



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RAHONY BREGENSK ALVES

**IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS *WASTE TO ENERGY* A
PARTIR DE SISTEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA FINS ENERGÉTICOS:
PERSPECTIVA SOCIAL E FINANCEIRA**

VITÓRIA - ES

2023

RAHONY BREGENSK ALVES

**IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS *WASTE TO ENERGY* A PARTIR
DE SISTEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS PARA FINS ENERGÉTICOS: PERSPECTIVA
SOCIAL E FINANCEIRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora:

Prof^ª. Dra. Luciana Harue Yamane

Coorientador:

Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

VITÓRIA - ES

2023

RAHONY BREGENSK ALVES

**IMPLANTAÇÃO DE TECNOLOGIAS *WASTE TO ENERGY* A
PARTIR DE SISTEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA FINS ENERGÉTICOS:
PERSPECTIVA SOCIAL E FINANCEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na linha de pesquisa em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em 24 de maio 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LUCIANA HARUE YAMANE
Data: 24/05/2023 15:42:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. D.Sc. Luciana Harue Yamane (UFES)

Orientadora - PPGES / CT / UFES

Documento assinado digitalmente
 RENATO RIBEIRO SIMAN
Data: 24/05/2023 15:52:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman

Coorientador - PPGES / CT / UFES

Documento assinado digitalmente
 EDNILSON SILVA FELIPE
Data: 24/05/2023 16:12:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe

Examinador Interno - PPGES / CT / UFES

Documento assinado digitalmente
 FRANCISCO CESAR DALMO
Data: 24/05/2023 16:47:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. D.Sc. Francisco César Dalmo

Examinador Externo – ICET / UFVJM

Em conformidade com as normas prescritas na Portaria Normativa Nº. 08/2021 – PRPPG/UFES, Sr. Presidente da banca examinadora atesta que, a defesa foi realizada por meio de videoconferência, ou outro suporte eletrônico a distância equivalente.

Prof^ª. D.Sc. Luciana Harue Yamane

Orientadora – PPGES / CT / UFES

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me sustentou, iluminou e me deu forças em todos os momentos;

Aos meus pais, pela oportunidade de realizar mais essa etapa tão importante em minha vida;

Aos meus amigos, que estão sempre ao meu lado, dando apoio e incentivo às minhas escolhas;

À minha noiva, Ranah, que esteve ao meu lado durante cada momento desta jornada e se doou junto comigo neste desafio;

Aos amigos do IEMA, Andressa, Antônio, Bruno, Carolina, Cheiber, Deysi, Flávia, Gilberto, Hugo, Lincoln e Renata, pelo incentivo e encorajamento inicial para eu iniciar e concluir esta jornada;

Aos amigos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Serra/ES pelo apoio e incentivos para a continuação e conclusão desta jornada;

Ao Alaimar Fiusa, pelo apoio para que eu conseguisse participar das aulas presenciais;

À Profa. Luciana Yamane pela orientação e comprometimento com cada etapa desenvolvida nesta dissertação e ao Prof. Renato Siman pelos ensinamentos, paciência e por me ajudar sempre que foi necessário para que eu conseguisse alcançar o caminho necessário para o desenvolvimento da minha pesquisa;

Ao Lagesa, por disponibilizar o espaço e equipamentos;

Às Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Recuperáveis, gestores municipais e representante das empresas de manejo e destinação final de resíduos e por contribuírem respondendo aos questionários;

À Lorena Miozzi, pela parceria, incentivos e apoio durante toda essa jornada;

Aos colegas do mestrado, Aladim, Roger, Leonardo, Tania, Vilker pelos momentos de conversa, desabafo e companheirismo tão importantes durante esta jornada;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Ser feliz, aprender e compartilhar.”

Abílio Diniz

RESUMO

O desenvolvimento urbano associado ao crescimento econômico e populacional demandam um maior consumo de bens materiais e de serviços, ocasionando o aumento na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e no consumo de energia elétrica. Cerca de 70% dos RSU gerados no mundo ainda são dispostos em “lixões” e/ou locais ambientalmente inadequados e aterros sanitários, e o restante são reciclados e reutilizados. Os países desenvolvidos e os em desenvolvimento, com base na hierarquização de resíduos, buscam novas alternativas para geração de valor para os RSU com a inserção do conceito de economia circular sugerida pela Organização das Nações Unidas (ONU) em cumprimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Essa evolução pode se dar por recuperação energética a partir do tratamento térmico de RSUE, mediante tecnologias *Waste to energy* (WTE). Nesse contexto, há a necessidade de entender o viés social, principalmente nos países com catadores de materiais recicláveis, a exemplo do Brasil. Nesse sentido este estudo buscou demonstrar a evolução das tecnologias WTE no mundo e no Brasil, e a avaliação financeira e social da implantação da incineração com recuperação energética no Brasil. Na primeira etapa uma revisão sistemática e integrada sobre a inclusão das tecnologias WTE no mundo e no Brasil, bem como dos aspectos técnicos, normativos e uma análise do potencial energético das regiões do Brasil. Na segunda etapa, com dados do Brasil, propõe uma avaliação financeira da implantação de uma unidade *mass burning*, e a partir disso, avalia por meio de questionário aplicado, o impacto social sob a perspectiva de *stakeholders* diretamente ligados ao manejo e destinação final de RSU. Sendo assim, na primeira etapa, concluiu-se que no mundo há uma evolução das tecnologias WTE e no Brasil percebeu-se uma fase embrionária com algumas mudanças legislativas nos últimos anos a favor do tema. Observou-se a capacidade de geração de energia quando da instalação das tecnologias WTE no Brasil, tendo uma contribuição de 4,86% a mais na matriz elétrica brasileira. Na segunda etapa, percebeu-se pelos indicadores financeiros Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) que, para faixas populacionais do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) 5 e 6 com população superior a 1,9 milhões de habitantes a unidade *mass burning* é financeiramente viável. Assim, tendo em vista a avaliação financeira positiva em grandes centros urbanos, onde existe maior atuação dos catadores de materiais recicláveis, observou-se pela percepção dos *stakeholders* que os catadores terão melhores condições socioeconômicas e trabalhistas com a implantação das WTE.

Palavras chaves: Resíduos Sólidos Urbanos. *Waste to Energy*. Incineração. Gaseificação. Potencial energético. Sistemas térmicos. Impacto Social. Catadores de Materiais Recicláveis e Reutilizáveis. Avaliação Financeira. Valor Presente Líquido. Taxa Interna de Retorno.

ABSTRACT

Urban development associated with economic and population growth demand greater consumption of material goods and services, leading to an increase in the generation of urban solid waste (MSW) and in the consumption of electricity. About 70% of the MSW generated in the world is still disposed of in “dumps” and/or landfills. In addition, developed and developing countries, based on the hierarchy of waste, seek new alternatives to generate value for MSW with the inclusion of the concept of circular economy suggested by the United Nations (UN) in compliance with Goals of Sustainable Development (SDGs). This evolution in the destination of MSW can occur through energy recovery from the thermal treatment of MSW, using Waste to Energy – WTE technologies. It is important to emphasize that, considering the SDGs, especially in developing countries, such as Brazil, there is a need to understand the social inclusion of recyclable material collectors in this context. In this sense, this study proposes, in the first stage, a systematic and integrated review on the inclusion of WTE technologies in the world and in Brazil, as well as technical and regulatory aspects and an analysis of the energy potential of the regions of Brazil. In the second stage, with data from Brazil, it proposes an analysis of the financial viability of the implementation of mass burning unit, and from that, it evaluates the social impact from the perspective of stakeholders directly linked to the management and destination of MSW. Therefore, in the first stage, it was concluded that in the world there is an evolution of WTE technologies and in Brazil an embryonic phase was perceived with some legislative changes in recent years in favor of the theme, The power generation capacity was observed when WTE technologies were installed in Brazil, with a contribution of 4,86% more in the Brazilian energy matrix. In the second stage, it was noticed by the financial indicators Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) that, for population groups of the National Sanitation Information System (SNIS) 5 and 6 population superior to 1.9 million inhabitants, the mass burning unit is financially viable. Benefiting the sector, in view of the financial viability in large urban centers, where there is greater activity by recyclable material collectors, it was observed by the perception of the interviewed stakeholders that collectors will have better socioeconomic and labor conditions with the implementation of WTE.

Keywords: Urban solid waste. Waste to energy. Mass burning. Gasification. Energy potential. Thermal systems. Social impact. Collectors of Recyclable and Reusable Materials. Net present value. Internal Rate of Return.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição percentual dos tipos de tratamento e destinação final de resíduos sólidos urbanos adotados na União Europeia, Suíça, Noruega e Islândia.	28
Figura 2 - Destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU) conforme regionalização proposta pelo Banco Mundial.....	29
Figura 3 – Descrição dos tratamentos e destinação final de RSU adotados em países da América Latina e Caribe.....	30
Figura 4 - Evolução da destinação final de resíduos sólidos urbanos no Brasil segundo o PLANARES.....	41
Figura 5 - Composição gravimétrica (% p/p) de RSU, conforme Banco Mundial.....	43
Figura 6 - Composição gravimétrica (% p/p) de RSU por macrorregião do Brasil.	44
Figura 7 – Processo de incineração ou <i>mass burning</i> de RSU com recuperação energética.....	46
Figura 8 - Processo de gaseificação de RSU com recuperação energética.....	47
Figura 9 - Poder calorífico inferior na base seca (PCIbs) e na base úmida (PCIbw) para cada macrorregião e para o Brasil.....	53
Figura 10 - Potência de geração energética de gaseificação utilizando PCIbs e da incineração utilizando PCIbw.	54
Figura 11 - Geração de energia da gaseificação utilizando PCIbs e da incineração utilizando PCIbw.	54
Figura 12 - Potência das tecnologias de gaseificação e incineração a partir do PCIbs.	55
Figura 13 – Geração de energia elétrica das tecnologias de gaseificação e incineração a partir do PCIbs.....	55
Figura 14 - Comparação entre a gaseificação e a incineração para geração de energia elétrica por tonelada de RSU.	56
Figura 15 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (%)......	57
Figura 16 - Avaliação financeira por faixa populacional.	75
Figura 17 - Perspectiva de impacto social das Organizações de Catadores e Materiais Reutilizáveis e Recicláveis (OCMRR).	77
Figura 18 - Perspectiva de impacto social das empresas privadas.	78
Figura 19 - Perspectiva de impacto social das prefeituras.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Detalhamento metodológico dos tópicos abordados na Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura.....	23
Quadro 2 - Projeção populacional das macrorregiões do Brasil para o ano de 2023.	24
Quadro 3 - Taxa de geração <i>per capita</i> diária de RSU das macrorregiões do Brasil.	24
Quadro 4 - Composição gravimétrica de RSU das macrorregiões do Brasil.....	25
Quadro 5 - Menor poder calorífico de cada tipo de resíduo combustível: poder calorífico inferior de base úmida (PCIbw) e poder calorífico inferior de base seca (PCIs).	26
Quadro 6 - Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais das opções de tratamento e destinação final de RSU e respectivos potenciais de recuperação energética no Brasil.....	31
Quadro 7 - Evolução da legislação do Brasil, com ênfase ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) com recuperação energética.	39
Quadro 8 – Limites de classificação de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE)..	45
Quadro 9 - Comparação das tecnologias de conversão térmica - <i>Waste to Energy</i> (WTE).	50
Quadro 10 - Dados para estimativa de geração <i>per capita</i> de RSU por faixa populacional.....	64
Quadro 11 - Detalhamento metodológico da revisão sistemática para coleta de dados secundários da Etapa 1.....	67
Quadro 12 - Detalhamento metodológico da revisão sistemática para coleta de dados secundários da Etapa 2.....	70
Quadro 13 - Categorias de impacto social, indicadores sociais e métricas para análise social das partes interessadas.....	72
Quadro 14 - Estimativa de produção de energia e potência para faixas populacionais brasileiras.	73
Quadro 15 - Premissas para a avaliação financeira.....	74
Quadro 16 – Questionário aplicado para gestores públicos municipais a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.....	98
Quadro 17 - Questionário aplicado para representantes de empresas que atuam com manejo e destinação final de RSU a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.	101
Quadro 18 - Questionário aplicado para representantes de OCMRR a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δt : número de horas anuais

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV-S: análise de ciclo de vida social

I: taxa de geração de resíduos

i: Taxa de juros

IPEA: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

CAPEX: *capital expenditure*

CDR: combustível derivado de resíduos

Cm: constante em relação à perda de massa dos resíduos úmidos

COFINS: Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

CSLL: Contribuição Comercial sobre o Lucro Líquido

Ct: Entrada de caixa líquido

D: Taxa de destinação final RSUE

E: energia gerada

F1: fator tributário

FC: Fator de capacidade de produção

Fr: fração de cada tipo de resíduo na composição gravimétrica

IRPJ: Imposto de Renda Pessoa Jurídica

ISS: Imposto Sobre Serviços

k1: cotação entre Euro e Real

m: Vida útil dos projetos

n: números de tipos de resíduos

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

OCMR: organizações de catadores de materiais recicláveis

ODS: objetivos de desenvolvimento sustentável

ONU: organização das nações unidas

OPEX: *operational expenditure*

P: População

PCI: Poder calorífico inferior

PCIbw: Poder calorífico inferior de base úmida

PCIs: Poder calorífico inferior de base seca

PERS-ES: Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos do estado do Espírito Santo

PIS: Programa de Integração Social
Planares: Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos
Pot: potência
Q: Quantidade de RSUE
R: Fluxo de massa de resíduos gerados
RDO: Resíduos sólidos domiciliares
RMGV: Região Metropolitana da Grande Vitória
RPU: resíduos sólidos públicos
Rr: Fluxo de massa de resíduos de cada tipo de resíduo
Rs: Fluxo de massa de resíduos secos
RSU: resíduos sólidos urbanos
RSUE: resíduos sólidos urbanos para fins energéticos
Ru: Fluxo de massa de resíduos úmidos gerado
SNIS: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
T: Tarifa de venda de energia
TIR: taxa interna de retorno
URE: unidade recuperação energética
USEPA: *United States Environmental Protection Agency*
VPL: valor presente líquido
 γ : Eficiência dos equipamentos de conversão térmica
WTE: *Waste to Energy*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	14
CAPÍTULO 2: POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA SISTEMAS TÉRMICOS NO BRASIL	18
2.1. INTRODUÇÃO	19
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.2.1. <i>Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura</i>	21
2.2.2. <i>Etapa 2 – Análise do potencial energético do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos não recicláveis para sistemas térmicos no Brasil</i>	23
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
2.3.1. <i>Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura</i>	27
2.3.1.1. <i>Inclusão dos tratamentos térmicos com recuperação energética na hierarquia do manejo de RSU no Mundo e no Brasil</i>	27
2.3.1.2. <i>Aspectos normativos: uso de RSU para recuperação energética</i>	35
2.3.1.3. <i>Aspectos técnicos: a implantação de sistemas térmicos como possibilidade de destinação final de RSU</i>	42
2.3.2. <i>Etapa 2 – Análise do potencial energético de resíduos sólidos urbanos não recicláveis para sistemas térmicos no Brasil</i>	52
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	59
CAPÍTULO 3: AVALIAÇÃO FINANCEIRA E DO IMPACTO SOCIAL NA IMPLANTAÇÃO DE UMA UNIDADE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NÃO RECICLÁVEIS NO BRASIL	60
3.1. INTRODUÇÃO	61
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	64
3.2.1. <i>Etapa 1 - Avaliação financeira da implantação da incineração de resíduos sólidos não recicláveis por faixa populacional no Brasil</i>	64
3.2.3. <i>Etapa 2 - Impacto social da implantação da unidade de recuperação energética a partir da incineração de resíduos sólidos não recicláveis</i>	70
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
3.3.1. <i>Etapa 1 - Avaliação financeira da implantação da incineração de resíduos sólidos não recicláveis por faixa populacional no Brasil</i>	73

<i>3.3.2. Etapa 2 - Impacto social da implantação da unidade de recuperação energética a partir da incineração de resíduos não recicláveis</i>	76
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	83
4.1. CONCLUSÕES.....	83
4.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE A.....	98

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O crescimento econômico e populacional, aliados ao desenvolvimento urbano acelerado percebido em todo o mundo, demandam crescente consumo de bens materiais e de serviços, os quais acarretam em aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), bem como do consumo de energia elétrica (AGBEJULE *et al.*, 2021; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

De acordo com Gutierrez-Gomez *et al.* (2021), cerca de 30% dos RSU gerados em todo mundo ainda são dispostos em “lixões” e/ou locais ambientalmente inadequados, enquanto 40% são destinados para aterros sanitários (SILVA *et al.*, 2020) e os restantes 30% são destinados para compostagem, reciclagem e reutilização (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021).

Na União Europeia, por intermédio de regulamentações próprias e no contexto da implantação da economia circular em substituição àquela linear, tem sido incentivado o aproveitamento energético de resíduos como fonte renovável da matriz energética (MALINAUSKAITE *et al.*, 2017, UNGUREANU *et al.*, 2021). Naquele bloco econômico, tal transição contribui para fomentar a reciclagem e recuperação energética de RSU, fomentando a maximização da utilização de fontes renováveis e a minimização da exploração de recursos fósseis primários (AGATON *et al.*, 2020; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; SANTOS *et al.*, 2019).

Nesse sentido, alguns estudos reportam a adoção de novas políticas para a valorização energética de resíduos sólidos ao mesmo tempo que possibilitam seus desvios de aterros sanitários em países desenvolvidos e em desenvolvimento (ARACIL *et al.*, 2018; DING *et al.*, 2021; MAKARICHI, Luke; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; MUKHERJEE *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2016).

Tais regulamentações intensificam estratégias de reutilização e reciclagem, assim como a utilização de novas tecnologias de destinação de RSU com recuperação energética, aqui chamadas de tecnologias *Waste to Energy* (WTE) (ARACIL *et al.*, 2018; DING *et al.*, 2021; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; LAUSSELET *et al.*, 2016; LU *et al.*, 2017; MAKARICHI, Luke; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; MENIKPURA; SANG-ARUN; BENGTTSSON, 2016; MUKHERJEE *et al.*, 2020; VOSS *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2016).

O Brasil, mesmo em fase embrionária, possui políticas públicas de incentivo à recuperação energética de RSU, tais como o Marco Legal do Saneamento Básico, Lei nº14.026/2020, o Decreto nº10.936/2022, que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a Lei

nº12.305/2010, e o Decreto nº11.043/2022, que aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, todas admitindo a possibilidade de adoção de tecnologias visando à recuperação energética dos RSU.

Em 2019, a Portaria Interministerial nº274 buscou disciplinar as Unidades de Recuperação Energética (URE) dedicadas ao tratamento térmico de RSU com geração de energia elétrica, sendo sucedido pela Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) nº16849 (ABNT, 2020), que estabelece requisitos para o uso de RSU para fins energéticos (RSUE).

No Brasil, as URE podem ser definidas como qualquer unidade de tratamento térmico de RSU com recuperação de energia térmica e/ou elétrica gerada pela combustão, tais como coprocessamento, pirólise, gaseificação e incineração, estando atualizada para as tecnologias de tratamento termoquímico ou conversão termoquímica mais aplicadas em todo mundo, conforme descreve a literatura especializada (BRASIL, 2019; AGBEJULE *et al.*, 2021; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; NANDA; BERRUTI, 2021; RAM; KUMAR; RANI, 2021; SHAH *et al.*, 2021). Desta forma, para a implementação de uma URE, assim como qualquer outro empreendimento com potencial de causar impacto ambiental, torna-se fundamental a avaliação de estudos que comprovem suas viabilidades técnica, financeira e socioambiental.

Entretanto, especificamente em localidades que integram catadores de materiais recicláveis no gerenciamento dos RSU, há também que se atestar quanto à viabilidade social destes empreendimentos, uma vez que estes atores concorrem com o resíduo reciclável em detrimento daquele que tenha potencialidade de recuperação energética (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017).

Neste cenário, estudos de viabilidade aplicados a diversas estratégias de manejo de RSU recorrentemente concluem que as tecnologias WTE podem imprimir menos impacto ambiental e social do que aqueles que envolvem disposição final em aterros sanitários, quando para ambas as tecnologias houver maior intensificação da fiscalização dos equipamentos de controle ambiental (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; LEME *et al.*, 2014; OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017).

Van Caneghem *et al.* (2019) concluem que a valorização ou recuperação energética de RSU pode sempre complementar e ampliar o conceito de cobertura de reciclagem, uma vez que dá destino aos resíduos não-recicláveis diferente da disposição final em aterro sanitário, ampliando assim as possibilidades de geração de emprego e renda, bem como o desenvolvimento da economia local.

Adicionalmente, Malinauskaite *et al.* (2017) descrevem que, para estimular a implantação das

tecnologias WTE na hierarquia de gestão de RSU, além da valorização de outras tecnologias aplicáveis aos RSU como realizado na Europa, é imprescindível a aplicação de políticas públicas concomitantes, como aquelas que sobretaxam o envio de RSU para aterros sanitários. Da mesma maneira, diversos estudos concluíram que a introdução de outros incentivos econômicos como subsídios, desonerações fiscais, aplicação de estratégias tarifárias aos usuários, aplicados ao manejo ou produção de energia por URE, podem superar as barreiras financeiras para implantação de tecnologias WTE em complementação àquelas convencionais (AZIS; KRISTANTO; PURNOMO, 2021; CUDJOE; ACQUAH, 2021; DASTJERDI *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; NANDA; BERRUTI, 2021).

Entretanto, estudos acerca da viabilidade social desses empreendimentos ainda precisam ser explorados, principalmente em localidades que empregam catadores formalizados em Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Recuperáveis (OCMRR) considerando sua inserção e características do manejo de RSU, além da avaliação ambiental, confrontando-os aos ganhos econômicos (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022).

Segundo o que se recomenda nas publicações recentes, é primordial verificar o nível de conscientização dos atores envolvidos na gestão de RSU, com o objetivo de entender a sua percepção sobre os resíduos como uma oportunidade de recurso financeiro, devido à pouca maturidade de alguns atores com a tecnologia (AGBEJULE *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; SHAH *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Isto posto, esta pesquisa trata da avaliação do potencial energético, financeiro e social da ampliação das tecnologias de destinação final de RSUE com tecnologias de tratamento térmico e recuperação de energia elétrica, tais como pirólise, gaseificação e incineração *mass burning*. Cabe ressaltar que nesta pesquisa não será abordado o tema do aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários.

O objetivo geral foi demonstrar a evolução da destinação final de RSU do mundo e Brasil com ênfase nas tecnologias WTE, além de fazer uma avaliação financeira da possibilidade de implantação das Unidades de Recuperação Energética (URE), a partir de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE) no Brasil e o respectivo impacto social sobre a percepção dos *stakeholders*.

Diante disso, além do Capítulo 1 introdutório, o desenvolvimento dessa dissertação foi dividido em dois outros capítulos principais redigidos na forma de artigos.

No Capítulo 2, partindo do princípio que as tecnologias *Waste to Energy* são ambientalmente mais sustentáveis que os aterros sanitários para a destinação de RSU no Brasil, por intermédio

de uma pesquisa exploratória, com base na técnica de leitura e análise de fontes bibliográficas e documentais nacionais e internacionais, foi discutido a evolução dos aspectos normativos com relação ao tema para o mundo e para o Brasil.

Além disso, objetivou-se a análise dos aspectos técnicos para uma comparação do potencial energético da implantação de tecnologias de tratamento térmico, pirólise, gaseificação e incineração, em função da projeção populacional do ano de 2023 para cada região do Brasil.

Por conseguinte, no Capítulo 3, no primeiro item, foi realizada a apropriação dos dados da incineração *mass burning* para a realidade do Brasil. Assim, a partir das faixas populacionais do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), através das metodologias já aplicadas em outros países foi possível dimensionar o *capital expenditure* (CAPEX) e as despesas operacionais e/ou *operational expenditure* (OPEX), bem como as receitas sobre a taxa de destinação aplicada e venda de energia elétrica. Logo, realizou-se uma avaliação financeira para a implantação de unidade de recuperação energética a partir da incineração de resíduos sólidos urbanos não recicláveis no Brasil utilizando os métodos Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) para verificar a contribuição de investimento no fluxo de caixa durante a vida útil do empreendimento.

Ainda no capítulo 3, porém no segundo item, analisou-se o impacto social da possibilidade de implantação de unidade de recuperação energética a partir da incineração de RSUE no Brasil com o auxílio dos dados primários coletados mediante questionários aplicados em Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Recuperáveis (OCMRR), empresas privadas do ramo de gerenciamento de resíduos sólidos urbano (RSU) e Gestores Municipais responsáveis pela gestão dos RSU de sua região, fazendo uma correlação a partir da avaliação financeira nos centros urbanos, onde existe maior atuação das OCMRR.

Por fim, no Capítulo 4, as considerações finais, inicialmente, apresentam conclusões obtidas em torno das discussões dos Capítulos 2 e 3. E posteriormente, sugestões para trabalhos futuros, reunidas em torno das questões que surgiram durante o desenvolvimento do trabalho e que não foram contempladas.

CAPÍTULO 2: POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA SISTEMAS TÉRMICOS NO BRASIL

Resumo

Como estratégia de recuperação energética e economia circular sugerida pela Organização das Nações Unidas em cumprimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em sistemas térmicos passou a figurar como alternativa à disposição final destes amplamente aplicada em países desenvolvidos, porém ainda em estágio embrionário nos países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos. Dessa forma, a partir de ampla revisão bibliográfica e documental da evolução dos aspectos técnicos e normativos do mundo e do Brasil sobre o tema, verificou-se a premência do conhecimento dos aspectos técnicos das WTE para garantir a eficiência nos processos térmicos, e das mudanças nos aspectos normativos como forma de estimular a inserção desta etapa no gerenciamento de RSU no país. Além disso, analisou-se o potencial de geração de energia quando da destinação final de RSU, de modo que a pirólise foi descartada, sendo aplicadas apenas para as tecnologias gaseificação e incineração nas regiões do Brasil a partir da projeção populacional. Concluiu-se que, tanto em nível mundial quanto no Brasil, as tecnologias de tratamento térmico com recuperação energética estão em evolução, sendo que no Brasil, mesmo em estágio embrionário, há também uma evolução nos últimos anos da legislação a favor do tema. Além disso, observou-se que a eficiência de geração de energia a partir da incineração é maior que a gaseificação, como por exemplo na região Sudeste, com potencial de 0,62 e 0,24 MWh.ton⁻¹ de RSU, respectivamente. Contudo, com a implementação das tecnologias WTE, é inegável a mudança da matriz energética, principalmente nas regiões com maior densidade populacional. Além disso, é válido ressaltar o impacto social positivo do valor agregado nos resíduos não recicláveis como incentivo aos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis.

Palavras Chaves: Resíduos Sólidos Urbanos. Recuperação energética. Incineração. Gaseificação. *Waste to energy*. Potencial energético. Sistemas térmicos.

2.1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a distribuição de energia elétrica são uma constante preocupação para os países desenvolvidos e em desenvolvimento (ARACIL *et al.*, 2018; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; JOSEPH, L. P.; PRASAD, 2020), visto que o aumento da geração de RSU e do consumo de energia estão diretamente ligados ao desenvolvimento urbano e econômico (MUKHERJEE *et al.*, 2020; VLACHOKOSTAS; MICHAILEDOU; ACHILLAS, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Estudos reportaram que a geração global de resíduos sólidos urbanos em 2012 foi de 1,3 bilhão de toneladas, com previsão de atingir 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025, descrevendo uma tendência de geração anual de 9,5 bilhões de toneladas até 2050 (ABDALLAH *et al.*, 2018; VYAS *et al.*, 2022).

Assim, é notório atrelar o crescimento econômico de um país à sua dependência por energia, sendo percebido o uso de fontes não renováveis como combustíveis fósseis (VYAS *et al.*, 2022). Dessa forma, torna-se um desafio a adoção de soluções sustentáveis globais integrais para a valorização econômica e energética dos RSU, usufruindo da geração constante e crescente deste tipo de resíduo (GEMAR; SOLER; SÁNCHEZ-TEBA, 2021).

Neste sentido, a partir da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, a Organização das Nações Unidas (ONU) vem sugerindo a implantação de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com foco no bem estar da humanidade e incentivo às cidades sustentáveis (DANISH *et al.*, 2019; KABIR; KHAN, 2020; VLACHOKOSTAS; MICHAILEDOU; ACHILLAS, 2021).

Dentre as sugestões, existem aquelas que estabelecem metas não só para ampliar a disponibilidade de saneamento, principalmente nos países em desenvolvimento, como também para fomentar a valorização econômica e energética de RSU, com soluções que tornem a produção de energia mais acessível, confiável e sustentável (VLACHOKOSTAS; MICHAILEDOU; ACHILLAS, 2021).

Conforme demonstrado em diversos estudos, a hierarquização da gestão de resíduos sólidos, desde as estratégias de não geração, redução, reutilização, reciclagem com recuperação energética e disposição final de rejeitos em aterros sanitários, é comumente empregada em todo mundo como ponto de partida, descrevendo ações desde a regulamentação até a aplicação de técnicas de manejo de resíduos (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017;

MARGALLO, M. *et al.*, 2019; PANEPINTO; ZANETTI, 2018; VYAS *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2016; ARACIL *et al.*, 2018; MUKHERJEE *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Porém, há diferenças significativas nas condições que cada modelo de gestão de resíduos sólidos pode ser aplicado entre países desenvolvidos, em desenvolvimento e subdesenvolvidos (ARACIL *et al.*, 2018).

A Alemanha, a Suécia, os EUA, o Japão e a Dinamarca, por exemplo, possuem maior maturidade dos modelos de gestão e menor disposição final de RSU em aterros sanitários, com maior aplicabilidade de técnicas de gerenciamento de resíduos, tais como a reciclagem, bem como de novas tecnologias de tratamento térmico com recuperação energética (ARACIL *et al.*, 2018; MUKHERJEE *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2021).

Por outro lado, Colômbia, Nigéria, bem como o Brasil, ainda praticam a disposição irregular em “lixões”, e tem como principal destinação final de RSU os aterros sanitários, além de limitações devido aos seus recentes planos nacionais de gestão para integração dos elementos do gerenciamento de seus RSU (ABDALLAH *et al.*, 2018; ARACIL *et al.*, 2018; MUKHERJEE *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022).

Embora a implantação de aterros sanitários seja uma importante etapa em busca da gestão ambientalmente segura de RSU (GALAVOTE *et al.*, 2021), para a implantação dos ODS e do conceito de cidades inteligentes é fundamental estimular ações para a valorização material (reciclagem), bem como a recuperação de energia a partir dos RSU (DANISH *et al.*, 2019; ELHASSAN, 2021; KAYA *et al.*, 2021; KHAN; KABIR, 2020).

Neste contexto, o fato se torna ainda mais importante, principalmente para países como, Nicarágua, Brasil, Egito, Gana, Nigéria, China, Bangladesh, Paquistão, Indonésia, Filipinas, Malásia e Índia (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017; R. SIMAN *et al.*, 2022), os quais, para promover a economia circular, e como forma de incentivo às questões sociais, incorporaram ao sistema de gerenciamento dos RSU os catadores informais ou formalizados em Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Recuperáveis (OCMRR) (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017; R. SIMAN *et al.*, 2022).

É importante ressaltar que, de acordo com DING *et al.* (2021) e LIU *et al.* (2018), com o envolvimento da sociedade para a implantação de uma Unidade de Recuperação Energética (URE) e/ou *Waste to Energy*, com a demonstração das mitigações dos riscos e mediações entre as partes interessadas, a probabilidade de aceitação é maior.

