotérmico na curva DSC, cuja Entalpia é de 95,98 J/g. Pela curva TG é possível verificar que as perdas de massa por Vaporização da Água e Combustão são de, respectivamente, 5,4% e 81,23%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de papel toalha foram:

- Umidade (%) = 5,40;
- Cinzas (%) = 11,03;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 126,00 + 7.481,00 - 95,98 = 7.259,02.$

viii. **Amostra de guardanapo (papel com gramatura de 17-19 g/m²)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de guardanapo são apresentadas na Figura 52.

Figura 52 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de guardanapo analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Pela curva DTG são verificadas duas etapas principais de perda de massa que totalizam uma diminuição de 98,95% da massa do guardanapo, restando 1,05% de Cinzas ao final dos processos de queima. A primeira etapa refere-se à Vaporização da Água presente na amostra, a qual é responsável pelo pico DSC endotérmico com Entalpia de 287,2 J/g. A segunda etapa refere-se à Combustão da amostra, a qual é caracterizada pelo pico DSC exotérmico de 7491 J/g de Entalpia.

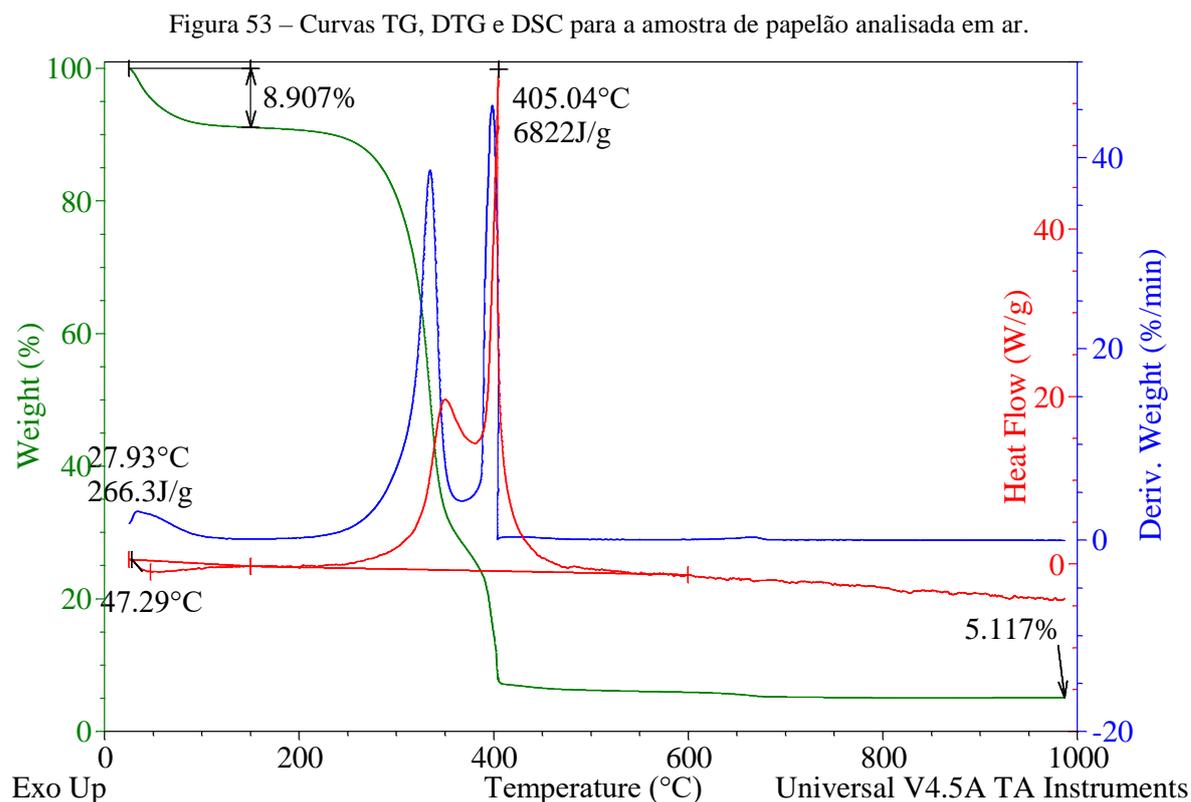
Conforme a curva TG, o guardanapo perde 12,27% de massa pela Vaporização da Água, além 86,68% pela sua Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de guardanapo foram:

- Umidade (%) = 12,27;
- Cinzas (%) = 1,05;

- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 287,20 + 7.491,00 = 7.203,80.$

ix. **Amostra de papelão (papelão micro ondulado tipo E)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de papelão são apresentadas na Figura 53.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pela curva DTG, a amostra possui três etapas de perda de massa que reduzem a massa do papelão em 94,88%, restando ao final cerca de 5,12% de Cinzas. A primeira etapa refere-se à perda Vaporização de Água, a qual gera um pico endotérmico na curva DSC com Entalpia de 266,3 J/g. As duas demais etapas referem-se à Combustão da amostra, a qual gera dois picos exotérmicos na curva DSC com Entalpia de 6822 J/g.

