



**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
MESTRADO ACADÊMICO EM SOCIOBIODIVERSIDADE E TECNOLOGIAS
SUSTENTÁVEIS (MASTS)**

PAULO RICARDO MATOS SAMPAIO

**POTENCIAL ENERGÉTICO E TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO NA MACRORREGIÃO DO MACIÇO DE
BATURITÉ-CEARÁ**

REDENÇÃO-CE

2023

PAULO RICARDO MATOS SAMPAIO

POTENCIAL ENERGÉTICO E TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO NA MACRORREGIÃO DO MACIÇO DE
BATURITÉ-CEARÁ

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis (Masts) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Marques da Fonseca.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Olienai de Ribeiro de Oliveira Pinto.

REDENÇÃO-CE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Sampaio, Paulo Ricardo Matos.

S192p

Potencial energético e tratamento sustentável dos resíduos sólidos urbanos: estudo na macrorregião do maciço de Baturité-Ceará / Paulo Ricardo Matos Sampaio. - Redenção, 2023.
74fl: il.

Dissertação - Curso de Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Marques da Fonseca.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Olienaiide Ribeiro de Oliveira Pinto.

1. Energia - Produção. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Tratamento térmico. 4. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 628.44

PAULO RICARDO MATOS SAMPAIO

POTENCIAL ENERGÉTICO E TRATAMENTO SUSTENTÁVEL DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO NA MACRORREGIÃO DO MACIÇO DE
BATURITÉ-CEARÁ

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis (Masts) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Aluísio Marques da Fonseca (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof.^a Dr.^a Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto (Coorientadora)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Prof.^a Dr. Antônio Roberto Xavier
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

Aos meus pais, irmão e esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Divina Providência pelas bênçãos concedidas e por me permitir a chance de estar neste plano material tentando melhorar a cada dia.

À minha esposa, Erica, pela paciência, compreensão, motivação e apoio ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, professor doutor Aluísio Marques da Fonseca, pela ajuda e suporte.

À minha coorientadora, professora doutora Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto, sempre solícita e paciente, que, com o seu conhecimento, contribuiu para a realização deste projeto.

Ao professor doutor Juan Carlos Alvarado Alcócer, pela oportunidade e pelos ensinamentos ao longo do trabalho.

Aos professores do Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis (Masts), que repassaram os seus conhecimentos acadêmicos contribuindo para a formação dos discentes.

Aos colegas de turma do Masts, pelo ótimo convívio durante esse período.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, colaboraram para que eu pudesse concluir esta caminhada acadêmica.

RESUMO

A crescente urbanização e o aumento do poder aquisitivo da população proporcionam um maior consumo de produtos industrializados, os quais implicam uma geração elevada de resíduos. No Brasil, uma quantidade considerável de resíduos sólidos urbanos ainda é disposta de forma inadequada (lixões e aterro controlado), o que compromete a qualidade do meio ambiente e da saúde humana. Atualmente, em países desenvolvidos, muitas tecnologias são empregadas visando ao reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, dessa forma, garante-se uma destinação adequada a eles, além de geração de energia elétrica. Para a região do Maciço de Baturité, localizada no estado do Ceará, há uma estimativa de crescente geração de resíduos, que poderiam ser reaproveitados energeticamente. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo do potencial energético e tratamento sustentável dos resíduos sólidos urbanos na macrorregião do Maciço de Baturité, Ceará, a fim de verificar a possibilidade da implantação de uma usina de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos a partir do seu tratamento térmico. A metodologia do trabalho compreende um estudo de caso do tipo exploratório de natureza básica, tendo uma abordagem de pesquisa quantitativa e qualitativa. Os resultados obtidos a partir de dois cenários – um considerando a reciclagem de materiais e outro não – demonstraram que a implantação da usina é viável economicamente, a qual, nos dois cenários, pode gerar de eletricidade, respectivamente, 21.384,10 kWh e 26.783,31 kWh. Quanto à análise da emissão de gases de efeito estufa, para os três cenários analisados, o cenário de reciclagem e aterro sanitário apresentou a maior emissão líquida de gases de efeito estufa, 32.774 toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano. Já para o cenário de reciclagem e tratamento térmico, as emissões chegam a 10.344 toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano. Considerando que 100% dos resíduos sólidos urbanos recebam tratamento térmico, o resultado líquido de emissões de gases de efeito estufa é 18.882 toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano. Esse estudo pode fomentar o interesse dos gestores municipais em relação ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, que, aliado à reciclagem, pode garantir sua destinação final ambientalmente adequada.

Palavras-chave: recuperação energética; resíduos sólidos urbanos; tratamento térmico; caracterização de resíduos.

ABSTRACT

Increasing urbanization and the increase in the population's purchasing power protect a greater consumption of industrialized products, which implies a high generation of waste. In Brazil, a specific amount of urban solid waste is still disposed of in a concentrated manner (controlled dumps and landfills), which demands the quality of the environment and human health. Currently, in developed countries, many technologies are used to reuse energy from solid urban waste, thus ensuring adequate disposal of it, in addition to the generation of electrical energy. For the Massif de Baturité region, located in the state of Ceará, there is an estimate of increasing generation of waste, which could be reused for energy. Thus, the present work aims to present a study of the energy potential and sustainable treatment of urban solid waste in the Maciço de Baturité macro-region, Ceará, in order to verify the possibility of implementing an energy recovery plant for urban solid waste from to carry out its heat treatment. The work methodology comprises an exploratory case study of a basic nature, taking a quantitative and qualitative research approach. The results obtained from two scenarios – one considering the recycling of materials and the other not – showed that the installation of the plant is economically viable, which, in the two scenarios, can generate electricity, respectively, 21,384.10 kWh and 26,783 , 31 kWh. Regarding the analysis of greenhouse gas emissions, for the three scenarios analyzed, the recycling and landfill scenario presented the highest net emission of greenhouse gases, 32,774 tons of carbon dioxide equivalent per year. For the recycling and thermal treatment scenario, emissions reach 10,344 tons of carbon dioxide equivalent per year. Considering that 100% of municipal solid waste receives thermal treatment, the net result of greenhouse gas emissions is 18,882 tons of carbon dioxide equivalent per year. This study can encourage the interest of municipal managers in relation to the energy use of urban solid waste, which, combined with recycling, can guarantee its finally adequate environmental destination.

Keywords: energy recovery; urban solid waste; heat treatment; waste characterization.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 | – Disposição final dos RSU no Brasil (T/ano)..... | 19 |
| Figura 2 | – Geração de RSU na região do Maciço de Baturité..... | 20 |
| Figura 3 | – Hierarquia na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos..... | 21 |
| Figura 4 | – Conversão de energia e produtos gerados a partir dos RSU..... | 22 |
| Figura 5 | – Tratamento de resíduos municipais em 2019 na Europa..... | 23 |
| Figura 6 | – Representação esquemática da coleta e processamento para uso do biogás de aterro..... | 25 |
| Figura 7 | – Planta de incineração de RSU..... | 26 |
| Figura 8 | – Incinerador com forno rotativo..... | 28 |
| Figura 9 | – Sistema de incineração em leito fluidizado..... | 29 |
| Figura 10 | – Representação do processo de pirólise..... | 31 |
| Figura 11 | – Ciclo de Rankine..... | 32 |
| Figura 12 | – Planta de URE para a geração de energia elétrica..... | 33 |
| Figura 13 | – Incinerador e caldeira..... | 34 |
| Figura 14 | – Turbina a vapor..... | 35 |
| Figura 15 | – Precipitador eletrostático..... | 36 |
| Figura 16 | – Região do Maciço de Baturité..... | 39 |
| Figura 17 | – Composição gravimétrica sem adoção do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas..... | 41 |
| Figura 18 | – Composição gravimétrica com adoção do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas..... | 41 |
| Figura 19 | – Gravimetria dos RSU no Brasil..... | 43 |
| Figura 20 | – Fluxo de caixa da usina para Cenário 1..... | 62 |
| Figura 21 | – Fluxo de caixa da usina para cenário 2..... | 63 |
| Figura 22 | – Emissões de GEE para os cenários estabelecidos..... | 64 |
| Figura 23 | – Detalhe das emissões de GEE para todos os cenários..... | 65 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – Disposição final de RSU nas regiões do Brasil, por tipo de destinação (T/ano)..... | 18 |
| Tabela 2 | – Estimativa da população da região do Maciço de Baturité | 19 |
| Tabela 3 | – Estimativa da geração de RSU na região do Maciço de Baturité..... | 20 |
| Tabela 4 | – Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para sistema de tratamento térmico | 36 |
| Tabela 5 | – Estimativa da população e da quantidade de RSU na região do Maciço de Baturité..... | 40 |
| Tabela 6 | – Estimativa da população e da quantidade de RSU na região do Maciço de Baturité..... | 42 |
| Tabela 7 | – Composição gravimétrica estimada para a região do Maciço de Baturité | 44 |
| Tabela 8 | – Análise elementar e imediata para frações que fazem parte dos RSU..... | 45 |
| Tabela 9 | – Valores da venda de metal para sucata | 55 |
| Tabela 10 | – Dados que serão adotados para a análise econômica da URE..... | 56 |
| Tabela 11 | – Estimativa do PCI a partir da equação de Dulong modificada | 57 |
| Tabela 12 | – Estimativa do PCI a partir da equação de Dulong modificada levando em consideração a reciclagem | 58 |
| Tabela 13 | – Consumo e consumidores de energia elétrica da região do Maciço de Baturité, segundo as classes no ano de 2021..... | 60 |
| Tabela 14 | – Resumo de eletricidade gerada e potência instalada | 60 |
| Tabela 15 | – Investimento inicial – Cenário 1 | 61 |
| Tabela 16 | – Investimento inicial – Cenário 2..... | 61 |
| Tabela 17 | – Receitas | 61 |
| Tabela 18 | – Dados adotados e obtidos – Cenário 1 | 62 |
| Tabela 19 | – Dados adotados e obtidos – Cenário 2 | 63 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| Abrelpe | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| ACV | Avaliação do ciclo de vida |
| AMSA | Associação Pública dos Municípios do Maciço de Baturité para o Saneamento Ambiental |
| Aneel | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CCI | Compostos clorados inorgânicos |
| CDR | Combustível derivado de resíduos |
| Cempre | Compromisso Empresarial para Reciclagem |
| Cewep | Confederation of European Waste-to-Energy Plants |
| CFI | Compostos fluorados inorgânicos |
| CNI | Confederação Nacional da Indústria |
| Conama | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| Feam | Fundação Estadual do Meio Ambiente |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| Ipece | Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará |
| LCOE | <i>Levelized Cost of Electricity</i> |
| Masts | Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| O&M | Operação e manutenção |
| PCI | Poder Calorífico Inferior |
| PCS | Poder Calorífico Superior |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| Prof. Dr. | Professor doutor |
| RSU | Resíduos Sólidos Urbanos |
| SCEE | Sistema de Compensação de Energia Elétrica |
| Sema | Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Ceará |
| Sinir | Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos |
| SNIS | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento |
| SNCR | Redução seletiva não catalítica |

| | |
|-----|-------------------------------------------------------------|
| SCR | Redução catalítica seletiva |
| TIR | Taxa interna de retorno |
| TMA | Taxa mínima de atratividade |
| URE | Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos |
| VPL | Valor presente líquido |
| WtE | Waste-to-Energy |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------|-------------------------|
| MW | Megawatts |
| kW | Quilowatts |
| kcal/kg | Quilocaloria/quilograma |
| kJ/kg | Quilojoule/quilograma |
| MJ/kg | Megajoule/quilograma |
| KWh | Quilowatt-hora |
| MWh | Megawatt-hora |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Resíduos sólidos urbanos (RSU) | 16 |
| 2.2 | Classificação dos resíduos sólidos | 17 |
| 2.3 | Gestão dos resíduos sólidos | 18 |
| 2.4 | Recuperação energética dos RSU | 21 |
| 2.4.1 | Processos bioquímicos | 23 |
| 2.4.1.1 | <i>Digestão anaeróbia</i> | 23 |
| 2.4.1.2 | <i>Gás de aterro</i> | 24 |
| 2.4.2 | Processos termoquímicos | 25 |
| 2.4.2.1 | <i>Incineração</i> | 25 |
| 2.4.2.2 | <i>Gaseificação e pirólise</i> | 29 |
| 2.5 | Usina Termelétrica para Recuperação Energética de RSU | 31 |
| 2.5.1 | Caldeira | 32 |
| 2.5.2 | Turbina a vapor | 34 |
| 2.5.3 | Controle de emissões | 35 |
| 2.6 | Minigeração e microgeração | 37 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 39 |
| 3.1 | Localização e caracterização da área de estudo | 39 |
| 3.2 | Estimativa da quantidade de RSU e sua caracterização no Maciço de Baturité | 40 |
| 3.3 | Estimativa do poder calorífico inferior (PCI) e eletricidade gerada | 44 |
| 3.3.1 | Estimativa do PCI..... | 44 |
| 3.3.2 | Eletricidade gerada | 49 |
| 3.4 | Análise de viabilidade econômica | 50 |
| 3.4.1 | VPL | 51 |
| 3.4.2 | TIR..... | 51 |
| 3.4.3 | <i>Payback</i> descontado e simples | 52 |
| 3.4.4 | Custo nivelado de energia | 52 |
| 3.4.5 | Parâmetros estabelecidos..... | 53 |
| 3.5 | Análise da emissão de GEE | 56 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 57 |

| | | |
|------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1 | Poder calorífico inferior (PCI) | 57 |
| 4.2 | Eletricidade gerada e potência instalada | 59 |
| 4.3 | Análise econômica | 60 |
| 4.4 | Análise da emissão de GEE | 63 |
| 5 | CONCLUSÕES | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 67 |

1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem aumentado de forma significativa no mundo. Um dos principais motivos é o crescimento populacional, que, somado ao desenvolvimento econômico dos países, promove um consumo maior de produtos por parte da população. Segundo o livro do Banco Mundial (Kaza *et al.*, 2018), a geração de resíduos global, no ano 2030, será de 2,59 bilhões de toneladas por ano, já no ano 2050, a quantidade pode chegar a 3,4 bilhões de toneladas anualmente (Campos *et al.*, 2021; Kaza *et al.*, 2018).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2020), para o Brasil, a partir de uma análise de dados, projeta-se que a geração de RSU será uma curva crescente no período de 30 anos. Comparado ao ano de 2019, até 2050 o país terá um incremento próximo de 50% no total de RSU. Vale salientar que, nesse mesmo período, espera-se um crescimento populacional de 12%, assim pode-se afirmar que o progresso gradual do Produto Interno Bruto (PIB) e consequente aumento do poder aquisitivo da sociedade influenciam na geração de resíduos, fato esse corroborado por Campos *et al.* (2021), que afirmam que os países mais ricos contribuem com mais de 1/3 do resíduo mundial, assim o nível de renda é um fator que está relacionado diretamente com a produção de RSU.