Além disso, a adoção de estratégias operacionais para a priorização da hierarquia no gerenciamento de RSU requer uma decisão justificada na minimização dos riscos ao meio

ambiente e a saúde humana, além da maximização da eficiência financeira para a seleção de tratamento e destinação final de RSU (RIPA *et al.*, 2017).

A definição das melhores estratégias para a escolha de uma URE e/ou *Waste to Energy* (WTE) depende das características dos RSU com relação a composição gravimétrica, volume e padrão de geração perene de cada país (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022; PANEPINTO; ZANETTI, 2018; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021).

Tal fundamento determina a porcentagem de resíduos que podem ser utilizados como combustível para as WTE, calculado junto com a projeção populacional, bem como com a taxa de geração de RSU, sendo possível identificar o potencial de geração de energia elétrica de cada tecnologia por ano (ARACIL *et al.*, 2018; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Perante o exposto, tendo em vista o cenário mundial de transição energética, e diante das metas de aumento da utilização de fontes renováveis na matriz energética estabelecidas pela ONU, este artigo pretende contribuir com uma revisão sistematizada, demonstrando a situação do mundo e do Brasil com relação à destinação final de RSU, com o enfoque na implantação das URE como pirólise, gaseificação e incineração. Além disso, também visou identificar os aspectos normativos utilizados no mundo e no Brasil para o incentivo às tecnologias WTE, bem como dos aspectos técnicos determinantes para a implantação dos sistemas térmicos de destinação final de RSU em todo o mundo. E, por fim, comparar o potencial energético do aproveitamento de energia a partir de destinações de RSU não recicláveis para sistemas térmicos nas macrorregiões do Brasil.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura

Dentre os conceitos e métodos para revisão de literatura, a análise sistemática e integrada são realizadas por meio de busca, seleção e análise de publicações, com o objetivo de síntese através das evidências dos estudos, permitindo a união das informações de uma área temática e a integração apropriada de forma a apresentar a síntese dos resultados rigorosamente ordenados (GRANT; BOOTH, 2009; SOARES *et al.*, 2014).

Destacam-se os autores ESCAMILLA-GARCÍA *et al.* (2020), GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021), LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA (2022), NANDA; BERRUTI (2021), VYAS *et al.* (2022), ARACIL *et al.* (2018), ABDALLAH *et al.* (2018), FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.* (2017), PANEPINTO e ZANETTI (2018) e ZHAO *et al.* (2016) que constituíram a base da análise sistemática da hierarquização das estratégias de manejo de RSU

no mundo e Brasil, incluindo a implementação das tecnologias WTE, pirólise, gaseificação e incineração.

Neste trabalho, também foram sistematizadas informações da evolução de atos normativos internacionais e nacionais que viabilizam as tecnologias WTE (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; MAKARICHI, L.; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2022), bem como aquelas que descrevem relação entre as alternativas de reciclagem e recuperação energética quando se trata de impacto social das partes interessadas que atuam diretamente com manejo de RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022; SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020).

A partir destes trabalhos e de forma a complementá-los, foram utilizados para essa pesquisa os *softwares* Bibliometrix e R-studio (INGALE; PALURI, 2020), desenvolvidos com o objetivo de identificar e selecionar periódicos de maneira facilitada e assertiva (INGALE; PALURI, 2020), conforme realizado por DASTJERDI *et al.* (2021) e LIU *et al.* (2018).

O Erro! Fonte de referência não encontrada. apresenta o detalhamento metodológico dos tópicos abordados nesta etapa.

Quadro 1 – Detalhamento metodológico dos tópicos abordados na Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura

TÓPICOS ABORDADOS	OBJETIVO	FERRAMENTAS	BASE DE DADOS	LAPSO TEMPORAL	TERMOS DE BUSCA
Inclusão dos tratamentos térmicos com recuperação energética na hierarquia do manejo de RSU no Mundo e no Brasil	Descrever a hierarquia do manejo de RSU com foco na implementação dos sistemas de tratamento térmico no mundo e no Brasil	Pesquisa bibliográfica com bibliometrix	SCOPUS e Web of Science	2016 a 2022	“waste to energy”, “economic analysis”, “waste incineration”, “waste to energy technologies”, “financial feasibility”, “energetic configuration”, “gasification”, “incineration”, “mass-burning”, “potential energy”, “energy recovery”, “economic viability”, “urban solid waste”, “municipal solid waste”, “circular economy”, “legislation”, “international standards”, “normative”, “international norms”.
Aspectos técnicos: a implantação de sistemas térmicos como possibilidade de destinação final de RSU	Identificar e analisar os aspectos técnicos relacionados à implementação dos sistemas térmicos para a destinação final de RSUE no Brasil				
Aspectos normativos: uso de RSU para recuperação energética	Identificar e analisar os aspectos normativos relacionados a implantação e inserção de sistemas térmicos na hierarquia de gestão de RSUE no Brasil	Pesquisa documental (normas técnicas e regulamentares e bancos de dados governamentais)	Leis e normas.	Não se aplica	“Regulamentações”, “tratamento térmico de resíduos”, “recuperação energética”

Fonte: Autoria própria.

Legenda: RSU - Resíduos sólidos urbanos; RSUE - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos.

2.2.2. Etapa 2 – Análise do potencial energético do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos não recicláveis para sistemas térmicos no Brasil

A compreensão do potencial energético dos RSU é um fator essencial na concepção de projetos de recuperação energética por pirólise, gaseificação e incineração (ARACIL *et al.*, 2018; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022). Dessa forma, para o cálculo desta premissa foram utilizadas projeções populacionais do ano de 2023, conforme apresentado no Quadro 2, bem como a taxa de geração *per capita* diária de RSU e a composição gravimétrica de cada macrorregião, podendo assim estimar a geração de RSUE para cada macrorregião brasileira (ARACIL *et al.*, 2018; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Quadro 2 - Projeção populacional das macrorregiões do Brasil para o ano de 2023.

Região	Ano (2023)
Norte	19.440.252 hab.
Nordeste	58.330.017 hab.
Centro Oeste	17.178.538 hab.
Sudeste	91.036.737 hab.
Sul	30.881.476 hab.
Brasil	216.867.021 hab.

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023).

A taxa de geração *per capita* diária de RSU foi adquirida através de informações e dados dos indicadores do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para manejo de RSU (BRASIL, 2021), conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Taxa de geração *per capita* diária de RSU das macrorregiões do Brasil.

Variável	Unidade	Norte	Nordeste	Centro oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Taxa de RSU coletado (RDO + RPU) Pop. Urbana	kgRSU.hab. ⁻¹ .dia ⁻¹	1,050	1,230	0,960	0,960	0,870	1,010

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2021).

Legenda: RSU - Resíduos sólidos urbanos. RDO – Resíduos sólidos domiciliares. RPU – Resíduos sólidos públicos.

A partir destes dados foi possível obter a geração anual de RSU por meio da Equação 1 para gaseificação e da Equação 2 para incineração (RODRIGUES *et al.*, 2022). É válido dizer que, para os gaseificadores, os resíduos devem estar secos (RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$Ru = P(t) \times I(g) \times 365 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Rs = P(t) \times I(g) \times 365 \times Cm \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

Ru = fluxo de massa de resíduos úmidos gerado em kg.ano⁻¹;

P(t) = população a cada ano;

I(g) = taxa de geração de resíduos em kgRSU.hab.⁻¹.dia⁻¹;

Rs = fluxo de massa de resíduos secos gerado em kg.ano⁻¹;

Cm = constante em relação à perda de massa dos resíduos úmidos.

O fluxo de massa de cada tipo de resíduo para cada macrorregião foi calculada de acordo com a Equação 3 (RODRIGUES *et al.*, 2022), segundo sua composição gravimétrica, conforme GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, (2021), e em função das frações combustíveis e não combustíveis apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Composição gravimétrica de RSU das macrorregiões do Brasil.

Fração combustível						
Tipos de Resíduos	Norte	Nordeste	Centro oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Fração orgânica	54,68	57,00	54,02	52,00	57,27	51,40
Papel e papelão	10,87	3,70	7,48	15,39	11,62	13,10
Plásticos	14,67	3,86	16,73	21,15	11,23	13,50
Fração Não combustível						
Metal	1,09	1,74	3,64	1,66	1,46	2,90
Vidro	0,83	1,01	1,87	3,50	2,56	2,40
Outros	17,86	32,69	16,26	6,30	15,86	16,70

Fonte: Adaptado de GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021).

$$Rr(t) = \frac{Fr \times R(t)}{100} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$Rr(t)$ = fluxo de massa de resíduos de cada tipo de resíduo em $\text{kg}\cdot\text{ano}^{-1}$;

$R(t)$ = fluxo de massa de resíduos gerados por cada região $\text{kg}\cdot\text{ano}^{-1}$;

Fr = fração de cada tipo de resíduo na composição gravimétrica.

Conhecido o fluxo de massa de resíduos para cada tecnologia é necessário estimar o poder calorífico disponível para cada macrorregião brasileira. Para a incineração é necessário utilizar as frações de RSU típicas de combustíveis, tais como plástico, papel e papelão, além da fração orgânica, ao passo que a umidade pode retardar a eficiência de combustão (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; VYAS *et al.*, 2022). Dessa forma, conforme os autores RODRIGUES *et al.* (2022), para o dimensionamento dos cálculos da incineração são utilizados o poder calorífico inferior na base úmida, denominado de PCI_{bw}.

No caso da gaseificação, a desuniformidade granulométrica e a umidade são fatores que podem influenciar na qualidade dos resíduos quando utilizado como combustível, sendo necessários serem submetidos a briquetagem (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; PORSHNOV, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022).

A formação de briquetes consiste em um processo de compactação em que são submetidos a altas temperaturas, onde a umidade evapora, e contribui para aumentar o poder calorífico inferior e ser utilizado na base seca (PCI_{bs}) (RODRIGUES *et al.*, 2022). O Quadro 5 mostra os valores dos poderes

caloríficos inferiores na base úmida (PCIbw) e na base seca de cada tipo de resíduo, que foram utilizados para os cálculos da incineração e da gaseificação, respectivamente.

Quadro 5 - Menor poder calorífico de cada tipo de resíduo combustível: poder calorífico inferior de base úmida (PCIbw) e poder calorífico inferior de base seca (PCIbs).

Tipos de Resíduos	Poder calorífico de base úmida (kJ.kg ⁻¹)	Poder calorífico de base seca (kJ.kg ⁻¹)
Fração orgânica + Não recicláveis	2.979	17.991
Papel e papelão	11.418	15.899
Plásticos	34.279	43.095

Fonte: Adaptado de RODRIGUES *et al.* (2022).

A partir das Equações 4 e 5 foi possível determinar o Poder Calorífico total dos RSUE (RODRIGUES *et al.*, 2022). Foi considerado no presente estudo os resíduos cuja fração da composição gravimétrica são considerados materiais combustíveis, conforme demonstrado no Quadro 5.

$$PCI_f = \frac{Fr \times PCI_i}{100} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$PCI_t = \sum_{i=1}^n PCI_f \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde

PCI_f = Poder calorífico por fração de RSU em kJ.kg⁻¹;

PCI_i = Poder calorífico por tipo de resíduo em kJ.kg⁻¹;

PCI_t = Poder calorífico total dos resíduos em kJ.kg⁻¹;

Fr = fração de cada tipo de resíduo na composição gravimétrica.

Assim, a partir do PCI_t, a potência disponível em cada ano da tecnologia em estudo foi determinada por meio da Equação 6 (RODRIGUES *et al.*, 2022). Para os cálculos foram adotados o gaseificador fluidizado circulante, cuja eficiência de conversão térmica (γ) foi fixada em 28%, e o incinerador de combustão em grelhas móveis com eficiência de conversão térmica fixada em 30% (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$Pot = \sum_{i=1}^n \frac{Rr \times PCI_t \times \gamma}{3600 \times \Delta t} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

Pot = potência disponível devido ao aproveitamento energético dos resíduos em kW

PCI_t = Poder calorífico total dos resíduos em kJ.kg⁻¹;

Rr(t) = fluxo de massa de resíduos de cada tipo de resíduo em kg.ano⁻¹;

γ = eficiência dos equipamentos de conversão térmica;

n = números de tipos de resíduos;

Δt = número de horas anuais;

3.600 = conversão de horas para segundos.

Por fim, a Equação 7 representa a energia que pode ser produzida por cada tecnologia estudada (RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$E = \frac{Pot \times \Delta t \times FC}{1000} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

E = energia gerada pelo equipamento em MWh.ano⁻¹;

Δt = número de horas anuais;

FC = fator de capacidade de produção, adotado em 80% para ambas as tecnologias, conforme RODRIGUES *et al.* (2022).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Etapa 1 - Revisão sistemática e integrada da literatura

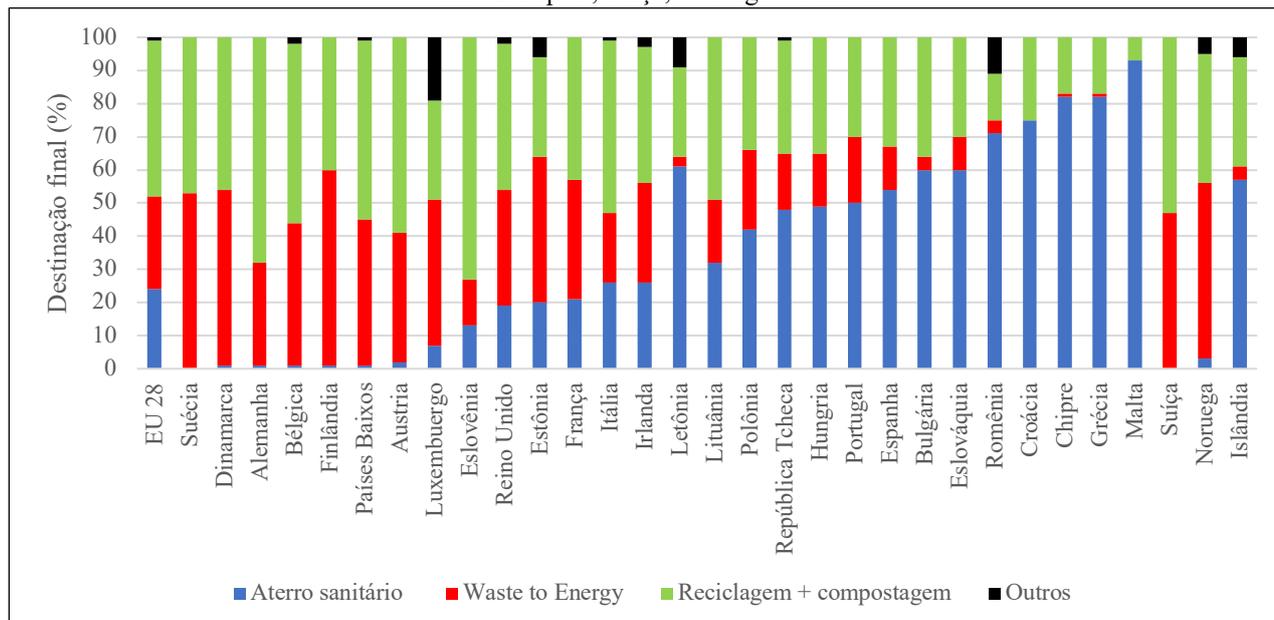
2.3.1.1 Inclusão dos tratamentos térmicos com recuperação energética na hierarquia do manejo de RSU no Mundo e no Brasil

No cenário mundial, as alternativas de destinação final de RSU para tratamento térmico com recuperação energética, principalmente para os países em desenvolvimento, quando comparados a realidade dos países desenvolvidos, ainda estão em estágio inicial (FOSTER *et al.*, 2021; MARGALLO, M. *et al.*, 2019).

Na Europa, Estados Unidos e China, por exemplo, há uma busca constante por novas alternativas de gerenciamento visando a valorização de RSU, bem como da utilização de tecnologias WTE para a comercialização de energia térmica e elétrica (ABDALLAH; HAMDAN; SHABIB, 2021; NANDA; BERRUTI, 2021; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Em linha com o conceito de WTE, observa-se na Figura 1 o impulsionamento da hierarquização do tratamento de resíduos priorizando a reciclagem, e outros tipos de valorização, incluindo a energética, com a disposição final em aterros sanitários apenas dos rejeitos nos países da União Europeia, Suíça, Noruega e Islândia (WANG *et al.*, 2020).

Figura 1 - Distribuição percentual dos tipos de tratamento e destinação final de resíduos sólidos urbanos adotados na União Europeia, Suíça, Noruega e Islândia.



Fonte: Adaptado de TISI (2019).

Em destaque na Figura 1, tem-se países como Alemanha, Bélgica, Dinamarca e Suíça que praticamente não utilizam aterros sanitários como destino final de RSU, tendo ainda como exemplo a Suécia, Espanha e Noruega, que impuseram taxas mais altas para aterramento em comparação às tecnologias WTE, promovendo a recuperação de energia em vez da disposição final em aterros sanitários, conforme orienta a União Européia (CARDOSO, 2019; KUMAR; SAMADDER, 2017; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

Nos EUA, apenas 13% dos RSU são utilizados para recuperação de energia e 53% ainda é depositado em aterros sanitários (MUKHERJEE *et al.*, 2020). Além disso, nos EUA, há a pretensão de aumentar a geração de energia renovável para 25% até 2025, e uma das formas é o incentivo para ampliação das instalações de WTE através da queima direta de RSU (*mass burning*) e Combustível Derivado de Resíduos (CDR), como forma de reduzir a dependência de combustíveis fósseis (MUKHERJEE *et al.*, 2020).

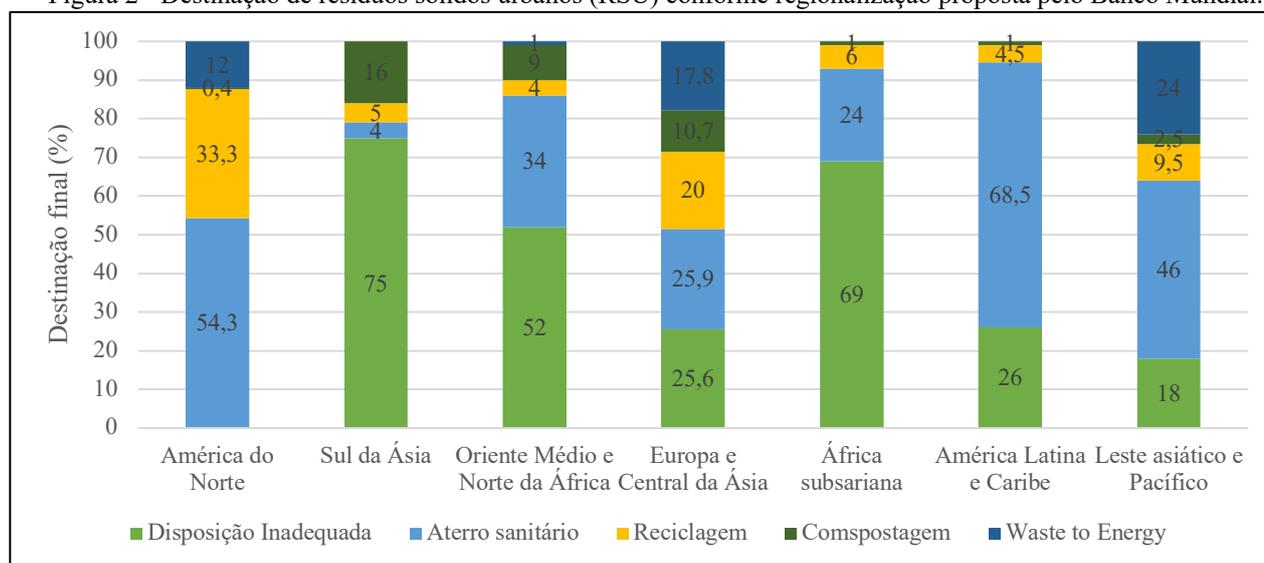
A China é a responsável pela geração de mais de 10% dos RSU do mundo, de modo que, em 2018, 52% dos seus resíduos foram encaminhados para aterros sanitários, enquanto 45% seguiu para o tratamento térmico (DING *et al.*, 2021). Vale ressaltar que, em 2015, a taxa de reciclagem da China estava em 15,6% quando se estabeleceu metas de 35% até 2021, incentivando as cidades a implementarem novas regulamentações de classificação de resíduos (DING *et al.*, 2021).

Dessa forma, pode ser observado na Figura 1 que, com o incentivo a novas alternativas e tecnologias, tal como a maturidade de destinação final de RSU dos países desenvolvidos, é possível perceber a redução considerável da disposição em aterros sanitários, além da ampliação da destinação final para as tecnologias com recuperação de energia do tipo WTE, e consequente intensificação dos desvios de

matéria prima para reciclagem e compostagem (DING *et al.*, 2021; FOSTER *et al.*, 2021; KHAN *et al.*, 2022; RAM; KUMAR; RANI, 2021).

Entretanto, conforme dados e divisão das regiões propostas pelo Banco Mundial dispostos na Figura 2 (KAZA *et al.*, 2018), é possível afirmar que os países da América do Norte, estes com economias de renda anual alta, com uma taxa de urbanização de 82% e gerando 2,21 kgRSU.hab.⁻¹.dia⁻¹, erradicaram os “lixões” com a utilização de aterros sanitários e com implantação das tecnologias WTE (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; MUKHERJEE *et al.*, 2020). Assim como, os países desenvolvidos da Europa (FOSTER *et al.*, 2021).

Figura 2 - Destinação de resíduos sólidos urbanos (RSU) conforme regionalização proposta pelo Banco Mundial.



Fonte: Adaptados de KAZA *et al.* (2018).

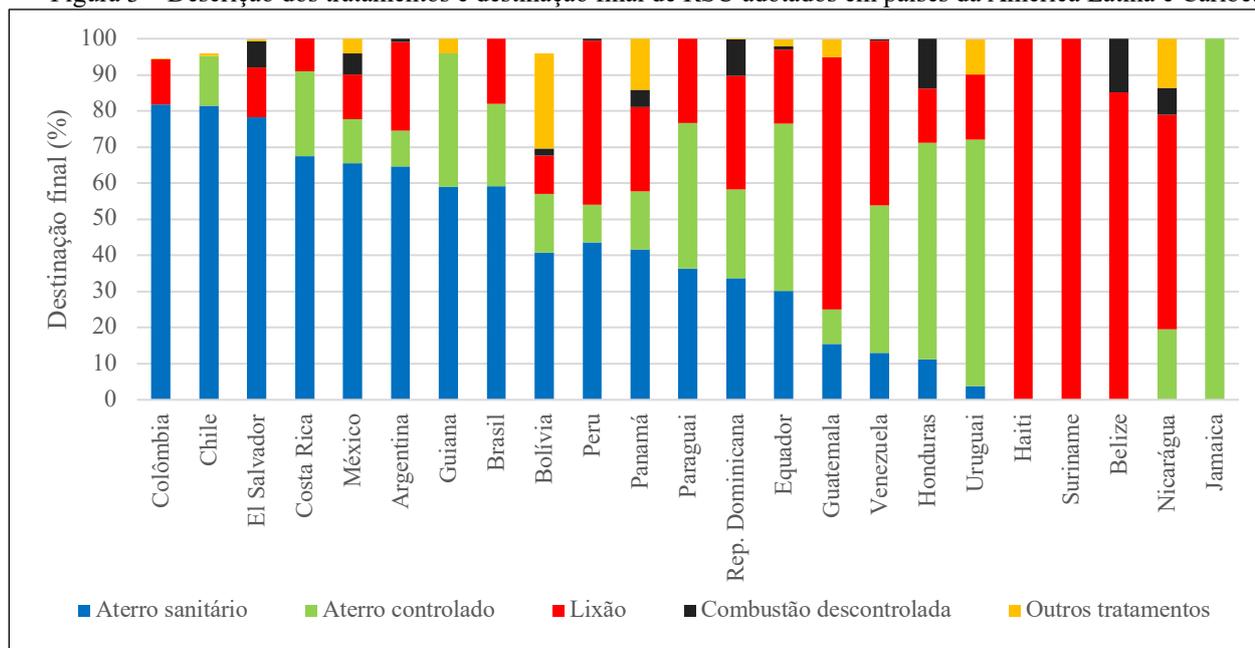
Ainda sob a análise da Figura 2, é possível perceber que nos países do Sul da Ásia, da África e do Oriente Médio, com taxa de urbanização de 38% e gerando 0,46 kgRSU.hab.⁻¹.dia⁻¹, é predominante a disposição final irregular de RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; KAZA *et al.*, 2018).

Essa preeminência ocorre nos países com economias de renda anual baixa e média baixa, e que não possuem incentivo ao desenvolvimento e/ou maturidade quando o assunto é disposição final de RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; KAZA *et al.*, 2018).

Ademais, conforme observado na Figura 2, nos países da América Latina e do Caribe, ocorre a disposição final em locais inapropriados (aterros controlados e “lixões”), porém a predominância é em aterros sanitários (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MARGALLO, M. *et al.*, 2019; TISI, 2019).

Em complementação, na Figura 3, está apresentado em mais detalhes os países da América Latina e do Caribe.

Figura 3 – Descrição dos tratamentos e destinação final de RSU adotados em países da América Latina e Caribe.



Fonte: TISI (2019), MARGALLO *et al.* (2019). OBS: Não foram encontradas informações para Cuba, Barbados e Tridade e Tobago.

A Figura 3 confirma que em países com economias de renda anual baixa e média baixa, tais como Haiti, Belize e Guatemala, a disposição final de RSU ocorre em locais inapropriados e quase sem nenhuma destinação para processos térmicos (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MARGALLO, M. *et al.*, 2019; TISI, 2019; KAZA *et al.*, 2018).

E os países com economias de renda anual média alta possuem disposição final irregular, porém com aterros sanitários sendo a alternativa adequada mais utilizada, e sem experiência com tecnologias WTE para destinação de RSU, tal como acontece no Brasil (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MARGALLO, M. *et al.*, 2019; TISI, 2019; KAZA *et al.*, 2018).

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento do Brasil (SNIS) (BRASIL, 2021), a estimativa de geração de resíduos é variável em função das faixas populacionais, cobertura de coleta e disposição final com aterros sanitários providos de balanças. Desta forma, é importante destacar que 90,5% da população total é atendida com cobertura de coleta direta e indireta de resíduos domiciliares, ao passo que, em relação à população urbana, esta eficiência de cobertura é de 98,7% (BRASIL, 2021).

Segundo FERRAZ DE CAMPOS *et al.* (2021) e o MDR (2022), na gestão de RSU no Brasil, a disposição final ambientalmente adequada é predominantemente realizada por empresas contratadas (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022). Com relação a coleta seletiva de materiais recicláveis, segundo o MDR (2022), foi identificado que 36,3% dos municípios do Brasil fazem coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares, mas não abrange toda a área urbana (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021).

Em 2020, a quantidade de resíduo reciclável coletado foi de 1,9 milhão ton.ano⁻¹, sendo coletado 47,5% por empresas contratadas pelas prefeituras, 35,2% por catadores com apoio das prefeituras e 16,6% por prefeituras (BRASIL, 2021).

Em resumo, a visão geral da coleta à disposição final de RSU no Brasil é que, a partir da geração de RSU de 1,01 kg.hab.⁻¹ dia⁻¹, com estimativa de 66,64 milhões ton.ano⁻¹, 1,07 milhões ton.ano⁻¹ de resíduos recicláveis secos e 0,27 milhões ton.ano⁻¹ de resíduos recicláveis orgânicos são recuperados, ao passo que, 65,3 milhões ton.ano⁻¹ são destinados para disposição final em solo, onde, 73,27 % ou 48,17 milhões ton.ano⁻¹ são destinados para aterros sanitários, e, 26,23% ou 17,13 milhões ton.ano⁻¹ são destinados para a disposição final em locais inadequados (aterro controlado e “lixão”) (BRASIL, 2021).

Diante deste cenário, o Quadro 6 apresenta uma comparação das opções de tratamento e destinação final de RSU em relação aos aspectos sociais, ambientais, econômicos e técnicos, e o potencial de recuperação energética no Brasil.

Quadro 6 - Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais das opções de tratamento e destinação final de RSU e respectivos potenciais de recuperação energética no Brasil.

Tipos de tratamento e destinação final	Aspectos técnicos	Aspectos econômicos	Aspectos ambientais	Aspectos sociais	Potencial de recuperação de energia
“Lixão”	Inadequado	Custo baixo de operação e manutenção	Poluição ambiental	Incentivo ao trabalho insalubre de catadores, proliferação de doenças	Incineração após a <i>urban mining</i> ¹
Aterro controlado	Inadequado	Custo baixo de operação e manutenção	Poluição ambiental	Proliferação de doenças, condições de trabalho escassas e insalubres	Incineração após a <i>urban mining</i> ¹
Aterro Sanitário	Tecnologia de disposição controlada de resíduos no solo	Demanda enormes áreas para disposição de RSU, baixo custo investimento, não incentivo da economia circular	Monitoramento ambiental durante a decomposição de RSU ²	Poluição visual, desvalorização das áreas vizinhas, condições de trabalho com controle ao risco de acidente e insalubridade do trabalhador	Aproveitamento do Biogás
Reciclagem	Apenas para resíduos recicláveis após segregação	Baixo custo de operação e manutenção, incentivo de economia circular	Reaproveitamento e reciclagem de resíduos	Incentivo a profissionalização dos catadores, condições de trabalho com controle ao risco de acidente e insalubridade do trabalhador, mudança de cultura da sociedade	Incineração dos resíduos não recicláveis e/ou rejeito
Compostagem	Apenas para resíduos orgânicos após segregação	Baixo custo de operação e manutenção, incentivo de economia circular	Evita a emissão de gases de efeitos estufa	Incentivo a profissionalização dos catadores, condições de trabalho com controle ao risco de acidente e insalubridade do trabalhador, mudança de cultura da sociedade	-

<i>Waste to Energy</i>	Tecnologia de tratamento térmico de RSU ² com recuperação energética	Alto custo de operação e manutenção, incentivo à economia circular	Redução de emissão de gases de efeito estufa, redução do volume de resíduos. Insegurança da população pela fiscalização da poluição atmosférica.	Valorização comercial do rejeito e do RSUE ³ , além do incentivo a profissionalização das OCMRR ⁴ , condições de trabalho com controle ao risco de acidente e insalubridade do trabalhador	Conversão térmica a partir da combustão direta de RSUE ³
------------------------	---	--	--	--	---

Fonte: MARGALLO *et al.* (2019); IYAMU, ANDA, HO (2020); JOSEPH, PRASAD (2020); KUMAR; SAMADDER (2017); MAKARICHI, JUTIDAMRONGPHAN, TECHATO (2018); MALINAUSKAITE *et al.*, (2017); MUKHERJEE *et al.*, (2020); OGUNJUYIGBE, AYODELE, ALAO (2017); SANTOS *et al.* (2019); SILVA *et al.* (2020); TAYEH, ALSAYED, SALEH (2021); TISI, (2019); WANG *et al.* (2021); SCARLAT *et al.* (2019); ESCAMILLA-GARCÍA *et al.* (2020); PANEPINTO, ZANETTI (2018).

Legenda: ¹ A mineração de locais de disposição final de RSU, é um processo de escavação com classificação e triagem de rejeitos combinando os conceitos de recuperação dessas áreas, recuperação de recursos e prevenção da poluição (WANG *et al.*, 2021). ² RSU – Resíduos sólidos urbanos. ³ RSUE - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos. ⁴ OCMRR - Organizações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

Conforme demonstrado nas Figuras 2 e 3, e complementado pelo Quadro 6, os “lixões” e aterros controlados são atividades inadequadas que resultam em impactos no meio ambiente (como produção de gases de efeito estufa e outros contaminantes atmosféricos, bem como contaminações do solo, das águas superficiais e subterrâneas) e na saúde humana (VYAS *et al.*, 2022). Para estes destinos, atenção especial deve ser dada à saúde dos trabalhadores informais que coletam resíduos neste locais (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020; MARCHESIN *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022).