Pela curva TG pode ser observado que a perda de massa pela Vaporização da Água e Combustão são de, respectivamente, 8,91% e 85,97%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de papelão foram:

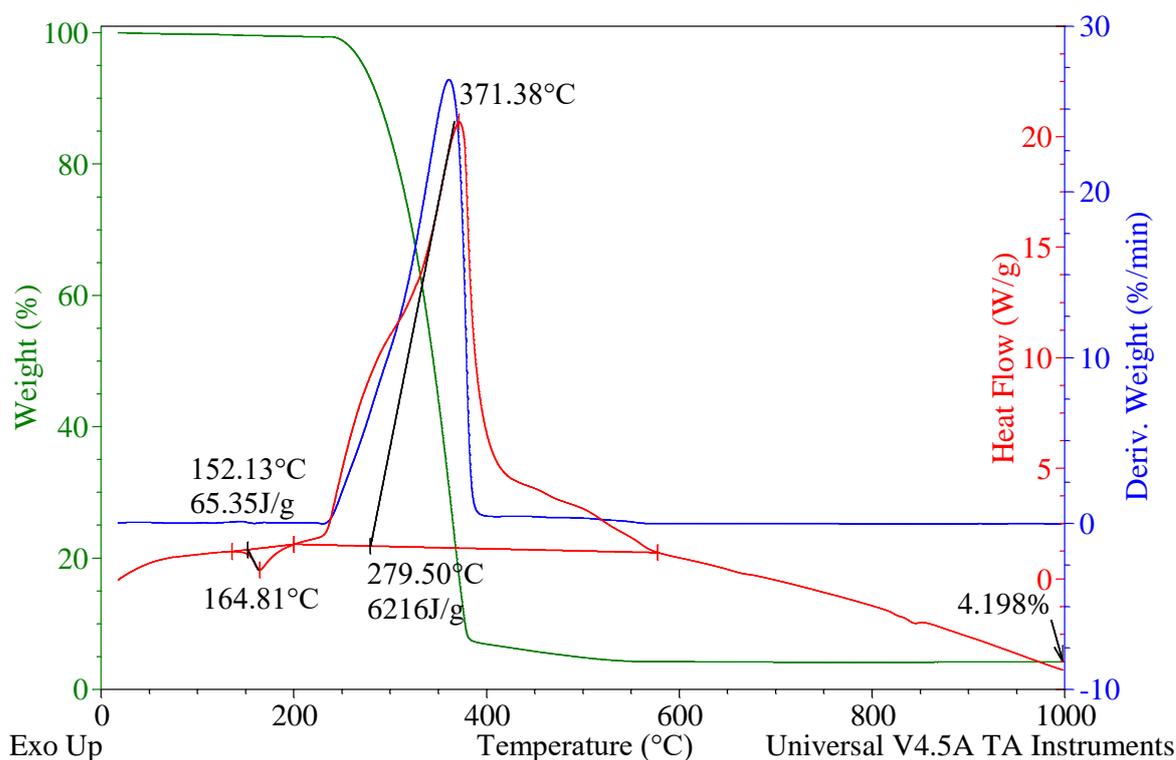
- Umidade (%) = 8,91;
- Cinzas (%) = 5,12;

- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 266,30 + 6822,00 = 6.555,70.$

x. **Amostra de copo plástico descartável (polipropileno ou PP)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de copo plástico descartável são apresentadas na Figura 54.

Figura 54 – Curvas TG, DTG e DSC para a amostra de copo plástico descartável (PP) analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Por se tratar de um copo de polipropileno, o material inicialmente sofre fusão e depois Combustão, sendo ambos os processos visíveis na curva DSC. No caso das curvas TG ou DTG, é possível observar somente a Combustão, tendo em vista que na fusão a amostra somente mudou de estado físico e sua massa manteve-se constante. Assim sendo, conforme a curva DSC, a fusão do copo de PP gera um pico endotérmico com Entalpia de 65,35 J/g, já sua Combustão gera um pico exotérmico com Entalpia de 6216 J/g.