Conforme a Abrelpe (2020), o Brasil apresentou notável incremento de geração de RSU entre 2010 e 2019, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano. No mesmo período, os RSU coletados que foram dispostos em aterros sanitários passaram de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas. No entanto, a quantidade de resíduos que foram para locais inadequados – lixões e aterros controlados – também aumentou, indo de 25 milhões de toneladas para 29,4 milhões de toneladas por ano (Abrelpe, 2020).

Apesar de o aterro sanitário ser a técnica mais utilizada para a disposição final dos RSU, uma vez que diminui os impactos ambientais, ela apresenta algumas desvantagens, entre as quais estão a formação de odores, a necessidade de uma área extensa, bem como a geração de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente o metano, além do monitoramento do espaço após seu encerramento (Portella; Ribeiro, 2014).

A parcela de resíduos orgânicos dos RSU que é depositada em aterros controlados ou lixões traz sérios impactos ao meio ambiente, visto que há a geração de GEE decorrente da emissão de gás metano, liberado a partir da decomposição da matéria orgânica. Além disso,

existe o risco de contaminação dos recursos hídricos pelo chorume, líquido de cor escura resultante da decomposição da parte orgânica do resíduo, além de danos à saúde humana. De acordo com a Abrelpe (2020), a disposição inadequada dos RSU impacta diretamente a saúde de brasileiros, tendo um custo ambiental e para tratamento de saúde de quase um bilhão de dólares por ano, valor esse, em reais, superior a cinco bilhões (Abrelpe, 2020).

Nessa conjuntura, a fim de se garantir uma sustentabilidade, dando uma destinação final ambientalmente adequada aos resíduos, surgem as tecnologias que os reaproveitam energeticamente, obtendo subprodutos que podem ser utilizados pela sociedade, como energia elétrica, vapor, biocombustíveis e cinzas para a construção civil. Destaca-se que, com o aumento populacional, há também uma demanda por energia, o que torna essas tecnologias atraentes, uma vez que algumas são utilizadas para a geração de eletricidade.

A tecnologia *Waste to Energy* (WtE), que permite a geração de energia elétrica a partir dos RSU, é bastante disseminada em muitos países europeus, já que é vista como uma solução para o gerenciamento dos seus resíduos, os quais se apresentam como fonte de grande relevância de energia renovável, tornando o processo economicamente atrativo (Kabir; Khan, 2019).

Seguindo essa direção, a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece como um de seus objetivos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético, prevendo a utilização de tecnologias que visam à recuperação energética dos RSU, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental, com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental (Brasil, 2010).

O respectivo trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial energético dos RSU que são gerados na macrorregião do Maciço de Baturité, Ceará, visando à análise de viabilidade da implantação de uma Usina de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (URE) com geração de energia elétrica a partir da combustão desses resíduos. Os objetivos específicos são: identificar as principais tecnologias utilizadas para reaproveitamento energético dos RSU, bem como levantar, a partir de informações bibliográficas, dados que os caracterizem na região do Maciço de Baturité a fim de se determinar o seu poder calorífico inferior (PCI), além de estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir da sua combustão; por fim, realizar uma análise econômica e de emissão de GEE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Ao se falar sobre resíduos sólidos ou resíduos de maneira geral, frequentemente há a ideia de algo que não tem utilidade ou valor agregado, ou é nocivo à saúde, devendo, assim, ser descartado. Esses resíduos, na sua maior parte, são provenientes de atividades industriais, agrícolas, domésticas, de serviços de saúde, mineração, construção civil, entre outras (Bastos, 2013).

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS, define rejeito como os 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 (aterros sanitários). A partir dessa definição, infere-se que os resíduos sólidos podem ser submetidos a tratamento ou recuperação, podendo ainda ser úteis à sociedade (Brasil, 2010).

Conforme a mesma lei, os resíduos sólidos são definidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, 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, 2010).

A definição de resíduos sólidos é apresentada também pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a partir da norma 10.004/2004, que aborda a classificação de resíduos sólidos. A referente norma define resíduos sólidos como:

3.1 resíduos sólidos: Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Com fundamento nas definições de resíduos apresentadas acima, conclui-se que eles podem passar por tratamentos que possibilitem sua transformação em produtos benéficos

para a sociedade. Assim, evita-se que sejam depositados em locais inapropriados, onde possam causar consequências negativas para o meio ambiente e para a população.

2.2 Classificação dos resíduos sólidos

Conforme a norma 10.004/2004 (Resíduos Sólidos – Classificação), os resíduos sólidos, dependendo do seu tipo e de suas características, como propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem ocasionar riscos à saúde pública, acarretando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e ao meio ambiente, como consequência de um gerenciamento inapropriado. Dessa forma, ela classifica os resíduos em:

- a) Resíduos de Classe I (perigosos): são os que apresentam periculosidade ou características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- b) Resíduos de Classe II (não perigosos):
 - Resíduos classe II A (não inertes): não se enquadram nas classificações de resíduos classe I (perigosos) ou de resíduos classe II B (inertes); esses podem apresentar algumas propriedades, como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - Resíduos classe II B (inertes): na classe II B (inertes), estão os resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, a temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Já a PNRS classifica os resíduos sólidos quanto à origem em: resíduos domiciliares; de limpeza urbana; RSU; de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; dos serviços públicos de saneamento básico; industriais; de serviços de saúde; da construção civil; agrossilvopastoris; de serviços de transportes e de mineração (Brasil, 2010; Gomes, 2014).

Os RSU, conforme a PNRS, compreendem os domiciliares (originários de atividades domésticas em residências urbanas) e os resíduos de limpeza urbana (os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana). A maior parte dos RSU são destinados a aterros sanitários, uma vez que é a solução mais comum em muitas cidades.

2.3 Gestão dos resíduos sólidos

De acordo com Leite (2020), a gestão de resíduos sólidos pode ser abordada de forma diferente dependendo do país. Levando em consideração os países desenvolvidos, a política ambiental muitas vezes forte, aliada com a disponibilidade de recursos financeiros e tecnológicos, possibilita que os resíduos sejam gerenciados de maneira adequada, diferentemente do que ocorre em países menos desenvolvidos, os quais, na maioria das vezes, não possuem instrumentos suficientes que possibilitem o tratamento adequado dos RSU, que ainda são depositados em aterros controlados ou lixões a céu aberto.

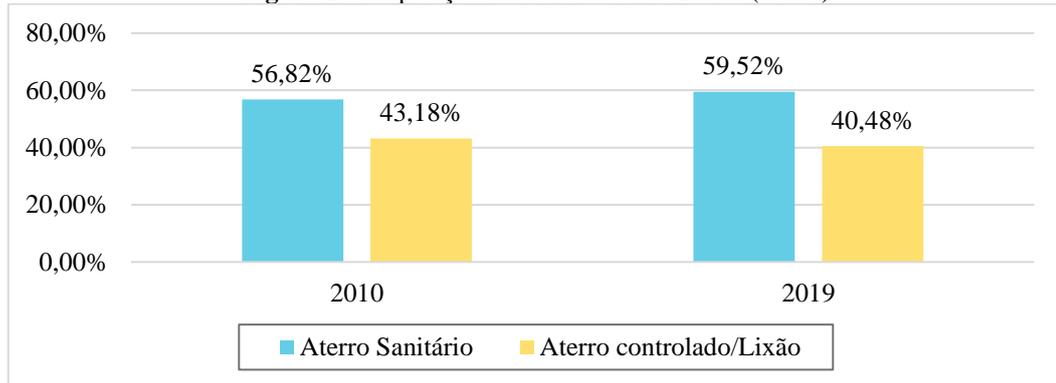
A Abrelpe (2020) apresenta a disposição final de RSU por região, conforme mostram a Tabela 1 e a Figura 1. A partir desses dados, conclui-se que, desde 2010 até 2019, a disposição final dos resíduos em locais inapropriados (aterro controlado e lixão) aumentou em todas as regiões, com exceção do Centro-Oeste, que teve uma diminuição da quantidade disposta em aterro controlado. Esse aumento significa que o país ainda caminha a passos lentos no que diz respeito à gestão de resíduos.

Tabela 1 - Disposição final de RSU nas regiões do Brasil, por tipo de destinação (T/ano)

| Região | 2010 | | | 2019 | | |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Aterro sanitário | Aterro controlado | Lixão | Aterro sanitário | Aterro controlado | Lixão |
| Norte | 1.165.810 | 1.015.795 | 1.348.675 | 1.683.745 | 1.421.675 | 1.664.765 |
| Nordeste | 4.314.300 | 4.312.110 | 4.486.215 | 5.686.700 | 5.255.270 | 5.031.525 |
| Centro-Oeste | 1.272.025 | 2.217.010 | 1.036.235 | 2.252.415 | 1.957.860 | 1.243.190 |
| Sudeste | 22.166.085 | 5.322.065 | 3.639.780 | 28.121.425 | 6.653.220 | 3.906.960 |
| Sul | 4.488.040 | 1.170.555 | 840.960 | 5.556.030 | 1.440.290 | 873.445 |
| Brasil | 33.406.260 | 14.037.535 | 11.351.865 | 43.300.315 | 16.727.950 | 12.720.250 |

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020).

A Figura 1 representa a disposição final dos RSU no Brasil realizada de forma adequada e inadequada nos anos de 2010 e 2019. Nesse intervalo de dez anos, conforme levantamento da Abrelpe (2020), os resíduos que foram a lixões e aterros controlados aumentaram pouco mais de quatro milhões de toneladas, o que ainda é preocupante, visto que essa disposição inadequada acarreta consequências ambientais e impactos sociais negativos.

Figura 1 - Disposição final dos RSU no Brasil (T/ano)

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020).

Para a região do Maciço de Baturité, o Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (Sema, 2018) apresenta a estimativa da população, bem como a geração de RSU para determinados períodos, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Analisando essas duas tabelas, infere-se que, com o aumento populacional, há gradativamente uma maior geração de RSU, que deverão ser geridos de maneira adequada pelo poder público, em geral o municipal.

Os municípios menores, na sua grande maioria, não possuem estrutura ou recursos financeiros para adotarem práticas adequadas referentes ao manejo correto dos RSU, assim terão dificuldades para garantir a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nas respectivas áreas. Uma maneira de resolver essa dificuldade é a viabilização dos Consórcios Públicos, ou seja, agrupamento de municípios que contribuem entre si para alcançarem um objetivo comum (Novakowski; Trindade; Piovezana, 2017).

Nesse contexto, foi constituído o Consórcio Associação Pública dos Municípios do Maciço de Baturité para o Saneamento Ambiental (AMSA), do qual fazem parte 12 municípios que buscam atender às determinações da PNRS relativas à gestão integrada dos RSU.

Tabela 2 - Estimativa da população da região do Maciço de Baturité

| Municípios | População | | | | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2022 | 2026 | 2030 | 2034 | 2037 |
| Acarape | 18.832 | 20.165 | 21.593 | 23.122 | 24.339 |
| Aracoiaba | 27.080 | 27.668 | 28.269 | 28.882 | 29.351 |
| Aratuba | 10.606 | 10.315 | 10.032 | 9.757 | 9.556 |
| Barreira | 23.140 | 24.469 | 25.873 | 27.358 | 28.528 |
| Baturité | 38.006 | 39.710 | 41.490 | 43.350 | 44.800 |
| Capistrano | 18.668 | 19.236 | 19.821 | 20.424 | 20.889 |
| Guaramiranga | 2.848 | 2.510 | 2.211 | 1.948 | 1.772 |
| Itapiúna | 21.898 | 23.112 | 24.393 | 25.745 | 26.808 |
| Mulungu | 15.603 | 17.280 | 19.138 | 21.196 | 22.884 |
| Pacoti | 12.476 | 12.780 | 13.092 | 13.411 | 13.655 |
| Palmácia | 15.205 | 16.452 | 17.800 | 19.259 | 20.431 |
| Redenção | 28.229 | 28.860 | 29.506 | 30.167 | 30.672 |
| Total | 232.592 | 242.557 | 253.219 | 264.620 | 273.683 |

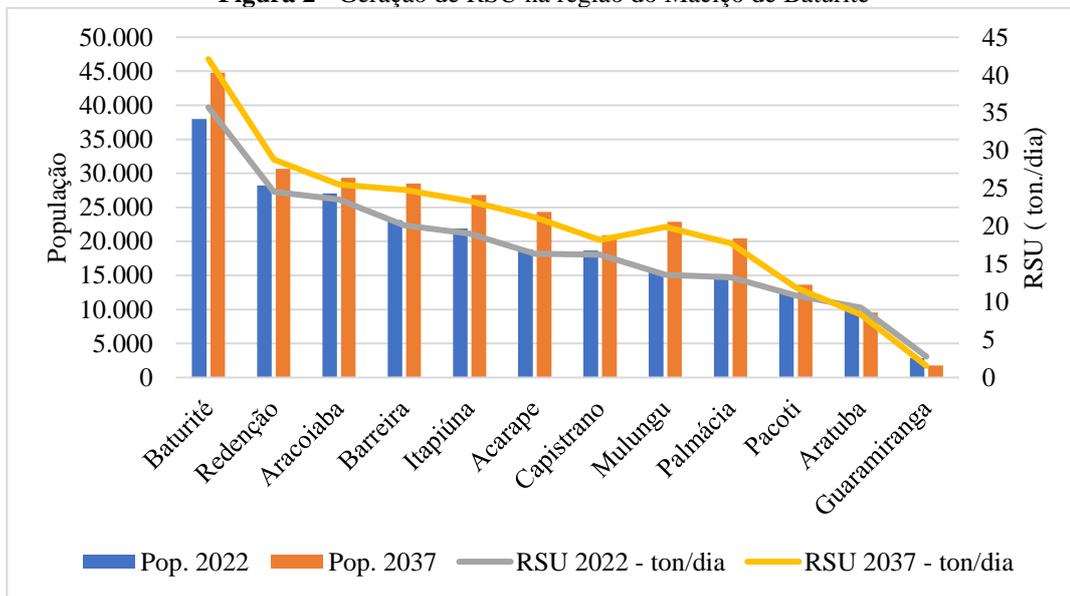
Fonte: Adaptado de Sema (2018).