Por outro lado, embora se tenha um material de menor qualidade para a reciclagem, sempre existe a possibilidade de extrair alguns materiais inadequadamente depositados nesses vazadouros de resíduos através da mineração urbana e aproveitar seu potencial energético para geração de energia (WANG *et al.*, 2021).

Porém, há que se prever riscos com relação a este tipo de prática, visto que a heterogeneidade e a decomposição avançada do material depositado poderão acarretar em emissões atmosféricas de diversos gases compostos de enxofre, nitrogênio, compostos aromáticos, oxigenados e terpenóides (WANG *et al.*, 2021).

De acordo com o Quadro 6, embora a reciclagem e a compostagem possibilitem menores custos de operação e manutenção em comparação com aquele gasto na disposição em aterros sanitários ou outras destinações como a recuperação energética (MARGALLO, M. *et al.*, 2019), há necessidade de antever o incremento de custo na implementação das estratégias de segregação na fonte, bem como aqueles para implantação de coleta seletiva no sistema de manejo de RSU (SALA-GARRIDO *et al.*, 2022).

Mesmo com tanto esforço para valorizar a reciclagem ou recuperação energética, esse caminho não parece óbvio ou primário do ponto de vista do gerador. ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR (2021) relataram que, embora em Madrid/Espanha tenha fomentado a separação na fonte com

incentivos financeiros para os usuários, investido em campanhas contínuas de conscientização para a entrega do resíduo seletivamente, bem como investido em um eficiente sistema de coleta seletiva, a cidade não registrou resultados significativos de desvio de resíduos de aterros sanitários.

Ainda sobre o Quadro 6, podemos citar que os aterros sanitários, quando comparadas às tecnologias WTE, são economicamente mais viáveis, principalmente para os países da América Latina, onde não se percebe sustentabilidade financeira para o manejo de resíduos, não só para a disposição final de RSU em aterros sanitários, como para implantação de novas tecnologias de destinação final, tais como de recuperação energética, apesar de haver estrutura de arrecadação de taxas ou tarifas não praticada por diversos municípios, no caso do Brasil (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; TISI, 2019).

Esse subsídio financeiro foi verificado em alguns países desenvolvidos, tais como Alemanha, Suécia, Suíça, Reino Unido e China (FOSTER *et al.*, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; MARGALLO, M. *et al.*, 2019; PANEPINTO; ZANETTI, 2018), além de ter sido descrito como requisito para viabilidade financeira dessas tecnologias nos EUA (MUKHERJEE *et al.*, 2020), nas Filipinas (AGATON *et al.*, 2020), Brasil (COLVERO *et al.*, 2020) e Colômbia (GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021).

De todas as formas, percebe-se na cobrança, seja na forma de arrecadação como taxa/tarifa ou outro subsídio econômico, condição fundamental para intensificar a diversificação de alternativas de destinação final de RSU, como através das tecnologias WTE (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; TISI, 2019).

É válido dizer que também há a possibilidade de aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários (ABDALLAH; HAMDAN; SHABIB, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; SALA-GARRIDO *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022), embora a forma de comercialização do biogás gerado, bem como o processo de geração de energia ou calor interfere fortemente na viabilidade financeira desse tipo de estratégia (DE LARA FILHO; UNSIHUAY-VILA; DA SILVA, 2019; MAKARICHI, Luke; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018; REBELATTO *et al.*, 2019).

Agregado a este fato, a geração de biogás está diretamente ligada à suscetibilidade da degradação biológica da fração orgânica do RSU, de modo que a viabilidade do processo também depende dos aspectos construtivos e da operação do aterro sanitário, de modo a evitar as perdas superficiais e no sistema de coleta do biogás (GALAVOTE *et al.*, 2021, AGHDAM *et al.*, 2018; DOS SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018). As perdas dentro do processo e na coleta do biogás podem chegar a 35% do previsto, sendo considerado um sistema de baixo aproveitamento do biogás gerado (GALAVOTE *et al.*, 2021, AGHDAM *et al.*, 2018; DOS SANTOS; BARROS; TIAGO FILHO, 2018).

Dessa forma, embora mais baratos, os aterros sanitários são tecnologias com maior potencial poluidor, maior taxa de emissão de gases do efeito estufa, bem como de menor potencial de geração de energia quando comparado as tecnologias WTE (ABDALLAH; HAMDAN; SHABIB, 2021; ALAMU *et al.*, 2021; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; TISI, 2019).

Entretanto, as tecnologias WTE também possuem algumas desvantagens, principalmente para países em desenvolvimento, como a carência de incentivos financeiros para sua viabilidade econômica, desconhecimento técnico pelas partes interessadas, tais como da sociedade civil e das autoridades públicas, elevados custos de manutenção e operação, além da falta de regulamentações a favor da diversificação de destinação final de RSU com tratamento térmico e recuperação de energia (CHAVANDO *et al.*, 2022; DING *et al.*, 2021; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; KUMAR; SAMADDER, 2017; MURI; HJELME, 2022; NANDA; BERRUTI, 2021; RASHEED *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; SALA-GARRIDO *et al.*, 2022).

Apesar disso, são preferíveis em comparação ao aterro sanitário, pois sua aplicação pode desenvolver qualificação no setor, bem como para os trabalhadores formais e informais, resultando em suas melhores condições de renda, saúde e segurança (BOLOY *et al.*, 2021; CHAVANDO *et al.*, 2022; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MARCHESIN *et al.*, 2022; MURI; HJELME, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; SALA-GARRIDO *et al.*, 2022).

É importante ressaltar que, no Brasil, está previsto desde 2020, com a nova estratégia para erradicar os “lixões” até 2024, mesmo com a possibilidade deste prazo não ser cumprido (MDR, 2022), o país pode ensaiar a discussão de novas referências tecnológicas e modelos de gestão para seus resíduos (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021). Embora ainda não tenha nenhuma unidade instalada do tipo WTE para RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021), em 2021 foi habilitada a primeira URE em Barueri/SP pelo Ministério de Minas e Energia (MME), por meio do Leilão de Energia Nova A-5 realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para início de suprimento energético previsto para janeiro de 2026 (ABREN, 2021).

Como pode ser percebido, no Brasil, o sistema WTE está em estágio inicial de implantação, embora existam diversos estudos demonstrando que para viabilizar financeiramente essas tecnologias há a necessidade de incluir mais segurança social e jurídica, incentivos econômicos, tanto de subsídios como de retirar créditos, tais como a sobretaxação da disposição final em aterros sanitários e a venda de energia para o mercado brasileiro de energia elétrica, bem como boas condições de financiamento (DALMO, F. C. *et al.*, 2019; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; LIMA; PAULA, 2021; SANTOS, R. E. Dos *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

Com relação ao desprovimento de conhecimento das tecnologias WTE pelas empresas privadas, prefeituras e catadores de materiais recicláveis, que atuam direta e indiretamente na gestão de RSU no Brasil, acabam não entendendo os benefícios que elas podem proporcionar e influenciar positivamente na economia circular e com maior inclusão social (CHAVANDO *et al.*, 2022; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; SANTOS, R. E. *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019; TISI, 2019; VYAS *et al.*, 2022). Por isso a necessidade de ampliar a discussão não só dos aspectos técnicos e normativos que influenciam no potencial econômico, bem como aqueles sociais do aproveitamento energético a partir de destinações finais de RSU não recicláveis para sistemas térmicos no Brasil.

2.3.1.2. Aspectos normativos: uso de RSU para recuperação energética

A definição de “resíduos”, mediante atos normativos é essencial para fundamentar a seleção de alternativas e tecnologias adequadas em prol de uma gestão de resíduos assertiva (ELHASSAN, 2021; KAYA *et al.*, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; MARCHESIN *et al.*, 2022).

De acordo com MALINAUSKAITE *et al.* (2017), a Comissão Europeia foi criticada pela falta de clareza quando apresentou na Diretiva - Quadro de Resíduos (DQR) uma definição ampla e subjetiva para “resíduos”, “resíduos municipais”, “subproduto” e “rejeito”. Por isso, após revisões e atualizações da DQR, estabeleceu-se novas concepções para definir “subproduto” e “rejeito”, restringindo o escopo de “resíduos” (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; VYAS *et al.*, 2022).

Juntamente com a Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos resíduos, tornou-se possível a reclassificação dos resíduos quando são submetidos às operações com valorização, incluindo a reciclagem e recuperação energética (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; MARCHESIN *et al.*, 2022). Em outras palavras, a definição pode variar dependendo da tecnologia de tratamento e/ou disposição final que a região possuir (MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

No Brasil, os resíduos sólidos (RS) são definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”
(BRASIL, 2010a, p. 2).

Já os resíduos sólidos urbanos (RSU) são definidos como:

“resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas, como varrição, limpeza de logradouros e de vias públicas, e outros serviços de limpeza

urbana, de estabelecimentos comerciais e de prestadores de serviços” (BRASIL, 2010a, p. 4).

E rejeitos são definidos como:

“resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010a, p. 4).

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010, estabeleceu que a destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, além da disposição final ambientalmente adequada, que é a distribuição ordenada em aterros sanitários dos resíduos sólidos que não possuem outra alternativa de tratamento ou recuperação, estes, definidos como rejeitos (TISI, 2019).

O mesmo conceito é aplicado em outros países, como os da União Europeia, conforme a Diretiva 2008/98/CE, Estados Unidos e China (FERREIRA; BALESTIERI, 2018; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; MUKHERJEE *et al.*, 2020; TISI, 2019).

No entanto, nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, em consequência da ausência de tecnologias próximas à geração ou falta de aplicabilidade das legislações, a fração residual dos RSU não comercializáveis como reciclados é destinada para a disposição final em aterro sanitário, como rejeito, sem esgotar as possibilidades de recuperação energética ou tratamento (ALAM; QIAO, 2020; IYAMU, H.O.; ANDA; HO, 2020; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; TISI, 2019). Ao passo que, em países desenvolvidos, tais como EUA, China e na Europa essa mesma fração residual é utilizada como matéria-prima em plantas de tecnologias *Waste to Energy* (WTE) (ARACIL *et al.*, 2018; HE; LIN, 2019; MUKHERJEE *et al.*, 2020).

Isto demonstra o quanto é providencial uma definição e classificação clara, para que as autoridades convertam os princípios legislativos para incentivar e subsidiar novas alternativas de tratamento de RSU no sentido da economia circular (CHU *et al.*, 2019; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017). Por isso, a necessidade da disseminação da ideia dos resíduos não recicláveis como matéria-prima para a unidades de recuperação de energia (CHU *et al.*, 2019; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

As primeiras publicações de atos legislativos com relação a gestão de RSU com incentivo a economia circular e enfoque na recuperação de energia a partir de resíduos sólidos não recicláveis foi feita pela União Europeia (CHU *et al.*, 2019; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017). A comissão própria em matéria de resíduos no Parlamento Europeu estabeleceu metas de prevenção, reutilização e reciclagem, como para a erradicação de locais com disposição inadequadas de resíduos aos seus Países-Membros (DALMO, F. C. *et al.*, 2019; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2022; TISI, 2019).

Com base no estabelecido pelo Parlamento e fundamentado nas experiências individuais, cada País-Membro elaborou seus planos, programas e demais atos normativos de gerenciamento de resíduos estipulando objetivos e metas compatíveis e exequíveis com cada realidade (MALINAUSKAITE *et al.*, 2017). Também foi apresentada sugestão de imposição de taxas para intensificar o desvio de RSU de aterros sanitários, bem como incentivar a economia circular e recuperação energética a partir de resíduos não recicláveis (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; SARQUAH *et al.*, 2022).

Com isso, os Países-Membros tiveram uma evolução considerável no desenvolvimento das novas alternativas de gerenciamento de resíduos nos últimos anos (FOSTER *et al.*, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; SARQUAH *et al.*, 2022). Em praticamente todos os Países-Membros, houve uma redução drástica na disposição final de RSU em aterros sanitários e aumento das taxas de reciclagem (BERTANZA *et al.*, 2021; ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017).

Além do avanço das tecnologias WTE nas etapas de tratamento e destinação final, com a instalação em países que ainda não as possuíam, tais como a Estônia, Letônia e Eslovênia, houve ampliação das taxas de resíduos tratados com tecnologias WTE nos países com elas já implementadas, como por exemplo Polônia, Noruega, Espanha, Itália e no Reino Unido (BERTANZA *et al.*, 2021; BISINELLA *et al.*, 2022; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; GEMAR; SOLER; SÁNCHEZ-TEBA, 2021; ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR, 2021; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2020).

Dessa forma, no que tange o conceito de desenvolvimento econômico circular, pode-se concluir, que ainda há um potencial das tecnologias WTE a ser explorada na Europa (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; SARQUAH *et al.*, 2022).

Isso, se deve aos fatores políticos e a natureza descentralizada da gestão de resíduos com governança multinível (CHAVANDO *et al.*, 2022; MALINAUSKAITE *et al.*, 2017; SARQUAH *et al.*, 2022).

Seguindo os passos da Europa, a China estabeleceu diversas medidas políticas para o desenvolvimento da tecnologia WTE (HE; LIN, 2019; ZHAO *et al.*, 2016).

ZHAO *et al.* (2016) e He; Lin (2019), após uma revisão das políticas públicas na China sobre a destinação final de resíduos, constaram que as tecnologias WTE são economicamente viáveis com a implementação de atos normativos de desoneração fiscal para os três primeiros anos de implantação das plantas, bem como redução em 50% nos três anos seguintes, além de oferecimento de subsídios para a destinação de resíduos.

Ainda que existam casos de sucessos de países desenvolvidos com relação aos benefícios trazidos pelas modificações das políticas públicas em favor da recuperação energética a partir de RSU, os países em desenvolvimento ainda estão em fase de transição, como é o caso do Brasil (DALMO,

FRANCISCO CÉSAR *et al.*, 2019; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; SANTOS, R. E. Dos *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

A regulamentação da gestão de RSU do Brasil vem sofrendo modificação e alterações a partir da implementação da PNRS, instituída pela Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (CARDOZO; MANNARINO; FERREIRA, 2021). No Quadro 7 pode-se perceber a evolução da legislação do Brasil, principalmente no que diz respeito ao tratamento térmico de RSU com recuperação energética.

Quadro 7 - Evolução da legislação do Brasil, com ênfase ao tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos (RSU) com recuperação energética.

Atos administrativos e legislativos	Ano	Objetivo	Descrição
Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS ¹)	2010	Instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS ¹).	Determina a hierarquização de resíduos por meio da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Incentiva o desenvolvimento e melhoria dos processos produtivos do reaproveitamento dos resíduos sólidos, com tecnologias de recuperação o aproveitamento energético tecnicamente e ambientalmente viáveis.
Portaria nº 65 de 27 de fevereiro	2018	Estabelecer novos Valores Anuais de Referência Específicos (VRES ²), para os Sistemas de Geração de Energia Distribuída.	Estabelece valor de venda de energia distribuída a partir da geração de energia tendo como fonte Resíduos Sólidos Urbanos – RSU ³ , no valor de R\$ 561,00/MWh (quinhentos e sessenta e um reais).
Portaria Interministerial nº 274 de 30 de abril	2019	Disciplinar a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos	Define Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (URE ⁴) como qualquer unidade dedicada ao tratamento térmico de RSU ³ com recuperação de energia térmica gerada pela combustão, com vistas à redução de volume e periculosidade, preferencialmente associada à geração de energia térmica ou elétrica. Além de constituir a URE ⁴ como forma de destinação final ambientalmente correta observando a Lei Federal nº 12.305/2010.
Decreto nº 10.117 de 19 de novembro	2019	Dispor sobre a qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de RSU ³ no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI ⁵) da Presidência da República	Qualifica os projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de RSU ³ no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República (PPI ⁵) para realização de parcerias com a iniciativa privada.
Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho - Novo Marco Legal do Saneamento Básico	2020	Atualizar o marco legal do saneamento básico para aprimorar as condições estruturais do tema no País.	Institui que os serviços públicos de saneamento básico terão a sustentabilidade econômico-financeira assegurada por meio de remuneração pela cobrança dos serviços, como subsídios ou subvenções, nos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, na forma de taxas, tarifas e outros preços públicos, conforme o regime de prestação do serviço ou das suas atividades.
Portaria Normativa nº 10 de 30 de abril	2021	Estabelecer diretrizes para a realização do Leilão de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração	Institui que os empreendimentos de geração que utilizem como combustível principal os resíduos sólidos urbanos nos termos da Portaria Interministerial nº 274/2019, dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e do Desenvolvimento Regional, serão enquadrados como empreendimentos de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.
Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro	2022	Regulamentar a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS ¹ .	Regulamenta que na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos, serão incentivados o desenvolvimento científico e tecnológico, a inovação e o empreendedorismo, de forma a desenvolver a cadeia de valor dos resíduos sólidos, tais como a recuperação energética dos RSU ³
Decreto nº 11.043 de 13 de abril	2022	Aprovar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES ⁶).	Define diretrizes e metas para o aumento do aproveitamento energético de resíduos sólidos, tais como os mapeamentos das limitações e entraves de ordem técnica, econômica, tributária, jurídica e legal para expansão da recuperação energética de RSU ³ no território nacional e articular soluções junto aos estados, consórcios, municípios e setor privado.

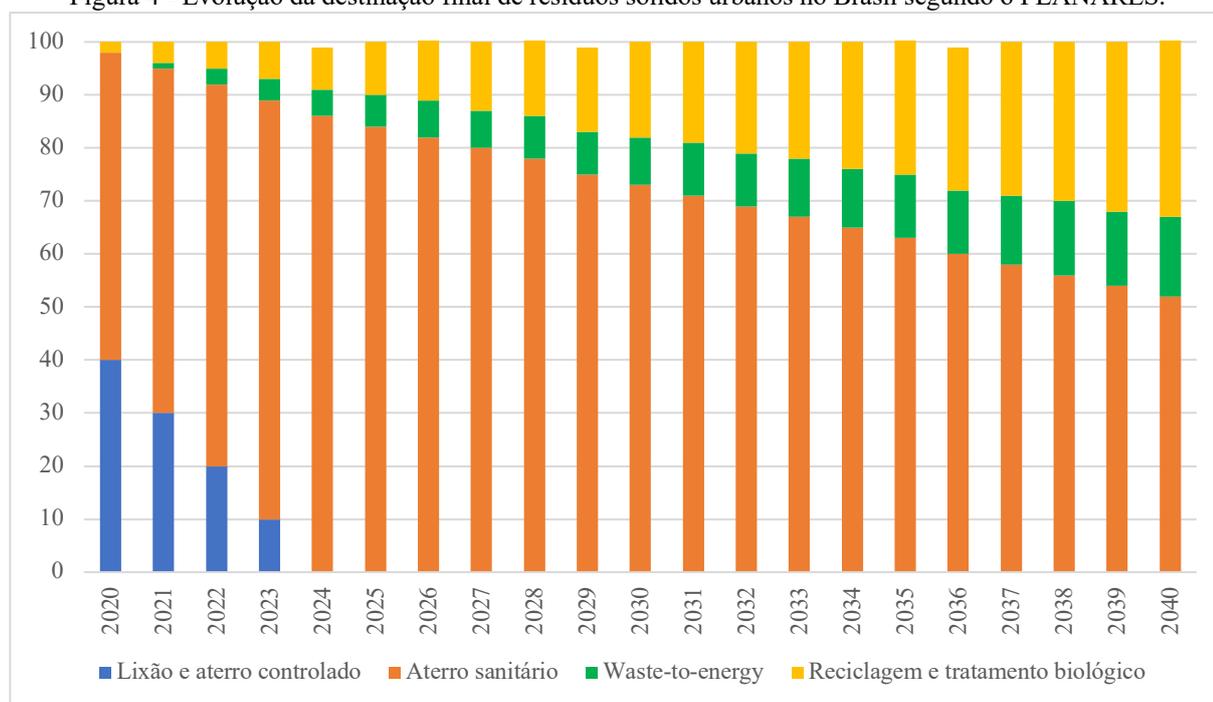
Edital de chamamento público conjunto entre CAIXA ⁷ e BNDES ⁸ N° 01/2022	2022	Estabelecer critérios para seleção de propostas de estados, distrito federal e arranjos regionais legalmente constituídos para estruturação de projetos de concessões no setor de saneamento básico, modalidade manejo de RSU ³ de origem domiciliar – serviços divisíveis.	Tem por objeto selecionar propostas dos Estados, Distrito Federal e arranjos regionais legalmente constituídos, doravante designados de ENTES PÚBLICOS, a fim de atuar na estruturação e no desenvolvimento de projetos de concessões para serviço público de saneamento básico, na modalidade de manejo de RSU ³ de origem domiciliar – serviços divisíveis.
Resolução Normativa ANEEL ⁹ N° 1.047, de 8 de novembro de 2022	2022	Possibilitar a cobrança de taxas ou tarifas decorrentes da prestação de serviço de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos na fatura de energia elétrica.	Institui que a distribuidora pode arrecadar taxa ou tarifa do serviço de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos por meio da fatura de energia elétrica.

FONTE: BRASIL (2010a), MME (2018), BRASIL (2019a), BRASIL (2019b), BRASIL (2020), BRASIL (2021), BRASIL (2022^a), BRASIL (2022b), CAIXA (2022), ANEEL (2022).

Legenda: ¹ PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos. ² VRES - Valores anuais de referência específicos. ³ RSU – Resíduos sólidos urbanos. ⁴ Unidade de Recuperação Energética. ⁵ PPI - Programa de Parcerias de Investimentos. ⁶ PLANARES - Plano Nacional de Resíduos Sólidos. ⁷ CAIXA – Caixa Econômica Federal. ⁸ Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. ⁹ ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

A Figura 4 apresenta a evolução da destinação final de RSU segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que define como uma das metas a expansão da recuperação energética e a inserção na matriz energética do Brasil da energia gerada a partir de RSU, bem como a erradicação de “lixões” e aterros controlados e a evolução da reciclagem e do tratamento biológico (BRASIL, 2022a).

Figura 4 - Evolução da destinação final de resíduos sólidos urbanos no Brasil segundo o PLANARES.



Fonte: BRASIL, 2022a.

Alinhada às metas do PLANARES (Figura 4), como incentivo à recuperação energética, o Ministério de Minas e Energia (MME), mediante a Portaria Normativa nº 10 de 30 de abril de 2021, estabeleceu diretrizes para a realização de Leilão de Compra de Energia Elétrica para os empreendimentos de geração que utilizem como combustível principal os RSU, com período de suprimento entre 1º de janeiro de 2026 e 31 de dezembro de 2045 (MME, 2021), além da possibilidade de cobrança de taxa ou tarifas dos serviços e manejo de resíduos sólidos urbanos mediante fatura de energia elétrica (ANEEL, 2022).

Com estes atos administrativos foi possível viabilizar, por modalidade de disponibilidade de energia elétrica, a primeira Unidade de Recuperação Energética de Resíduos (URE) no Brasil. Trata-se da URE Barueri, contratada no Leilão A-5 do MME, cujas obras iniciaram no 1º semestre de 2022, com capacidade de gerar 20MW de potência instalada e tratar 870 ton/dia de RSU (ABREN, 2021).

Além disso, o Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro de 2022 prevê que será disciplinada, de forma específica, em ato conjunto dos Ministros de Estado do Meio Ambiente, de Minas e Energia e do Desenvolvimento Regional, a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (Brasil, 2022b).

Portanto, as tecnologias de tratamento térmico de RSU com recuperação energética começaram a ser avaliadas no Brasil, principalmente em municípios de médio e grande porte e por meio de arranjos regionais legalmente constituídos (CARDOZO; MANNARINO; FERREIRA, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022).

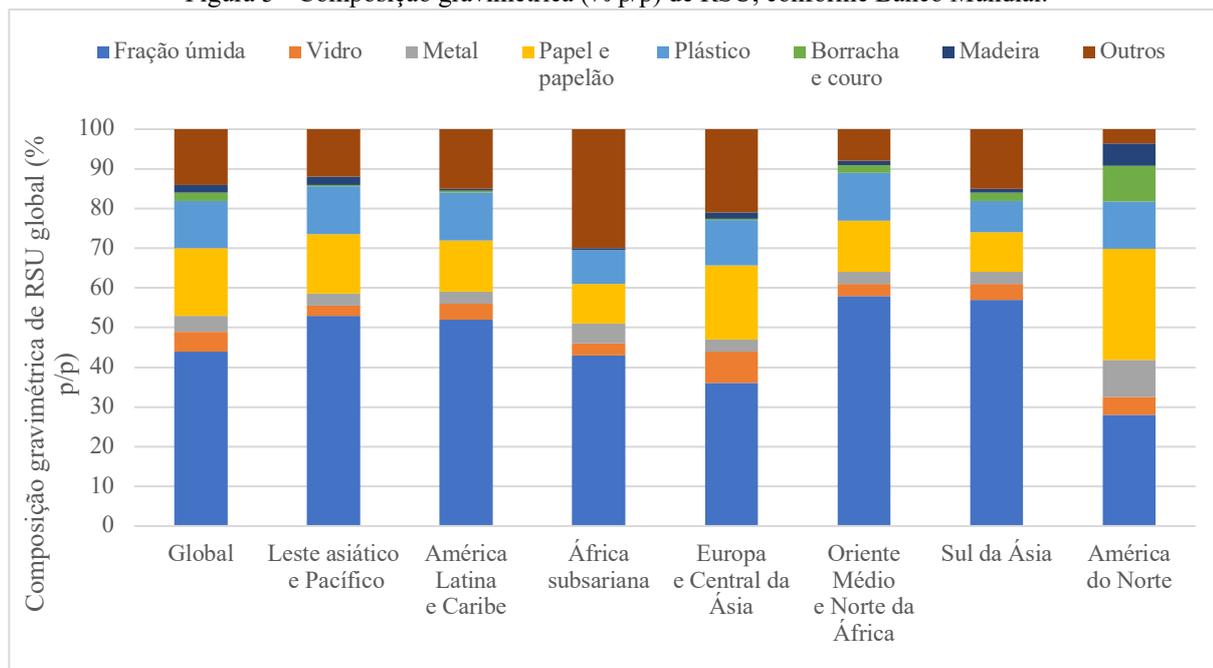
Em alguns estados brasileiros, as URE já se encontram em processo de licenciamento ambiental (CARDOZO; MANNARINO; FERREIRA, 2021). Porém, ainda há a necessidade de definição legal específica, apoio do Governo, bem como de aprofundar os conhecimentos sobre as tecnologias WTE (CARDOZO; MANNARINO; FERREIRA, 2021; DALMO, F. C. *et al.*, 2019; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021), para que assim, sejam viabilizadas economicamente e utilizadas de forma segura nos sistemas de gestão de RSU do Brasil (CARDOZO; MANNARINO; FERREIRA, 2021; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021).

2.3.1.3. Aspectos técnicos: a implantação de sistemas térmicos como possibilidade de destinação final de RSU

Para viabilizar a implantação das plantas WTE é primordial conhecer fatores técnicos, tais como a geração e a composição gravimétrica dos resíduos. Estes, quando são originários daqueles municipais, sempre se dão em função da população, cultura, renda, padrão de consumo, além do clima e sazonalidade de uma determinada região, de modo que sua composição interfere diretamente na determinação do potencial energético do RSU, e conseqüentemente na escolha da tecnologia WTE mais eficaz (AYODELE; OGUNJUYIGBE; ALAO, 2017; BOLOY *et al.*, 2021; DALMO, F. C. *et al.*, 2019; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; NANDA; BERRUTI, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022; KAZA *et al.*, 2018).

A Figura 5 apresenta a composição gravimétrica de RSU descrita pelo Banco Mundial.

Figura 5 - Composição gravimétrica (% p/p) de RSU, conforme Banco Mundial.



Fonte: KAZA *et al.* (2018).

É possível perceber na Figura 5 que, conforme a classificação das economias do Banco Mundial, os países com alta renda possuem uma porcentagem menor para a geração de resíduos úmidos e maior para resíduos secos (papel, papelão e plásticos), como é o caso dos países da Europa e América do Norte (KAZA *et al.*, 2018).

Por exemplo, a porcentagem de resíduos secos, com exceção de metais, na composição de RSU nos Estados Unidos representam 62% (CHICKERING; KRAUSE; TOWNSEND, 2018), 59% na Romênia (GHINEA *et al.*, 2016) e 60% na Inglaterra (WANG *et al.*, 2020).

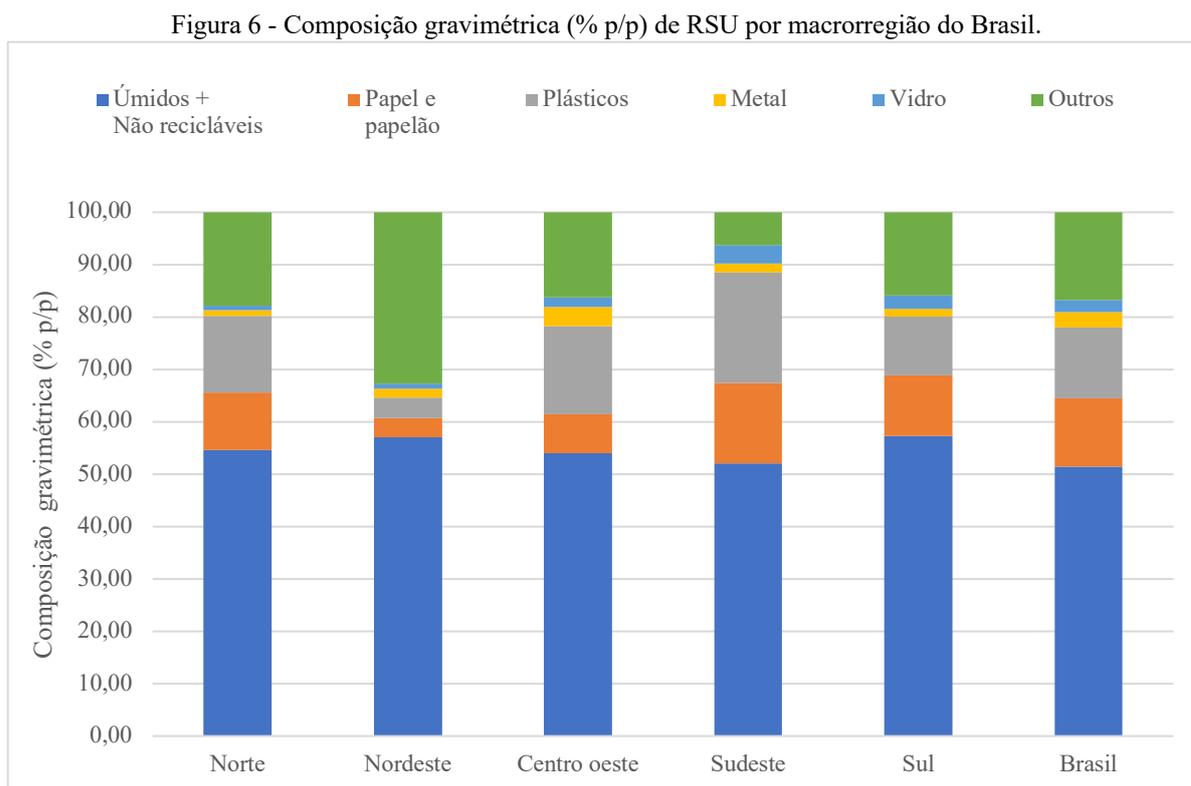
O Banco Mundial define como resíduos úmidos os RSU coletados que são o somatório da porção dos resíduos não recicláveis com a fração orgânica (KAZA *et al.*, 2018). Nos países com baixa e média renda, como os da região do Oriente Médio e Norte da África, América Latina, Caribe e Ásia, a porcentagem de fração úmida se apresenta acima de 50% (KAZA *et al.*, 2018).