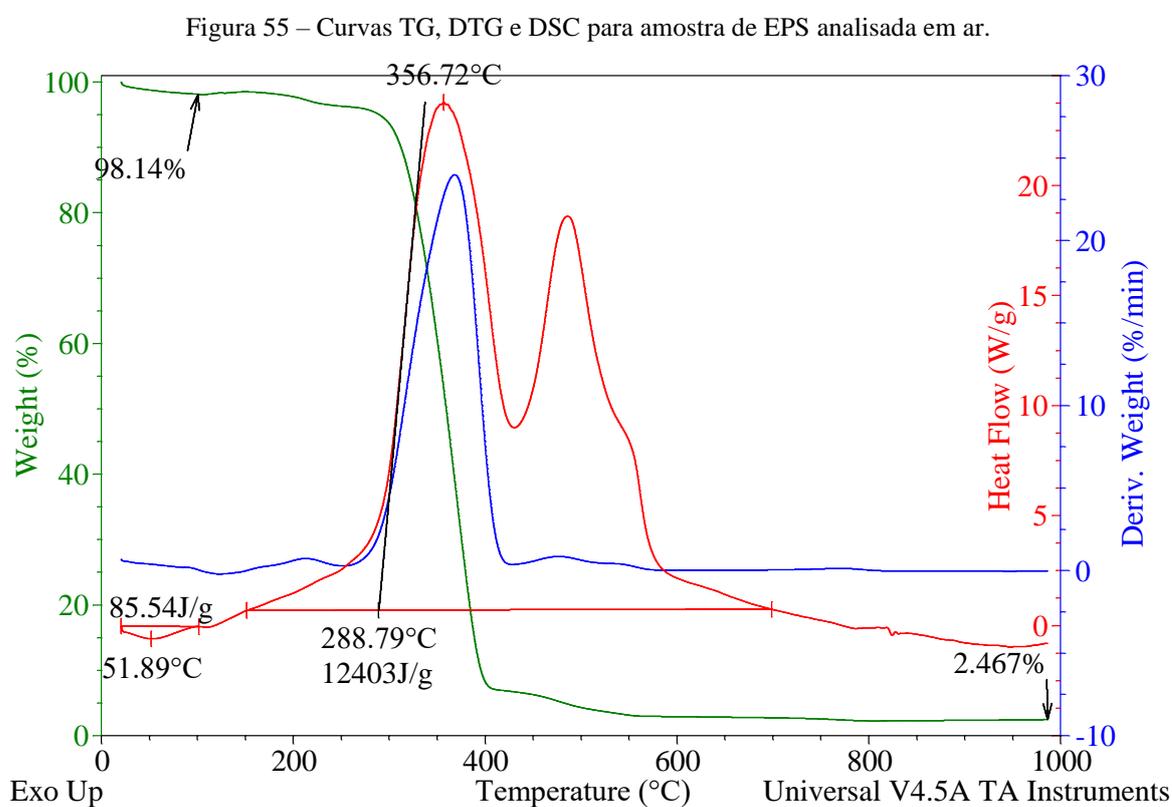
Pela curva DTG nota-se uma única etapa de perda de massa, dada pela Combustão da amostra. Já pela curva TG é possível verificar que essa perda de massa é de 95,8%, restando ao

final do processo de queima uma massa de Cinzas de 4,2%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de copo de PP foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 4,20;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 65,35 + 6216,00 = 6.150,65$.

xi. Amostra de isopor para marmita (poliestireno expandido ou EPS)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de EPS são apresentadas na Figura 55.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado na curva DSC, a amostra não apresentou o pico endotérmico de fusão. Essa situação já era esperada tendo em vista que o EPS é amorfo, assim sendo não possui um ponto de fusão definido; no entanto ele começa a amolecer na faixa de temperatura entre 80°C a 120°C, ao atingir a temperatura de transição vítrea (AHN, LEE e YANG, 2003).

Pela curva DTG podem ser verificadas três etapas de perda de massa que resultam na redução de 97,53% da massa amostra, sobrando 2,47% de Cinzas. A primeira etapa de perda de massa não gera um pico DTG significativo, no entanto refere-se à Vaporização da Água presente na amostra, caracterizada por um pico DSC endotérmico com Entalpia de 85,54 J/g. Na segunda e terceira etapas de perda de massa a amostra sofre Combustão, gerando dois picos DSC exotérmicos com Entalpia de 12403 J/g.

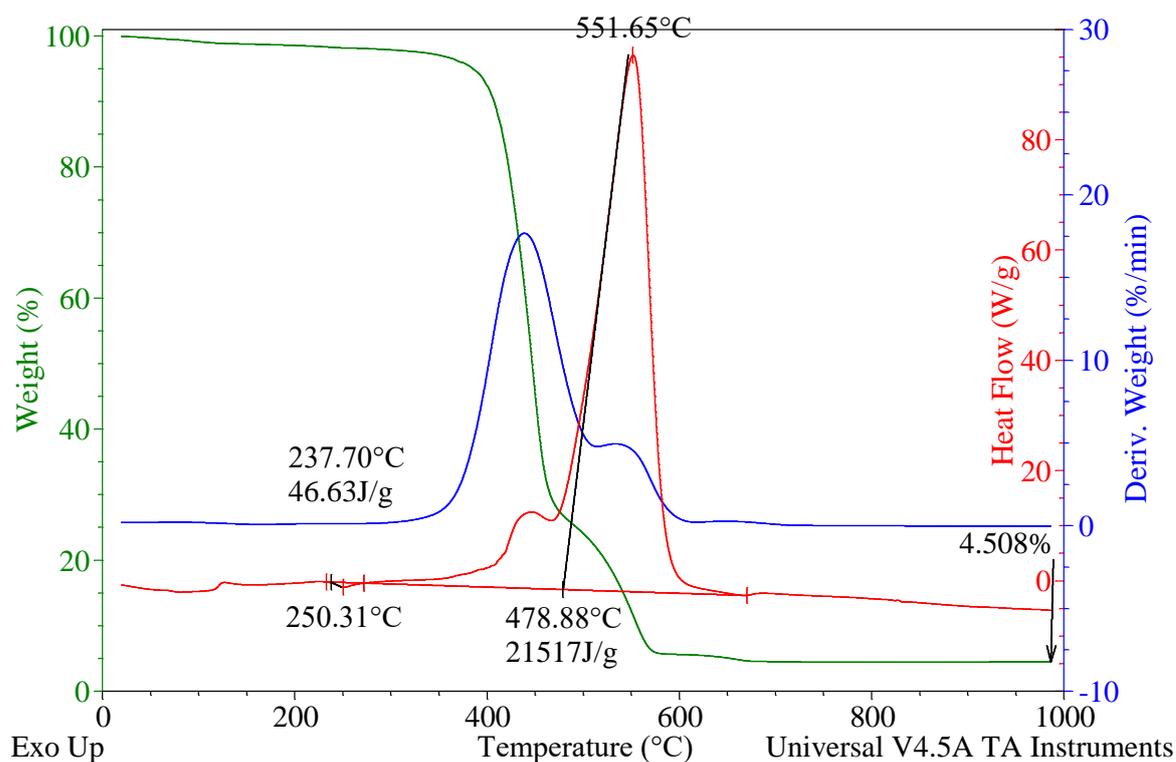
Conforme a curva TG pode ser observado que a amostra perde 1,86% de Água por Vaporização, além de 95,67% de sua massa por Combustão. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de EPS foram:

- Umidade (%) = 1,86;
- Cinzas (%) = 2,47;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 85,54 + 12403,00 = 12.317,46.$

xii. Amostra de prato plástico descartável (PS)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de plástico descartável (PS) são apresentadas na Figura 56.

Figura 56 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de prato descartável (PS) analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado pela curva DTG a amostra possui duas etapas de perda de massa que se referem a Combustão. Pela curva DSC é verificado um pico endotérmico que se refere a fusão do PS, a qual gerou uma Entalpia de 46,63 J/g. Após a fusão, o material sofre Combustão em duas etapas, que são caracterizadas por dois picos DSC exotérmicos que totalizam uma Entalpia de 21.517 J/g.

Pela curva TG pode ser verificado que durante o processo de queima a amostra perde 95,49% de massa, sobrando cerca de 4,51% de Cinzas. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de plástico descartável foram:

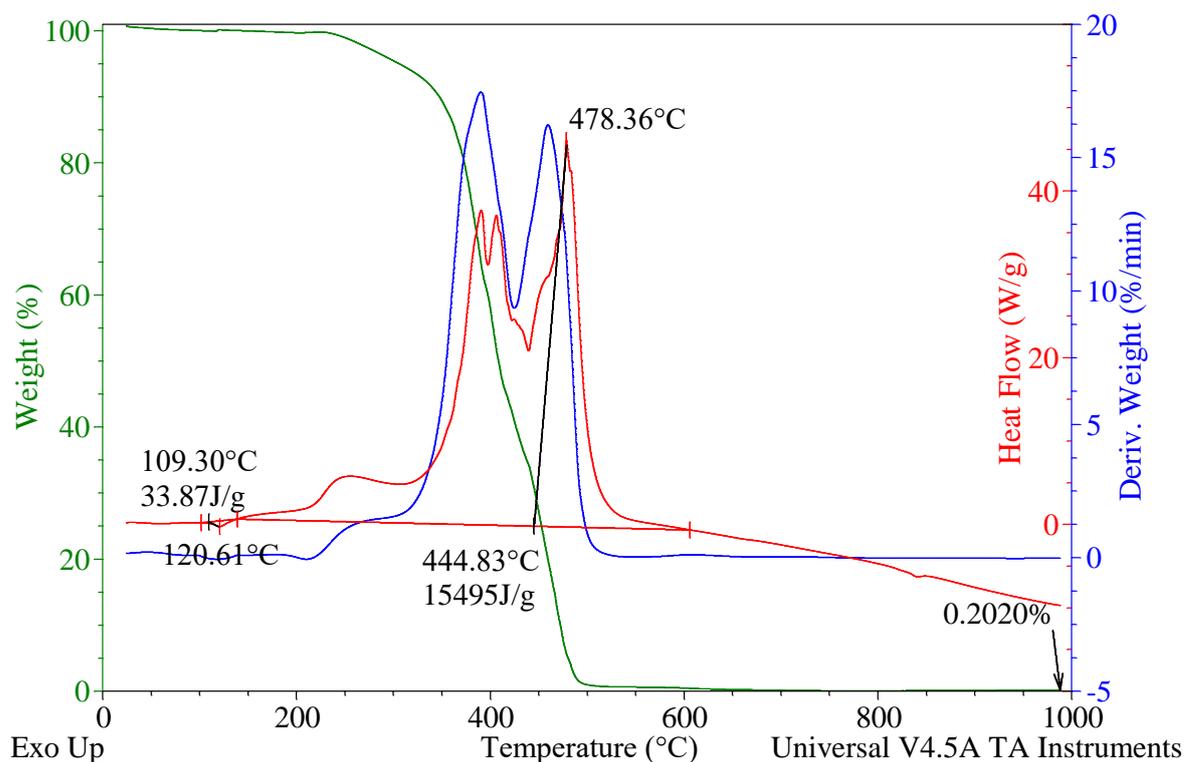
- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 4,51;

- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 46,63 + 21.517,00 = 21.470,37.$

xiii. Amostra de embalagem plástica transparente (PEBD)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem plástica transparente (PEBD) são apresentadas na Figura 57.