Tabela 3 - Estimativa da geração de RSU na região do Maciço de Baturité

| Municípios | Estimativa de RSU (t/dia) | | | | |
|--------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 2022 | 2026 | 2030 | 2034 | 2037 |
| Acarape | 16,38 | 17,54 | 18,79 | 20,12 | 21,17 |
| Aracoiaba | 23,56 | 24,07 | 24,59 | 25,13 | 25,54 |
| Aratuba | 9,23 | 8,97 | 8,73 | 8,49 | 8,31 |
| Barreira | 20,13 | 21,29 | 22,51 | 23,80 | 24,82 |
| Baturité | 35,73 | 37,33 | 39,00 | 40,75 | 42,11 |
| Capistrano | 16,24 | 16,74 | 17,24 | 17,77 | 18,17 |
| Guaramiranga | 2,48 | 2,18 | 1,92 | 1,70 | 1,54 |
| Itapiúna | 19,05 | 20,11 | 21,22 | 22,40 | 23,32 |
| Mulungu | 13,57 | 15,03 | 16,65 | 18,44 | 19,91 |
| Pacoti | 10,85 | 11,12 | 11,39 | 11,67 | 11,88 |
| Palmácia | 13,23 | 14,31 | 15,49 | 16,76 | 17,78 |
| Redenção | 24,56 | 25,11 | 25,67 | 28,36 | 28,83 |
| Total | 205,02 | 213,80 | 223,20 | 235,37 | 243,39 |

Fonte: Adaptado de Sema (2018).

A Figura 2 representa a população das cidades que compõem a área do Maciço de Baturité e os RSU gerados por elas, conforme as Tabelas 2 e 3, no período de 2022 e 2037. É notável que as cidades de Baturité, Redenção e Aracoiaba figuram como as três maiores, respectivamente, geradoras de resíduos nos períodos citados.

Figura 2 - Geração de RSU na região do Maciço de Baturité

Fonte: Adaptado de Sema (2018).

Nessa conjuntura dos RSU, Poli *et al.* (2013) refere-se à gestão integrada de resíduos sólidos como sendo um conjunto de ações direcionadas com o intuito de solucioná-los, considerando as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável, ou seja, a gestão está ligada a políticas públicas que contemplam uma participação da sociedade na busca de medidas para os RSU que prezem a sustentabilidade (Brasil, 2010; Leite, 2020).

Ainda nesse contexto, o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos ou com o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, consiste no gerenciamento dos resíduos sólidos de acordo a PNRS. Assim, o gerenciamento é a aplicação de medidas no fluxo dos resíduos visando a atender ao que foi determinado na gestão integrada (Brasil, 2010).

A PNRS, no seu artigo 9º, determina que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, como mostra a Figura 3. O parágrafo 1º do mesmo artigo permite o uso de tecnologias que tenham como objetivo a recuperação energética dos RSU, desde que seja comprovada a viabilidade técnica e ambiental, bem como a implantação de Programa de Monitoramento de Emissão de Gases Tóxicos aprovado por órgão ambiental.

Figura 3 - Hierarquia na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Autor (2022).

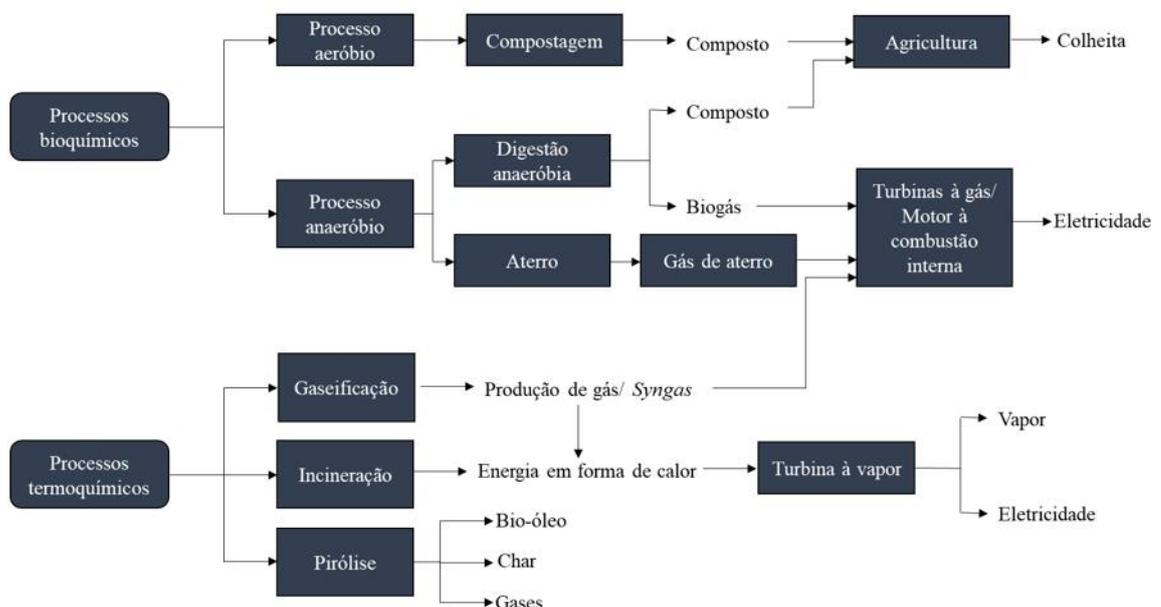
2.4 Recuperação energética dos RSU

Quando se fala em recuperação energética dos RSU, também conhecida como Waste do Energy (WtE), há, quase que inevitavelmente, uma relação com a incineração, uma vez que é a mais utilizada. No entanto, existem outras tecnologias/processos que são empregadas com o objetivo de extrair a energia desses resíduos, as quais são utilizadas como opções nos sistemas de gestão dos RSU (Leite, 2020).

De acordo com Rajaeifar *et al.* (2017), as tecnologias empregadas no reaproveitamento dos RSU possuem a capacidade de oferecer vantagens de gerenciamento eficiente desses resíduos, além de eletricidade, de maneira ecologicamente correta e economicamente viável. Vale ressaltar que elas farão parte de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos a fim de se conseguir uma reutilização completa dos materiais e da energia contidos nos fluxos de resíduos de forma sustentável. Nesse cenário, a incineração, a recuperação de gás de aterro, a digestão anaeróbica, a gaseificação e a pirólise têm sido bastante discutidas. A Figura 4 apresenta algumas rotas tecnológicas empregadas para o aproveitamento energético dos RSU.

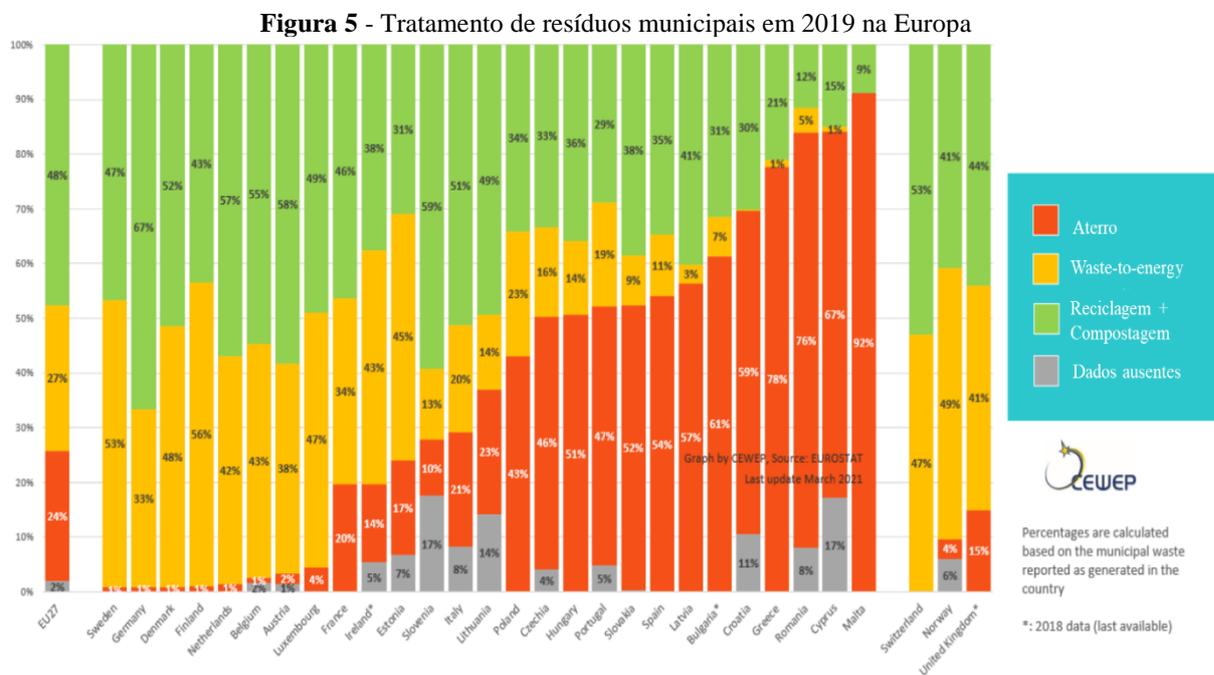
Nesse contexto, a Lei nº 12.305/2010 prevê que a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, observando normas operacionais específicas, de maneira a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Assim, o governo brasileiro, a partir da Portaria interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019, disciplina sobre a recuperação energética dos RSU, sendo observados a ordem de hierarquia na gestão e o gerenciamento desses resíduos, conforme Figura 2. Salienta-se que essa recuperação está vinculada à comprovação de sua viabilidade técnica, ambiental e econômico-financeira e à implantação de Programa de Monitoramento de Emissão de Gases Tóxicos aprovado pelo órgão ambiental competente, nos termos da legislação em vigor (Brasil, 2019).

Figura 4 - Conversão de energia e produtos gerados a partir dos RSU



Fonte: Leite (2020).

Na Europa, as tecnologias de transformação de resíduos em energia já são bastante empregadas. A Figura 5 apresenta, conforme a Confederação Europeia de Plantas de Recuperação de Energia Proveniente de Resíduos (Confederation of European Waste-to-Energy Plants - Cewep), a porcentagem dos resíduos depositados em aterro, do reaproveitamento energético e da parcela de reciclagem (incluindo compostagem) no gerenciamento dos resíduos municipais dos países que fazem parte da União Europeia, além de Noruega, Suíça e Reino Unido. Percebe-se, a partir da Figura 5, que a reciclagem e o aproveitamento energéticos dos RSU são complementares na gestão de resíduos, visto que será reaproveitado energeticamente aquilo que não puder ser reciclado ou reutilizado, removendo, assim, contaminantes que prejudicam o fluxo de reciclagem.



Fonte: Adaptada de Cewep (2021).

2.4.1 Processos bioquímicos

2.4.1.1 Digestão anaeróbia

A transformação da matéria orgânica em metano, dióxido de carbono e fertilizantes, que pode ocorrer de forma natural ou por meio artificial, através de biodigestores, é conhecida como digestão anaeróbia. Nesse processo, microrganismos decompõem a matéria orgânica produzindo o biogás, rico em metano, que apresenta poder calorífico para gerar energia térmica, elétrica ou pode ser convertido em gás veicular (CNI, 2019).

Na digestão anaeróbia, caso seja necessário, é preciso haver uma segregação do material orgânico, ou seja, um pré-tratamento, de modo a obter uma mistura homogênea. Então, é importante que os resíduos sejam segregados na fonte, dessa forma, evitam-se materiais indesejados, como papelão, vidro ou metais. Isso faz com que a geração de energia elétrica a partir de RSU seja um desafio, uma vez que é necessário garantir um fornecimento regular de resíduo orgânico livre de outros tipos de resíduos.

O biogás que é produzido a partir da ação de bactérias passa por gasômetros, que equilibram a quantidade de gás, em seguida o biogás passa por um purificador, de modo a se manter a concentração ideal de gás metano, retirando-se a umidade e os gases sulfídricos. Após isso, a energia química contida nas moléculas do biogás é convertida em mecânica a partir de uma combustão controlada em um conjunto motor-gerador. Essa energia mecânica ativa o gerador, que a converte em energia elétrica.

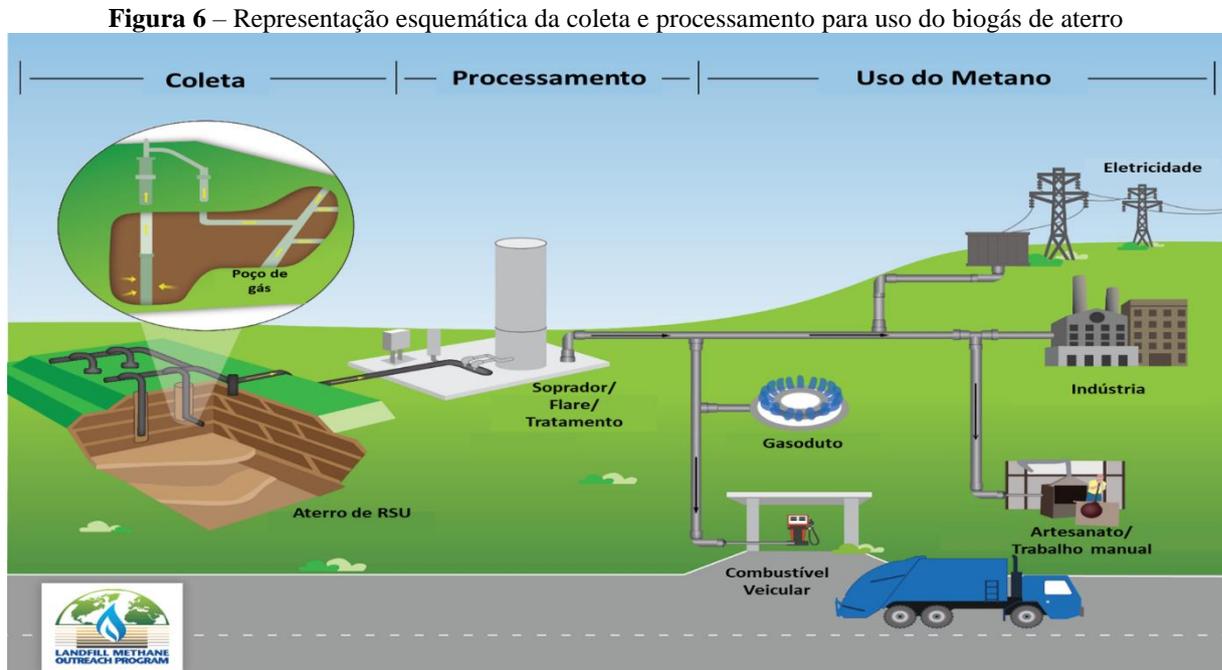
2.4.1.2 Gás de aterro

A partir de dados da Abrelpe (2020), no ano de 2019, 59,5% dos RSU coletados no Brasil foram dispostos em aterros sanitários. Essa disposição gera um determinado tipo de gás que é composto de metano, dióxido de carbono e pequenas frações de amônia e sulfeto de hidrogênio. Dessa maneira, a fim impossibilitar a liberação de metano para a atmosfera, a recuperação do gás de aterro torna-se uma alternativa viável na mitigação de emissões de GEE, podendo constituir uma fonte de receita ao gerar créditos de carbono no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), do protocolo de Kyoto (Leite, 2020).