De modo geral, alguns estudos mostram que, nos países em desenvolvimento essa mesma fração pode chegar a 52,4% no México (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020); 63% em Gana, 68-81% em Bangladesh (ALAM e QIAO, 2020), 50-65% no Peru (ZIEGLER-RODRIGUEZ *et al.*, 2019), 56% no Paquistão (AZAM *et al.*, 2020).

Apesar disso, a China, com composição gravimétrica de fração úmida em 52,6%, é o país em desenvolvimento que mais aumentou sua capacidade de tratamento térmico com a implantação de plantas WTE (DING *et al.*, 2021; KHAN *et al.*, 2022). Porém, de acordo com DING *et al.*

(2021), tendo em vista o teor de umidade nos RSU da China, há a necessidade de pré-tratamento para melhorar a taxa de conversão para energia. A umidade causa instabilidade na combustão e flutuações de poluentes nos processos de tratamento térmico com recuperação energética (LU *et al.*, 2017).

No Brasil, essa composição de úmidos e não recicláveis misturados se apresenta com 51,4% (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021). A Figura 6, apresenta a composição gravimétrica por macrorregião do país.



Fonte: Adaptado de GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021).

Ou seja, os fatores críticos, tais como composição, volume, teor de umidade, poder calorífico e densidade dos RSU, bem como as condições termodinâmicas e químicas em que as plantas WTE operam, são imprescindíveis para conhecer a eficiência de rendimento energético a depender do local e região para a implantação dessas novas alternativas de destinação de RSU (KUMAR; SAMADDER, 2017; UNGUREANU *et al.*, 2021; MUKHERJEE *et al.*, 2020).

O poder calorífico dos RSU sofre influência de perda de calor proporcionalmente à quantidade de água, vidro, metal e materiais não combustíveis e inorgânicos na massa de resíduos (THEMELIS *et al.*, 2016).

Dessa forma, com a separação da fração úmida e dos materiais não combustíveis de RSU, bem como de qualquer papel, plástico ou material que possa economicamente ser reciclado, o RSU

restante ou “RSU não recicláveis”, com pouco ou nenhum teor de umidade, tem demonstrado ser o fluxo de resíduos mais adequado para conversão térmica em plantas WTE (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022; MUKHERJEE *et al.*, 2020).

Nesse sentido, a Norma Técnica Brasileira ABNT NBR 16849/2020 estabeleceu os requisitos para eleger os RSU como matéria-prima, além do preparo para se tornarem resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), seguindo a hierarquização do gerenciamento de resíduos sólidos e classificando-os quanto ao poder calorífico inferior na base seca (PCI), sendo determinado o seu poder de combustão quando seco, bem como o teor de cloro e de mercúrio, conforme Quadro 8.

Quadro 8 – Limites de classificação de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE).

Parâmetros	Classes		
	P1	P2	P3
PCI (base seca) (kcal.kg ⁻¹)	PCI ≥ 4.750	4.750 > PCI ≥ 3.580	3.580 > PCI ≥ 2.390
Teor de cloro (%)	C1	C2	C3
	CI ≤ 0,5	0,5 < CI ≤ 1,5	1,5 < CI ≤ 3,0
Teor de mercúrio (kcal.kg ⁻¹)	H1	H2	H3
	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16849/2020.

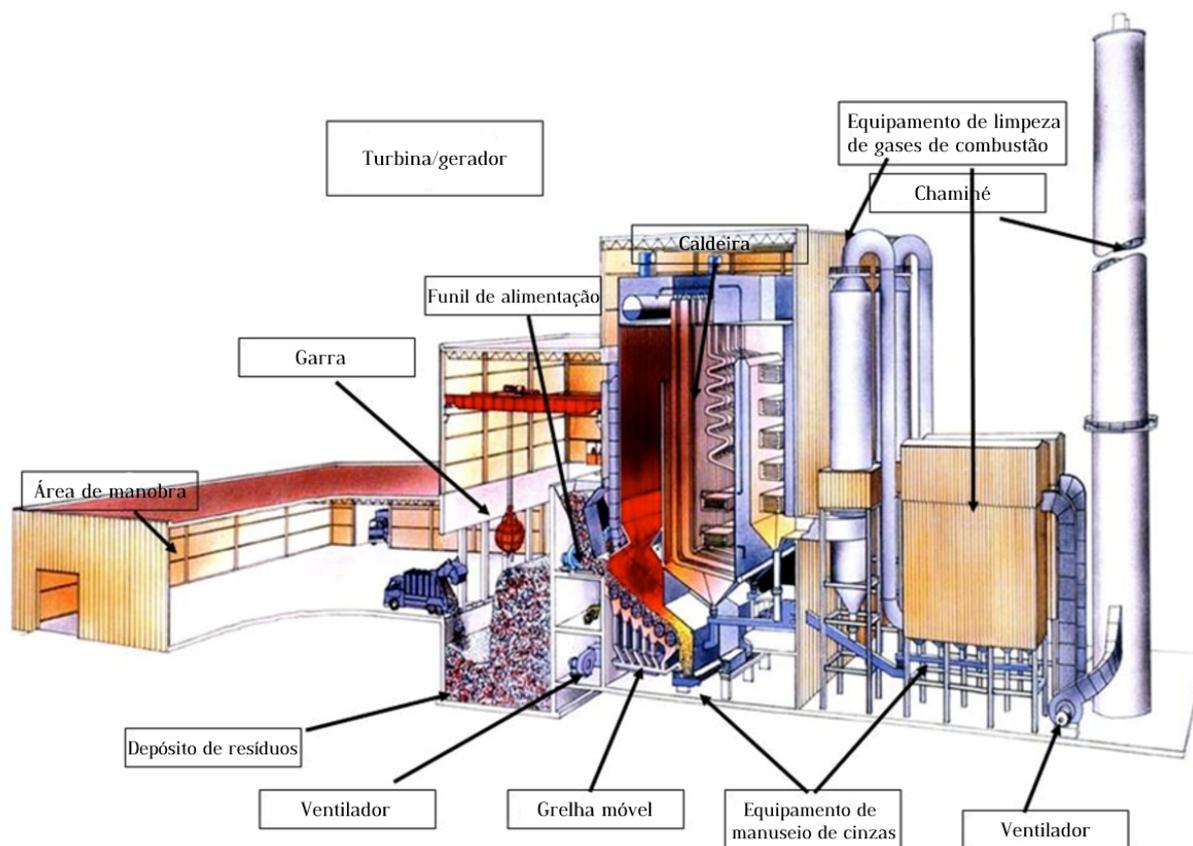
Legenda: PCI - Poder Calorífico Inferior.

Após a classificação dos RSUE (vide Quadro 8), e condicionada à comprovação de viabilidade técnica, ambiental e econômico-financeira, são determinados os sistemas de aproveitamento energético de uma determinada macrorregião.

As tecnologias WTE mais utilizadas como tratamento e conversão térmica de RSUE com aproveitamento energético são incineração, gaseificação e pirólise, no qual, através da geração de calor é possível a produção de energia térmica e elétrica (AGATON *et al.*, 2020; ALAM; QIAO, 2020; KUMAR; SAMADDER, 2017; OUDA *et al.*, 2017).

No processo de incineração ou combustão em grelha, ilustrado pela Figura 7, e também conhecido como *mass burninig*, os RSUE são descartados e armazenados em um depósito de resíduos com capacidade para manter a constante alimentação da caldeira (THEMELIS *et al.*, 2016; TISI, 2019). Uma ponte rolante com uma garra coleta e alimenta uma calha com os resíduos, que são empurrados para a grelha móvel pelo sistema de alimentação (THEMELIS *et al.*, 2016).

Figura 7 – Processo de incineração ou *mass burning* de RSU com recuperação energética.



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

Pode ser observado na Figura 7, o movimento lento da grelha move o leito de RSUE através da câmara de combustão (OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017). Assim, a oxidação a alta temperatura (a partir de 850°C) na câmara reduz os materiais à cinzas, que são descartados na ponta final de grelha (NANDA; BERRUTI, 2021).

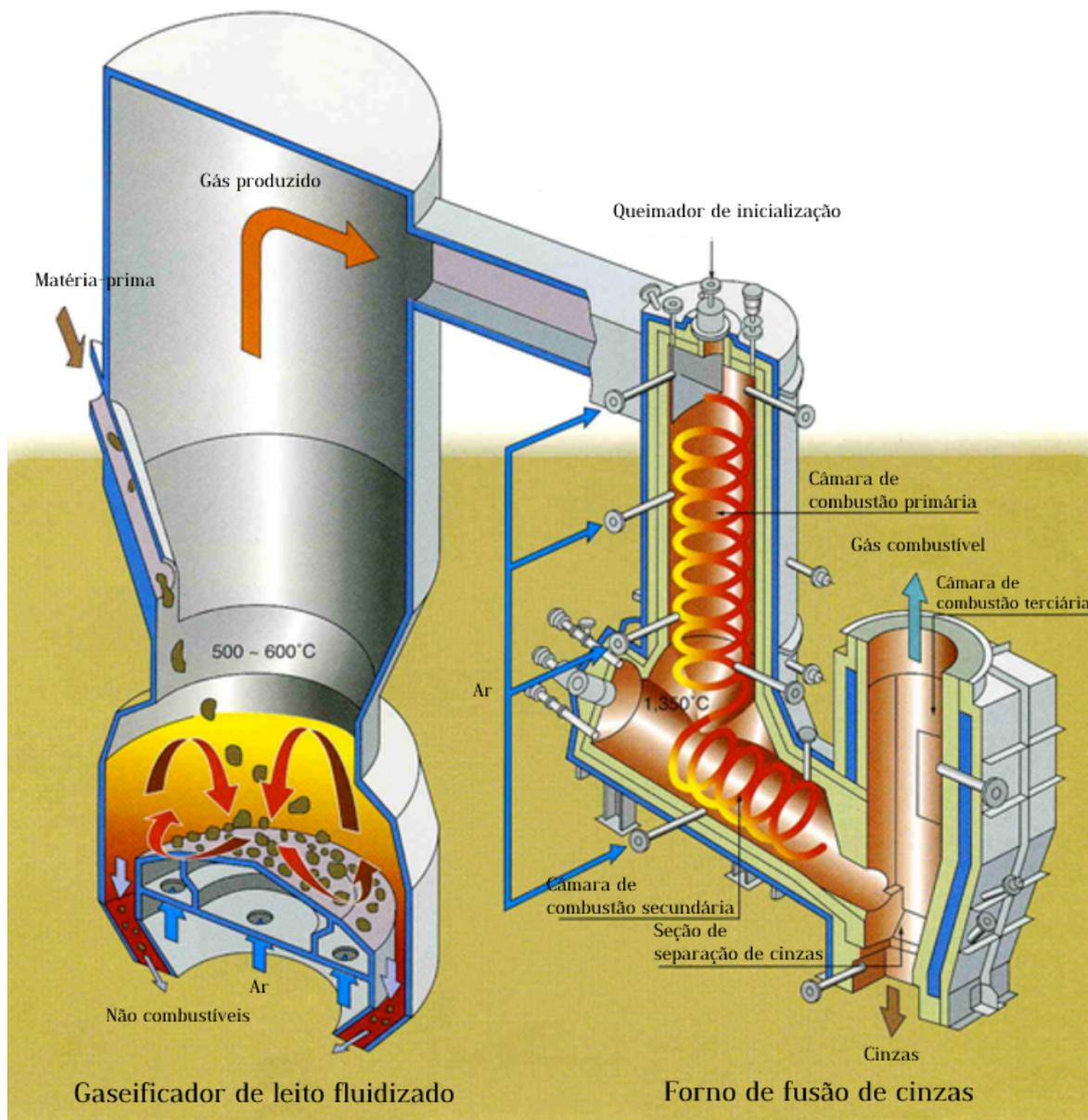
O calor dos gases de combustão podem ser transferidos por meio da parede de tubos de água de caldeira para o vapor de alta pressão, que aciona os cogeneradores de eletricidade (JOSEPH, L. P.; PRASAD, 2020; MUKHERJEE *et al.*, 2020).

Na incineração são selecionados e utilizados como combustível os resíduos sólidos não recicláveis, incentivando a economia circular (FOSTER *et al.*, 2021), e os resíduos com baixo teor de umidade para que seja obtido um PCI ótimo (entre 8 e 14 MJ/kg), tornando um processo térmico com alto potencial de geração de calor e eletricidade para abastecer residências e indústrias (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; MURI; HJELME, 2022; NANDA; BERRUTI, 2021).

As altas temperaturas da incineração, combinadas com a combustão por oxidação completa com apoio da presença de oxigênio, faz com que o volume dos RSUE seja reduzido em 90%,

transformando-os em cinzas e materiais não combustíveis (KHAN; KABIR, 2020; MUKHERJEE *et al.*, 2020; RASHEED *et al.*, 2021). Além disso, ocorre a degradação térmica de riscos biológicos ou detritos de organismos mortos nos RSUE (MUKHERJEE *et al.*, 2020). Já o processo de gaseificação, ilustrado na Figura 8, é a combinação da oxidação parcial e da volatilização dos compostos orgânicos contidos devido ao fornecimento controlado de oxigênio (DONG *et al.*, 2018; PORSHNOV, 2022).

Figura 8 - Processo de gaseificação de RSU com recuperação energética.



Fonte: Adaptado de THEMELIS *et al.* (2016).

Conforme observado na Figura 8, o processo inicia com um tratamento prévio de triagem, secagem, trituração e magnetismo para a redução da proporção de metais advindos do RSUE,

bem como o tamanho e teor de umidade (MUKHERJEE *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022; SUN *et al.*, 2021; TISI, 2019; WANG *et al.*, 2021).

É válido ressaltar a necessidade de utilização de resíduos mais homogêneos (como por exemplo, aparas de madeira, resíduos de pneu, papel, papelão e plásticos) e secos para a eficiência do processo (MUKHERJEE *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

No reator, acontece a combustão ou oxidação parcial do conteúdo carbonáceo dos RSUE, convertendo em produtos gasosos, denominados gás de síntese ou *Syngas* (MUNIR *et al.*, 2021; PORSHNOV, 2022; SHAH *et al.*, 2021). Mesmo que as reações redutivas dentro do gaseificador evitem a formação de dioxinas e furanos (MUKHERJEE *et al.*, 2020), pela natureza heterogênea dos RSUE, que possui impurezas, em uma faixa de temperatura de operação de 850-900°C há produção de alcatrão e hidrocarbonetos pesados, que são contaminantes para o *syngas* (MUNIR *et al.*, 2021).

Assim, esses gases voláteis gerados na câmara de gaseificação são tratados em um sistema de lavagem a seco, e queimados completamente em uma caldeira anexa, para a geração de energia elétrica em uma usina a vapor, como ocorre no processo de incineração (KUMAR; SAMADDER, 2017; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021). As frações de resíduos não combustíveis descem para o fundo do forno, enquanto os resíduos fundidos são descarregados e separados magneticamente em escória e metais (DONG *et al.*, 2019).

Dessa forma, para a gaseificação é necessário estimar o poder calorífico superior em base seca (PCS) (RODRIGUES *et al.*, 2022), sendo fundamental a secagem dos RSUE e homogeneização granulométrica (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Por fim, o tratamento térmico por meio da pirólise necessita de fonte externa de energia em seu processo (TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021), e não é por combustão direta dos RSUE, conforme descrito para a incineração e gaseificação (THEMELIS *et al.*, 2016).

A pirólise não utiliza oxigênio em sua degradação térmica (KUMAR; SAMADDER, 2017; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021). É obrigatório um pré-tratamento para separar os metais, vidros e materiais inertes não combustíveis (MUKHERJEE *et al.*, 2020; RAM; KUMAR; RANI, 2021). Em seguida, os RSUE são inseridos no pirolisador ou forno rotativo (DONG *et al.*, 2019; RAM; KUMAR; RANI, 2021), que são aquecidos com calor externo, onde o processo de degradação térmica da matéria orgânica inicia em uma temperatura de 300°C, com o consumo de oxigênio inicialmente presente (MUKHERJEE *et al.*, 2020; RAM; KUMAR; RANI, 2021).

Com a temperatura aumentada, e próxima aos 500-550°C, são gerados os primeiros produtos da pirólise, que são a cera, alcatrão e óleo de pirólise (MUKHERJEE *et al.*, 2020; PORSHNOV,

2022; RASHEED *et al.*, 2021). Quando o processo atinge temperaturas acima de 700°C e se mantém em 800°C em tempo médio de uma hora é gerado o gás de síntese ou *syngas*, composto por metano, hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono (DONG *et al.*, 2019; RAM; KUMAR; RANI, 2021; RASHEED *et al.*, 2021).

O óleo de pirólise e o *syngas* são utilizados para produzir eletricidade em um motor ou processo de combustão (ALAO; POPOOLA; AYODELE, 2021; MUNIR *et al.*, 2021). Além disso, como resíduo sólido deste processo, é gerado um carvão com alto poder calorífico, denominado biochar, que também pode ser utilizado em processos térmicos para a geração de energia térmica e elétrica (MUNIR *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2021).

É válido ressaltar que, devido à heterogeneidade dos RSU, há necessidade de conhecer os RSUE utilizados na pirólise para evitar que impurezas, metais ou vidros prejudiquem a qualidade dos produtos gerados pelo processo pirolítico (MUKHERJEE *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2021; RASHEED *et al.*, 2021). Para que sejam gerados produtos pirolíticos de boa qualidade, a matéria prima deve ter tipos específicos de resíduos, tais como plásticos, pneus, equipamentos elétricos e eletrônicos e madeira (KUMAR; SAMADDER, 2017)

O óleo de pirólise, por exemplo, quando contaminado por elementos heteroátomos (por exemplo, O, N, Cl, F, Br), podem se tornar ácidos, não estáveis, imiscíveis com óleo, ficando inutilizável como combustível (PORSHNOV, 2022). Além disso, essas impurezas podem desativar a função catalítica dos catalisadores sintéticos e naturais, aumentando o custo operacional do processo (MUKHERJEE *et al.*, 2020; RASHEED *et al.*, 2021).

É importante ressaltar que, os elementos considerados poluentes, como os halogenados e metais pesados (como mercúrio), são produzidos como produtos da pirólise e podem contaminar o biocarvão ou biochar (RASHEED *et al.*, 2021).

No Quadro 9 é possível fazer uma comparação, percebendo as características das três tecnologias, tais como a reação química, temperatura de operação, produtos gerados, a necessidade de pré-tratamento, o poder calorífico exigido, produção de energia e a capacidade de redução de volume dos resíduos sólidos. Além disso, é possível perceber que é apenas aconselhável a separação e segregação manual e mecanizada como pré-tratamento para incineração dos RSUE (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Isso se torna necessário para estimar e conhecer o poder calorífico inferior de base úmida (PCI) dos RSUE (RODRIGUES *et al.*, 2022), pois, caso não haja pré-tratamento, o PCI deve ser acima de 6 MJ.kg⁻¹ para não haver necessidade de matéria combustível de apoio a fim de manter a temperatura ideal do processo (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022).

Quadro 9 - Comparação das tecnologias de conversão térmica - *Waste to Energy* (WTE).

Parâmetros	Incineração	Pirólise	Gaseificação
Reação química	Combustão oxidativa completa, com presença de oxigênio	Degradação térmica de material orgânica na presença de oxigênio	Oxidação térmica parcial, com fornecimento de controlado de oxigênio
Temperatura de operação (°C)	850-1200	400-800	800-1600
Produtos	Sólido	Cinzas, materiais não combustíveis, metais e vidro	Cinza, escória, carvão (combinação de não combustível e carbono – Biochar)
	Líquido	-	Óleo de pirólise, cera, alcatrão
	Gasoso	CO ₂ , H ₂ O, O, O ₂ , N ₂	Gases de síntese (<i>Syngas</i>)
Pré-tratamento	Aconselhável	Obrigatório	Obrigatório
Poder Calorífico exigido (MJ.kg⁻¹) (kcal.kg⁻¹)	8 a 14	Não há combustão direta	11 a 12
Produção de energia por tonelada de RSUE	até 0,7 MWh de energia elétrica	8 MWh de energia térmica, para resíduos plásticos separados na fonte	até 0,5 MWh de energia elétrica
Redução de volume do RSUE (%)	90	84	90

Fonte: (AGATON *et al.*, 2020; CUDJOE; WANG, 2022; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FOSTER *et al.*, 2021; KABIR; KHAN, 2020; KUMAR; SAMADDER, 2017; MUKHERJEE *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2021; NANDA; BERRUTI, 2021; RASHEED *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; SHAH *et al.*, 2021; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021; VOSS *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Legenda: RSUE - resíduos sólidos urbanos para fins energéticos.

Como pode ser percebido no Quadro 9, as três principais tecnologias WTE (incineração, pirólise e gaseificação) possuem vantagens em comum, tais como a redução do volume dos RSU e alto potencial calorífico, quando houver pré-tratamento, para a conversão para energia elétrica (MUKHERJEE *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2021; PORSHNOV, 2022; RAM; KUMAR; RANI, 2021).

Porém, em virtude de suas desvantagens, o processo pirolítico para RSU se torna limitado devido às suas restrições para resíduos heterogêneos, não sendo uma tecnologia eficaz quando comparada com a gaseificação e a incineração (AGATON *et al.*, 2020; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; MUKHERJEE *et al.*, 2020; RASHEED *et al.*, 2021), por isso não será considerada na análise de potencial energético neste estudo.

É importante ressaltar que a gaseificação e a incineração preferencialmente trabalham com RSUE de baixo teor de umidade livres de material orgânico, a fim de evitar ineficiência dos processos termoquímicos (DONG *et al.*, 2019; MUKHERJEE *et al.*, 2020; MUNIR *et al.*, 2021; RASHEED *et al.*, 2021).

A preferência são pelos resíduos urbanos secos que, por motivos de ausência de mercado ou qualidade da triagem, não puderam ser reciclados (MARCHESIN *et al.*, 2022; RASHEED *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022). Isso incentiva no manejo de resíduos a segregação e a coleta seletiva por parte sociedade (BERTANZA *et al.*, 2021; BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022), através da valorização e comercialização de forma separada, dos resíduos recicláveis e não recicláveis, a fim de agregar valor aos RSU e RSUE dando ênfase à economia circular (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; VLACHOKOSTAS; MICHAILIDOU; ACHILLAS, 2021; WANG *et al.*, 2020).

Tomando como base e exemplo a realidade do Brasil, que ainda possui locais de disposição inadequada resíduos e está em estágio inicial de uso das tecnologias WTE, existem poucas aplicações utilizando o RSUE como combustível (DALMO, F. C. *et al.*, 2019; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022).

Há também a possibilidade de melhorar as condições econômicas e sociais dos trabalhadores informais diretamente ligados ao tema, como é o caso dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020; VYAS *et al.*, 2022). incentivando novos investimentos em tecnologias por parte das empresas que atuam diretamente com o gerenciamento de resíduos, além de reduzir os impactos da geração de resíduos apoiando os gestores públicos com novas alternativas de tratamento de RSU (ELHASSAN, 2021; KAYA *et al.*, 2021; MARCHESIN *et al.*, 2022).

Dessa forma, é importante conhecer o potencial energético e social das tecnologias WTE, analisando as experiências de outros países e apropriando as informações para a realidade brasileira através de

dados adquiridos nos órgãos públicos provedores de informações e indicadores sobre manejo de RSU, conforme abordado na etapa a seguir.

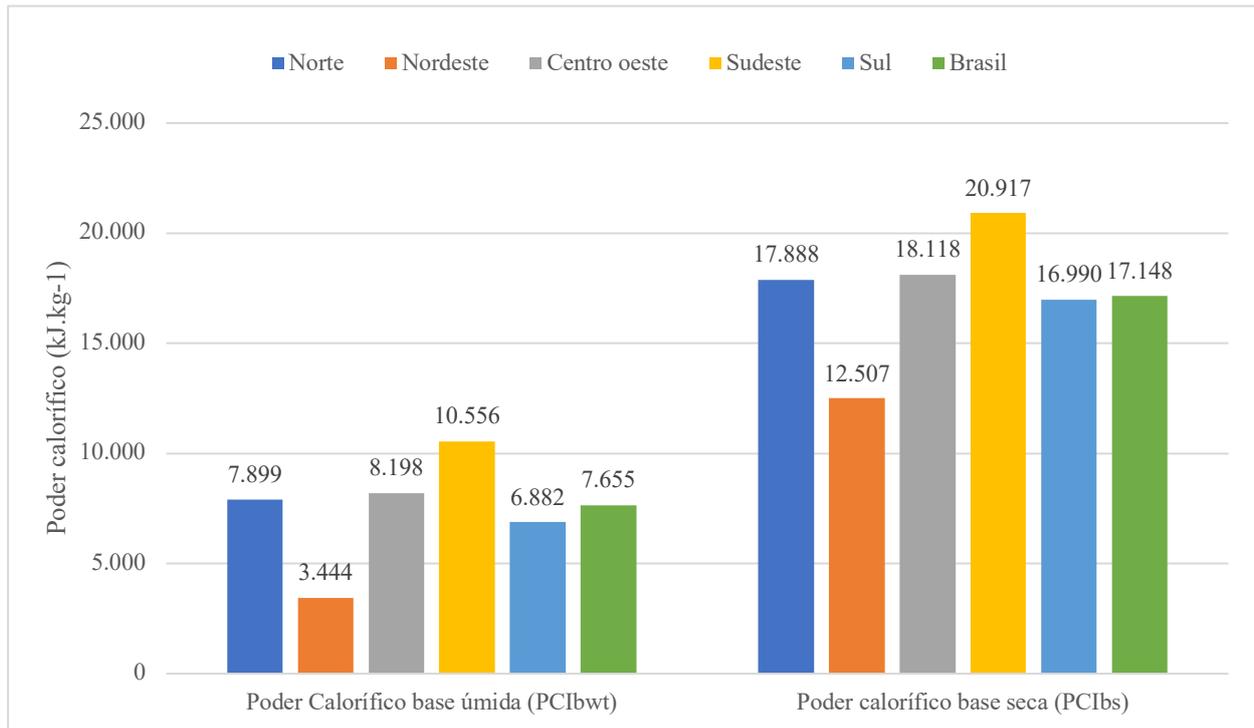
2.3.2. Etapa 2 – Análise do potencial energético de resíduos sólidos urbanos não recicláveis para sistemas térmicos no Brasil

Diversos estudos fazem a comparação do potencial das unidades de tratamento térmico com o aproveitamento energético de RSU, verificando quase sempre a incineração, pirólise, gaseificação com a digestão anaeróbia e aterro sanitário com recuperação de gás para geração de energia (ARACIL *et al.*, 2018; AYODELE; OGUNJUYIGBE; ALAO, 2018; CUDJOE; WANG, 2022; DALMO, F. C. *et al.*, 2019; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; NANDA; BERRUTI, 2021; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Dessa forma, é evidente que, dentre as tecnologias *Waste to Energy* mais utilizadas, a gaseificação e a incineração possuem maior potencial energético e são mais propícias quando dos resíduos heterogêneos, ao passo que a pirólise não tem se mostrado adequada para o processamento de RSU mistos, não se mostrando viável para aplicação à realidade brasileira sob as condições atuais (VOSS *et al.*, 2021 CHAVANDO *et al.*, 2022; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; SAFAR *et al.*, 2021; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021).

Conforme descrito na metodologia, há necessidade no processo operacional da gaseificação, o tratamento prévio obrigatório de britagem e secagem, que reduz o peso na fração dos RSU combustível. Dessa forma, foi possível estimar o poder calorífico inferior na base seca (PCIbs) para determinar o potencial energético da gaseificação e o poder calorífico inferior na base úmida (PCIbw) para determinar o da incineração para cada macrorregião do Brasil (RODRIGUES *et al.*, 2022), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Poder calorífico inferior na base seca (PCIbs) e na base úmida (PCIbw) para cada macrorregião e para o Brasil.

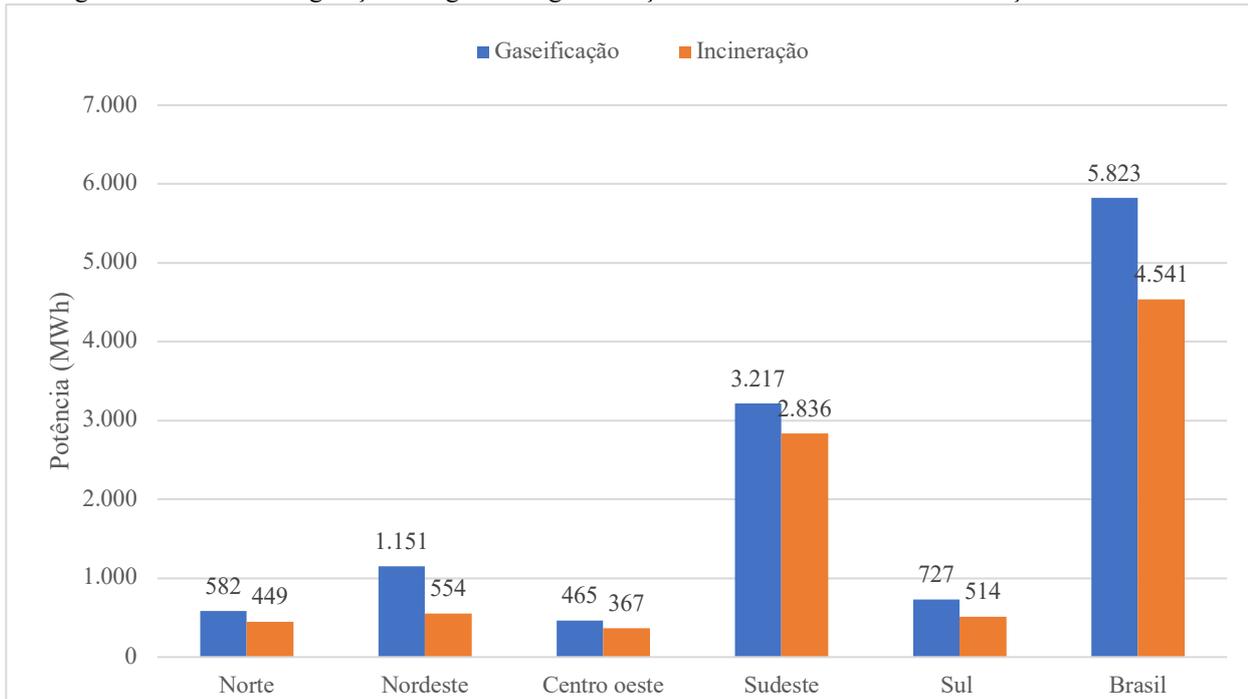


Fonte: Própria.

Com base na análise da Figura 9 foi possível perceber que cada macrorregião brasileira possui um poder calorífico distinto, sendo que, nas regiões onde possuem maior densidade populacional e maior desenvolvimento econômico, o poder calorífico é mais interessante para as tecnologias WTE (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022).

Quando se compara as duas tecnologias, percebe-se que a gaseificação, quando da utilização da homogeneização e a secagem dos RSU como pré-tratamento, tem maior potencial energético que a incineração devido aos cálculos para a gaseificação terem usado poder calorífico inferior em base seca (PCIbs), tendo em vista suas limitações técnicas para a utilização de resíduos heterogêneos e umidificados como combustíveis, conforme mostra a Figura 10 (CUDJOE; WANG, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; PORSHNOV, 2022).