Figura 57 - Curvas TG, DTG e DSC para amostra de embalagem plástica transparente (PEBD) analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser verificado pela curva DTG a amostra possui três etapas de perda de massa, sendo referentes à Combustão. Pela curva DSC pode ser verificado um pico endotérmico de fusão da amostra, a qual possui Entalpia de 33,87 J/g. Após a fusão são verificados três picos exotérmicos principais, os quais identificam a Combustão da amostra e geram uma Entalpia de 15495 J/g.

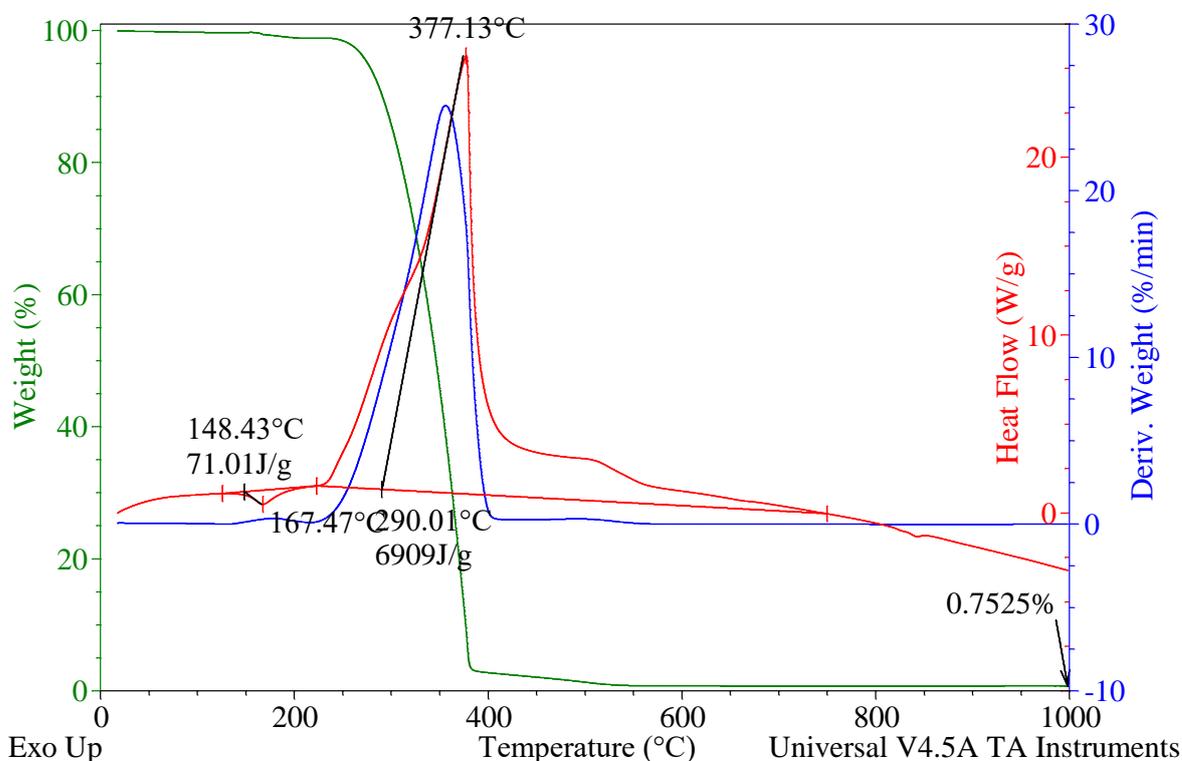
Pela curva TG nota-se quase a perda de massa total da amostra, sobrando ao final do processo de queima cerca de 0,20% de Cinzas. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de embalagem plástica transparente foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 0,20;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = -33,87 + 15.495,00 = 15.461,13$.

xiv. **Amostra de tampa de tubo para creme dental (PP)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de tampa de tubo para creme dental (PP) são apresentadas na Figura 58.

Figura 58 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de tampa de tubo para creme dental (PP) analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