A Figura 6 exibe um esquemático de coleta e processamento de gás de aterro. O gás é coletado nas camadas do aterro e levado até o processamento por meio de tubulações, que podem ser instaladas vertical ou horizontalmente. Após esse processo, o biogás poderá ser utilizado para gerar eletricidade, em indústrias, ou lançado à rede de gás para abastecer residências ou como combustível veicular (Leite, 2020).

Em determinadas situações, o rendimento efetivo de gás é bem abaixo das expectativas, ou seja, a produção de gás e a sua captação são diferentes, isso implica que parte do metano escapa para a atmosfera. O gás de aterro não deve ser considerado como uma tecnologia WtE primária, mas uma alternativa de utilizar um subproduto, no caso o biogás, para locais onde existam aterros sanitários e que não contem com outra alternativa.

Assim, esse processo bioquímico é visto como uma oportunidade para aterros existentes, em vez de novos projetos WtE (Mutz *et al.*, 2017).



Fonte: Adaptado de EPA (2022).

2.4.2 Processos termoquímicos

2.4.2.1 Incineração

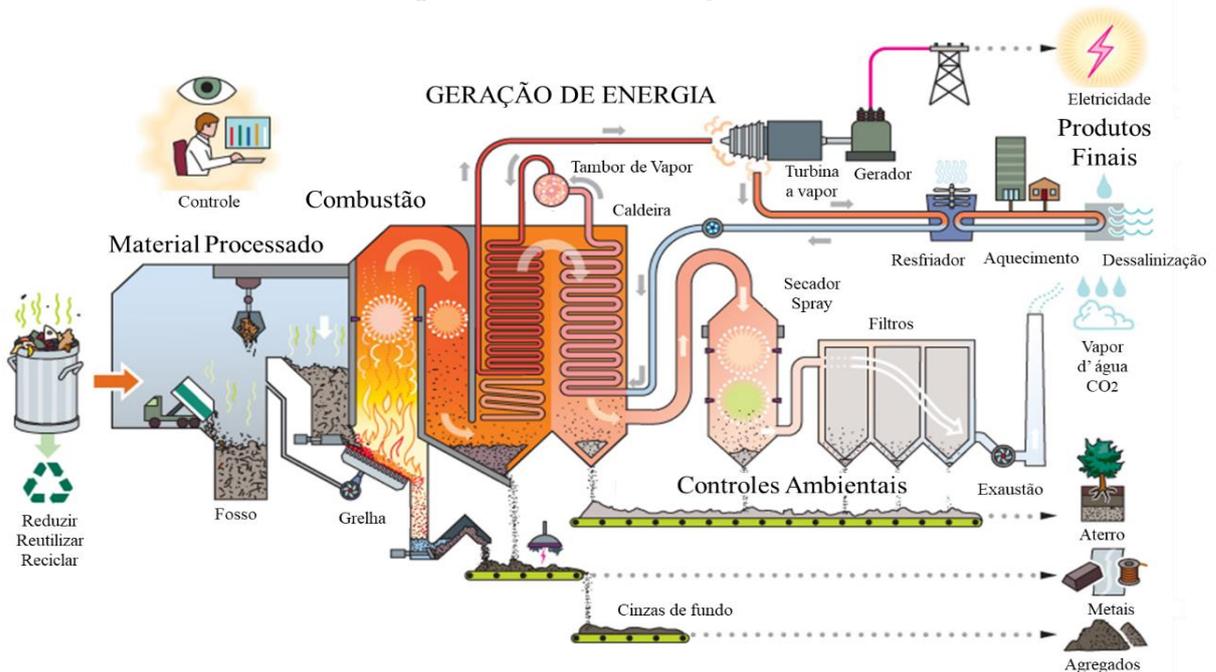
A incineração é a tecnologia mais empregada no tratamento termoquímico dos RSU. A partir dela, pode-se obter energia elétrica ou térmica (vapor). A geração de energia elétrica nesse processo é bem semelhante à das usinas termoeletricas convencionais que adotam o ciclo Rankine, sendo que, utilizando RSU, existirá uma relação entre poder calorífico do material encontrado nos resíduos e a eficiência de conversão do calor em eletricidade (Leite, 2020).

A Figura 7 representa um modelo de planta de incineração de RSU. Dentre as vantagens da utilização da incineração, está a redução da massa e volume dos resíduos, além de uma perda da sua periculosidade. Apesar de ser a tecnologia de reaproveitamento energético mais utilizada nos sistemas de gerenciamento integrado de RSU, a incineração ainda levanta questionamentos sobre os seus riscos ambientais e à saúde humana, uma vez que há emissão de poluentes atmosféricos, como dioxinas, furanos, gases ácidos e metais pesados (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

Embora haja uma resistência por parte de alguns estudiosos quanto ao uso de incineradores, dados de monitoramento revelam que as concentrações de poluentes nos gases lançados por incineradores na Europa estão bem abaixo dos limites estabelecidos por lei. A partir da análise de elementos de plantas incineradoras, entende-se que a incineração é uma tecnologia de tratamento térmico de RSU que contribui de maneira reduzida para a poluição atmosférica, contanto que bem operada e monitorada, tendo legislações fundamentais que são decisivas para conduzir a operação da tecnologia (Cardozo; Mannarino; Ferreira, 2021).

Estudo realizado na Itália, na comuna de Desio (província de Monza e Brianza), comparou as emissões de contaminantes de uma planta WtE com as de tráfego de veículos ao longo das principais vias da cidade, evidenciando que as emissões das plantas WtE apresentam um impacto muito baixo na qualidade do ar local. Já a contribuição do tráfego na área residencial de Desio é entre duas e quatro vezes superior ao impacto da planta WtE para poluentes tóxicos (Lonati; Cambiaghi; Cernuschi, 2019).

Figura 7 - Planta de incineração de RSU



Fonte: Adaptado de Deltaway Energy (2022).

Sendo um processo de combustão controlada, onde o ambiente tem alta concentração de oxigênio, a incineração queima os resíduos, convertendo-os em gases não combustíveis. Nesse tipo de processo, são aplicáveis três sistemas: grelhas móveis, forno rotativo e leito fluidizado (CNI, 2019).

- Grelhas móveis

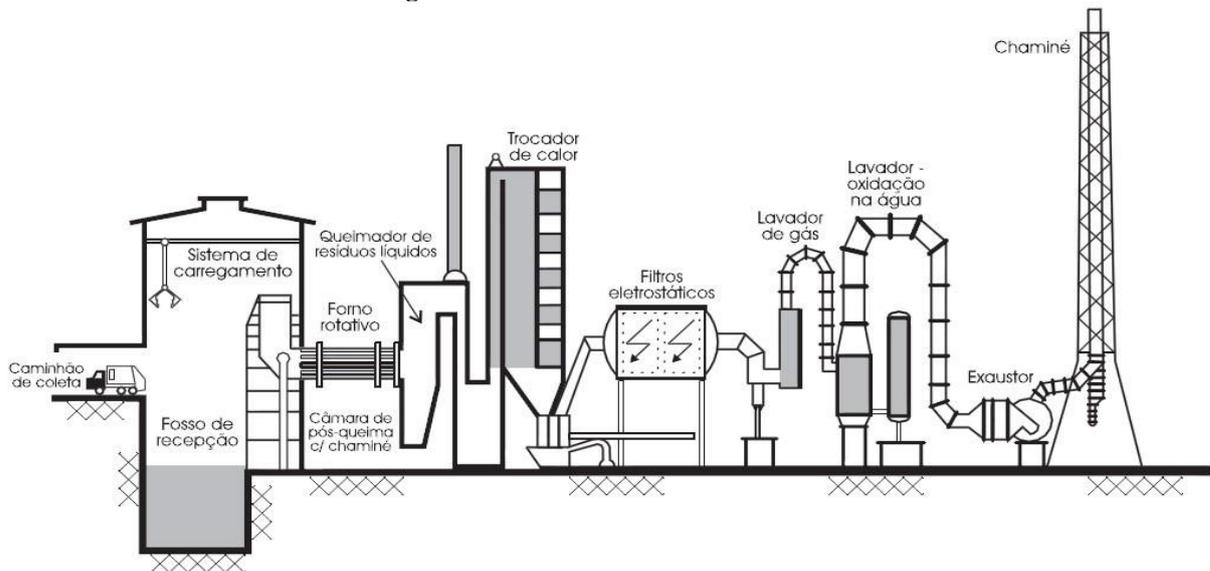
Conforme Barrak (2018), esse sistema é uma tecnologia simples e a mais aplicada, visto que possibilita a operação de materiais com granulometrias variadas. Nesse sistema, os resíduos são levados para câmara de combustão por meio da grelha móvel, que fica na parte inferior (ver Figura 7). O fluxo de entrada e saída dos resíduos na grelha acontece de maneira contínua e as condições do sistema são controladas de forma a otimizar o processo a fim de garantir uma combustão completa.

Quando bem dimensionada, a grelha móvel transporta e agita eficientemente os resíduos, assim como distribui uniformemente o ar de combustão. A grelha pode ser seccionada em zonas individualmente ajustáveis, e o ar de combustão pode normalmente ser preaquecido para acomodar variações no valor calorífico dos resíduos. Nesse tipo de sistema, pode-se incinerar resíduos com poder calorífico de 7.800 kJ/kg a 12.500 kJ/kg sem demandar combustível adicional. Pequenas unidades modulares pré-fabricadas recebem entre 5 tons/dia e 200 tons/dia, e plantas maiores são capazes de processar até 3.000 tons/dia (CNI, 2019).

- Forno rotativo

A queima dos resíduos em incinerador com forno rotativo acontece em camadas em um cilindro rotativo inclinado, o qual transporta o material pelo forno através de suas rotações. O cilindro pode ter de 1 a 5 metros de diâmetro e de 8 a 20 metros de comprimento, e sua capacidade começa em 2,4 tons/dia (100 kg/h), chegando a 480 tons/dia (20 tons/h). Sendo a proporção de ar maior do que as outras tecnologias de incineração, a eficiência energética é ligeiramente inferior e de até 80%, uma vez que o tempo de retenção dos gases de combustão é usualmente muito curto para uma combustão completa no próprio forno rotativo; para garantir a destruição de componentes tóxicos, o cilindro é interligado a uma câmara de pós-combustão que pode ser incorporada na primeira parte da caldeira. Em fornos rotativos, podem ser tratados resíduos sólidos, líquidos e gasosos, bem como lodos de esgotos. A Figura 8 demonstra um incinerador com forno rotativo (CNI, 2019).

Figura 8 - Incinerador com forno rotativo



Fonte: Portal Resíduos Sólidos (2022).

- Leito fluidizado

Essa tecnologia é baseada no princípio de que as partículas sólidas são misturadas com o combustível e fluidizadas pelo ar. O reator (depurador) consiste em recipiente vertical de aço com revestimento refratário, o qual contém um leito de material granular, como areia de sílica ou calcário. A tecnologia de leito fluidizado possui uma série de características atraentes em relação à incineração: redução de substâncias perigosas no reator de leito fluidizado, alta eficiência térmica, flexibilidade em relação à entrada de múltiplos combustíveis e custo (CNI, 2019).

A combustão, nesse processo, acontece em um único estágio. Os resíduos são lançados em uma câmara com um leito de material inerte ou areia que estão superaquecidos; a temperatura desse material fica entre 700 e 900 °C, sendo o leito mantido em agitação contínua por meio de um fluxo de ar preaquecido que é injetado no fundo do forno. As partículas dos resíduos sólidos, quando entram em contato com a areia, trocam calor, o que faz com que o sistema aqueça e entre em combustão rapidamente. As cinzas mais pesadas são retiradas por extratores mecânicos situados no fundo da caldeira e as cinzas leves são arrastadas e coletadas nos sistemas de limpeza de gases (Barrak, 2018).

A principal desvantagem para o tratamento de resíduos nessa tecnologia é a necessidade do processo de pré-tratamento dos RSU, em que são removidos materiais pesados e inertes, de maneira a atender aos requisitos bastante rigorosos de tamanho, valor calorífico e teor de cinzas (Barrak, 2018; CNI, 2019).

Conforme a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2019), a gaseificação é mais apropriada para o tratamento de RSU que apresentam uma composição homogênea, assim, para esse processo, é importante que se leve em consideração o tamanho, bem como a consistência dos resíduos, dessa maneira, terá que haver um pré-tratamento dos RSU, uma vez que o resíduo brasileiro é, na sua grande parte, heterogêneo (CNI, 2019).

A pirólise é definida como a decomposição térmica da fração orgânica sob atmosferas estequiométricas não oxidantes ou muito pouco oxidantes, ou seja, sem ausência de oxigênio, ocorrendo entre temperaturas que variam de 250 a 1.200 °C. Os produtos gerados a partir desse processo termoquímico são: gases não condensáveis (*syngas*), bio-óleo e biochar. A pirólise pode ser classificada como lenta, rápida ou *flash*, a depender das condições da operação do processo, como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de resistência (Tayibi *et al.*, 2021).

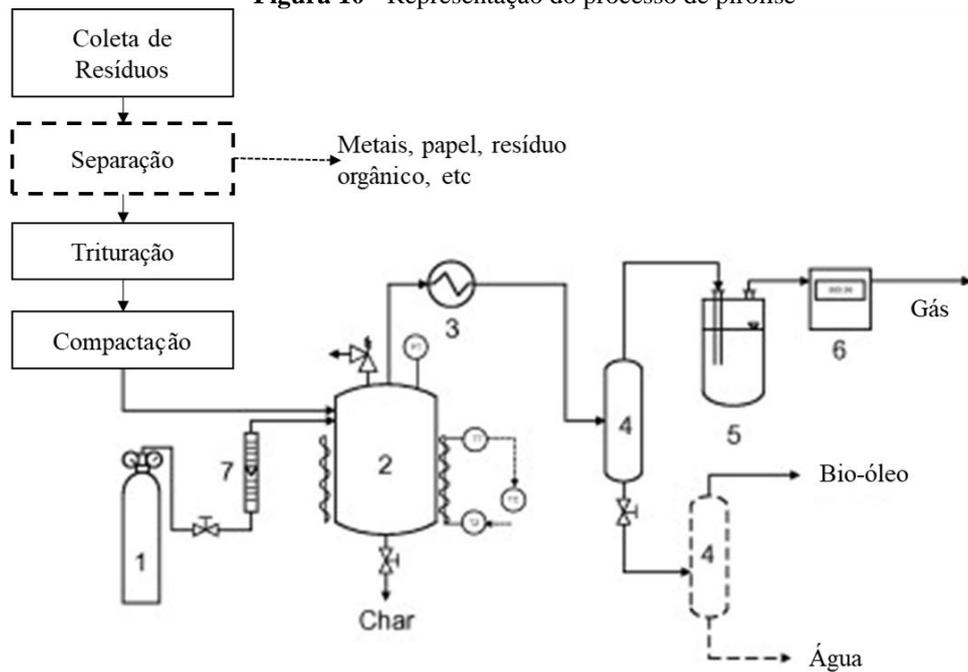
Consoante Tayibi *et al.* (2021), o *syngas* obtido a partir da pirólise, devido ao seu alto poder calorífico, poderá ser utilizado para a geração de calor ou eletricidade. Uma outra alternativa é transformá-lo em metanol, éter dimetílico e outras matérias-primas químicas. Já o bio-óleo produzido poderá substituir o diesel em motores de combustão interna para produzir eletricidade. O biochar pode ser convertido em carvão ativado através de processos de ativação física e química com o objetivo de aumentar suas propriedades físico-químicas, principalmente a área superficial acessível e a porosidade.