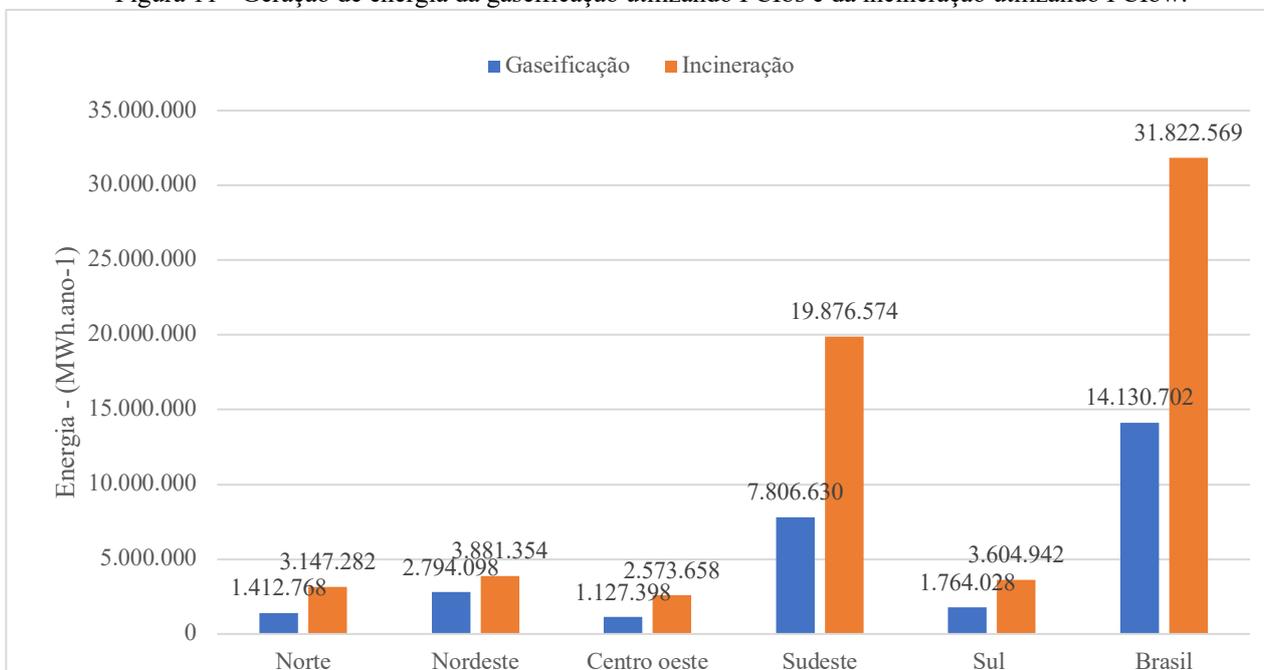
Figura 10 - Potência de geração energética de gaseificação utilizando PCIbs e da incineração utilizando PCIbw.



Fonte: Própria.

Porém, mesmo a incineração utilizando o poder calorífico inferior em base úmida (PCIbw), a eficiência de conversão térmica da incineração resultou em uma maior geração de energia elétrica do que a gaseificação, conforme ilustra a Figura 11 (RODRIGUES *et al.*, 2022).

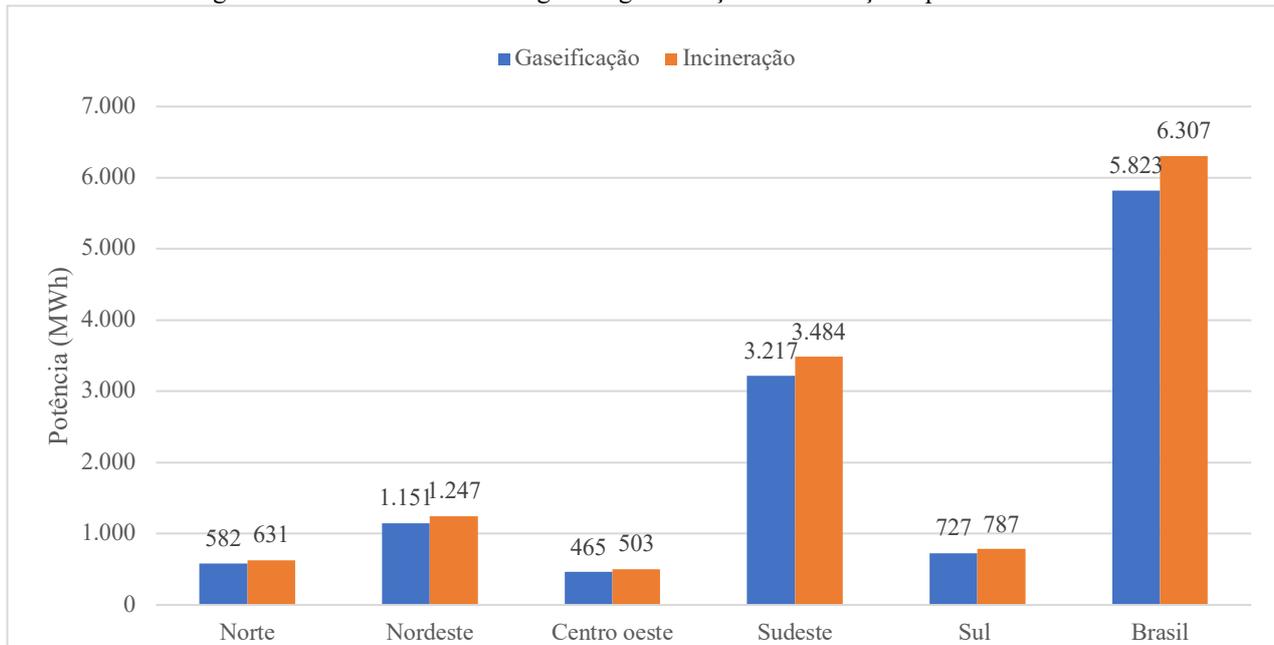
Figura 11 - Geração de energia da gaseificação utilizando PCIbs e da incineração utilizando PCIbw.



Fonte: Própria.

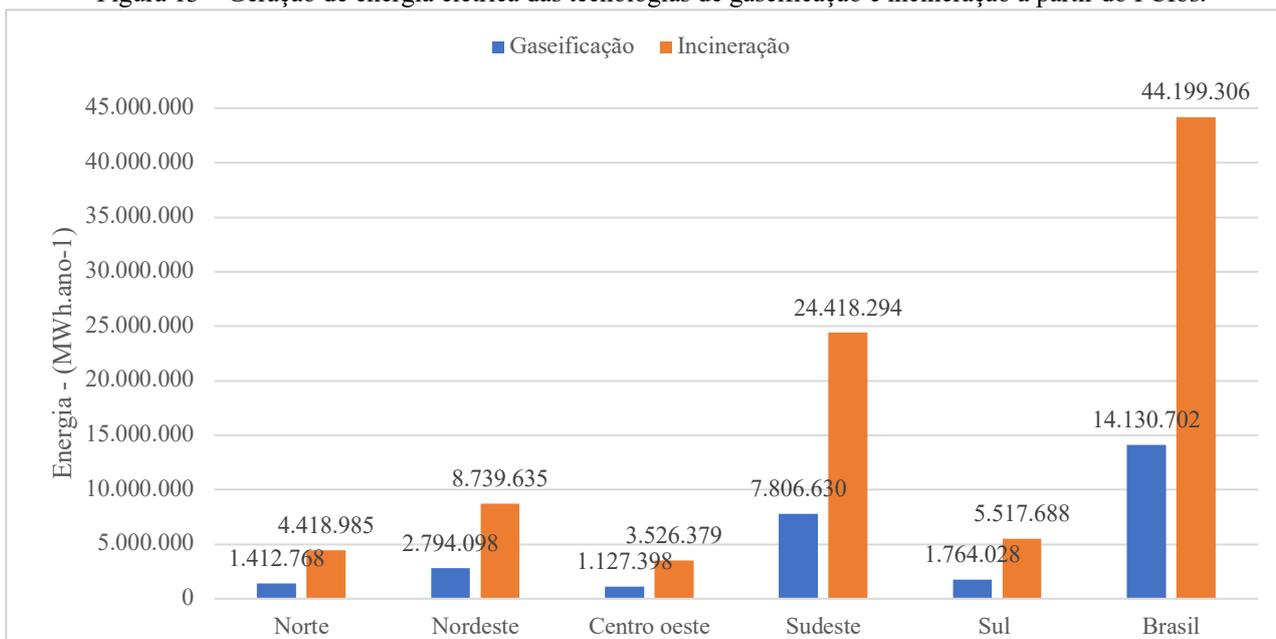
É importante ressaltar que no processo de incineração não há obrigatoriedade de tratamento prévio para a redução de umidade (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022). Contudo, foi possível obter resultados calculando a potência e a geração de energia utilizando para ambas as tecnologias o poder calorífico na base seca (PCIbs), confirmando que a incineração melhora ainda mais sua eficiência de conversão térmica para a potência e consequentemente geração de energia elétrica, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Potência das tecnologias de gaseificação e incineração a partir do PCIbs.



Fonte: Própria.

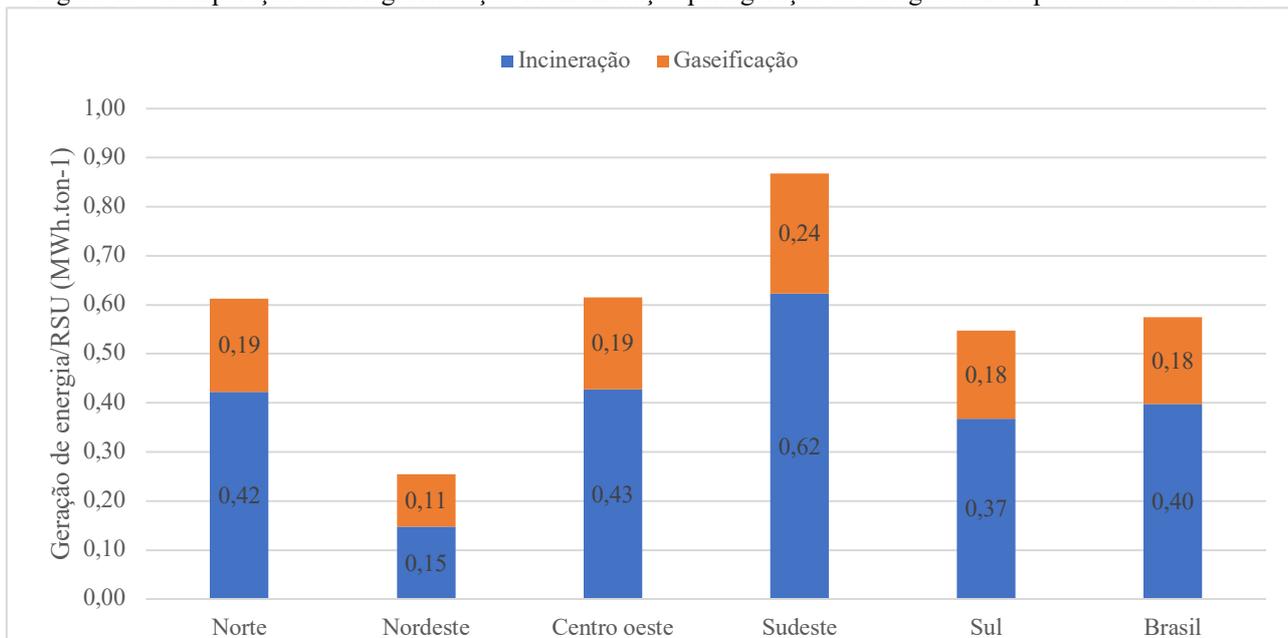
Figura 13 – Geração de energia elétrica das tecnologias de gaseificação e incineração a partir do PCIbs.



Fonte: Própria.

Ambas as tecnologias possuem potencial de geração de energia elétrica a partir do RSU, sendo que a incineração, mesmo com a desnecessidade de realizar um pré-tratamento, atinge uma maior taxa de geração por tonelada de RSU devido à sua eficiência no processo de conversão térmica (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; SANTOS, R. E. Dos *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020), conforme ilustra a Figura 14.

Figura 14 - Comparação entre a gaseificação e a incineração para geração de energia elétrica por tonelada de RSU.



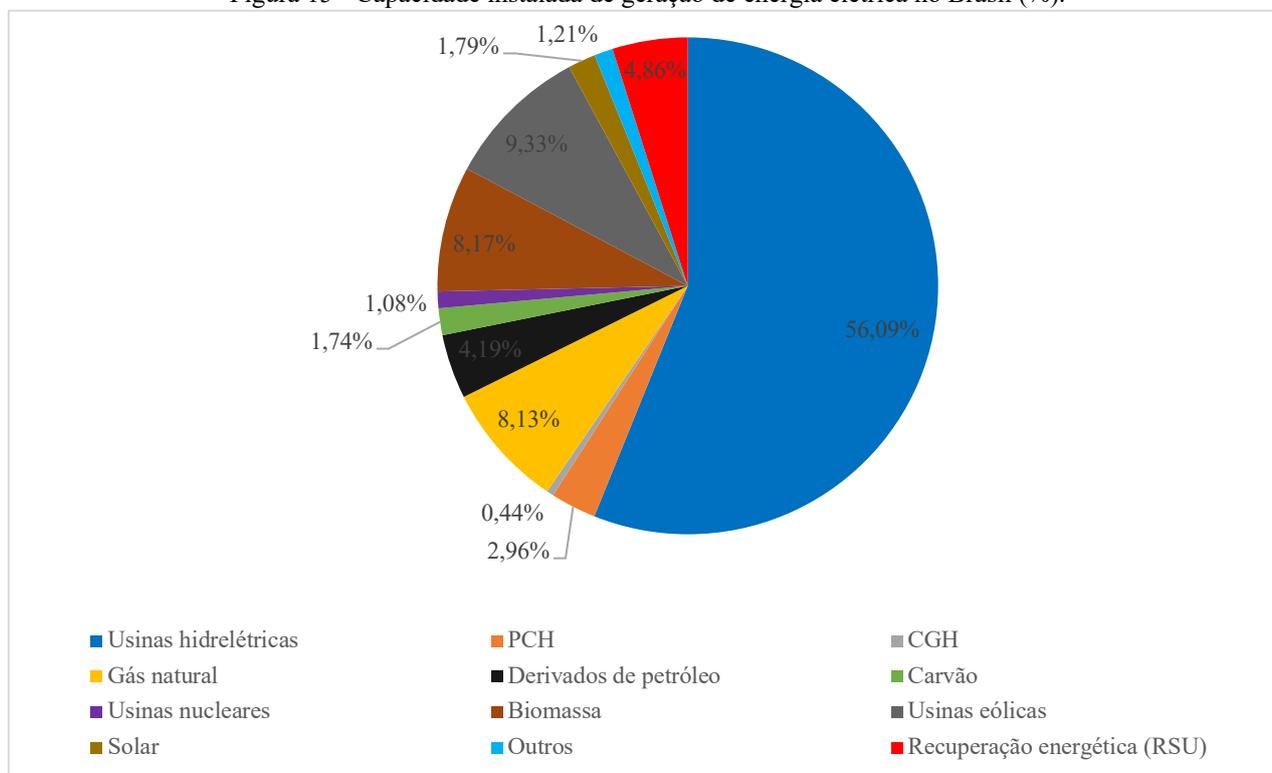
Fonte: Própria.

É importante saber que, o Brasil ainda não possui instaladas tecnologias WTE a partir de RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021), mas GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021) afirmaram que as tecnologias de conversão de RSU em energia podem trazer benefícios como a redução da disposição irregular de resíduos e exploração de uma nova fonte de energia, podendo contribuir com a matriz energética do Brasil e na evolução da economia circular, agregando valor aos resíduos recicláveis e não recicláveis como forma de incentivo aos grupos sociais de interesse da cadeia de gerenciamento resíduos (ALAMU *et al.*, 2021; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MUNIR *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

A principal fonte de energia elétrica do Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas, contribuindo com 53,34% da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2023), conforme demonstrado na Figura 15. Ao passo que, considerando os cálculos de potencial energético utilizados neste estudo, a recuperação energética a partir de RSU com as tecnologias de gaseificação e incineração teria contribuição de

4,86% a mais na matriz energética brasileira (ALAMU *et al.*, 2021; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Figura 15 - Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (%).



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) acessado em 24/01/2023; Balanço Energético Nacional 2021. (1) PCH: Pequena Central Hidrelétrica; (2) CGH: Central Geradora Hidrelétrica; (3) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível; (4) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia; (5) Outras: gás de coque, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis e biodiesel.

É importante ressaltar que para as tecnologias WTE é importante a separação dos RSUE para melhorar a eficiência térmica do processo produtivo (ALAMU *et al.*, 2021; ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022). Os catadores de materiais recicláveis atuam diretamente nesta atividade, fazendo a reciclagem destes produtos (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018).

Além disso, o Brasil é dependente dos trabalhadores diretos do setor de reciclagem, sendo responsáveis por parte da coleta, além da triagem por tipo de resíduos, transporte, embalagem, processamento e comercialização da fração reciclável dos RSU (FIDELIS *et al.*, 2020). No entanto, existem catadores informais que trabalham precariamente nas ruas e “lixões” (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021).

Dessa forma, há necessidade de inclusão socioprodutiva destes trabalhadores (tanto informais quanto os formalizados em organizações), pois a situação atual deste mercado proporciona baixos salários, falta de benefícios, longas jornadas de trabalho, além da precariedade das condições trabalho,

conhecimento limitado sobre as possibilidades da valorização dos RSU e obtenção de apoio financeiro e subsídios de órgãos governamentais, falta de estrutura física e de equipamentos (FIDELIS *et al.*, 2020).

Com a evolução das alternativas de tratamento térmico de RSU no Brasil é indiscutível a influência no pilar social (FIDELIS *et al.*, 2020). Ao passo que, o desenvolvimento e implantação de tecnologias WTE no Brasil, poderia ser vista como uma forma de incentivar não só a qualificação profissional para trabalharem ou fornecerem matéria prima para este tipo de empreendimento, promovendo assim saúde, qualidade e segurança do trabalho desses colaboradores, mas também como forma de estimular a comercialização dos produtos recicláveis e não recicláveis (FIDELIS *et al.*, 2020).

Em integração às tecnologias WTE, os administradores locais devem sugerir soluções formais para os trabalhadores informais diretamente ligados a reciclagem de RSU (SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020). Esses colaboradores podem se mostrar essenciais para criar sistemas mais eficientes de reciclagem dos materiais, reduzindo os custos de triagem para as plantas WTE, além de obter maiores benefícios para o seu sustento (SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020). Dessa forma, as alternativas de reciclagem e recuperação de energia podem ser vistas como tecnologias e processos complementares, não necessariamente competindo entre si (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021).

É inegável a viabilidade técnica da conversão de RSU em energia, bem como dos benefícios sociais e econômicos que podem ser aplicados nos municípios brasileiros (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022). É válido dizer que, a própria legislação brasileira e os programas de governo possuem diretrizes para aumentar a recuperação energética de RSU no território nacional (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021).

Porém, para vencer esse desafio tecnológico, político e econômico é fundamental propor e avaliar cenários intermediários com análise de sensibilidade mais detalhados sobre os aspectos energéticos e econômicos, considerando inclusive as variações do teor de umidade, a cobertura de coleta de resíduos, as receitas das tecnologias por meio da venda de energia, bem como proposição de sobretaxa para a disposição final de RSU em aterros sanitários (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022, RODRIGUES *et al.*, 2022; GALAVOTE *et al.*, 2021). E, após realizada a avaliação financeira, é importante entender a opinião dos interessados na gestão de resíduos sólidos sobre os impactos que as tecnologias *Waste to Energy* podem trazer a cada realidade (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FIDELIS *et al.*, 2020; MARCHESIN *et al.*, 2022).

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A pirólise, não é uma tecnologia apropriada para RSU com uma composição heterogênea e umidade elevada. Porém, com a utilização de resíduos plásticos como combustível nesta modalidade, tendo em vista o alto poder calorífico do óleo de pirólise de plásticos, além da qualidade do óleo poder ser melhorada com a adição de catalisadores para baixar o teor de oxigênio, há perspectiva da pirólise ser uma tecnologia disponível para a reciclagem terciária de plásticos. Isso pode ocorrer para outros resíduos, tais como os pneus inservíveis.

A gaseificação, por ser uma tecnologia com restrições de matéria-prima, e por haver necessidade de um pré-tratamento para homogeneizar os RSU e reduzir a granulometria, além da necessidade de utilizar resíduos específicos para geração de produtos de qualidade, bem como da necessidade de redução da umidade para melhorar a combustibilidade do material, o sucesso comercial em todo mundo é limitado. Isso se deve ao fato da eficiência de conversão térmica quando comparado a incineração.

Por sua vez, a incineração é a tecnologia com maior eficiência térmica e maior geração de eletricidade por tonelada de RSU, diante do fato de não necessitar de pré-tratamento para resíduos com poder calorífico inferior acima de 6 MJ/kg. A incineração é a melhor opção dentre as três tecnologias para as regiões com maior densidade populacional e maior desenvolvimento econômico, podendo ser considerada uma excelente alternativa para as regiões metropolitanas do Brasil, onde o poder calorífico dos RSU é compatível para a implementação dessa tecnologia.

Ficou evidente que, com a implantação de novas alternativas de tratamento haverá a ampliação da matriz elétrica e diversificação das opções de gestão de RSU, sendo criadas oportunidades do mercado de gerenciamento de resíduos no Brasil.

É recomendado um estudo mais aprofundado sobre as tecnologias WTE de forma que sejam elucidados os detalhes técnicos da estrutura de cada tecnologia. Há a necessidade de estudos de viabilidade financeira, para que seja possível a análise econômica por meio de cenários e dos custos de forma discriminada, haja vista a importância de conhecer a influência no valor final do custo de investimento e do custo operacional, bem como das receitas dos produtos gerados. Da mesma forma, a partir da viabilidade financeira, é importante ressaltar a relevância do impacto social que as tecnologias WTE podem oferecer para as partes interessadas no manejo e gerenciamento de resíduos sólidos da região onde serão implantadas, tendo a possibilidade de aprofundamento no tema mediante novos estudos e pesquisas.

CAPÍTULO 3: AVALIAÇÃO FINANCEIRA E DO IMPACTO SOCIAL NA IMPLANTAÇÃO DE UMA UNIDADE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NÃO RECICLÁVEIS NO BRASIL

Resumo

A exemplo dos países desenvolvidos, o Brasil necessita implementar tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU) ao mesmo tempo que promove incentivos aos catadores de materiais recicláveis como forma de desenvolver a gestão de resíduos sólidos no país. E assim como a reciclagem, os processos térmicos são tecnologias que necessitam de um material classificado e livre ao máximo de umidade em sua composição, descrevendo uma possível competição com os catadores no manejo de resíduos sólidos municipais. Nesse sentido, este estudo propõe uma avaliação financeira para implantação de uma unidade *mass burning* a partir de revisão sistemática da literatura, apropriando a análise das características gravimétrica dos RSU do Brasil para descrever os custos de investimento (CAPEX) e custos operacionais (OPEX), bem como das receitas que podem ser auferidas com a comercialização de energia. Além disso, este estudo também avaliou o impacto social a partir da implantação de unidades de recuperação energética do tipo *Waste to Energy* (WTE) no Brasil com a ferramenta Avaliação de Ciclo de Vida – Social (ACV-S), medindo as perspectivas sob a ótica dos representantes de Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Recuperáveis (OCMRR), prefeituras e empresas que atuam no gerenciamento de resíduos. Como resultados, percebe-se pelos indicadores financeiros Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) que, para faixas populacionais do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) 5 e 6 com população superior a 1,9 milhões de habitantes, a implantação da incineração com recuperação energética de RSU é economicamente viável. Beneficamente ao setor, observou-se pela percepção dos *stakeholders* entrevistados que os catadores terão melhores condições de trabalho, mais benefícios trabalhistas, menos discriminação, além da maior participação da comunidade, desenvolvimento local e perspectiva de crescimento de novas alternativas de manejo e destinação final de resíduos, conforme determina a hierarquia da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. Os *stakeholders*, em sua maioria, concordam que a renda dos catadores irá aumentar com a implantação das WTE, bem como a porcentagem de coleta seletiva de materiais recicláveis, já que os resíduos não recicláveis são matéria-prima para as WTE.

Palavras Chaves: Resíduos Sólidos Urbanos. *Waste to Energy*. Incineração. Impacto Social. Catadores de Materiais Recicláveis e Reutilizáveis. Avaliação Financeira. Valor Presente Líquido. Taxa Interna de Retorno.

3.1. INTRODUÇÃO

A partir da Agenda 2030 do Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ONU) são sugeridos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com uma forte integração dos elos da cadeia de sustentabilidade (DANISH *et al.*, 2019; VLACHOKOSTAS; MICHAILIDOU; ACHILLAS, 2021). Dessa forma, seguindo os ODS, diversos atores das iniciativas públicas e privadas devem contribuir para o desenvolvimento sustentável, bem como para a evolução da matriz energética com fontes renováveis, tais como a biomassa por meio de resíduos sólidos urbanos (RSU) (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

A evolução do mecanismo de gestão de resíduos utilizando como destinação final o tratamento térmico mediante tecnologia *mass burning* ou incineração de RSU com recuperação de energia elétrica é uma das alternativas mais sustentáveis e aderente aos ODS que já são praticadas principalmente por países desenvolvidos (DANISH *et al.*, 2019; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; VLACHOKOSTAS; MICHAILIDOU; ACHILLAS, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

É importante ressaltar que, comparada com outras tecnologias de tratamento térmico por combustão, tais como a gaseificação e a pirólise, a queima direta de RSU com recuperação energética possui maior potencial energético e melhor eficiência para resíduos mistos (AGATON *et al.*, 2020; FOSTER *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; PORSHNOV, 2022). Esse processo de tratamento térmico traz benefícios ambientais, devido à capacidade de reduzir o volume do RSU em 90%, exigindo áreas menores quando comparada aos aterros sanitários, além de não haver o risco de contaminação de corpos hídricos e solos, bem como da redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) (ALAMU *et al.*, 2021; BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022; BISINELLA *et al.*, 2022; KABIR; KHAN, 2020; OUDA *et al.*, 2017; SALA-GARRIDO *et al.*, 2022; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021; TISI, 2019).

Além disso, possibilita o desenvolvimento da economia circular mediante o desenvolvimento de novos mercados de energia, e agrega valor aos resíduos com a necessidade de uma reciclagem de alta qualidade (FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017; VYAS *et al.*, 2022). Conseqüentemente, impacta de forma positiva a vertente social, principalmente nos países em que possuem trabalhadores informais, tais como os catadores de materiais recicláveis no Brasil, e demais organizações públicas e privadas envolvidas diretamente com o gerenciamento de RSU (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020; VYAS *et al.*, 2022; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; KUMAR; SAMADDER, 2017; SIMAN *et al.*, 2022).

GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021) afirmaram que no Brasil as tecnologias de conversão de RSU em energia podem trazer benefícios como a redução da disposição irregular de resíduos e a exploração de uma nova fonte de energia, podendo contribuir com 3% a mais na matriz elétrica do Brasil e na evolução da economia circular, agregando valor ao RSU e incentivo aos grupos sociais de interesse da cadeia de gerenciamento resíduos (ALAMU *et al.*, 2021; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; ISTRATE; GALVEZ-MARTOS; DUFOUR, 2021; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; MUNIR *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Percebe-se então estudos que descrevem novas alternativas de destinação de RSU, tais como a incineração com recuperação energética, como estratégia de incentivar ampliação da coleta seletiva e conseqüentemente os ganhos dos trabalhadores da reciclagem (FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; LINO; ISMAIL, 2017; RODRIGUES; MONDELLI, 2021). Porém, os autores descrevem a necessidade de mudanças de paradigmas sobre o tratamento térmico de RSU envolvendo políticas públicas e a sociedade (FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; LINO; ISMAIL, 2017; RODRIGUES; MONDELLI, 2021).

Dessa forma, no Brasil, para que seja possível a maior aderência aos objetivos da ONU, é clara a necessidade de ampliar as alternativas de destinação de RSU (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022). No país, 26,23 % do RSU coletado, equivalente a 17,13 milhões ton.ano⁻¹ são destinados para a disposição final em locais inadequados (aterro controlado e “lixão”) (MDR, 2022; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; TISI, 2019).

Ao mesmo tempo, há trabalhadores formais e informais buscando resíduos nesses locais enfrentando dificuldades, tais como: equipamentos inexistentes; conhecimento limitado sobre o mercado de reciclagem; além de falta de apoio técnico e financeiro (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; ZON *et al.*, 2020; R. SIMAN *et al.*, 2022).

LINO; ISMAIL (2017) concluíram que, em um cenário de reciclagem e incineração com recuperação energética no Brasil, com a descrição de aumento das taxas de reciclagem para as cidades brasileiras, há a necessidade de maiores investimentos em coleta seletiva por parte dos gestores públicos, bem como da estruturação das Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Reutilizáveis (OCMRR) (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; FIDELIS *et al.*, 2020).

Para investir na implementação dessas plantas (tanto de tratamento térmico quanto de triagem de resíduos recicláveis), a viabilidade financeira é uma questão crítica para a tomada de decisão na sua implantação ou aplicação (TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021; VOSS *et al.*, 2021). De todas as formas, torna-se necessário considerar o impacto econômico a longo prazo, natureza dos resíduos,

bem como as implicações socioculturais dessa tecnologia em países que usam a forma de trabalho humana no manejo de resíduos (AGBEJULE *et al.*, 2021; NANDHINI *et al.*, 2022; VOSS *et al.*, 2021).

O conhecimento da densidade populacional, taxa de geração de RSU, as especificidades do local de implantação, bem como as características do RSU, além de determinar a porcentagem de resíduos utilizados como combustível para a incineração, influenciam diretamente na composição dos custos de investimentos e/ou *capital expenditure* (CAPEX) e nas despesas operacionais e/ou *operational expenditure* (OPEX) (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; PANEPINTO; ZANETTI, 2018; RODRIGUES *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2016).

Além disso, para determinar as receitas do empreendimento, tais como a taxa de recebimento de RSU e a venda de energia, ambas são dimensionadas a partir das faixas populacionais e coeficientes de geração *per capita* de RSU (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2020, 2019).

Dessa forma, conhecendo as despesas e as receitas é possível calcular os indicadores econômicos de avaliação financeira para um determinado período de tempo, tais como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; HADIDI; OMER, 2017; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022).

Perante o exposto, tendo em vista o cenário atual do Brasil, levando em consideração o incentivo dos ODS da ONU com relação a economia circular, a utilização de fontes renováveis na matriz energética, bem como da ampliação da disponibilidade de saneamento e qualificação de novas tecnologias de manejo e tratamento térmico de RSU, este estudo pretende contribuir com uma avaliação socioeconômica utilizando como apoio a viabilidade financeira, aplicando as metodologias VPL e TIR a partir das faixas populacionais aplicadas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no país. E ainda, levando em consideração os ODS da ONU, qualificando e quantificando os aspectos sociais a partir das percepções das partes interessadas que atuam diretamente com gerenciamento de resíduos, sob a ótica da implantação de tratamento térmico a partir da incineração de RSU com geração de energia elétrica, utilizando para tanto as categorias da análise de Ciclo de Vida Social (ACV-Social) proposta por IBÁÑEZ-FORÉS *et al.* (2019).