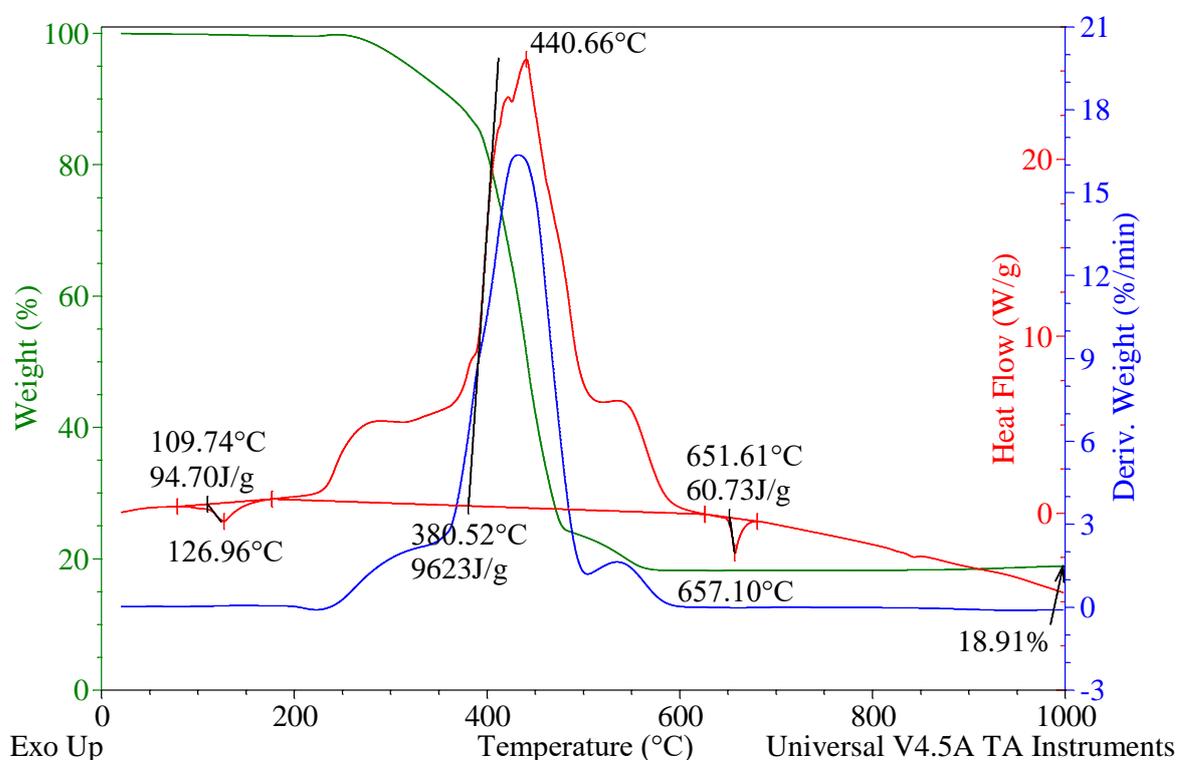
Conforme pode ser observado pela curva DTG a amostra sofreu perda de massa em etapa única, a qual refere-se à Combustão. Pela curva DSC é possível verificar a fusão do PP, a qual é caracterizada pelo pico DSC endotérmico com Entalpia de 71,01 J/g. Logo depois ocorre a Combustão do material, que é caracterizada pelo pico DSC exotérmico com Entalpia de 6909 J/g. Pela curva TG pode-se verificar que durante o processo de queima a amostra sofre uma perda de massa de 99,25%, restando cerca de 0,75% de Cinzas. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de tampa de tubo para creme dental foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 0,75;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 71,01 + 6.909,00 = 6.837,99$.

xv. **Amostra de tubo para creme dental (PEBD e Alumínio)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de tubo para creme dental são apresentadas na Figura 59.

Figura 59 – Curvas TG, DTG e DSC para amostra de tubo para creme dental analisada em ar.



Fonte: autoria própria.

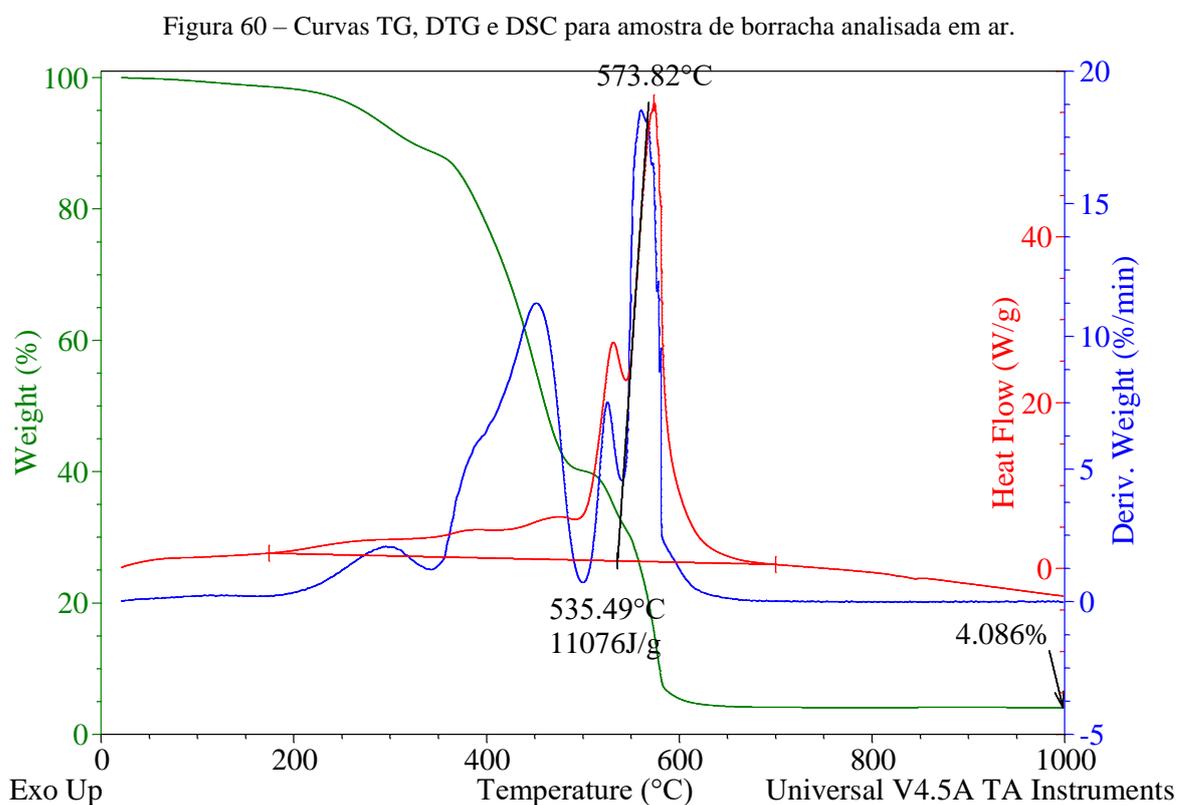
Conforme pode ser observado pela curva DTG, a amostra perde massa em três etapas, todas referentes a Combustão do material. Pela curva DSC é possível verificar a fusão da fração de PEBD da amostra, a qual é caracterizada por um pico endotérmico com Entalpia de 94,7 J/g. A Combustão da amostra ocorre em três etapas diferentes conforme pode ser verificado pelos três picos DSC exotérmicos com Entalpia de 9623 J/g. Após a amostra sofrer Combustão, a sua fração de alumínio sofre fusão, o que também pode ser verificado na curva DSC pelo pico endotérmico com Entalpia de 60,73 J/g.