A grande maioria das tecnologias de pirólise utilizadas necessitam de pré-tratamento dos RSU, sendo isso uma etapa necessária do processo. Esse pré-tratamento consiste na separação de materiais indesejáveis e redução de tamanho. Geralmente uma etapa de secagem antes de ir ao reator de pirólise é necessária para reduzir o teor de umidade dos materiais (Chen *et al.*, 2014).

Segundo Leite (2020), ao se comparar a pirólise com a incineração e gaseificação, a vantagem do processo é que ele libera na atmosfera concentrações menores de NO_x e SO₂, gases considerados nocivos ao meio ambiente.

De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (Feam, 2012), o balanço energético do sistema de pirólise é sempre positivo, pois produz mais energia do que consome. A Figura 10 apresenta uma planta de pirólise que foi construída em laboratório.

Figura 10 - Representação do processo de pirólise



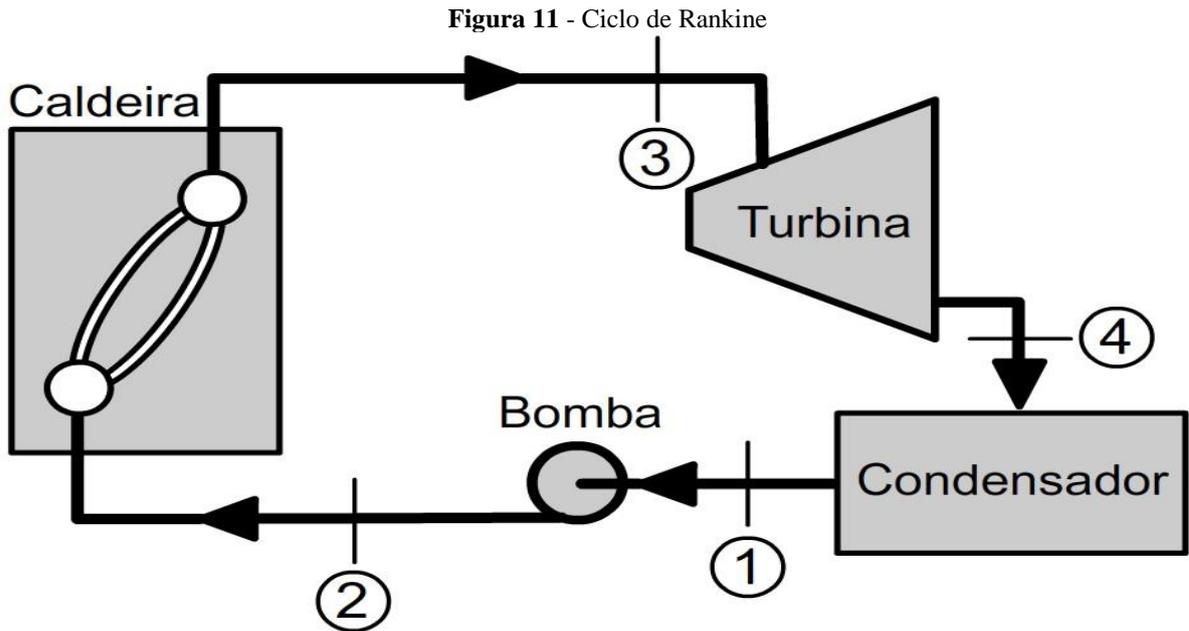
1: abastecimento; 2: reator; 3: resfriamento; 4: separador; 5: purgador; 6: medidor de vazão de gás; 7: rotâmetro.

Fonte: Adaptado de Ateş, Miskolczi e Borsodi (2013).

2.5 Usina Termelétrica para Recuperação Energética de RSU

Em URE, a tecnologia de combustão em grelha é a mais utilizada de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem (Cempre, 2018). Segundo Amulen *et al.* (2022), esse tipo de tecnologia já é empregada em mais de 500 plantas no mundo, sendo a sua operação já consolidada. Santos (2013) afirma que os incineradores de grelha possibilitam a combustão de diversos materiais, contemplando aqueles que apresentam alto teor de umidade, o que permite que os RSU possam ser aproveitados como combustível.

As usinas termelétricas geralmente adotam o ciclo de Rankine, conforme dito anteriormente, uma vez que esse ciclo é compatível para a geração de energia elétrica a partir de vapor, ou seja, trata-se de um ciclo termodinâmico que realiza a conversão de parte do calor em trabalho mecânico. A Figura 11 apresenta um esquema básico do ciclo de Rankine, a qual expõe os equipamentos principais que fazem parte do ciclo: caldeira, turbina, condensador e bomba. De modo simplificado, a partir da caldeira há geração de vapor, o qual será direcionado para a turbina a vapor, e essa, por sua vez, estará ligada a geradores elétricos capazes de gerar energia elétrica.



O ciclo de Rankine apresenta quatro processos reversíveis e usa a água como fluido devido ao seu baixo custo, além de suas propriedades favoráveis. Conforme Figura 11:

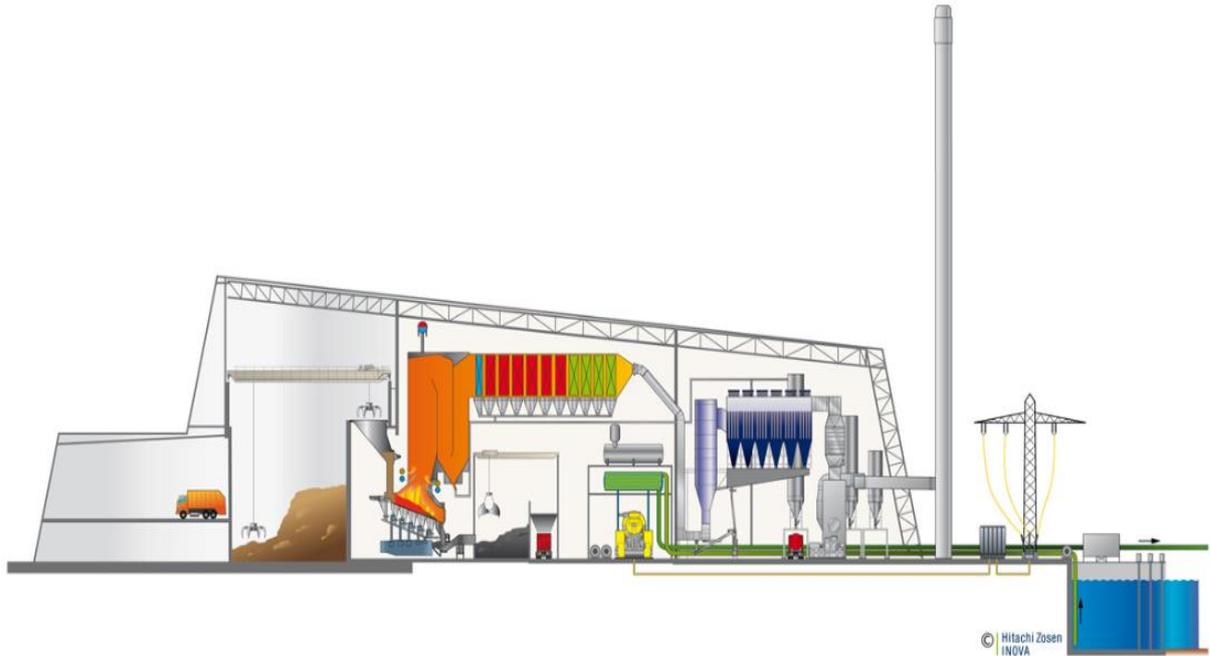
- Processo 3-4: expansão isentrópica (entropia constante) do fluido de trabalho através da turbina até a pressão do condensador.
- Processo 4-1: transferência de calor do fluido de trabalho, a fim de diminuir sua temperatura, a pressão constante através do condensador, chegando em forma de líquido saturado no ponto 3.
- Processo 1-2: compressão isentrópica (entropia constante) na bomba até o ponto 4, aumentando a pressão do fluido.
- Processo 2-3: transferência de calor para o fluido de trabalho com o objetivo de aumentar sua temperatura, de forma a manter a pressão constante através da caldeira, completando o ciclo.

2.5.1 Caldeira

Equipamento também conhecido por gerador de vapor, o qual produz vapor de água acima da pressão atmosférica utilizando energia térmica a partir de uma fonte de energia, no caso em estudo, essa fonte é representada pelos RSU.

A partir da queima do combustível, a caldeira irá gerar vapor d'água que será utilizado para acionar uma turbina a vapor com o objetivo de gerar energia elétrica. A Figura 12 demonstra uma URE desenvolvida pela empresa Hitachi Zosen Inova.

Figura 12 - Planta de URE para a geração de energia elétrica

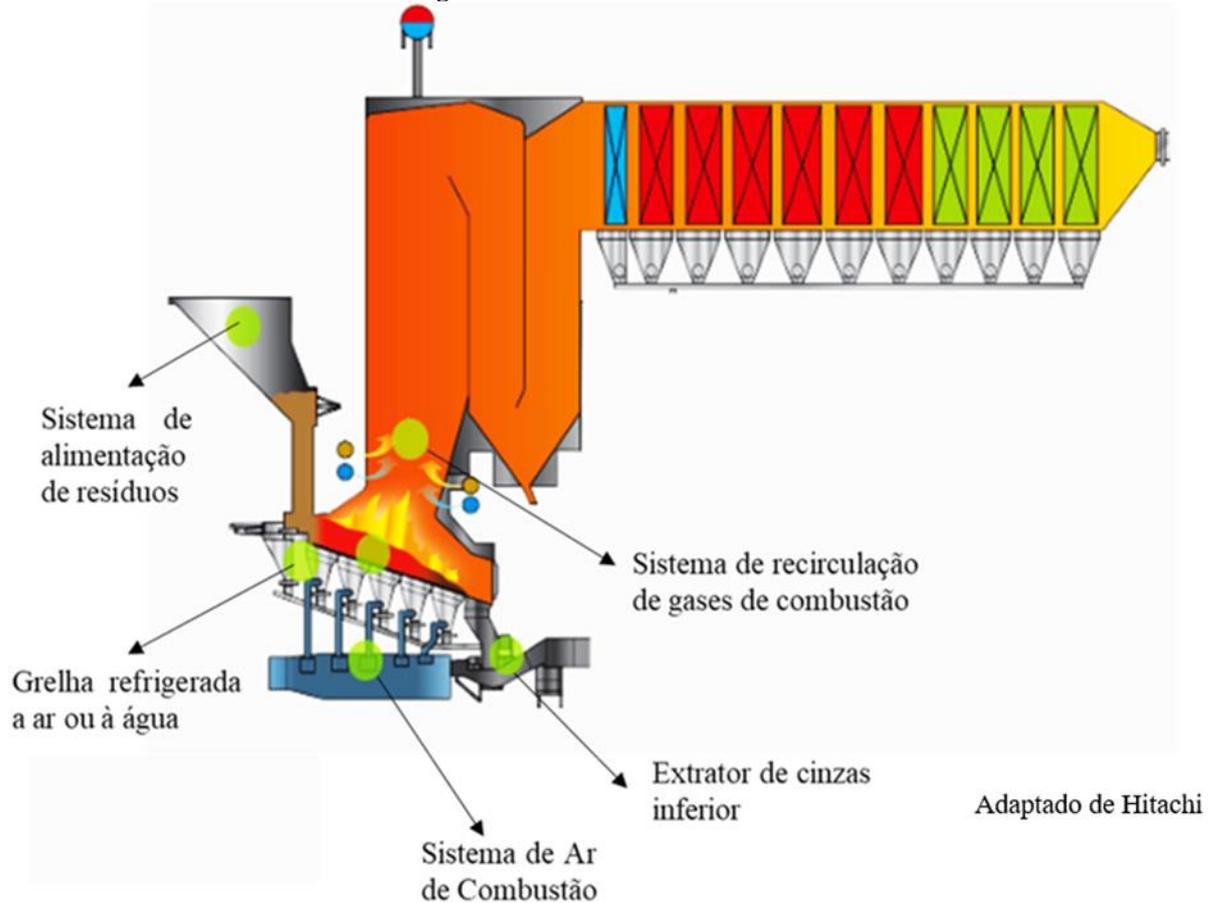


Fonte: Hitachi Zosen Inova (2022).

A empresa citada é responsável por vários projetos e construções de plantas WtE, além dos equipamentos que compõem essas usinas, como, por exemplo, a grelha de combustão e a caldeira, os quais são apresentados na Figura 13. De acordo com a fabricante, as grelhas podem ser confeccionadas com refrigeração a água ou ar, sendo a utilização de um dos dois realizada em função do diagrama de combustão, dos requisitos específicos da instalação e dos resíduos processados. Caso o valor calorífico dos resíduos seja baixo ou médio, é mais apropriado o resfriamento a ar. Já para resíduos com maior poder calorífico, a grelha refrigerada a água será mais compatível.

Conforme a fabricante Hitachi Zosen Inova, o processo de combustão libera gases que são resfriados na caldeira. Nesse processo, o calor é transferido para a água, que resultará na produção de vapor, o qual é expandido em uma turbina ou usado para fins de aquecimento. No Brasil, por ser um país de clima tropical, o ideal é a produção de energia elétrica a partir da turbina acoplada a um gerador. Vale ressaltar que parte da energia elétrica produzida é utilizada para a própria planta. A fabricante afirma que a eficiência líquida global de uma usina que produz apenas energia elétrica é da ordem de 35%.