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Etapa 1 - Avaliação financeira da implantação da incineração de resíduos sólidos não recicláveis por faixa populacional no Brasil

A avaliação financeira utilizou como apoio métodos de viabilidade, tais como o valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). O potencial de recuperação de energia foi estimado considerando o tamanho populacional associado às quantidades potenciais de resíduos gerados para determinar o potencial total de energia economicamente viável derivada do processo de incineração no Brasil.

A tecnologia *mass burning* foi escolhida neste estudo devido à sua alta eficiência de conversão térmica, bem como da capacidade mais favorável de utilização de resíduos heterogêneos em seu processo produtivo quando comparada a outras tecnologias WTE, tais como gaseificação e pirólise (BIANCO; PANEPINTO; ZANETTI, 2022; DONG *et al.*, 2019; PORSHNOV, 2022).

Essa abordagem é consistente com métodos utilizados pelos autores ESCAMILA-GARCÍA *et al.* (2020), RODRIGUES *et al.* (2022), SANTOS, R. E. Dos *et al.* (2019) e SILVA *et al.* (2020). Os detalhes são descritos nas seções a seguir.

a. Estimativa para geração de RSU

A estimativa considerou o índice de geração *per capita* de RSU e 6 faixas de população conforme distribuído pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2021) e apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Dados para estimativa de geração *per capita* de RSU por faixa populacional.

Faixa Populacional	1	2	3	4	5	6
Intervalo da faixa (hab.)	Menor ou igual 30.000	Entre 30.001 e 100.000	Entre 100.001 e 250.000	Entre 250.001 e 1.000.000	Entre 1.00.001 e 4.000.000	Maior que 4.000.001
Taxa de geração de RSU por faixa populacional (kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹)	0,99	1,01	0,95	1,05	1,06	1,01

Fonte: BRASIL (2021).

Legenda: RSU – Resíduos sólido urbano

A geração de resíduos foi estimada aplicando a Equação 7, utilizando as quantidades mínimas e máximas de habitantes das faixas populacionais do SNIS.

$$RSUc = P \times Ig \times 365 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

RSUc = resíduo coletado kg.ano⁻¹;

P = tamanho da população;

Ig = índice de geração *per capita* kgRSU.hab.⁻¹.dia⁻¹.

Além disso, a produção de matéria orgânica, papel e papelão e plásticos por faixa de população foi estimada conforme GUTIERREZ-GOMEZ *et al.* (2021), os quais descreveram respectivamente composições de 51,40%; 13,10% e 13,50% para o resíduo brasileiro e aplicando a Equação 8 (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$W = \sum_{i=1}^n W(i) = \frac{RSUc \times F(i)}{100} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

W(i) = produção de cada tipo de resíduo (kg.ano⁻¹);

W = resíduo combustível gerado (kg. ano⁻¹);

F(i) = fração de cada tipo de resíduo removido da composição gravimétrica;

n = números de tipos de resíduos.

b. Estimativa de potencial energético

Para a estimativa de geração de energia foi utilizado o poder calorífico dos resíduos, aproveitando a quantidade de energia por unidade de massa ou unidade de volume de matéria que pode ser liberada quando ocorre uma reação de oxidação química mediante combustão (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

A análise considerou os valores de geração de calor de acordo com as categorias de materiais considerados combustíveis, tais como resíduos orgânicos, resíduos plásticos e resíduos de papel (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020).

O potencial calorífico utilizado nas estimativas considerou um potencial calorífico de base úmida (PCIi) de 2.979 kJ.kg⁻¹ para resíduos orgânicos, 11.418 kJ.kg⁻¹ para papel e papelão e 34.279 kJ.kg⁻¹ para plásticos (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022). A partir das Equações 9 e 10 foi possível determinar o Poder Calorífico Total (PCIt) dos resíduos (RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$PCI_f = \frac{Fr \times PCI_i}{100} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$PCIt = \sum_{i=1}^n PCI_f \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

PCIf = Poder calorífico por fração de RSU em kJ.kg^{-1} ;

PCLi = Poder calorífico por tipo de resíduo em kJ.kg^{-1} ;

PCIt = Poder calorífico Total dos resíduos em kJ.kg^{-1} ;

Fr = fração de cada tipo de resíduo na composição gravimétrica;

n = números de tipos de resíduos.

A potência disponível para cada tamanho de população foi determinada por meio da Equação 11 (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022). Para os cálculos foram adotados o incinerador de combustão em grelhas móveis com eficiência de conversão térmica fixada em 30% (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$Pot = \frac{W \times PCIt \times \gamma}{3600 \times \Delta t} \quad (\text{Eq.11})$$

Onde:

Pot = potência disponível devido ao aproveitamento energético dos resíduos em kW;

PCIt = Poder calorífico total dos resíduos em kJ.kg^{-1} ;

W = resíduo combustível gerado em kg.ano^{-1} ;

γ = eficiência dos equipamentos de conversão térmica em 30% (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022);

Δt = número de horas anuais;

3.600 = conversão de horas para segundos.

Por fim, pela Equação 12 foi possível calcular a energia que pode ser produzida pela tecnologia estudada (RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$E = \frac{Pot \times \Delta t \times FC}{1000} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

E = energia gerada pelo equipamento em MWh.ano^{-1} ;

Δt = número de horas anuais;

FC = fator de capacidade de produção, adotado em 80% para ambas as tecnologias, conforme RODRIGUES *et al.* (2022).

c. Premissas para avaliação financeira

Para que seja possível a avaliação financeira, é necessário conhecer as despesas de capital compreendidos como investimentos, *capital expenditure* (CAPEX), tais como custos de construção, uso da terra, fundos de preparação, empréstimo e gestão de juros e riscos, aquisições de maquinários, equipamentos e instalações, e outros custos (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; VOSS *et al.*, 2021; UBA 2018a).

Além disso, é necessário obter os custos de despesas operacionais *operational expenditure* (OPEX), compreendidos como custos operacionais, tais como salários, aluguéis, custos de manutenção de máquinas e equipamentos, publicidade, despesas ambientais (monitoramentos, manuseios de cinzas volantes, tratamento de chorume), taxas e outros gastos consumíveis mensalmente ou anualmente (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; VOSS *et al.*, 2021; UBA 2018a (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; VOSS *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

Para identificar os elementos de custo CAPEX e OPEX foi realizada a coleta de dados secundários por meio de revisão sistemática da literatura, conforme detalhado no Quadro 11.

Quadro 11 - Detalhamento metodológico da revisão sistemática para coleta de dados secundários da Etapa 1.

OBJETIVOS	FERRAMENTA	BASE DE DADOS	PERÍODO	TERMOS DE BUSCA
Identificar e descrever os elementos formadores de custos e receitas relacionados à implementação dos sistemas térmicos para a destinação de ¹ RSU no Brasil	Pesquisa documental	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), ² ABREN, ³ ANEEL, ⁴ IPEA	Não se aplica	“custo unitário de manejo de ¹ RSU”, “custo unitário de destinação de ¹ RSU”, custo unitário de disposição final”, “taxa de destinação final”, “taxa de venda de energia elétrica”
Valorar a magnitude de cada elemento formador de custo para cálculo do Valor Presente Líquido (⁵ VPL) e Taxa Interna de Retorno (⁶ TIR)	Pesquisa bibliográfica com Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017).	SCOPUS e <i>Web of Science</i>	2016 à 2022	“waste to energy”, “incineration”, “mass-burning”, “economic analysis”, “waste incineration”, “waste to energy technologies”, “financial feasibility”, “energetic configuration”, “economic viability”, “urban solid waste”, “municipal solid waste incineration”, “circular economy”

Fonte: Autoria própria.

Legenda: ¹RSU - resíduos sólidos urbanos; ²ABREN - Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos; ³ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; ⁴IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. ⁵VPL – Valor Presente Líquido. ⁶TIR – Taxa Interna de Retorno.

De posse dos dados secundários coletados conforme Quadro 11, os cálculos de CAPEX e OPEX para conhecer as despesas e custos da incineração foram obtidos em função da geração de RSU, principalmente dos RSU coletados (ARACIL *et al.*, 2018; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2017; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; GUTIÉRREZ; MENDOZA FANDIÑO; CABELLO ERAS, 2021; NANDHINI *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2020; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021). Dessa forma, para os cálculos financeiros foi determinado o CAPEX relacionado à aquisição dos equipamentos utilizando a Equação 13 (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022).

$$CAPEX = 15,797 \times Pot^{0,82} \times (1 + F1) \times k1 \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

CAPEX = custo de investimento do incinerador em R\$;

Pot = potência em kW;

F1 = fator tributário devido a importação de tecnologia, sendo adotado 30% da base na alíquota dos equipamentos de geração de energia elétrica (RODRIGUES *et al.*, 2022);

k1 = cotação entre Euro e Real em 28 de março de 2023.

E para determinação do OPEX foi considerado em 4% do valor de investimento inicial por ano (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022), conforme Equação 14. É importante ressaltar que, os custos de coleta e transporte de resíduos até destinação final não foram considerados neste estudo.

$$OPEX = 0,04 \times CAPEX \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

OPEX = custos de operação e manutenção do incinerador em R\$.ano⁻¹;

Para as receitas foram consideradas a taxa de destinação final de RSU em R\$110,00 por tonelada (BRASIL, 2020) e a venda de energia elétrica a R\$603,00 por MWh (EPE, 2022). Com isso, a análise financeira foi realizada utilizando os métodos VPL considerando todos os pagamentos e os recebíveis para um período de 20 anos (2023 a 2043) (ZHAO *et al.*, 2016), e da TIR que colabora de forma efetiva e ágil para verificar a viabilidade financeira do investimento (LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021).

O cálculo foi realizado conforme as Equações 15 e 16 (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; LUÍS PADILHA; LUIZ AMARANTE MESQUITA, 2022; OGUNJUYIGBE; AYODELE; ALAO, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2016).

$$VPL = \sum_{j=1}^m \frac{(E \times T + D \times Q) - OPEX}{(1+i)^j} - CAPEX \quad (\text{Eq. 15})$$

$$0 = VPL = \sum_{j=1}^m \frac{Ct}{(1+TIR)^t} - CAPEX \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

VPL = Valor Presente Líquido em R\$;

T = Tarifa de venda de energia em R\$.MWh⁻¹;

E = Energia gerada pelo equipamento em MWh.ano⁻¹;

D = Taxa de destinação final RSUE em R\$.ton⁻¹;

Q = Quantidade de RSUE em ton;

CAPEX = Custo de investimento do incinerador em R\$;

OPEX = Custos de operação e manutenção do incinerador em R\$.ano⁻¹;

Ct = Entrada de caixa líquido durante o período j;

i = Taxa de juros, definida como 13,75%, correspondente a taxa Selic de 2023 (RECEITA FEDERAL, 2023);

j = Anos de análise;

m = Vida útil dos projetos, definido em 20 anos (RODRIGUES *et al.*, 2022).

Para os cálculos mais fidedignos foram considerados impostos sobre a receita bruta de Imposto Sobre Serviços – ISS de 2%, Programa de Integração Social – PIS de 1,76% e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social – COFINS de 7,6%, considerando que o faturamento será sob o regime de lucro real, tendo em vista a faixa de possibilidade de faturamento (RECEITA FEDERAL, 2023). E foi considerado os impostos sobre o lucro Imposto de Renda Pessoa Jurídica - IRPJ de 25% e Contribuição Comercial sobre o Lucro Líquido – CSLL de 9% (RECEITA FEDERAL, 2023).

3.2.3. Etapa 2 - Impacto social da implantação da unidade de recuperação energética a partir da incineração de resíduos sólidos não recicláveis

Para a análise do impacto social da implementação de unidades de recuperação energética a partir da incineração de RSU no Brasil foi utilizada a metodologia de análise de ciclo de vida social (ACV-S) com base em inventário e nos impactos para determinados indicadores e categorias sociais, identificados por meio de revisão sistemática conforme Quadro 12, e quantificados por meio da escala de Likert.

A metodologia de ACV-S foi utilizada para direcionar a pesquisa com relação ao desenvolvimento de indicadores sociais para a aplicação de questionários em organizações, a fim de obter resultados qualitativos e quantitativos da percepção dos *stakeholders* (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022).

Quadro 12 - Detalhamento metodológico da revisão sistemática para coleta de dados secundários da Etapa 2.

OBJETIVOS	FERRAMENTA	BASE DE DADOS	PERÍODO	TERMOS DE BUSCA
Identificar os elementos sociais impactantes sobre os <i>stakeholders</i> com a implementação dos sistemas térmicos para a destinação de RSU no Brasil	Pesquisa bibliográfica com Bibliometrix (ARIA; CUCCURULLO, 2017).	SCOPUS e Web of Science	2016 à 2022	“waste to energy”, “incineration”, “mass-burning”, “social indicator”, “social life cycle assessment”, “developing country”, “waste management”, “SLCA”, “social impact”, “municipal solid waste”
Discutir os impactos sociais quando da implementação dos sistemas térmicos para a destinação de RSU no Brasil				

Fonte: Autoria própria.

Legenda: RSU – Resíduos sólidos urbanos.

Após a coleta dos dados secundários (Quadro 12), foram definidas as partes interessadas, as categorias de impacto social, os indicadores sociais, as métricas, os questionários, a estratégia de coleta de dados primários e requisitos da qualidade e quantificação dos resultados (MARCHESIN *et al.*, 2022; UNEP, 2020).

A fim de obter uma percepção e uma interpretação de diferentes cenários sociais, foram escolhidos *stakeholders* que atuam em diferentes setores econômicos: o público, privado e de associações. Além disso, foram estabelecidas categorias de impacto social, indicadores sociais e métricas (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019), de modo que as perguntas foram elaboradas em função da percepção do impacto social sobre catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis de cada *stakeholder*, quando da implantação de uma unidade de incineração de RSU com recuperação de energia no Brasil.

As categorias de impacto social, os indicadores sociais e as métricas foram submetidas ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal do Espírito Santo (CEP/UFES) e foram aprovados pelo Parecer Consubstanciado do CEP nº 5.677.372.

Assim, foi possível entrar em contato com cada entrevistado por e-mail e/ou via WhatsApp, durante o período compreendido entre outubro/2022 e janeiro/2023 para enviar o *link* de acesso das perguntas, sendo estas aplicadas através da ferramenta Google Forms para os sete (7) representantes de Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis e Reutilizáveis (OCMRR) da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) Espírito Santo/Brasil, seis (6) gestores públicos municipais da RMGV Espírito Santo/Brasil e onze (11) representantes de empresas que atuam diretamente com gerenciamento de resíduos no Espírito Santo e no Brasil. Esta metodologia foi desenvolvida por IBÁÑEZ-FORÉS *et al.* (2019), porém para avaliar o sistema de gestão de RSU implantado em João Pessoa-PB (Brasil).

Assim, para cada métrica foi elaborada uma pergunta e desenvolvido um questionário específico para cada *stakeholder*, conforme o Apêndice A.

Além disso, para pontuar algumas respostas foi realizada uma análise quantitativa por meio da escala de Likert, utilizada em estudos para compreender as opiniões e as atitudes de um entrevistado, a fim de medir o grau de concordância entre uma frase, variando de positiva à negativa (BEGLAR; NEMOTO, 2014; JOSHI *et al.*, 2015).

Para isso, assume-se que a força e intensidade da experiência é linear, vai desde “concordo totalmente” a “discordo totalmente”, assumindo que as atitudes podem ser medidas, e na utilização de um elemento neutro para que quem não tenha opinião formada (não concordo nem discordo) ter um ponto de fuga (BEGLAR; NEMOTO, 2014; JOSHI *et al.*, 2015).

Foi utilizado o método de estatística descritiva como forma de apresentação de resultados quantificados para facilitar a identificação de categorias de impacto social com melhor e pior comportamento, ou para comparar os diferentes dados (AMEIJEIRAS-ALONSO, 2022). Assim, o tratamento apresentou o desempenho de cada categoria de impacto social em gráfico de barras por meio de porcentagem de repostas de cada entrevistado, sendo possível fazer uma comparação da percepção dos três *stakeholders*.

O Quadro 13 apresenta as categorias de impacto social, indicadores sociais e métricas que foram utilizadas na análise do impacto social sob a percepção dos *stakeholders*.

Quadro 13 - Categorias de impacto social, indicadores sociais e métricas para análise social das partes interessadas.

CATEGORIAS DE IMPACTO SOCIAL	INDICADORES SOCIAIS	MÉTRICAS
1. Direitos trabalhistas	1.1 Possibilidade de associação e de negociação coletiva	1.1.a Formalização de novos catadores em OCMRR ² , novas OCMRR ² ou redes de OCMRR ² 1.1.b Resolução de litígios 1.1.c Contratações trabalhadores (celetistas ou autônomos) 1.1.d Presença sindical
2. Direitos Humanos	2.1 Trabalho infantil	2.1.a Fiscalização ao trabalho de menores de 18 anos 2.1.b Redução do trabalho de menos de 18 anos
3. Condições de trabalho	3.1 Salário Justo 3.2 Horas de trabalho e/ou descanso semanal	3.1 Ampliação de renda dos catadores 3.2 Ampliação das horas semanais efetivamente trabalhadas pelos catadores
4. Igualdade de oportunidades / Discriminação	4.1 Discriminação de gênero 4.2 Regulamentação laboral 4.3 Trabalhadores de classes marginais	4.1. Participação de mulheres trabalhando nas OCMRR ² 4.2 Controle de documentados nas OCMRR ² 4.3 Incentivo à reeducação social para presidiários em OCMRR ²
5. Saúde & Segurança	5.1 Saúde e segurança dos trabalhadores 5.2 Saúde a longo prazo	5.1 Utilização de EPI (equipamentos de proteção individual) no trabalho pelos catadores 5.2.a. Aplicação de vacinas nos catadores
6. Benefícios trabalhistas	6.1 Empregos legal com benefícios / segurança sociais 6.2 Trabalhadores e familiares com seguro de saúde	6.1 Ampliação de controle de direitos trabalhistas dos catadores 6.2 Ampliação da seguridade social dos catadores
7. Condições socioeconômicas	7.1 Grau de educação dos trabalhadores 7.2 Características sociais da população 7.3 Condições de vida seguras e saudáveis (acesso a recursos materiais)	7.1.a Nível de escolaridade x qualidade de separação resíduos recicláveis e rejeitos 7.1.b Nível de escolaridade x criação de novas parcerias comerciais 7.1.c Ampliação de formação escolar em OCMRR ² 7.2 Rendimento familiar mensal total 7.3 Qualidade das casas dos trabalhadores
8. Participação e satisfação da comunidade	8.1 Satisfação do cliente / cidadão 8.2 Participação do cliente / cidadão	8.1 Satisfação da sociedade com o aproveitamento energético 8.2 Ampliação da cobertura de coleta seletiva pela prefeitura
9. Relação dos atores da cadeia de valor	9.1 Transparência / corrupção	9.1.a Transparência na destinação de RSU ¹ 9.1.b Apresentação de relatórios periódicos de empresas públicas de resíduos secos
10. Desenvolvimento profissional	10.1 Consciência ambiental do trabalhador	10.1 Treinamentos realizados para os catadores
11. Desenvolvimento Local (repercussão socioeconômica)	11.1 Desenvolvimento de consciência e responsabilidade ambiental 11.2 Integração local de trabalhadores formais oriundos do setor informal	11.1.a Sensibilização ambiental da sociedade 11.1.b Informação para a sociedade sobre gestão de resíduos 11.2 Mão de obra formalizada
12. Governança	12.1 Compromissos públicos em matéria de sustentabilidade	12.1 Ampliação das possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição em Aterro Sanitário (hierarquia da PNRS ³ para destinações)

Fonte: Adaptado de IBÁÑEZ-FORÉS *et al.* (2019).

Legenda: ¹RSU – Resíduos Sólidos Urbanos. ²OCMRR - Organizações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

³PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Etapa 1 - Avaliação financeira da implantação da incineração de resíduos sólidos não recicláveis por faixa populacional no Brasil

Conforme metodologia descrita neste estudo, para iniciar a avaliação financeira foi determinado o poder calorífico dos RSU no Brasil a partir da fração dos RSU combustíveis (resíduos orgânicos 51,40%, papel e papelão 13,10% e plásticos 13,50%), bem como de seus respectivos valores caloríficos (2.979 kJ.kg^{-1} , $11.418 \text{ kJ.kg}^{-1}$ e $34.279 \text{ kJ.kg}^{-1}$) (GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

Assim, foi possível obter o PCI_t sob o valor de 7.655 kJ.kg^{-1} , ficando dentro da faixa indicada por TISI (2019), RODRIGUES *et al.* (2022) e SINDICIC (2011) para o Brasil, onde o PCI_t pode variar entre 6.500 e 9.000 kJ.kg^{-1} . Segundo os autores, na Europa e EUA, este valor pode variar entre 10.000 e $11.170 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Vale ressaltar ainda que, para definir a viabilidade técnica da incineração como forma de tratamento térmico, estudos garantem que o PCI menor que 5.000 kJ.kg^{-1} é tecnicamente inviável, entre 5.000 kJ.kg^{-1} a 6.500 kJ.kg^{-1} , a usina deverá dispor de algum pré-tratamento para elevar o poder calorífico, e acima de 6.500 kJ.kg^{-1} é tecnicamente viável (EPE, 2008; JAUREGUI *et al.*, 2017; SINDICIC, 2011).

O cálculo da geração elétrica foi efetuado utilizando o potencial elétrico juntamente com o fator de capacidade de produção de energia elétrica da incineração de 80% (RODRIGUES *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2019). Com esses cálculos, os resultados obtidos são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 - Estimativa de produção de energia e potência para faixas populacionais brasileiras.

Faixa populacional		Geração de RSU combustível (ton.ano ⁻¹)	Potência (kW)	Energia (MWh.ano ⁻¹)
Menor ou igual a 30.000	Máx.	8.456	616	4.315
	Mín.	8.627	628	4.402
Entre 30.001 e 100.000	Máx.	28.755	2.094	14.674
	Mín.	27.047	1.970	13.803
Entre 100.001 e 250.000	Máx.	67.616	4.924	34.507
	Mín.	74.734	5.442	38.139
Entre 250.001 e 1.000.000	Máx.	298.935	21.769	152.556
	Mín.	301.782	21.976	154.010
Entre 1.000.001 e 4.000.000	Máx.	1.207.128	87.905	616.038
	Mín.	1.150.188	83.758	586.979

Fonte: Autoria própria.

Legenda: RSU – resíduos sólidos urbanos

Conforme demonstrado no Quadro 14, a incineração é uma alternativa de tratamento térmico de RSU com geração de eletricidade para o Brasil, ao passo que a geração de RSU está diretamente ligada à

capacidade de geração de energia elétrica (SILVA *et al.*, 2020). A exemplo disso, DALMO *et al.* (2019) concluíram que a eletricidade gerada por usinas de incineração no estado de São Paulo/Brasil poderia gerar 5,7 TWh, o potencial atenderia 21,07% da demanda residencial de eletricidade no Estado.

Por outro lado, SANTOS *et al.* (2019) perceberam que enquanto a energia gerada a partir do biogás em um aterro sanitário poderia suprir um consumo médio de 38.000 habitantes de São José dos Campos/São Paulo/Brasil (6,3% da população total), se a incineração fosse considerada, a eletricidade produzida poderia atender a 107.688 habitantes, cerca de 48,9% da população em questão.

Ademais, para a avaliação financeira foram obtidos o CAPEX, o OPEX e as receitas da incineração foram determinadas em função da população e conseqüentemente da geração de RSU conforme realizado em estudos similares (DALMO, F. C. *et al.*, 2019; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FOSTER *et al.*, 2021; JAUREGUI *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2022; SILVA *et al.*, 2020; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021).

Por conseguinte, a partir das premissas econômicas metodológicas foi possível dimensionar os resultados de CAPEX e OPEX (Quadro 15), e para a avaliação financeira. Sendo importante ressaltar que, será considerado como receita a taxa de destinação final de RSU a R\$ 110,00 por tonelada (BRASIL, 2021) e taxa de venda de energia a R\$ 603,00 por MWh, correspondente a uma usina por disponibilidade (EPE, 2022).

Quadro 15 - Premissas para a avaliação financeira.

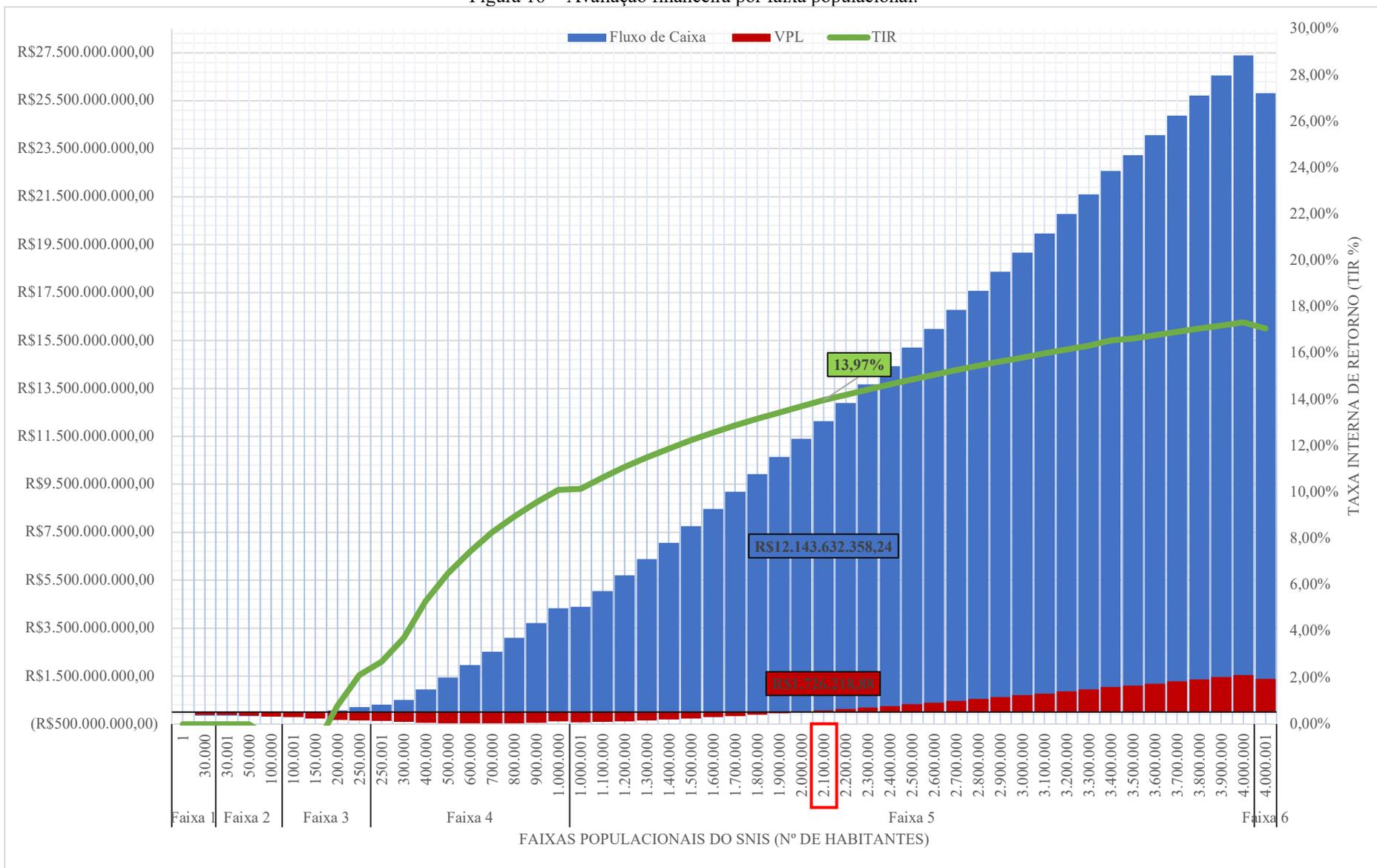
Faixa populacional		CAPEX (R\$)	OPEX (R\$.ano ⁻¹)	Receita com destinação de RSU (R\$.ano ⁻¹)	Receita com venda de energia elétrica (R\$.ano ⁻¹)
Menor ou igual a 30.000	Máx.	R\$ 22.325.022,97	R\$ 893.000,92	R\$ 930.114,90	R\$ 2.602.047,17
	Mín.	R\$ 22.694.804,80	R\$ 907.792,19	R\$ 948.936,73	R\$ 2.654.702,26
Entre 30.001 e 100.000	Máx.	R\$ 60.908.114,06	R\$ 2.436.324,56	R\$ 3.163.017,00	R\$ 8.848.712,59
	Mín.	R\$ 57.925.333,57	R\$ 2.317.013,34	R\$ 2.975.144,75	R\$ 8.323.129,72
Entre 100.001 e 250.000	Máx.	R\$ 122.793.616,22	R\$ 4.911.744,65	R\$ 7.437.787,50	R\$ 20.807.616,23
	Mín.	R\$ 133.296.603,29	R\$ 5.331.864,13	R\$ 8.220.745,38	R\$ 22.997.983,61
Entre 250.001 e 1.000.000	Máx.	R\$ 415.438.604,85	R\$ 16.617.544,19	R\$ 32.882.850,00	R\$ 91.991.566,49
	Mín.	R\$ 418.680.555,31	R\$ 16.747.222,21	R\$ 33.196.053,20	R\$ 92.867.769,51
Entre 1.000.001 e 4.000.000	Máx.	R\$ 1.304.883.165,57	R\$ 52.195.326,62	R\$ 132.784.080,00	R\$ 371.470.706,57
	Mín.	R\$ 1.254.193.178,40	R\$ 50.167.727,14	R\$ 126.520.711,63	R\$ 353.948.591,92

Fonte: Autoria própria.

Legenda: RSU – resíduos sólidos urbanos; CAPEX - *capital expenditure*; OPEX – *operational expenditure*.

Assim, para o período de 2023 a 2043, utilizando como parâmetro a taxa Selic de 2023, e 13,75%, como taxa mínima de atratividade (RODRIGUES *et al.*, 2022) foi possível obter o Fluxo de Caixa VPL e TIR da incineração por cada faixa populacional brasileira, conforme Figura 16.

Figura 16 - Avaliação financeira por faixa populacional.



Nota-se na Figura 16 que a implantação da incineração no Brasil é financeiramente viável em cidades com população acima de 2.100.000 habitantes, pois superam a taxa mínima de atratividade de 13,75%. O fluxo de caixa e o VPL são positivos, com uma TIR de 13,97%, em cidades acima dessa quantidade populacional nas características de RSU da faixa populacional 5.

Nas cidades que se enquadram na faixa populacional 6, a incineração é ainda mais lucrativa, com uma TIR acima de 17%. Porém, para as cidades com população inferior a 2.100.000 habitantes, que se enquadram nas faixas populacionais de 1, 2, 3, 4 e parte da 5, o VPL é negativo, e mesmo que a TIR e o fluxo de caixa sejam favoráveis fica financeiramente inviável.

Estes resultados corroboram com estudos realizados no Brasil e demais países em desenvolvimento, tais como México e China (DALMO, F. C. *et al.*, 2019; ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2022; SANTOS, R. E. *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020; TAYEH; ALSAYED; SALEH, 2021). É economicamente viável em cidades e/ou centros urbanos com população acima de 2.100.000 habitantes, com geração de RSU acima de aproximadamente 2.000 ton.dia⁻¹.

Os projetos de incineração exigem altos níveis de investimento e custos operacionais (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022). No entanto, para que seja possível a aceleração do desenvolvimento da incineração no Brasil é necessária a aplicação de medidas como a integração de subsídios do governo que auxiliam no financiamento de projetos, limitação de infraestrutura apenas ao equipamento necessário em função da capacidade instalada e das características dos resíduos, bem como da sobretaxação de aterros sanitários (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE *et al.*, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2022; TISI, 2019).