De acordo com a curva TG a amostra perdeu 81,09% de massa, restando cerca de 18,91% de Cinzas, onde a fração alumínio está concentrada. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de tubo para creme dental foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 18,91;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 94,70 + 9.623,00 - 60,73 = 9.467,57$.

xvi. **Amostra de borracha para revestimento de piso (Poli-Isopreno)**

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de borracha são apresentadas na Figura 60.



Fonte: autoria própria.

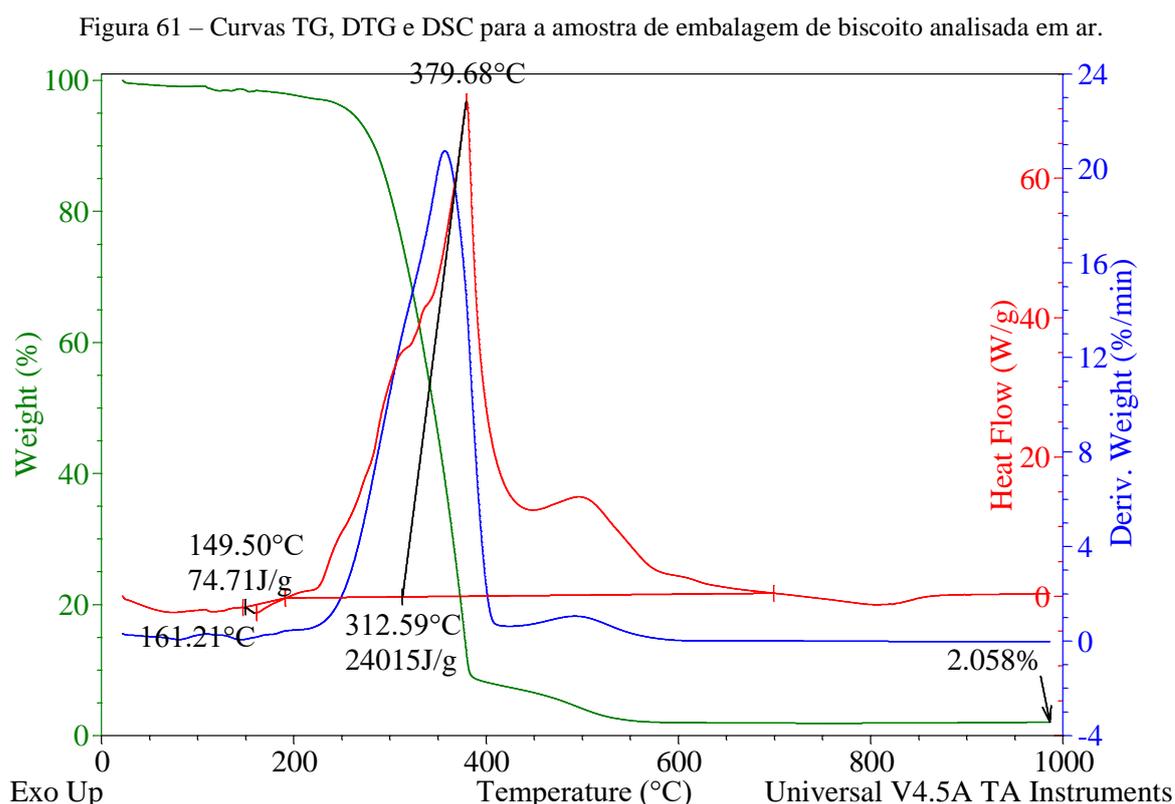
Conforme pode se observar na curva DTG, a amostra apresenta quatro etapas de perda de massa, todas referentes à combustão do material. Pela curva DSC o processo de combustão é caracterizado pelos picos exotérmicos que somam uma entalpia de 11.076 J/g.