Figura 13 - Incinerador e caldeira



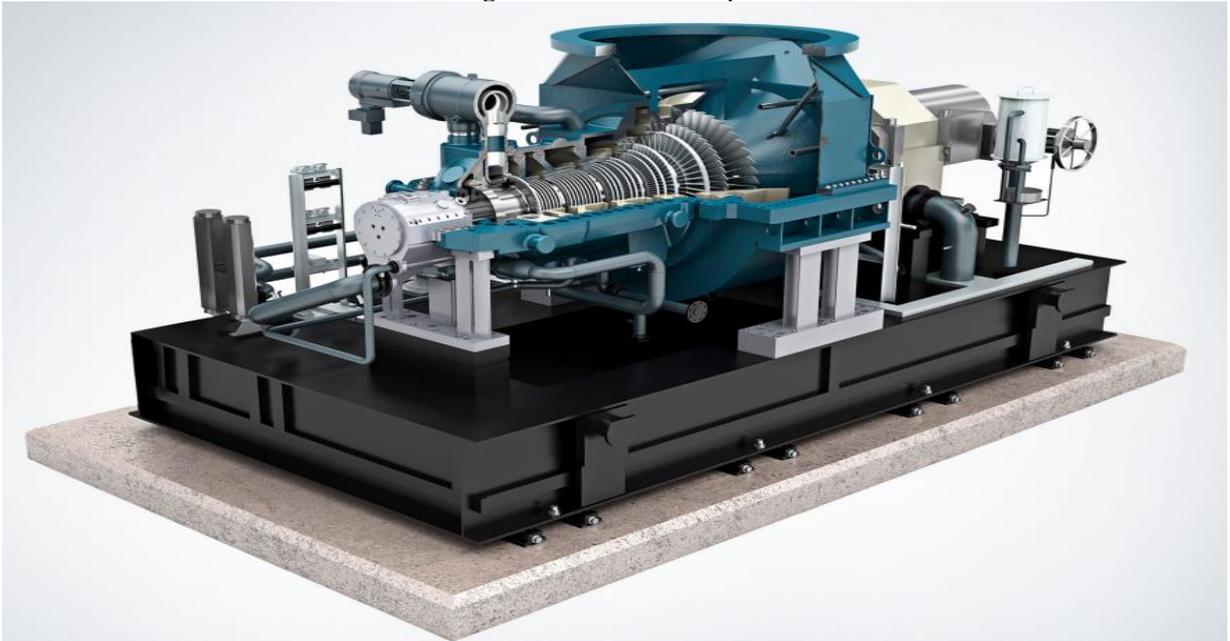
Fonte: Adaptado de Hitachi Zosen Inova (2022).

2.5.2 Turbina a vapor

A turbina a vapor é responsável por transformar o vapor em energia elétrica a partir do acoplamento a um gerador. Para obter os parâmetros desse tipo de turbina que podem ser utilizadas em usinas de recuperação energética, realizou-se uma busca na internet, a partir da qual se descobriu que a empresa Siemens disponibiliza para o mercado a turbina a vapor SST-300, mostrada na Figura 14. Essa turbina, de acordo com a fabricante, apresenta os seguintes dados técnicos:

- 1) Potência de saída: até 45 MW.
- 2) Pressão de entrada de vapor: até 140 bar / até 2.030 psi.
- 3) Temperatura do vapor de entrada: até 540 °C / até 1004 °F.
- 4) Extrações controladas (até dois): simples ou duplo, estágio adaptável, controle de bicos, controle de aceleração.

Figura 14 - Turbina a vapor



Fonte: Siemens Energy (2022).

Como exemplo de aplicação, esse tipo de turbina foi instalado na planta WtE Linconshire, que fica na cidade de North Hykeham, Lincoln, Reino Unido. A fabricante Siemens também disponibiliza outros modelos, com uma faixa de potência de 2 a 250 MW, que são compatíveis para a recuperação de RSU. Assim, a seleção da turbina mais adequada vai ter relação com a potência instalada da planta.

2.5.3 Controle de emissões

Conforme citado anteriormente, o tratamento térmico de RSU pode resultar na emissão de gases e outros compostos que são considerados poluentes atmosféricos, como dioxinas, furanos, gases ácidos, metais pesados, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e material particulado. Assim, é fundamental que sejam utilizados equipamentos que realizem o controle das emissões atmosféricas das plantas de incineração.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), a partir da sua Resolução nº 316, de 2002, estabelece procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes, de modo a minimizar os impactos ao meio ambiente e à saúde pública resultante dos processos de tratamento térmico. A Tabela 4 apresenta os valores dos limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos permitidos nos processos de tratamentos térmicos.

Tabela 4 - Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para sistema de tratamento térmico

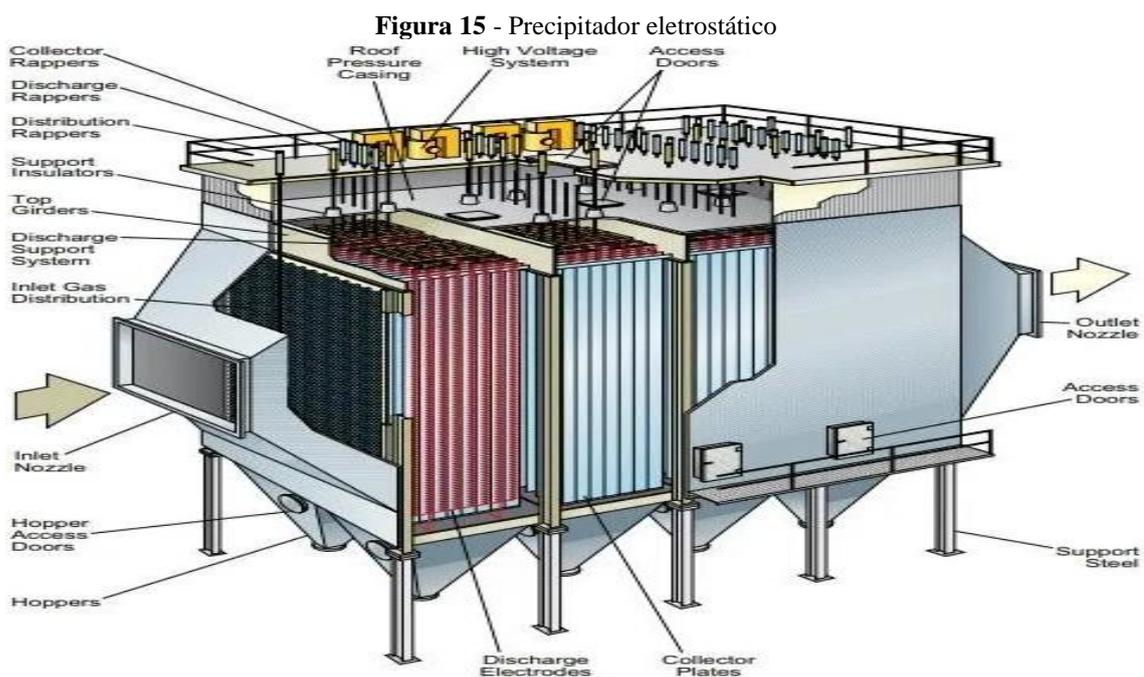
| Poluentes | Conama 316/2002 (mg/Nm ³) |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Material particulado (MP) | 70 |
| Classe 1: Cd, Hg, Tl | 0,28 |
| Classe 2: As, Co, Ni, Te, Se | 1,4 |
| Classe 3: Sb, Pb, Cr, CN, Cu, Sn, F, Mn, Pt, Pd, Rh, V | 7,0 |
| SO _x | 280,0 |
| NO _x | 560,0 |
| CO | 100,0 |
| Compostos clorados inorgânicos (CCI) | 80 |
| Compostos fluorados inorgânicos (CFI) | 5,0 |
| Dioxinas e furanos (ng/Nm ³) | 0,5 |

Fonte: Brasil (2002).

De acordo com Cempre (2018), o material particulado é formado por compostos orgânicos sólidos não queimados e compostos inorgânicos, sendo que, para a retenção deste material, utilizam-se normalmente filtros eletrostáticos e filtros de tecidos.

Em um precipitador eletrostático, representado na Figura 15, as partículas são ionizadas, após isso são separadas sob a influência de um campo elétrico. O precipitador eletrostático geralmente se localiza a jusante da caldeira (Hitachi Zosen Inova).

A empresa Hitachi Zosen Inova apresenta um processo de lavagem a seco, a XeroSorp. Nesse processo, os gases ácidos corrosivos (HCl, HF e SO₂) são neutralizados com a ajuda de aditivos de adsorção. O processo não envolve a introdução de água. Em vez disso, utilizam-se dois aditivos de adsorção diferentes para neutralização: cal hidratada e bicarbonato de sódio.



Fonte: Brasil Escola (2022).

No que diz respeito à neutralização de óxidos nitrosos (NO_x), a Hitachi Zosen Inova possui o processo SNCR (redução seletiva não catalítica) e o SCR (redução catalítica seletiva). Nesses processos, os óxidos nitrosos reagem com a amônia e são quimicamente convertidos em nitrogênio e vapor de água. O uso de um conversor catalítico, SCR, permite a redução de óxidos nitrosos a temperaturas significativamente mais baixas e é consideravelmente mais rápido que o processo SNCR.

A dioxinas e furanos provenientes da combustão são adsorvidos em carvão ativado; esse processo é facilmente integrado a outros processos de remoção já citados anteriormente, sendo uma tecnologia bastante empregada em URE. Vale ressaltar que o tratamento dos gases da combustão atende a uma necessidade específica, dessa maneira pode haver a demanda de combinação de tecnologias para tratamento dos resíduos a fim de atender aos limites de emissão.

Pode-se perceber que existem equipamentos apropriados e eficientes a fim de controlar as emissões de poluentes atmosféricos dos sistemas de tratamento térmico, uma vez que esses sistemas estão sujeitos a uma rigorosa legislação ambiental, o que os tornam seguros no que diz respeito à poluição atmosférica.

2.6 Minigeração e microgeração

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a partir da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Essa resolução permitiu a instalação de central geradora de energia elétrica que utilizasse cogeração qualificada, segundo regulamentação da Aneel, ou fontes renováveis, conectada na rede de distribuição a partir de instalações de unidades consumidoras.

Assim, a referida resolução possibilitou a geração distribuída de energia, que consiste na energia elétrica gerada próxima ao local de consumo. Essa proximidade permite adiar investimentos em linhas de transmissão, que são utilizadas para transmitir a energia gerada nas grandes fontes geradoras até os centros consumidores, além de admitir geradores de pequeno porte a partir de fontes de energia renováveis que garantem uma diversificação da matriz energética brasileira.

A Resolução Normativa nº 482/2012 foi revogada pela Resolução Normativa Aneel nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, a qual aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de

distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (Aneel, 2023).

Segundo a Resolução Normativa nº 1.059/2023, a microgeração e a minigeração são diferenciadas pela potência de geração de energia elétrica e são definidas a seguir:

XXIX-A - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora; XXIX-B - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada, conforme a Resolução Normativa nº 1.031, de 26 de julho de 2022, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidade consumidora, que possua potência instalada em corrente alternada maior que 75 kW e menor ou igual a: a) 5 MW para as centrais geradoras de fontes despacháveis; b) 3 MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis; ou c) 5 MW para unidades consumidoras já conectadas em 7 de janeiro de 2022 ou que protocolarem solicitação de orçamento de conexão, nos termos da Seção IX do Capítulo II do Título I, até 7 de janeiro de 2023, independentemente do enquadramento como centrais geradoras de fontes despacháveis (Aneel, 2023).

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) permite que a energia gerada não consumida possa ser injetada na rede de distribuição para ser compensada posteriormente, constituindo um crédito para a unidade geradora. A Resolução nº 1.059/2023 define o SCEE como:

XLV-A – [...] sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída na rede da distribuidora local, cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente utilizada para compensar o consumo de energia elétrica ativa ou contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do sistema (Aneel, 2023).

O SCEE pode ser aplicado à geração compartilhada, a qual se caracteriza por um agrupamento de consumidores, por meio de consórcio, cooperativa ou qualquer outra forma de associação civil instituída para esse fim, composta por pessoas físicas ou jurídicas que possuam unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída (Aneel, 2023).

No caso de consórcio de municípios, por exemplo, é possível a geração compartilhada, na qual os participantes, por meio de um gerador único, dividem a energia elétrica obtida por este. Assim, os integrantes, a partir de uma métrica definida por eles, estabelecem a que parcela de energia elétrica cada um terá direito.

A geração de energia elétrica por meio do aproveitamento energético dos RSU, caso se enquadre nos moldes de microgeração ou minigeração, pode ser uma opção para municípios que se agrupem a fim de firmarem uma geração compartilhada.

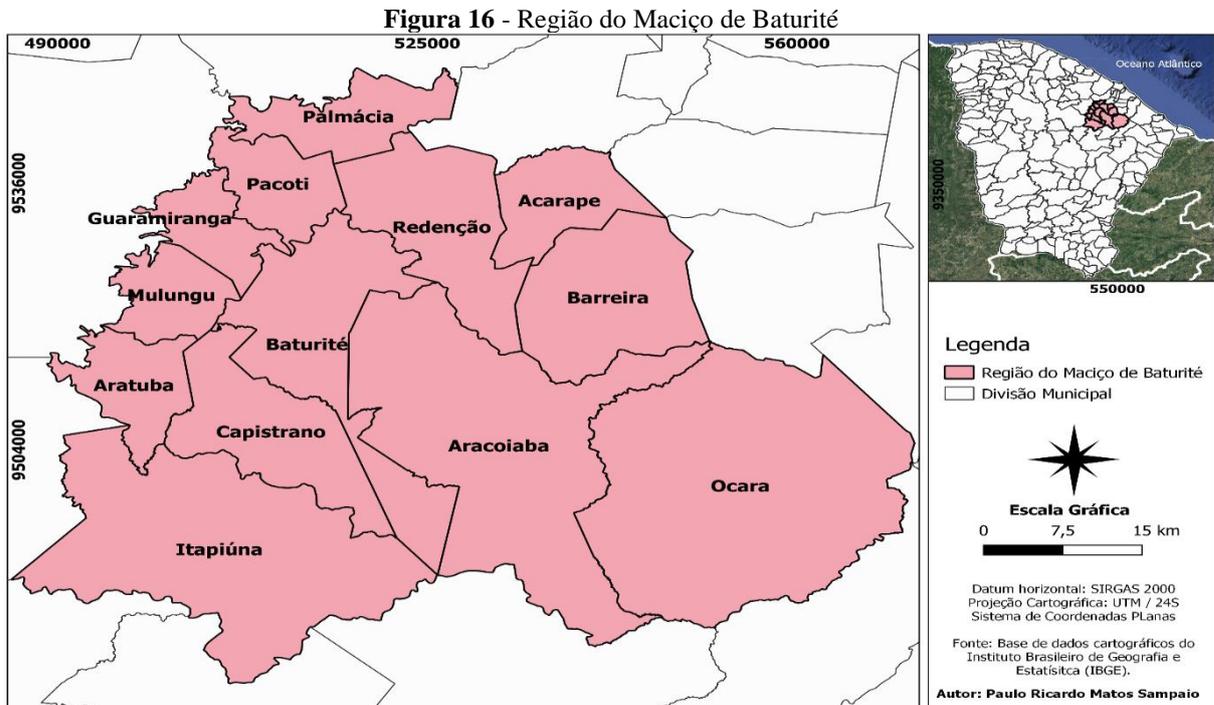
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

O Maciço de Baturité, o qual ocupa uma área de 3.729 Km², é uma formação geológica localizada no sertão central do Ceará, composto pelos municípios de Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Ocara, Pacoti, Palmácia e Redenção, conforme representado na Figura 16 (Ipece, 2022).