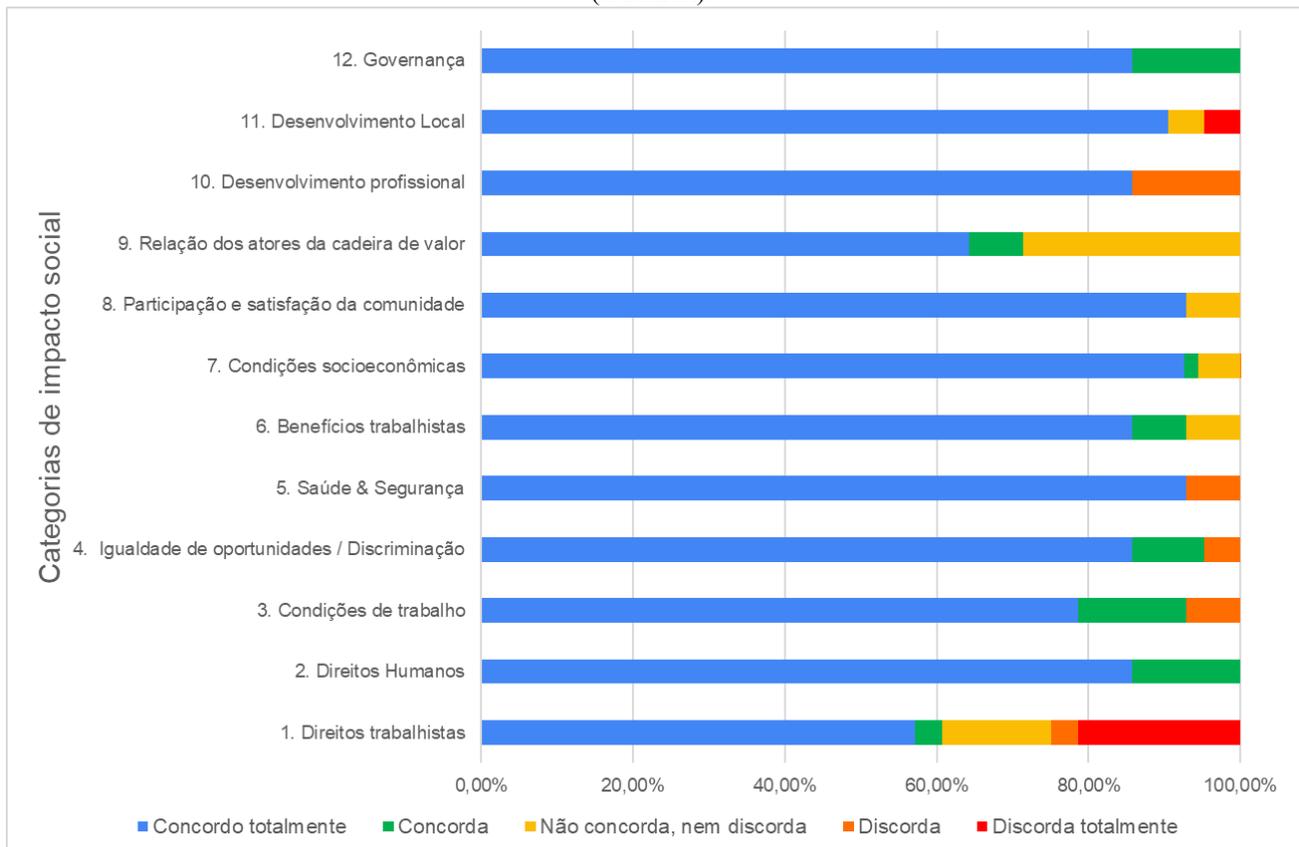
3.3.2. Etapa 2 - Impacto social da implantação da unidade de recuperação energética a partir da incineração de resíduos não recicláveis

A partir da metodologia apresentada neste estudo, mediante a aplicação de questionários junto aos *stakeholders* (OCMRR, prefeituras e empresas que atuam diretamente com gerenciamento de resíduos), foi possível descrever o entendimento das partes interessadas sob a ótica da implantação de unidades de incineração a partir de RSU para recuperação energética, em complementação à reciclagem material daquele resíduo próprio para a comercialização.

Os referidos questionários foram elaborados com base nas métricas das categorias de impacto social, (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022), a seguir: direitos trabalhistas, direitos humanos, condições de trabalho, igualdade de oportunidade/discriminação, saúde e segurança,

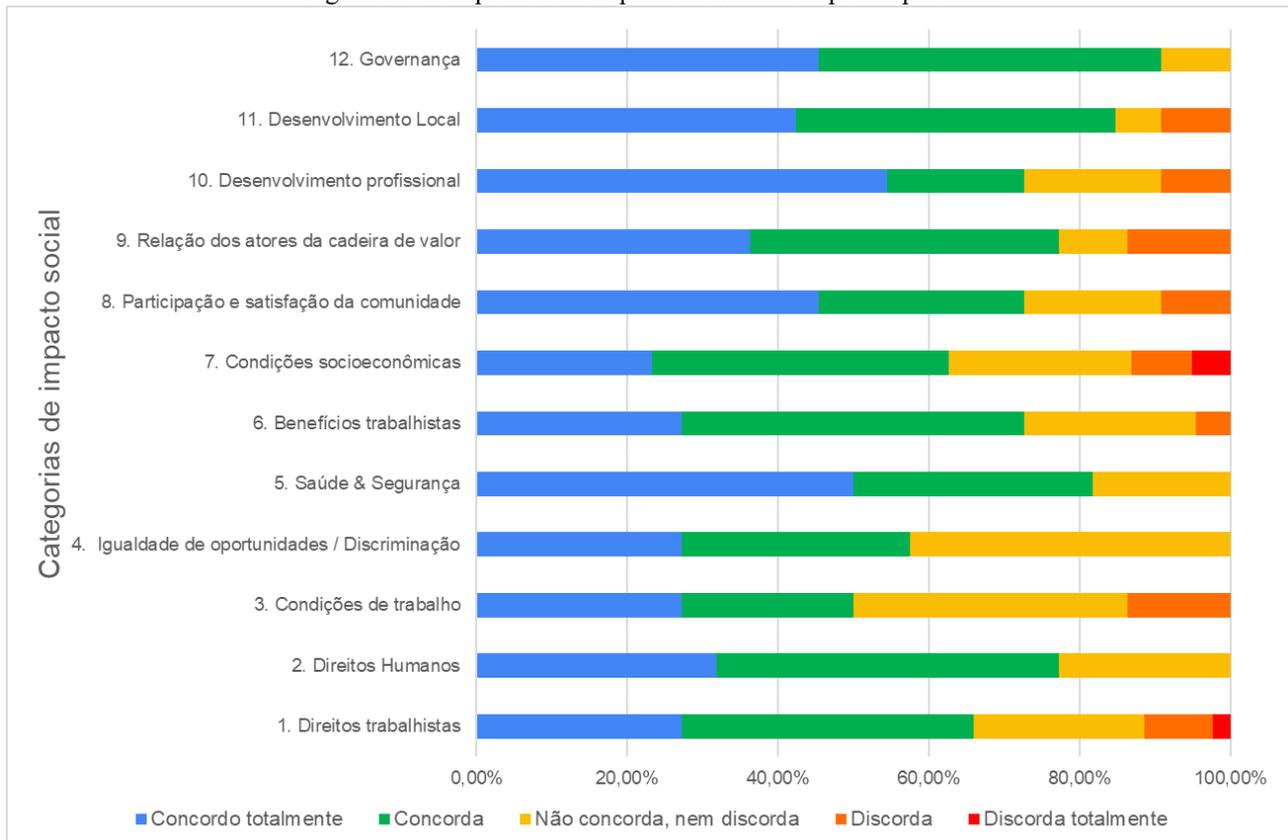
benefícios trabalhistas, condições socioeconômicas, participação e satisfação da comunidade, relação dos atores na cadeia de valor, desenvolvimento profissional, desenvolvimento local e governança. Os resultados foram esboçados por meio de gráficos apresentados nas Figuras 17, 18 e 19, demonstrando a perspectiva de impacto social da implantação de uma unidade de incineração a partir de RSU com recuperação energética de cada *stakeholder*.

Figura 17 - Perspectiva de impacto social das Organizações de Catadores e Materiais Reutilizáveis e Recicláveis (OCMRR).



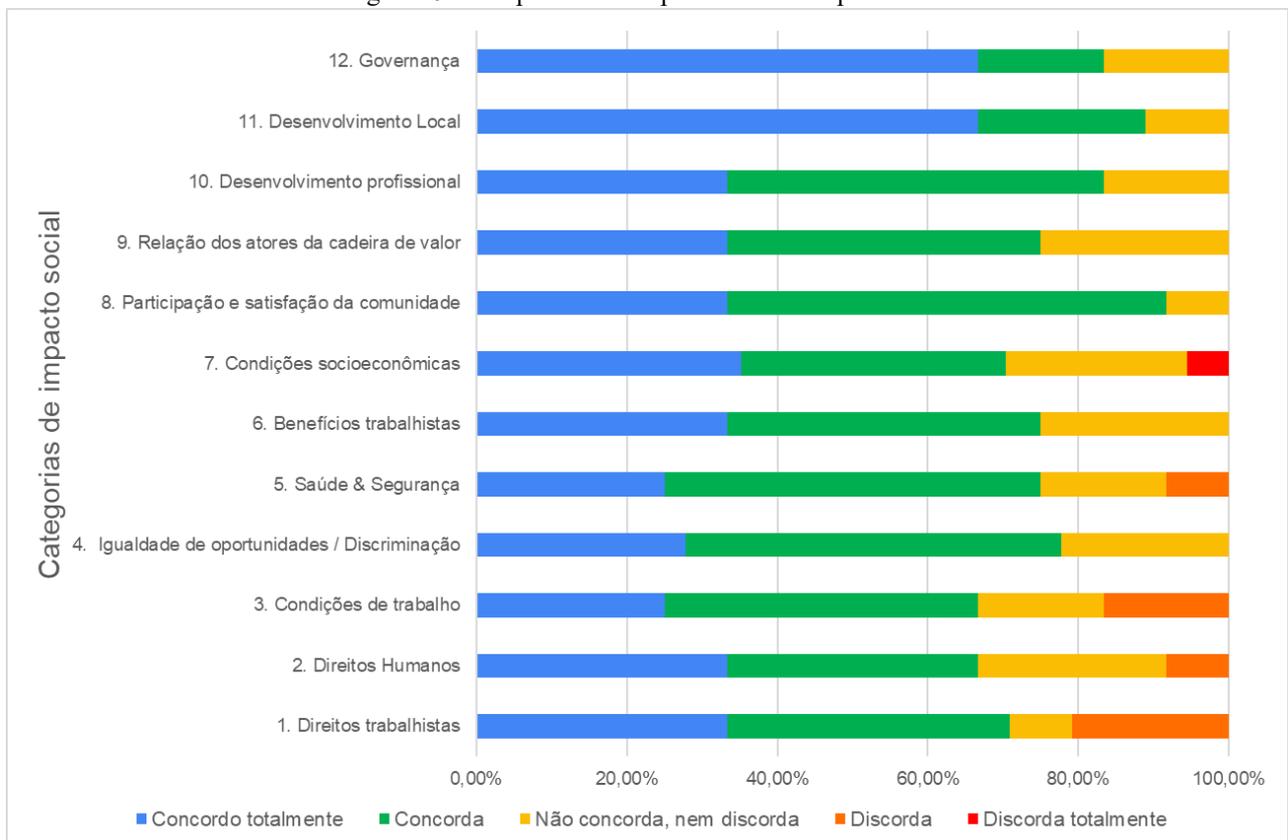
Fonte: Própria.

Figura 18 - Perspectiva de impacto social das empresas privadas.



Fonte: Própria.

Figura 19 - Perspectiva de impacto social das prefeituras.



Fonte: Própria.

Em uma primeira análise, foi possível perceber uma percepção positiva dos três *stakeholders*, sendo que para os representantes das OCMRR, o cenário da implantação de uma unidade de incineração com recuperação energética é ainda mais favorável do que para os representantes das prefeituras e empresas. A partir da viabilidade técnica e financeira da incineração em grandes centros urbanos, é indiscutível a evolução das alternativas de tratamento térmico de RSU no Brasil e a influência no pilar social (FIDELIS *et al.*, 2020).

Na análise das categorias de impacto social “participação e satisfação da comunidade”, “relação dos atores da cadeia de valor”, “desenvolvimento local” e “governança” foi observada a percepção de todos os *stakeholders* sobre a evolução da sensibilização ambiental e da credibilidade por parte da sociedade com o tema gerenciamento de resíduos sólidos. Também se evidenciou as expectativas de ampliação da cobertura de coleta seletiva, de novos sistemas de tratamento incluindo o aproveitamento energético indo além da disposição final em aterros sanitários, bem como da maior transparência e disponibilização das informações sobre o tema.

Na sua totalidade, as OCMRR concordam com a ampliação das possibilidades de destinação final além dos aterros sanitários. Porém, para algumas análises foram percebidas algumas diferenças, onde 25% (vinte e cinco por cento) dos representantes das prefeituras e 30% (trinta por cento) das OCMRR não concordam e nem discordam que ocorrerão mudanças na transparência da destinação final de RSU e 14% (quatorze por cento) das empresas discordam. E com relação a participação e satisfação da comunidade 10% (dez por cento) das empresas discordam que haverá mudanças.

Reforçando a afirmativa, as empresas atuantes vem buscando tecnologias que se complementem na busca da sustentabilidade e da promoção da economia circular, principalmente com a utilização de energias renováveis (NANDA; BERRUTI, 2021; VLACHOKOSTAS; MICHAILIDOU; ACHILLAS, 2021).

O cenário vai de encontro ao objetivo dos gestores municipais que possuem a obrigação de realizar uma gestão de RSU eficiente e transparente, além da responsabilidade da implementação de novas alternativas de gerenciamento e destinação final dos RSU (KHAN *et al.*, 2022; SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020; VLACHOKOSTAS; MICHAILIDOU; ACHILLAS, 2021).

Além disso, os catadores serão essenciais para criar sistemas mais eficientes de segregação dos materiais, reduzindo os custos de triagem para as plantas de tratamento térmico de RSU via incineração (SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020).

Noutro giro, avaliou-se o entendimento dos *stakeholders* no que concerne às condições de trabalho *lato sensu* mediante as categorias de impacto social: direitos trabalhistas, direitos humanos, condições

de trabalho, saúde e segurança, benefícios trabalhistas e desenvolvimento profissional. Neste contexto constatou-se que as partes interessadas em sua maioria concordam que haverá um avanço no que tange a possibilidade de associação e de negociação coletiva, redução e fiscalização do trabalho infantil, propagação da seguridade social dos catadores, eficiência das medidas de saúde e segurança, capacitação e treinamentos, além da ampliação da renda dos catadores.

Por unanimidade, os representantes das OCMRR, concordam com a redução e fiscalização do trabalho infantil. Entretanto, 25% (vinte e cinco por cento) dos representantes das OCMRR, 12% (doze por cento) das empresas e 21% (vinte e um por cento) das prefeituras discordam das evoluções dos direitos trabalhistas dos catadores e aproximadamente 7% (sete por cento) dos OCMRR discordam das melhorias nas condições dos trabalhos e na eficiência das medidas de saúde e segurança.

Em continuidade à análise, foi possível perceber a compreensão dos *stakeholders* com relação a maior participação das mulheres nas OCMRR, incentivo a reeducação social de presidiários em OCMRR, além do aumento do nível de escolaridade dos trabalhadores, bem como da qualidade das residências dos catadores. Tais circunstâncias foram avaliadas com base nas categorias de impacto social: igualdade de oportunidade / discriminação e condições socioeconômicas.

Dessa forma, as análises vão de encontro a necessidade de mudança da realidade brasileira, onde catadores trabalham precariamente nas ruas e “lixões”, tanto individualmente, quanto coletivamente, mediante organização em cooperativas ou associações (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021).

Este mercado proporciona baixos salários, falta de benefícios, longas jornadas de trabalho, há precariedade das condições trabalho, conhecimento limitado sobre a possibilidade da valorização dos RSU e obtenção de apoio financeiro e subsídios de órgãos governamentais, falta de estrutura física e de equipamentos (FIDELIS *et al.*, 2020; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019, DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; ZON *et al.*, 2020; R. SIMAN *et al.*, 2022).

Com a ampliação nas oportunidades de destinação final do que antes seria tratado como rejeito, passa a existir possibilidade de inclusão socioprodutiva dos trabalhadores informais pela abertura de mercado (ALAMU *et al.*, 2021; KHAN; KABIR, 2020; MARCHESIN *et al.*, 2022).

O desenvolvimento e implantação de tecnologias *WTE* no Brasil torna-se, portanto, uma forma de impulsionar a reciclagem como complementação de alternativas de destinação de resíduos e estimular os catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis (FERRAZ DE CAMPOS *et al.*, 2021; GUTIERREZ-GOMEZ *et al.*, 2021; VYAS *et al.*, 2022).

O incentivo se dará por meio da qualificação profissional como forma de agregar os conhecimentos práticos aos teóricos, bem como da identificação de novas formas de valorização dos resíduos (IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022). Em consequência disso, fomenta a

comercialização dos produtos recicláveis e não recicláveis (FIDELIS *et al.*, 2020). Esses trabalhadores poderão investir em sua saúde e da sua família, bem como melhorar as condições de qualidade e segurança do trabalho (FIDELIS *et al.*, 2020; IBÁÑEZ-FORÉS *et al.*, 2019; MARCHESIN *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022).

Em integração as tecnologias WTE, os administradores locais devem sugerir soluções formais para os trabalhadores informais diretamente ligados a reciclagem de RSU (SIDDIQI; HARAGUCHI; NARAYANAMURTI, 2020). É importante ressaltar que, com as OCMRR sendo devidamente remuneradas pelos serviços prestados, há a possibilidade de se estruturarem e conseguirem aumentar a sua demanda de serviços e consequentemente obterem melhores ganhos e benefícios (MARCHESIN *et al.*, 2022; VYAS *et al.*, 2022).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo traz informações a respeito do processo da avaliação financeira da implantação de unidade de tratamento térmico com recuperação de energia a partir da incineração de RSU, uma vez que, sabe-se que tecnologias desse porte estão sujeitas a custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) dispendiosos, aos quais são determinados a partir da geração de resíduos de uma determinada faixa populacional. Sendo assim, foi identificado que para as condições gravimétricas dos RSU no Brasil, apenas para cidades com faixas populacionais acima de 2.100.000 de habitantes a tecnologia *mass burning* é financeiramente viável.

Dessa forma, sabendo da positiva avaliação financeira, este artigo faz uma integração com a percepção social sob a ótica da implantação da incineração de RSU com recuperação energética nas cidades e conglomerados urbanos que se enquadram nas faixas populacionais 5 e 6 do SNIS. Nessas cidades há um maior número de catadores, com a possibilidade de sofrerem maior influência quando da implantação dessas novas alternativas de destinação final e tratamento de RSU no Brasil.

Por meio de uma abordagem participativa das partes interessadas que atuam diretamente com o gerenciamento de resíduos composta por representantes das OCMRR, das empresas e das prefeituras foi possível comparar e interpretar de maneira qualitativa e quantitativa o entendimento e comportamento social com relação à evolução do tema no Brasil.

É inegável a percepção positiva, principalmente das OCMRR no que diz respeito a evolução nos direitos humanos, condições de trabalho, saúde e segurança, benefícios trabalhistas, bem como da ampliação das possibilidades de destinação de RSU além da disposição final em aterros sanitários (hierarquia da PNRS) dos catadores quando da implantação da incineração de RSU com recuperação energética.

Já os representantes das empresas e prefeituras, possuem um entendimento um pouco mais conservador no que diz respeito aos direitos humanos, condições de trabalho, saúde e segurança e benefícios trabalhistas. Os três *stakeholders* mantiveram o conservadorismo com relação aos direitos trabalhistas dos catadores, de modo que parte dos representantes discordam que haverá alguma evolução neste tema.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou fazer uma revisão bibliográfica da evolução das tecnologias WTE no mundo e no Brasil, bem como a análise de viabilidade socioeconômica da implantação da incineração a partir de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética no Brasil. Para isso foram considerados quatro objetivos secundários e dois capítulos.

O Capítulo 2 descreveu o desenvolvimento das tecnologias WTE no mundo, com base nas práticas dos países em que as tecnologias estão mais amadurecidas. Demonstrou ainda a evolução dos aspectos normativos do Brasil, cuja aplicação dessas novas alternativas de destinação final de RSU está em fase embrionária, porém com algumas mudanças legislativas que incentivam o tratamento térmico de RSU no país.

Além disso, foram identificados os aspectos técnicos das três tecnologias mais utilizadas em todo o mundo, sendo a pirólise, a gaseificação e a incineração. Dessa forma, após uma comparação técnica entre as tecnologias, foi possível perceber que a pirólise não é indicada para resíduos mistos, não sendo utilizada para a comparação do potencial energético com as outras tecnologias.

Além disso, no processo de gaseificação é obrigatório a triagem e a briquetagem dos RSU, a fim de homogeneizar e reduzir a umidade da composição gravimétrica. Assim, a partir das características gravimétricas dos RSU por macrorregião brasileira e geração de RSU foi realizada uma comparação do potencial energético da gaseificação e da incineração. Contudo, observou-se que a incineração além de possuir menor restrição em seu processo, possui maior eficiência térmica e conseqüentemente maior geração de energia por tonelada de RSU, podendo contribuir com a evolução da matriz energética brasileira.

O Capítulo 3, a partir do maior potencial de geração de energia por incineração de RSU, foi realizada a avaliação financeira da implantação da tecnologia no Brasil num período de 20 anos. A partir das seis faixas populacionais estabelecidas pelo SNIS foi realizado o dimensionamento da geração de RSU, bem como dos custos de investimento (CAPEX) e operacionais (OPEX) e das receitas com taxa de destinação final de RSU e venda de energia elétrica para o mercado regulado.

Com isso, mediante os indicadores financeiros VPL e TIR, constatou-se que, para as faixas populacionais cinco e seis, quando o número de habitantes ultrapassa um milhão e novecentos, há avaliação financeira positiva da implantação da unidade de incineração a partir de RSU com recuperação energética.

Além disso, no Capítulo 3, tendo em vista que as faixas populacionais cinco e seis são aglomerados urbanos densos, e que possuem a atuação mais presente dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, foi realizada uma análise do impacto social com aplicação de questionários aos representantes de OCMRR, prefeituras e empresas, a fim de conhecer as respectivas perspectivas sociais da implantação das unidades de incineração de RSU com recuperação energética. Os resultados apontam que, de acordo com a opinião dos entrevistados, os catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis serão beneficiados com o desenvolvimento das alternativas de tratamento térmico de RSU, com melhores condições de trabalhos, aumento na renda mensal salarial, melhores benefícios trabalhistas e previdenciários, além da evolução da conscientização ambiental dos cidadãos com maior participação na coleta seletiva.

4.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados sugerem que estudos futuros devem focar em análises de sensibilidade com a utilização de cenários de aumento da cobertura de coleta de RSU, bem como da elevação das taxas de reciclagem para resíduos secos e úmidos e sobre o efeito da implementação de políticas e incentivos às tecnologias WTE. Uma análise de tendência poderá contribuir para apoiar as metas de eficiência de gestão de resíduos, tornar às tecnologias WTE mais atrativas financeiramente para cidades densidade populacionais menor, além de incentivar o mercado de reciclagem.

Em relação aos dados relacionados aos parâmetros técnicos, estes foram fatores limitantes ao presente estudo. Uma composição mais detalhada das tecnologias pode ser mais eficiente para conhecer às limitações técnicas a fim de garantir um dimensionamento mais eficaz das despesas de capital e de operação, bem como no que diz respeito a produção de energia e geração de receitas.

Outra sugestão é aprofundar os estudos das tecnologias de gaseificação e pirólise para construir banco de dados comparando o potencial de aplicação, pois sabe-se que no caso da pirólise ainda há poucas informações.

CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, M. *et al.* Financial feasibility of waste to energy strategies in the United Arab Emirates. **Waste Management**, [s. l.], v. 82, p. 207–219, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.029>.

ABDALLAH, M.; HAMDAN, S.; SHABIB, A. A multi-objective optimization model for strategic waste management master plans. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 284, p. 124714, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124714>.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**, [s. l.], p. 51, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>.

ABNT. ABNT NBR 16849/2020 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos - Requisitos. Brasil, 2020.

ABREN. **Proposta para o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES)**. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Brasília-DF: Abren, Outubro, 2020.

ABREN. **Estudo acerca dos critérios de precificação e contratação de energia de usinas Waste-to-energy – sugestões para consideração na consulta pública sobre a portaria MME Nº 480/2021**. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. Brasília-DF: Abren, Fevereiro, 2021.

AGATON, C. B. *et al.* Economic analysis of waste-to-energy investment in the Philippines: A real options approach. **Applied Energy**, [s. l.], v. 275, n. April, p. 115265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115265>.

AGBEJULE, A. *et al.* Application of multi-criteria decision-making process to select waste-to-energy technology in developing countries: The case of Ghana. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 22, 2021.

AGHDAM, E. F. *et al.* Determination of gas recovery efficiency at two Danish landfills by performing downwind methane measurements and stable carbon isotopic analysis. **Waste Management**, [s. l.], v. 73, p. 220–229, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.049>.

ALAM, O.; QIAO, X. An in-depth review on municipal solid waste management, treatment and disposal in Bangladesh. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 52, p. 101775, 2020.

ALAMU, S. O. *et al.* Sustainability assessment of municipal solid waste in Baltimore USA. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1–12, 2021.

ALAO, M. A.; POPOOLA, O. M.; AYODELE, T. R. Selection of waste-to-energy

technology for distributed generation using IDOCRIW-Weighted TOPSIS method: A case study of the City of Johannesburg, South Africa. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 178, p. 162–183, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.031>.

AMEIJEIRAS-ALONSO, J. **Estatística descritiva**. [S. l.]: Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, 2022. *E-book*. Disponível em: http://www.usc.gal/libros/index.php?id_product=1059&controller=product.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resultado de Leilões**. [s. l.], 2021b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>. Acesso em: 16 mar. 2023.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 1.047, DE 8 DE NOVEMBRO DE 2022. Altera a Resolução Normativa n° 1.000, de 7 de dezembro de 2021, para regular a Lei n° 11.445, de 2007, com redação dada pela Lei n° 14.026, de 2020, que possibilita a cobrança de taxas ou tarifas decorrentes da prestação de serviço de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos na fatura de energia elétrica.

ARACIL, C. *et al.* Implementation of waste-to-energy options in landfill-dominated countries: Economic evaluation and GHG impact. **Waste Management**, [s. l.], v. 76, p. 443–456, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.039>.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 203, p. 718–735, 2018.

AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. **Applied Energy**, [s. l.], v. 201, p. 200–218, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.097>.

AZAM, M. *et al.* Status, characterization, and potential utilization of municipal solid waste as renewable energy source: Lahore case study in Pakistan. **Environment International**, [s. l.], v. 134, n. October 2019, p. 105291, 2020.

AZIS, M. M.; KRISTANTO, J.; PURNOMO, C. W. A techno-economic evaluation of municipal solid waste (Msw) conversion to energy in indonesia. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 13, 2021.

BRASIL. DECRETO N° 10.117, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2019 - Dispõe sobre a qualificação de projetos para ampliação da capacidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República.

BRASIL. DECRETO N° 10.936, DE 12 DE JANEIRO DE 2022 - Regulamentar a Lei n°

12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS.

BRASIL. DECRETO Nº 11.043, DE 13 DE ABRIL DE 2022 - Aprova p Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES).

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020 - Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana: Programa Lixão Zero**. Brasil, 2019.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Financiamento**. 2021a. Disponível em: < www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/bndes-finem >. Acesso em: 5 jan. 2023.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Taxa de juros**. 2021b. Disponível em: < <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/taxa-de-juros/>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

BEGLAR, D.; NEMOTO, T. Developing Likert-scale questionnaires. **JALT2013 Conference Proceedings**, [s. l.], p. 1–8, 2014.

BERTANZA, G. *et al.* Implementation of circular economy in the management of municipal solid waste in an Italian medium-sized city: A 30-years lasting history. **Waste Management**, [s. l.], v. 126, p. 821–831, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.017>.

BIANCO, I.; PANEPINTO, D.; ZANETTI, M. Environmental impacts of electricity from incineration and gasification: How the lca approach can affect the results. **Sustainability**

(Switzerland), [s. l.], v. 14, n. 1, 2022.

BISINELLA, V. *et al.* Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage. **Waste Management and Research**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 79–95, 2022.

BOLOY, R. A. M. *et al.* Waste-to-Energy Technologies Towards Circular Economy: a Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. **Water, Air, and Soil Pollution**, [s. l.], v. 232, n. 7, 2021.

CARDOSO, M. T. (2019). Energy from Waste Regulation: Suggestions to Brazil based on the Sweden Study Case (Portuguese). Doctorate Thesis, University of São Paulo, **Environmental Energy Institute**. Retrieved on February 21, 2020. <https://doi.org/10.37704/2022.01.178>

CARDOZO, B. C.; MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 123–131, 2021.

CHAVANDO, J. A. M. *et al.* Snapshot review of refuse-derived fuels. **Utilities Policy**, [s. l.], v. 74, n. November 2021, 2022.

CHICKERING, G. W.; KRAUSE, M. J.; TOWNSEND, T. G. Determination of as-discarded methane potential in residential and commercial municipal solid waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 76, p. 82–89, 2018.

CHU, Z. *et al.* Charging for municipal solid waste disposal in Beijing. **Waste Management**, [s. l.], v. 94, p. 85–94, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.051>.

COLVERO, D. A. *et al.* Economic analysis of a shared municipal solid waste management facility in a metropolitan region. **Waste Management**, [s. l.], v. 102, n. August 2014, p. 823–837, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.033>.

CUDJOE, D.; ACQUAH, P. M. Environmental impact analysis of municipal solid waste incineration in African countries. **Chemosphere**, [s. l.], v. 265, p. 129186, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129186>.

CUDJOE, D.; WANG, H. Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 237, n. July, p. 107470, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470>.

DALMO, F. C. *et al.* Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 212, p. 461–474, 2019.

DANISH, M. S. S. *et al.* A novel transdisciplinary paradigm for municipal solid waste to energy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 233, p. 880–892, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.402>.

DASTJERDI, B. *et al.* A systematic review on life cycle assessment of different waste to energy valorization technologies. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 290, p. 125747, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125747>.

DE LARA FILHO, M. O.; UNSIHUAY-VILA, C.; DA SILVA, V. R. G. R. Integrated project of a smart microgrid allied with energy management: An initiative to reduce electrical energy costs. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 62, n. specialissue, p. 1–8, 2019.

DING, Y. *et al.* A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 293, 2021.

DONG, J. *et al.* Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 196, n. May, p. 497–512, 2019.

DONG, J. *et al.* Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 626, p. 744–753, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>.

DOS SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 41, n. January, p. 587–600, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.029>.

DUTRA, Renato Meira Sousa, YAMANE, Luciana Harue; SIMAN, Renato Ribeiro. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste picker's organization: A case study of 16 Brazilian cities. **Waste Management**, [S.1], v. 77, n. 2018, p.50-58, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.009>.

ELHASSAN, R. M. Potential Opportunities for Waste to Energy and Recycling in the Kingdom of Saudi Arabia. **2021 6th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications, ICREGA 2021**, [s. l.], p. 76–81, 2021.