Pela curva TG pode-se verificar que a amostra perde 95,91% de sua massa, sobrando ao final do processo de queima uma massa de Cinzas de 4,09%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de borracha para revestimento foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 4,09;
- ΔH_{queima} (J/g) = 11.076,00.

xvii. Amostra de embalagem de biscoito e salgados (Polipropileno com filme metalizado)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de embalagem de biscoito são apresentadas na Figura 61.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado pela curva DTG, a amostra possui duas etapas significativas de perda de massa, referentes à Combustão do material. Pela curva DSC é possível verificar a fusão do polipropileno, a qual é caracterizada por um pico endotérmico com

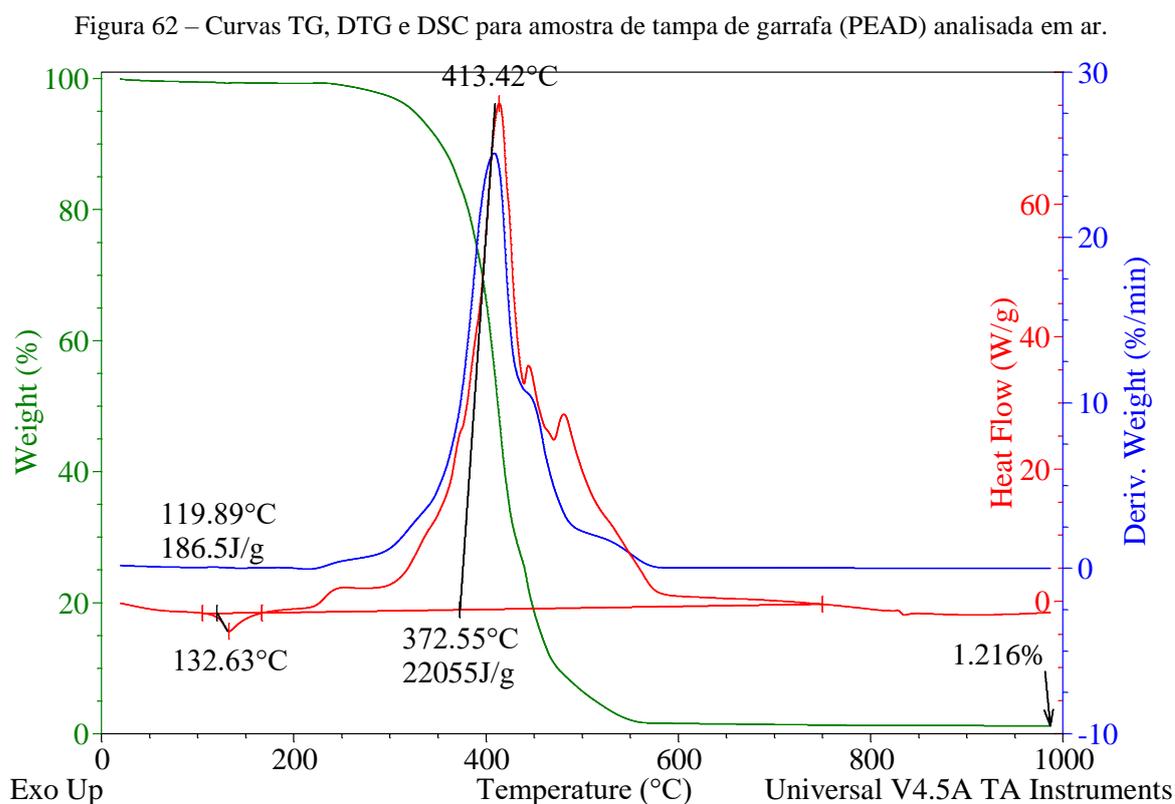
Entalpia de 74,71 J/g. Após a fusão o material sofre Combustão em duas etapas, as quais geram picos DSC exotérmicos com Entalpia de 24.015 J/g.

Pela curva TG pode-se observar que o material perde 97,94% de massa, restando ao final do processo de queima uma massa de Cinzas de 2,06%. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de embalagem de biscoito foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 2,06;
- ΔH queima (J/g) = - 74,71 + 24.015,00 = 23.940,29.

xviii. Amostra de tampa de garrafa plástica (PEAD)

As curvas TG, DTG e DSC para a amostra de tampa de garrafa são apresentadas na Figura 62.



Fonte: autoria própria.

Conforme pode ser observado na curva DTG, a amostra apresenta uma etapa única de perda de massa que se refere à Combustão. Pela curva DSC a fusão do material pode ser visualizada pelo pico endotérmico com Entalpia de 186,5 J/g. Após fusão, a amostra sofre Combustão, que é caracterizada pelos picos DSC exotérmicos sobrepostos com Entalpia de 22.055 J/g. Pela curva TG observa-se que a amostra perde 98,78% de massa, restando ao final do processo de queima cerca de 1,22% de Cinzas. Assim sendo, os dados de interesse obtidos para a amostra de tampa de PEAD foram:

- Umidade (%) = 0,00;
- Cinzas (%) = 1,22;
- $\Delta H_{\text{queima}} \text{ (J/g)} = - 186,50 + 22.055,00 = 21.868,5.$