No que diz respeito à metodologia, trata-se de um estudo de caso do tipo exploratório de natureza básica. Quanto ao problema de pesquisa, utilizou-se uma abordagem qualitativa e quantitativa. Já em relação às técnicas de análise de dados, acolheu-se a análise de conteúdo e do discurso para a parte da abordagem qualitativa e a estatística descritiva referente à pesquisa quantitativa.

Para a caracterização da área de estudo, considerou-se o Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – Região do Maciço de Baturité (2018), que contempla apenas 12 municípios da região do Maciço de Baturité, sendo que o município de Ocara não está abrangido por esse Plano. Ainda de acordo com o respectivo Plano, a população estimada para os municípios que o compõem, bem como a geração de RSU, é representada na Tabela 5.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 5 - Estimativa da população e da quantidade de RSU na região do Maciço de Baturité

| Ano | 2024 | 2026 | 2030 | 2034 | 2037 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| População | 237.491 | 242.557 | 253.219 | 264.620 | 273.683 |
| RSU (t/dia) | 209,34 | 213,80 | 223,30 | 235,37 | 243,39 |

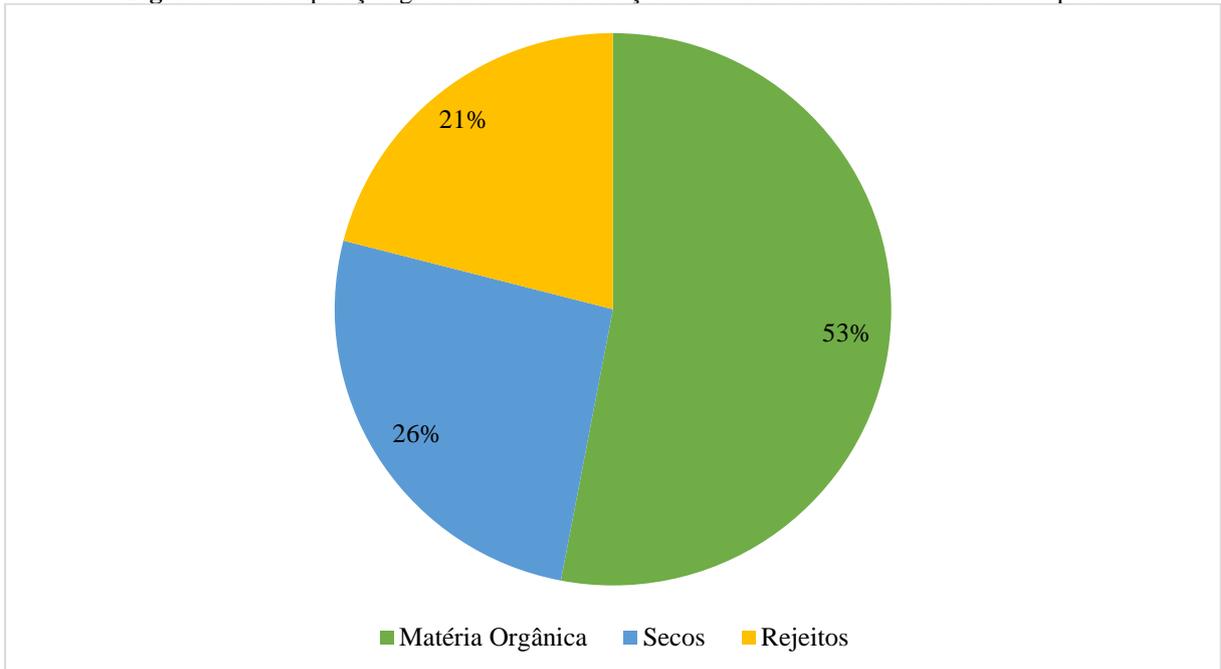
Fonte: Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – Região Maciço de Baturité (2018).

Na Tabela 5, percebe-se que a geração de RSU na respectiva região é relevante, necessitando de uma adequada gestão. Assim, o aproveitamento energético a partir de uma URE de RSU pode ser viável para a região, dando uma destinação final ambientalmente adequada, além de geração de energia elétrica.

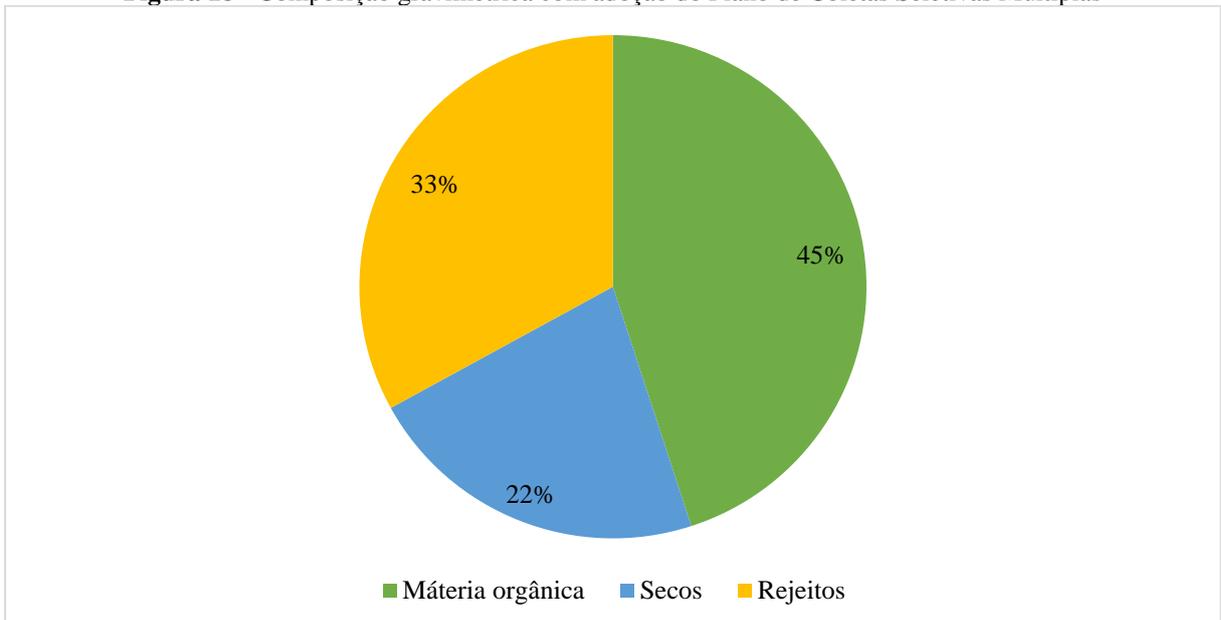
3.2 Estimativa da quantidade de RSU e sua caracterização no Maciço de Baturité

O Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região do Maciço de Baturité, elaborado pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Ceará (Sema), é um documento que busca apresentar alternativas que visam à melhoria e otimização de recursos públicos com implementação de uma gestão de resíduos sólidos de forma regionalizada e integrada. Dentre os objetivos desse Plano, estão: o estímulo à implantação da coleta seletiva nos municípios da região Maciço de Baturité; o apoio à estruturação dos consórcios para a implantação da Política Regionalizada de Resíduos Sólidos; a inclusão dos catadores de materiais recicláveis no processo de coleta seletiva; a compostagem dos resíduos orgânicos (Sema, 2018).

Conforme o Plano Regional, citado anteriormente, a região do Maciço de Baturité prevê a implantação do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas, que consiste na separação dos resíduos de acordo com sua constituição ou composição. Em 2017, a partir de estudos da composição gravimétrica, foi determinado que a porcentagem de resíduos orgânicos era de 53%; a de seco, 26%; e a de rejeitos, 21%, segundo está representado na Figura 17. Com a aplicação da coleta seletiva múltipla, espera-se que a porcentagem, no período de cinco anos a partir de 2017, seja de 45% de resíduos orgânicos, 22% de seco e 33% de rejeitos, uma vez que se consiga atingir o objetivo de tratamento de 85% dos resíduos secos e orgânicos. As porcentagens com a aplicação da coleta seletiva estão representadas na Figura 18.

Figura 17 - Composição gravimétrica sem adoção do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas

Fonte: Sema (2018).

Figura 18 - Composição gravimétrica com adoção do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas

Fonte: Sema (2018).

Para o estudo em questão, será adotado o ano de 2024, para o qual o respectivo Plano estabelece uma estimativa do número de habitantes para a região, bem como a quantidade da geração de RSU representados na Tabela 6. A quantidade de RSU previstos para o respectivo ano é de 209,34 toneladas por dia, considerando os 12 municípios que integram o Plano.

Tabela 6 - Estimativa da população e da quantidade de RSU na região do Maciço de Baturité

| Municípios | População total (2024) | Quantidade de RSU (2024) - ton/dia |
|--------------|------------------------|------------------------------------|
| Acarape | 19.487 | 16,95 |
| Aracoiaba | 27.373 | 23,81 |
| Aratuba | 10.460 | 9,1 |
| Barreira | 23.795 | 20,7 |
| Baturité | 38.849 | 36,52 |
| Capistrano | 18.950 | 16,49 |
| Guaramiranga | 2.674 | 2,33 |
| Itapiúna | 22.497 | 19,57 |
| Mulungu | 16.420 | 14,29 |
| Pacoti | 12.627 | 10,99 |
| Palmácia | 15.816 | 13,76 |
| Redenção | 28.543 | 24,83 |
| Total | 237.491 | 209,34 |

Fonte: Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – Região Maciço de Baturité (2018).

Para corroborar os dados referentes à quantidade de RSU da Tabela 6, Santos *et al.* (2019), em seu estudo, utilizaram a equação 1 para calcular a geração de resíduos por ano.

$$R_g = \frac{P \times I_g \times 365}{1000} \quad (1)$$

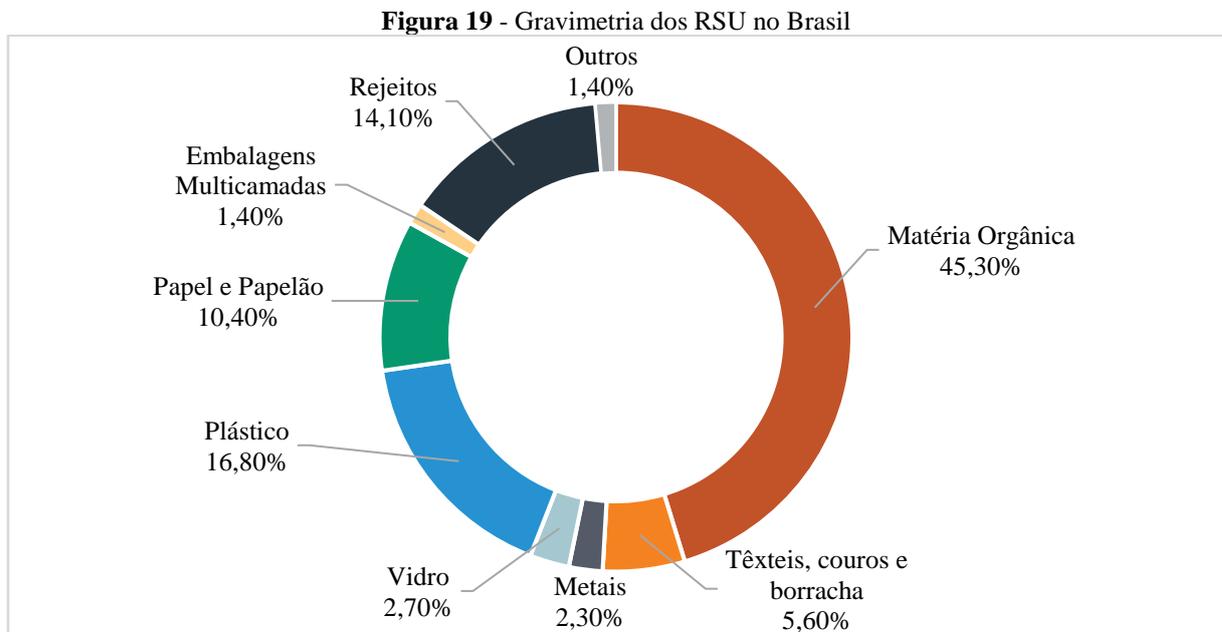
Sendo:

- R_g a geração de RSU em toneladas por ano;
- P a população no respectivo ano;
- I_g a massa estimada de RSU coletada no ano (como o ano de referência é 2024, adotou-se 0,95 kg/hab.dia, que representa a massa média *per capita* de RSU coletada em relação à população total de acordo com Brasil (2022).

Adotando a equação 1, para uma população de 237.491 habitantes, conforme representado na Tabela 6, a geração de resíduos será de 225,61 toneladas por dia no ano de 2024, o que representa uma diferença de aproximadamente 7,7% em relação ao levantando pelo Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Essa diferença se deve ao fato de a massa estimada de RSU ser uma média nacional, o que, a depender da região, pode ter um valor diferente. Dessa forma, para o estudo será adotado o valor de RSU gerado estabelecido no Plano, o qual equivale a 209,34 toneladas por dia.

A composição gravimétrica dos resíduos exprime a porcentagem de cada componente em relação ao peso total desses resíduos, sendo fundamental para se determinar a quantidade de energia que é possível obter a partir do reaproveitamento energético (Divino, 2019; Feam, 2012).

Para a análise da composição gravimétrica dos RSU provenientes do Maciço de Baturité, o Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região do Maciço de Baturité, elaborado pela Sema do estado do Ceará no ano de 2018, foi utilizado como base. No entanto, vale ressaltar que não foram encontrados na literatura estudos representando a contribuição de cada fração dos RSU para a região de estudo, logo, para se ter uma estimativa do potencial energético, serão consideradas as porcentagens estabelecidas na Figura 18, bem como as da Figura 19, a qual demonstra a composição gravimétrica dos RSU no Brasil.



Fonte: Adaptado da Abrelpe (2020).

Comparando a Figura 18 com a 19, pode-se perceber que as porcentagens de resíduos orgânicos são bem próximas. Já a quantidade de rejeitos e resíduos secos da região do Maciço de Baturité são diferentes da média do país. Os resíduos secos são os que podem ser reciclados ou reutilizados, como papelão, papel, garrafas plásticas, metais, vidros, entre outros. Já a parte orgânica é composta principalmente por alimentos.