EPE, E. de P. E. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Governo Federal, 2008.

EPE, E. de P. E. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, Governo Federal, 2008.

ESCAMILLA-GARCÍA, P. E. *et al.* Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 31, 2020.

ESPÍRITO SANTO. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo. Vitória, 2019.

Disponível em: <https://seama.es.gov.br/plano-estadual-de-residuos-solidos>. Acesso em: 9 agosto. 2021.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J. M. *et al.* Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. **Waste Management**, [s. l.], v. 67, p. 360–374, 2017.

FERRAZ DE CAMPOS, V. A. *et al.* A review of waste management in Brazil and Portugal: Waste-to-energy as pathway for sustainable development. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 178, p. 802–820, 2021.

FERREIRA, E. T. de F.; BALESTIERI, J. A. P. Comparative analysis of waste-to-energy alternatives for a low-capacity power plant in Brazil. **Waste Management and Research**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 247–258, 2018.

FERREIRA DE OLIVEIRA LEITE, F. *et al.* Evaluation of technological alternatives for the treatment of urban solid waste: A case study of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 330, n. October 2020, 2022.

FIDELIS, R. *et al.* Socio-productive inclusion of scavengers in municipal solid waste management in Brazil: Practices, paradigms and future prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 154, n. July 2019, p. 104594, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104594>.

FOSTER, W. *et al.* Waste-to-energy conversion technologies in the UK: Processes and barriers – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 135, n. January 2020, p. 110226, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110226>.

GALAVOTE, Tania. Efeitos da implementação de políticas públicas na expectativa de produção de energia em aterros sanitários brasileiros. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2021.

GEMAR, G.; SOLER, I. P.; SÁNCHEZ-TEBA, E. M. Waste management: Valorisation is the way. **Foods**, [s. l.], v. 10, n. 10, 2021.

GHINEA, C. *et al.* Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 182, p. 80–93, 2016.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information and Libraries Journal**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009.

GUTIERREZ-GOMEZ, A. C. *et al.* Energy recovery potential from Brazilian municipal solid waste via combustion process based on its thermochemical characterization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 293, p. 126145, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126145>.

GUTIÉRREZ, A. S.; MENDOZA FANDIÑO, J. M.; CABELLO ERAS, J. J. Alternatives of municipal solid wastes to energy for sustainable development. The case of Barranquilla (Colombia). **International Journal of Sustainable Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1809–1825, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1993378>.

HADIDI, L. A.; OMER, M. M. A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy (WTE) plants in Saudi Arabia. **Waste Management**, [s. l.], v. 59, p. 90–101, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.030>.

HE, J.; LIN, B. Assessment of waste incineration power with considerations of subsidies and emissions in China. **Energy Policy**, [s. l.], v. 126, n. November 2018, p. 190–199, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.025>.

IBGE. **Estimativas da População: IBGE**. [s. l.], 2023a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 9 jan. 2023.

IBGE. **Inflação: Calculadora IPCA**. [s. l.], 2023b. Disponível em: <https://ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 9 mar. 2023.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Espírito Santo**. [s. l.], 2021c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/es/.html>. Acesso em: 22 março. 2023.

IBÁÑEZ-FORÉS, V. *et al.* Assessing the social performance of municipal solid waste management systems in developing countries: Proposal of indicators and a case study. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 98, n. November 2018, p. 164–178, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.031>.

INGALE, K. K.; PALURI, R. A. Financial literacy and financial behaviour: a bibliometric analysis. **Review of Behavioral Finance**, [s. l.], 2020.

ISTRATE, I. R.; GALVEZ-MARTOS, J. L.; DUFOUR, J. The impact of incineration phase-out on municipal solid waste landfilling and life cycle environmental performance: Case study of Madrid, Spain. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 755, p. 142537, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142537>.

IYAMU, H. O.; ANDA, M.; HO, G. A review of municipal solid waste management in the BRIC and high-income countries: A thematic framework for low-income countries. **Habitat International**, [s. l.], v. 95, n. October 2019, 2020.

JAUREGUI, B. C. *et al.* Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da produção de energia a partir da incineração dos resíduos urbanos da cidade de São Paulo. *In:* , 2017,

Joinville. **XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: 10 a 13 de outubro de 2017**. Joinville: [s. n.], 2017. p. 1–17.

JOSEPH, L. P.; PRASAD, R. Assessing the sustainable municipal solid waste (MSW) to electricity generation potentials in selected Pacific Small Island Developing States (PSIDS). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 248, p. 119222, 2020.

JOSHI, A. *et al.* Likert Scale: Explored and Explained. **British Journal of Applied Science & Technology**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 396–403, 2015.

KABIR, Z.; KHAN, I. Environmental impact assessment of waste to energy projects in developing countries: General guidelines in the context of Bangladesh. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], v. 37, n. December 2019, p. 100619, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100619>.

KAYA, K. *et al.* Waste-to-Energy Framework: An intelligent energy recycling management. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, [s. l.], v. 30, n. January, p. 100548, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100548>.

KHAN, S. *et al.* Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives. **Chemosphere**, [s. l.], v. 288, n. P1, p. 132403, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132403>.

KHAN, I.; KABIR, Z. Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 150, p. 320–333, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.132>.

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 69, p. 407–422, 2017.

KAZA, Silpa *et al.* **What a waste 2.0: A Global snapshot of solid waste Management to 2050**. Washington, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.

LAUSSELET, C. *et al.* Life-cycle assessment of a Waste-to-Energy plant in central Norway: Current situation and effects of changes in waste fraction composition. **Waste Management**, [s. l.], v. 58, p. 191–201, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.014>.

LEME, M. M. V. *et al.* Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 87, p. 8–20, 2014.

LIMA, D. A.; PAULA, D. N. T. Free contract environment for big electricity consumer in Brazil considering correlated scenarios of energy, power demand and spot prices. **Electric Power**

Systems Research, [s. l.], v. 190, n. August 2020, p. 106828, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106828>.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 35, n. September, p. 752–757, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.028>.

LIU, Y. *et al.* Impact of community engagement on public acceptance towards waste-to-energy incineration projects: Empirical evidence from China. **Waste Management**, [s. l.], v. 76, p. 431–442, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.028>.

LU, J. W. *et al.* Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: A comparison with developed regions. **Waste Management**, [s. l.], v. 69, p. 170–186, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.014>.

LUÍS PADILHA, J.; LUIZ AMARANTE MESQUITA, A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 265, n. March, p. 115743, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890422005398>.

MAKARICHI, Luke; JUTIDAMRONGPHAN, W.; TECHATO, K. anan. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 91, n. April, p. 812–821, 2018.

MALINAUSKAITE, J. *et al.* Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. **Energy**, [s. l.], v. 141, p. 2013–2044, 2017.

MARCHESIN, A. *et al.* Social evaluation of municipal solid waste management systems from a life cycle perspective : a systematic literature review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], n. 0123456789, 2022.

MARGALLO, M. *et al.* Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 689, p. 1255–1275, 2019.

MENIKPURA, S. N. M.; SANG-ARUN, J.; BENGTSSON, M. Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 86, p. 576–584, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.054>.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 274, DE 30 DE ABRIL DE 2019 - Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º dos art. 9º da Lei 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. PORTARIA NORMARTIVA Nº 10, DE 30 DE ABRIL DE 2021 - Estabelecer as diretrizes para a realização de Leilão de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração, denominado Leilão de Energia Nova "A-5", de 2021.

MUKHERJEE, C. *et al.* A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 119, n. March 2019, p. 109512, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512>.

MUNIR, M. T. *et al.* Municipal solid waste-to-energy processing for a circular economy in New Zealand. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 145, n. August 2020, p. 111080, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111080>.

MURI, H. I. D. I.; HJELME, D. R. Sensor Technology Options for Municipal Solid Waste Characterization for Optimal Operation of Waste-to-Energy Plants. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 3, 2022.

NANDA, S.; BERRUTI, F. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 403, n. August 2020, p. 123970, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>.

NANDHINI, R. *et al.* Thermochemical conversion of municipal solid waste into energy and hydrogen: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 1645–1669, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01410-3>.

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R.; ALAO, M. A. Electricity generation from municipal solid waste in some selected cities of Nigeria: An assessment of feasibility, potential and technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 80, n. May 2016, p. 149–162, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.177>.

OUDA, O. K. M. *et al.* Waste-to-energy potential in the Western Province of Saudi Arabia. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 212–220, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2015.02.002>.

PANEPINTO, D.; ZANETTI, M. C. Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration. **Waste Management**, [s. l.], v. 73, p. 332–341, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.036>.

PORSHNOV, D. Evolution of pyrolysis and gasification as waste to energy tools for low carbon economy. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1–37, 2022.

RAM, C.; KUMAR, A.; RANI, P. **Municipal solid waste management: A review of waste to energy (WtE) approaches**. [S. l.: s. n.], 2021.

RASHEED, T. *et al.* Valorisation and emerging perspective of biomass based waste-to-

energy technologies and their socio-environmental impact: A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 287, n. September 2020, p. 112257, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112257>.

REBELATTO, B. G. *et al.* Energy efficiency actions at a Brazilian university and their contribution to sustainable development Goal 7. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 842–855, 2019.

RECEITA FEDERAL - Receita Federal. **Tributos**. 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br> >. Acesso em: 12 fev. 2023.

RIPA, M. *et al.* The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 142, p. 445–460, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.149>.

RODRIGUES, L. F. *et al.* Energy and economic evaluation of MSW incineration and gasification in Brazil. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 188, p. 933–944, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148122002312>.

RODRIGUES, E.; MONDELLI, G. Assessment of integrated MSW management using multicriteria analysis in São Paulo City. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], n. 2011, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03681-9>.

SALA-GARRIDO, R. *et al.* Measuring technical, environmental and eco-efficiency in municipal solid waste management in Chile. **International Journal of Sustainable Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 71–85, 2022.

SANTOS, R. E. *et al.* Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 231, p. 198–206, 2019.

SARQUAH, K. *et al.* Bibliometric Analysis; Characteristics and Trends of Refuse Derived Fuel Research. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1–18, 2022.

SHAH, A. V. *et al.* Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 105717, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105717>.

SIDDIQI, A.; HARAGUCHI, M.; NARAYANAMURTI, V. Urban waste to energy recovery assessment simulations for developing countries. **World Development**, [s. l.], v. 131, p. 104949, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104949>.

SILVA, L. J. de V. B. da *et al.* Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 149, p. 1386–1394, 2020.

SOARES, C. B. *et al.* Revisão integrativa: conceitos e métodos utilizados na enfermagem.

Revista da Escola de Enfermagem da U S P., [s. l.], v. 48, n. 2, p. 335–345, 2014.

SUN, Y. *et al.* Techno-environmental-economic evaluation on municipal solid waste (MSW) to power/fuel by gasification-based and incineration-based routes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 106108, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106108>.

TAYEH, R. A.; ALSAYED, M. F.; SALEH, Y. A. The potential of sustainable municipal solid waste-to-energy management in the Palestinian Territories. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 279, p. 123753, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123753>.

TISI, Y. S. A. B. **Waste-to-Energy como forma ambientalmente adequada de destinação dos resíduos sólidos urbanos**. 1º Ediçãoed. Rio de Janeiro: SYNERGIA EDITORA, 2019.

VLACHOKOSTAS, C.; MICHAILIDOU, A. V.; ACHILLAS, C. Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 138, n. October 2020, p. 110563, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>.

VOSS, R. *et al.* Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. **Waste Management**, [s. l.], v. 134, p. 206–219, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X21004268>.

VYAS, S. *et al.* Municipal solid waste management: Dynamics, risk assessment, ecological influence, advancements, constraints and perspectives. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 814, p. 152802, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152802>.

WANG, Y. nan *et al.* Evaluating the physicochemical properties of refuse with a short-term landfill age and odorous pollutants emission during landfill mining: A case study. **Waste Management**, [s. l.], v. 121, p. 77–86, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.001>.

WANG, D. *et al.* Life cycle assessment of municipal solid waste management in Nottingham, England: Past and future perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 251, p. 119636, 2020.

WU, Y. *et al.* A risk assessment framework of PPP waste-to-energy incineration projects in China under 2-dimension linguistic environment. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 183, p. 602–617, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.077>.

ZHAO, X. gang *et al.* Economic analysis of waste-to-energy industry in China. **Waste Management**, [s. l.], v. 48, p. 604–618, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.014>.

ZIEGLER-RODRIGUEZ, K. *et al.* Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 229, p. 989–1003, 2019.

APÊNDICE A

Quadro 16 – Questionário aplicado para gestores públicos municipais a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.

CATEGORIA DE IMPACTO SOCIAL	INDICADOR SOCIAL	MÉTRICA	GESTORES MUNICIPAIS
1. Direitos trabalhistas	1.1 Possibilidade de associação e de negociação coletiva	1.1.a Formalização de novos catadores em OCMRR, novas OCMRR ou redes de OCMRR	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de regularização de catadores em OCMRR, novas OCMRR ou em Redes de OCMRR, pela livre comercialização de resíduos sólidos entre pessoas jurídicas distintas?
		1.1.b Resolução de litígios	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a possibilidade de resolução de litígios entre catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		1.1.c Contratações trabalhadores (celetistas ou autônomos)	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, haveria a necessidade de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos?
		1.1.c Presença sindical	Caso a resposta tenha sido positiva, a prefeitura acredita que com a ampliação de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos, haveria a necessidade de estabelecimento ou adesão a algum Sindicato Trabalhista?
2. Direitos Humanos	2.1 Trabalho infantil	2.1.a Fiscalização ao trabalho de menores de 18 anos	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR, ampliaria a necessidade de FISCALIZAÇÃO PARA COMBATE ao trabalho de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		2.1.b Redução do trabalho de menos de 18 anos	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR, REDUZIRIA a quantidade de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
3. Condições de trabalho	3.1 Salário Justo	3.1 Ampliação de renda dos catadores	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, poderia ampliar o ganho médio mensal dos catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
	3.2 Horas de trabalho e/ou descanso semanal	3.2 Ampliação das horas semanais efetivamente trabalhadas pelos catadores	A prefeitura acredita a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a jornada de trabalho semanal para os catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
4. Igualdade de oportunidades / Discriminação	4.1 Discriminação de gênero	4.1. Participação de mulheres trabalhando nas OCMRR	A prefeitura acredita que a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a participação das mulheres dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?

	4.2 Regulamentação laboral	4.2 Controle de documentados nas OCMRR	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de CONTROLE DE DOCUMENTAÇÃO dos catadores em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?
	4.3 Trabalhadores de classes marginais	4.3 Incentivo à reeducação social para presidiários em OCMRR	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a possibilidade de inserção de novos associados ou contratados (celetistas ou autônomos) que sejam presidiários buscando a reeducação social em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?
5. Saúde & Segurança	5.1 Saúde e segurança dos trabalhadores	5.1 Utilização de EPI (equipamentos de proteção individual) no trabalho pelos catadores	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de uso e fiscalização de EPI para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	5.2 Saúde a longo prazo	5.2.a. Aplicação de vacinas nos catadores	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de controle de aplicação de vacinas para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
6. Benefícios trabalhistas	6.1 Emprego legal com benefícios / segurança sociais	6.1 Ampliação de controle de direitos trabalhistas dos catadores	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de controle de documentos e vínculos, descrição e fiscalização de desvios de função para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	6.2 Trabalhadores e familiares com seguro de saúde	6.2 Ampliação da seguridade social dos catadores	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, os catadores deveriam ampliar a forma organizacionais de sua formalização como cooperativas em vez de associações de catadores de forma a garantirem seguridade social para seus cooperados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
7. Condições socioeconômicas		7.1.a Nível de escolaridade x qualidade de separação resíduos recicláveis e rejeitos	A prefeitura acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na qualidade e/ou quantidade da separação de resíduos recicláveis e rejeito?
	7.1 Grau de educação dos trabalhadores	7.1.b Nível de escolaridade x criação de novas parcerias comerciais	A prefeitura acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na criação de novas parcerias comerciais?
		7.1.c Ampliação de formação escolar em OCMRR	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de ampliação de formação escolar para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
		7.2 Características sociais da população	7.2 Rendimento familiar mensal total

	7.3 Condições de vida seguras e saudáveis (acesso a recursos materiais)	7.3 Qualidade das casas dos trabalhadores	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, e com a renda extra auferida com essa venda, possibilitaria que o associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR, investissem em melhorias de suas residências?
8. Participação e satisfação da comunidade	8.1 Satisfação do cliente / cidadão	8.1 Satisfação da sociedade com o aproveitamento energético	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a população estaria mais satisfeita em saber que o rejeito poderia ser enviado para o aproveitamento energético ao invés de disposto em aterro sanitário?
	8.2 Participação do cliente / cidadão	8.2 Ampliação da cobertura de coleta seletiva pela prefeitura	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a prefeitura teria condições de ampliar a cobertura de coleta seletiva de resíduos secos?
9. Relação dos atores da cadeia de valor	9.1 Transparência / corrupção	9.1.a Transparência na destinação de RSU	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, tais contratos bem como os relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos emitidos trariam mais transparência sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
		9.1.b Apresentação de relatórios periódicos de empresas públicas de resíduos secos	A prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, seriam necessários a apresentação de relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos informando sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
10. Desenvolvimento profissional	10.1 Consciência ambiental do trabalhador	10.1 Treinamentos realizados para os catadores	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de oferecimento de treinamento para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
11. Desenvolvimento Local (repercussão socioeconômica)	11.1 Desenvolvimento de consciência e responsabilidade ambiental	11.1.a Sensibilização ambiental da sociedade	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a conscientização quanto a responsabilidade ambiental da sociedade?
		11.1.b Informação para a sociedade sobre gestão de resíduos	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a sociedade precisaria receber informações sobre gestão de resíduos como separação na fonte e coleta seletiva?
	11.2 Integração local de trabalhadores formais oriundos do setor informal	11.2 Mão de obra formalizada	A Prefeitura entende que, caso haja nova modalidade comercial de destinação de rejeitos, além de Aterro Sanitário, com geração de receita adicional, aumentaria a necessidade de mão de obra formalizada?
12. Governança	12.1 Compromissos públicos em matéria de sustentabilidade	12.1 Ampliação das possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição em Aterro Sanitário (hierarquia da PNRS para destinações)	A Prefeitura acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, haveria ampliação de possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição final em aterros sanitários?

Fonte: Própria.

Quadro 17 - Questionário aplicado para representantes de empresas que atuam com manejo e destinação final de RSU a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.

CATEGORIA DE IMPACTO SOCIAL	INDICADOR SOCIAL	MÉTRICA	SETOR PRIVADO – REPRESENTANTES LISTADOS EM EMPREENDIMENTOS DE MANEJO E DESTINAÇÃO FINAIS DE RESÍDUOS (DIVERSOS)
1. Direitos trabalhistas	1.1 Possibilidade de associação e de negociação coletiva	1.1.a Formalização de novos catadores em OCMRR, novas OCMRR ou redes de OCMRR	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de regularização de catadores em OCMRR, novas OCMRR ou em Redes de OCMRR, pela livre comercialização de resíduos sólidos entre pessoas jurídicas distintas?
		1.1.b Resolução de litígios	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos de fornecimento de resíduos por OCMRR ou Redes de OCMRR, ampliaria a possibilidade de resolução de litígios entre catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		1.1.c Contratações de trabalhadores (celetistas ou autônomos)	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, haveria a necessidade de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos?
		1.1.c Presença sindical	Caso a resposta tenha sido positiva, a empresa acredita que com a ampliação de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos, haveria a necessidade de estabelecimento ou adesão a algum Sindicato Trabalhista ou Empresarial?
2. Direitos Humanos	2.1 Trabalho infantil	2.1.a Fiscalização ao trabalho de menores de 18 anos	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos de fornecimento de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR, ampliaria a necessidade de FISCALIZAÇÃO PARA COMBATE ao trabalho de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		2.1.b Redução do trabalho de menos de 18 anos	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos de fornecimento de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR, REDUZIRIA a quantidade de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
3. Condições de trabalho	3.1 Salário Justo	3.1 Ampliação de renda dos catadores	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos de fornecimento de resíduos por OCMRR ou redes de OCMRR, poderia ampliar o ganho médio mensal dos catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
	3.2 Horas de trabalho e/ou descanso semanal	3.2 Ampliação das horas semanais efetivamente trabalhadas pelos catadores	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a jornada de trabalho semanal para os catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
4. Igualdade de oportunidades / Discriminação	4.1 Discriminação de gênero	4.1. Participação de mulheres trabalhando nas OCMRR	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a participação das mulheres dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
	4.2 Regulamentação laboral	4.2 Controle de documentados nas OCMRR	A Empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de CONTROLE DE DOCUMENTAÇÃO dos catadores em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?

	4.3 Trabalhadores de classes marginais	4.3 Incentivo à reeducação social para presidiários em OCMRR	A Empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a possibilidade de inserção de novos associados ou contratados (celetistas ou autônomos) que sejam presidiários buscando a reeducação social em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?
5. Saúde & Segurança	5.1 Saúde e segurança dos trabalhadores	5.1 Utilização de EPI (equipamentos de proteção individual) no trabalho pelos catadores	A Empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de uso e fiscalização de EPI para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	5.2 Saúde a longo prazo	5.2.a. Aplicação de vacinas nos catadores	A Empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade controle de aplicação de vacinas para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
6. Benefícios trabalhistas	6.1 Emprego legal com benefícios / segurança sociais	6.1 Ampliação de controle de direitos trabalhistas dos catadores	A Empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de controle de documentos e vínculos, descrição e fiscalização de desvios de função para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	6.2 Trabalhadores e familiares com seguro de saúde	6.2 Ampliação da seguridade social dos catadores	A Empresa acredita que para garantir seguridade social para os cooperados e/ou contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR deveria instituir para os contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico que o formato organizacional da formalização dos catadores deveria se dar preferencialmente como cooperativas em vez de associações de catadores?
7. Condições socioeconômicas	7.1 Grau de educação dos trabalhadores	7.1.a Nível de escolaridade x qualidade de separação resíduos recicláveis e rejeitos	A empresa acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na qualidade e/ou quantidade da separação de resíduos recicláveis e rejeito?
		7.1.b Nível de escolaridade x criação de novas parcerias comerciais	A empresa acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na criação de novas parcerias comerciais?
		7.1.c Ampliação de formação escolar em OCMRR	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de ampliação de formação escolar para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
	7.2 Características sociais da população	7.2 Rendimento familiar mensal total	Para a empresa, com a maior cobertura de coleta domiciliar e coleta de recicláveis há impacto direto no aumento da diversidade dos serviços e consequentemente nos lucros dos sócios?
	7.3 Condições de vida seguras e saudáveis (acesso a recursos materiais)	7.3 Qualidade das casas dos trabalhadores	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, e com a renda extra auferida com essa venda, possibilitaria que o associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR, investissem em melhorais de suas residências?

8. Participação e satisfação da comunidade	8.1 Satisfação do cliente / cidadão	8.1 Satisfação da sociedade com o aproveitamento energético	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a população estaria mais satisfeita em saber que o rejeito poderia ser enviado para o aproveitamento energético ao invés de disposto em aterro sanitário?
	8.2 Participação do cliente / cidadão	8.2 Ampliação da cobertura de coleta seletiva pela prefeitura	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a prefeitura teria condições de ampliar a cobertura de coleta seletiva de resíduos secos?
9. Relação dos atores da cadeia de valor	9.1 Transparência / corrupção	9.1.a Transparência na destinação de RSU	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, tais contratos bem como os relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos emitidos trariam mais transparência sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
		9.1.b Apresentação de relatórios periódicos de empresas públicas de resíduos secos	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, seriam necessários a apresentação de relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos informando sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
10. Desenvolvimento profissional	10.1 Consciência ambiental do trabalhador	10.1 Treinamentos realizados para os catadores	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de oferecimento de treinamento para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
11. Desenvolvimento Local (repercussão socioeconômica)	11.1 Desenvolvimento de consciência e responsabilidade ambiental	11.1.a Sensibilização ambiental da sociedade	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a conscientização quanto a responsabilidade ambiental da sociedade?
		11.1.b Informação para a sociedade sobre gestão de resíduos	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a sociedade precisaria receber informações sobre gestão de resíduos como separação na fonte e coleta seletiva?
	11.2 Integração local de trabalhadores formais oriundos do setor informal	11.2 Mão de obra formalizada	A empresa entende que, caso haja nova modalidade comercial de destinação de rejeitos, além de Aterro Sanitário, com geração de receita adicional, aumentaria a necessidade de mão de obra formalizada?
12. Governança	12.1 Compromissos públicos em matéria de sustentabilidade	12.1 Ampliação das possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição em Aterro Sanitário (hierarquia da PNRS para destinações)	A empresa acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, haveria ampliação de possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição final em aterros sanitários?

Fonte: Própria.

Quadro 18 - Questionário aplicado para representantes de OCMRR a partir das categorias de impacto social, indicadores e métricas.

CATEGORIA DE IMPACTO SOCIAL	INDICADOR SOCIAL	MÉTRICA	REPRESENTANTES DE ORGANIZAÇÃO DE CATADORES DE MATERIAIS REICLÁVEIS ORGANIZADOS (OCMRR)
1. Direitos trabalhistas	1.1 Possibilidade de associação e de negociação coletiva	1.1.a Formalização de novos catadores em OCMRR, novas OCMRR ou redes de OCMRR	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de formalização de novos catadores em OCMRR, novas OCMRR ou formalização de Redes de OCMRR para negociação coletiva??
		1.1.b Resolução de litígios	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a possibilidade de resolução de litígios entre catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		1.1.c Contratações trabalhadores (celetistas ou autônomos)	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, haveria a necessidade de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos?
		1.1.c Presença sindical	Caso a resposta tenha sido positiva, a OCMRR acredita que com a ampliação de contratação de trabalhadores (celetistas ou autônomos) para cumprimento desses contratos, haveria a necessidade de estabelecimento ou adesão a algum Sindicato Trabalhista?
2. Direitos Humanos	2.1 Trabalho infantil	2.1.a Fiscalização ao trabalho de menores de 18 anos	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de FISCALIZAÇÃO PARA COMBATE ao trabalho de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
		2.1.b Redução do trabalho de menos de 18 anos	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, REDUZIRIA a quantidade de menores de 18 anos trabalhando como catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
3. Condições de trabalho	3.1 Salário Justo	3.1 Ampliação de renda dos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a renda dos catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
	3.2 Horas de trabalho e/ou descanso semanal	3.2 Ampliação das horas semanais efetivamente trabalhadas pelos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a jornada de trabalho semanal para os catadores dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?
4. Igualdade de oportunidades / Discriminação	4.1 Discriminação de gênero	4.1. Participação de mulheres trabalhando nas OCMRR	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a participação das mulheres dentro das OCMRR ou Redes de OCMRR?

	4.2 Regulamentação laboral	4.2 Controle de documentados nas OCMRR	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos ou concessões com a prefeitura para coleta seletiva, triagem e destinação de resíduos e/ou com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de CONTROLE DE DOCUMENTAÇÃO do catadores em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?
	4.3 Trabalhadores de classes marginais	4.3 Incentivo à reeducação social para presidiários em OCMRR	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a possibilidade de inserção de novos associados ou contratados (celetistas ou autônomos) que sejam presidiários buscando a reeducação social em OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento aos contratos?
5. Saúde & Segurança	5.1 Saúde e segurança dos trabalhadores	5.1 Utilização de EPI (equipamentos de proteção individual) no trabalho pelos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de uso e fiscalização de EPI para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	5.2 Saúde a longo prazo	5.2.a. Aplicação de vacinas nos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de controle de aplicação de vacinas para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
6. Benefícios trabalhistas	6.1 Emprego legal com benefícios / segurança sociais	6.1 Ampliação de controle de direitos trabalhistas dos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de controle de documentos e vínculos, descrição e fiscalização de desvios de função para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR para atendimento de novos contratos?
	6.2 Trabalhadores e familiares com seguro de saúde	6.2 Ampliação da seguridade social dos catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria sua seguridade social para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
7. Condições socioeconômicas	7.1 Grau de educação dos trabalhadores	7.1.a Nível de escolaridade x qualidade de separação resíduos recicláveis e rejeitos	A OCMRR acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na qualidade e/ou quantidade da separação de resíduos recicláveis e rejeito?
		7.1.b Nível de escolaridade x criação de novas parcerias comerciais	A OCMRR acredita que o nível de escolaridade dos catadores influencia na criação de novas parcerias comerciais?
		7.1.c Ampliação de formação escolar em OCMRR	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de ampliação de formação escolar para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
	7.2 Características sociais da população	7.2 Rendimento familiar mensal total	Para a OCMRR, com a maior cobertura de coleta domiciliar e coleta de recicláveis a renda mensal familiar dos catadores irá aumentar?
	7.3 Condições de vida seguras e saudáveis (acesso a recursos materiais)	7.3 Qualidade das casas dos trabalhadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, e com a renda extra auferida com essa venda, possibilitaria que o associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR, investissem em melhorias de suas residências?

8. Participação e satisfação da comunidade	8.1 Satisfação do cliente / cidadão	8.1 Satisfação da sociedade com o aproveitamento energético	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a população estaria mais satisfeita em saber que o rejeito poderia ser enviado para o aproveitamento energético ao invés de disposto em aterro sanitário?
	8.2 Participação do cliente / cidadão	8.2 Ampliação da cobertura de coleta seletiva pela prefeitura	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a prefeitura teria condições de ampliar a cobertura de coleta seletiva de resíduos secos?
9. Relação dos atores da cadeia de valor	9.1 Transparência / corrupção	9.1.a Transparência na destinação de RSU	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, tais contratos bem como os relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos emitidos trariam mais transparência sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
		9.1.b Apresentação de relatórios periódicos de empresas públicas de resíduos secos	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, seriam necessários a apresentação de relatórios de controle ambiental e Manifestos de Transporte de Resíduos informando sobre a destinação de rejeitos proveniente da coleta seletiva de resíduos secos?
10. Desenvolvimento profissional	10.1 Consciência ambiental do trabalhador	10.1 Treinamentos realizados para os catadores	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a necessidade de oferecimento de treinamento para associados e contratados (celetistas e prestadores de serviços) atuando dentro de OCMRR ou Redes de OCMRR?
11. Desenvolvimento Local (repercussão socioeconômica)	11.1 Desenvolvimento de consciência e responsabilidade ambiental	11.1.a Sensibilização ambiental da sociedade	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, ampliaria a conscientização quanto a responsabilidade ambiental da sociedade?
		11.1.b Informação para a sociedade sobre gestão de resíduos	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, e a celebração de contratos para a destinação de resíduos com empresas privadas encarregadas da destinação final de resíduos com tratamento térmico, a sociedade precisaria receber informações sobre gestão de resíduos como separação na fonte e coleta seletiva?
	11.2 Integração local de trabalhadores formais oriundos do setor informal	11.2 Mão de obra formalizada	A OCMRR entende que, caso haja nova modalidade comercial de destinação de rejeitos, e com isso auferissem receita adicional, os catadores concordariam em trabalhar de maneira formalizada?
12. Governança	12.1 Compromissos públicos em matéria de sustentabilidade	12.1 Ampliação das possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição em Aterro Sanitário (hierarquia da PNRS para destinações)	A OCMRR acredita que com a ampliação de oportunidades de destinação final, como aquela que busca o Tratamento Térmico de resíduos sólidos não recicláveis, haveria ampliação de possibilidades de destinação de resíduos sólidos além da disposição final em aterros sanitários?

Fonte: Própria.