Como o respectivo plano não especifica quais são os tipos de resíduos secos, apenas o total em porcentagem, será presumido que esses são constituídos, na sua maior parte, de papel, plástico, metal, vidro, têxteis e couro, de acordo com a Figura 19.

A composição gravimétrica pressuposta para a região do maciço está definida na Tabela 7. Conforme dito anteriormente, há apenas a porcentagem do total de resíduos secos, que é de 22%, após a aplicação do Plano de Coletas Seletivas Múltiplas. Os valores da Tabela 7 foram obtidos conforme estabelecido a seguir:

- 1) Determinaram-se os tipos de materiais que fariam parte dos resíduos secos: papel/papelão, plástico, metal, vidro, têxteis e couro.
- 2) O somatório das porcentagens dos materiais estabelecidos no item 1 na composição gravimétrica do país, conforme Figura 19, é 37,80%.
- 3) Adotou-se 0,5820 como fator de proporção, obtido a partir da divisão de 22%, que representa a porcentagem de resíduos secos na região do maciço, e 37,80%, somatório obtido no item 2.
- 4) O fator de proporção estabelecido no item 3 foi aplicado às porcentagens de cada fração gravimétrica a nível nacional considerando o item 1 e a Figura 19, estimando, assim, a composição gravimétrica para o maciço, representado na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição gravimétrica estimada para a região do Maciço de Baturité

| Fração gravimétrica | Média (%) |
|----------------------------|------------------|
| Resíduo orgânico | 45 |
| Papel/Papelão | 6,05 |
| Plástico | 9,78 |
| Metal | 1,34 |
| Vidro | 1,57 |
| Têxteis e couro | 3,26 |
| Rejeitos | 33 |

Fonte: Autor (2022).

3.3 Estimativa do poder calorífico inferior (PCI) e eletricidade gerada

3.3.1 Estimativa do PCI

É relevante que se conheça o PCI dos resíduos para o processo de incineração, visto que sua variação implicará impactos na operação do incinerador. De maneira geral, obtém-se o PCI por meio de equações matemáticas utilizando o poder calorífico superior (PCS), o teor de umidade e a fração mássica de hidrogênio (Silva; Toneli; Palacios-Bereche, 2017; Zhou *et al.*, 2014).

Conforme Cempre (2018), o PCI estabelece a quantidade de energia útil que pode ser liberada durante a incineração do resíduo, sendo que a potência obtida será proporcional ao PCI dos resíduos.

Para se obter uma estimativa do PCI, o qual dá uma noção do valor energético dos RSU, utilizam-se modelos matemáticos que se baseiam na análise elementar e imediata desses resíduos. De acordo com Kami (2019), a análise elementar apresenta o objetivo de determinar as frações, em porcentagem de massa, dos elementos que compõem o resíduo, sendo eles: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O₂), nitrogênio (N) e enxofre (S). Segundo Cempre (2018), a citada análise ainda possibilita uma avaliação da quantidade de ar suficiente para permitir que os resíduos sofram uma combustão completa.

Já a análise imediata determina as frações de material volátil (MV), carbono fixo (CF), teor de umidade (w) e cinzas (Cz) das amostras referentes ao RSU conforme estabelece Kami (2019). Na concepção de Nordi (2015), a análise citada auxilia nos cálculos da combustão dos resíduos. Segundo Divino (2020), os valores de referência utilizados para a análise elementar e imediata podem variar dependendo da bibliografia utilizada.

A Tabela 8 expõe os valores para a análise elementar em porcentagem de massa, em base seca, além da análise imediata, também em porcentagem de massa, em base úmida, de frações gravimétricas que integram os RSU.

Tabela 8 - Análise elementar e imediata para frações que fazem parte dos RSU

| Fração gravimétrica | Análise elementar | | | | | Análise imediata | | | |
|---------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|------|------|
| | C | H | O | N | S | CZ/inertes | W | MV | CF |
| Fração orgânica | 0,48 | 0,064 | 0,376 | 0,026 | 0,004 | 5 | 0,7 | 21,4 | 3,6 |
| Papel | 0,434 | 0,058 | 0,443 | 0,003 | 0,002 | 6 | 0,1 | 75,6 | 8,4 |
| Plástico | 0,6 | 0,072 | 0,228 | 0 | 0 | 10 | 0,05 | 83 | 2 |
| Metal | 0,045 | 0,006 | 0,043 | 0,001 | 0 | 90,5 | 0,02 | 0 | 0 |
| Vidro | 0,005 | 0,001 | 0,004 | 0,001 | 0 | 98,9 | 0,011 | 0 | 0 |
| Têxteis e couro | 0,48 | 0,064 | 0,4 | 0,022 | 0,002 | 3,2 | 0,1 | 66 | 17,5 |
| Borracha | 0,697 | 0,087 | 0 | 0,02 | 0,016 | 20 | 0,012 | 83,9 | 4,9 |
| Madeira | 0,495 | 0,06 | 0,427 | 0,002 | 0,001 | 1,5 | 0,2 | 68,1 | 0 |

Fonte: Divino (2019).

As equações apresentadas a seguir foram retiradas de Poli *et al.* (2013). O PCI é estimado a partir do PCS, que representa o calor liberado em uma combustão com condensação da água; geralmente é expresso em calorías/grama. Dessa forma, o PCS_{seco} é calculado conforme a equação 2.

$$PCS_{seco} = \frac{PCS_{base\ úmida}}{1 - w} \quad (2)$$

Sendo:

- PCS_{seco} : poder calorífico da amostra de RSU seca (kcal/Kg).
- $PCS_{base\ úmida}$: poder calorífico superior dos RSU na condição úmida (kcal/kg).
- w : umidade da amostra em % que será obtida a partir da equação 3.

Quando se trata de RSU, material que apresenta uma determinada umidade, ou seja, presença de água, o valor pode ser obtido pela equação 3.

$$w = \frac{m_{\text{água}}}{m_{cs} + m_{\text{água}}} \quad (3)$$

Sendo:

- $m_{\text{água}}$: massa da água evaporada (kg).
- m_{cs} : massa do combustível seco (kg).

De acordo com Poli *et al.* (2013), as amostras de resíduos com w menor que 0,03 são consideradas com baixo teor de umidade. Desse modo, o PCI poderá ser calculado conforme a equação 4.

$$PCI_{\text{úmido}} = PCS_{base\ seca} - w * h_{LV} \quad (4)$$

Sendo:

- $PCI_{\text{úmido}}$: PCI na condição úmida (kcal/kg).
- $PCS_{base\ seca}$: PCS na condição seca (kcal/kg).
- w : teor de umidade da amostra (%).
- h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25 °C (kcal/kg).

Para os resíduos que apresentam alto teor de umidade, w maior que 0,03, o PCI será calculado da seguinte maneira.

$$PCI_{\text{úmido}} = (1 - w) * PCS_{base\ seca} - w * h_{LV} \quad (5)$$

Sendo:

- $PCI_{\text{úmido}}$: PCI na condição úmida (kcal/kg).
- $PCS_{base\ seca}$: PCS na condição seca (kcal/kg).
- w : teor de umidade em (%).
- h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25 °C (kcal/kg).

A grande parte dos materiais que compõem os RSU apresentam hidrogênio em sua composição química, o qual, durante o processo de combustão, reage com o oxigênio produzindo água. Dessa forma, Poli *et al.* (2013) expressam a relação entre PCI e PCS levando em conta a conversão do hidrogênio em água pela seguinte equação:

$$PCI_{úmido} = (1 - w) * PCS_{base\ seca} - [(1 - w) * 9 * H + w] * h_{LV} \quad (6)$$

Sendo:

- $PCI_{úmido}$: PCI na condição úmida (kcal/kg).
- $PCS_{base\ seca}$: PCS na condição seca (kcal/kg).
- w : teor de umidade (%).
- h_{LV} : entalpia de vaporização da água a 25 °C (kcal/kg).
- H : teor de hidrogênio em massa e em base seca (%).

Conforme Poli *et al.* (2013), a entalpia da água a 25 °C é $h_{LV} = 584,2$ kcal/kg, dessa maneira a equação 6 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$PCI_{úmido} = (1 - w) * PCS_{base\ seca} - [(1 - w) * 9 * H + w] * 584,2 \quad (7)$$

Assim, a equação 7 deverá ser utilizada para RSU que apresentam elevadas quantidades de hidrogênio (H) e água em sua composição (Poli *et al.*, 2013).

O valor do $PCS_{base\ seca}$ pode ser obtido a partir de equações que utilizam a composição elementar do combustível, no caso o RSU, em base seca. Assim, o $PCI_{úmido}$ é calculado conforme a equação 7, a partir do teor de umidade e de hidrogênio em base seca (Poli *et al.*, 2013).

Dulong modificada

Através da equação de Dulong modificada, podem-se obter os valores de $PCS_{base\ seca}$, conforme:

$$PCS_{base\ seca} \left[\frac{kcal}{Kg} \right] = 7831 * C_{org} + 35932 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2212 * S - 3545 * C_{inorg} + 1187 * O + 578 * N \quad (8)$$

Sendo:

C_{org} : % em massa e em base seca de carbono orgânico.

C_{inorg}: % em massa e em base seca de carbono inorgânico.

H: % em massa e em base seca de hidrogênio.

O: % em massa e em base seca de oxigênio.

S: % em massa e em base seca de enxofre.

N: % em massa e em base seca de nitrogênio.

Na equação 8, a parcela C_{inorg}, carbono mineralizado, não participa da combustão e, nesse caso, incorpora-se nas cinzas. Sendo essa fração não muito representativa em termos de energia, estabelece-se que a parcela 3545*C_{inorg} terá valor de 32 kcal/kg para efeitos de cálculo (Poli *et al.*, 2013).

Dessa forma, substituindo a equação 8 na equação 7, o PCI_{base úmida} será representado por:

$$PCI_{base\ úmida} \left[\frac{kcal}{Kg} \right] = (1 - w) * [7831 * C_{org} + 35932 * \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2212 * S + 1187 * O + 578 * N - 32] - [(1 - w) * 9 * H + w] * 583,2 \quad (8)$$

Sendo:

- PCS_{base úmida}: PCI dos RSU (kcal/kg).
- C_{org}: % em massa e em base seca de carbono orgânico.
- H: % em massa e em base seca de hidrogênio.
- O: % em massa e em base seca de oxigênio.
- S: % em massa e em base seca de enxofre.
- N: % em massa e em base seca de nitrogênio.

Divino (2019) apresenta outras equações que podem ser utilizadas para a obtenção do PCI, como a equação de Lloyd e Davenport, além da equação de Boye. No entanto, de acordo com Kami (2019), os dados obtidos utilizando a equação de Dulong modificada são os que mais se aproximam dos experimentais. Logo, para a determinação do PCI dos resíduos da região do maciço de Baturité, será adotada a equação de Dulong modificada. Acentua-se que, devido à heterogeneidade dos RSU brasileiros, os resultados do PCI podem sofrer variações, uma vez que essa característica implica a sua gravimetria.

3.3.2 Eletricidade gerada

Uma vez que se obtém o PCI dos resíduos sólidos, é possível determinar por meio de equações a eletricidade gerada a partir da sua incineração. Mamede (2013) propõe que a energia gerada pelo processo de incineração possa ser calculada pela equação 9:

$$E_g = \sum PCI_{úmido} \times E_e \times 0,00028 \text{ (MWh/ano)} \quad (9)$$

Sendo:

- E_g : a eletricidade gerada em MWh/ano.
- $\sum PCI_{úmido}$: o somatório dos poderes caloríficos de cada fração do material a ser incinerado em MJ/ano.
- E_e : a eficiência de transformação de energia térmica para elétrica.
- 0,00028: constante de conversão de MJ para MWh.

Uma vez encontrada a energia gerada, é possível calcular a potência total a partir da equação 10, em conformidade com Dalmo *et al.* (2019):

$$P = \frac{E_g}{8760} \text{ (MW)} \quad (10)$$

Sendo:

- E_g : a eletricidade gerada em MWh/ano.
- 8760: as horas totais de operação no intervalo de um ano, que corresponde à planta em funcionamento durante 365 dias.

Para o cálculo da eletricidade gerada, será considerado um fator de 0,91, o qual será multiplicado à potência. Esse fator representa a quantidade de horas em que a planta estará gerando eletricidade, visto que, ao longo do ano, pode haver paradas para manutenções ou outras inspeções (Dalmo *et al.*, 2019; Silva, 2015). Assim, a eletricidade gerada será calculada conforme a equação 11:

$$E_{gfinal} = P \times 8760 \times 0,91 \text{ (MWh)} \quad (11)$$

Silva (2015) estabelece uma outra fórmula a fim de se obter a potência elétrica a partir da combustão do RSU, que é dada pela equação 12:

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times M_i(t) \times PCI \text{ (MW)} \quad (12)$$

Sendo:

- $M_i(t)$: taxa de incineração de RSU [kg/s].
- PCI: o PCI do RSU na entrada da caldeira em MJ/kg.
- η_v : a eficiência térmica do ciclo a vapor em base PCI.
- η_g : a eficiência do gerador elétrico.

Em seu estudo, Silva (2015) considerou a eficiência do ciclo a vapor (η_v) 0,33 e a eficiência do gerador elétrico (η_g) 0,98.

Conforme Dalmo *et al.* (2019), uma planta de incineração apresenta uma eficiência térmica que depende de fatores como capacidade, sistema de recuperação de energia, assim como de sistemas auxiliares, afirmando que a eficiência pode variar entre 20% e 35%. Já Bianchi, Branchini e Pascale (2014), em estudo com foco na Itália, determinaram que a eficiência se situa entre 18% e 25%. Dessa maneira, no projeto em estudo, será adotada a eficiência de 25%, seguindo Dalmo *et al.* (2019).

Para a estimativa da energia elétrica gerada e potência instalada, serão estabelecidos dois cenários. Cenário 1: todo o RSU gerado será reaproveitado energeticamente, ou seja, não será considerada a reciclagem como prioridade. Cenário 2: será considerada a separação de parte do material de acordo com dados sobre a reciclagem.

3.4 Análise de viabilidade econômica

Para o gerenciamento de RSU no que diz respeito ao seu reaproveitamento energético, é importante a avaliação dos custos a fim de auxiliar na tomada de decisão, ou seja, analisar se o projeto é viável economicamente ou não. De acordo com Tsilemou e Panagiotakopoulos (2006), a variedade de esquemas financeiros, somada aos avanços tecnológicos de tratamento de RSU, bem como as operações das plantas fazem com que a análise econômica seja complexa. Além disso, a falta de dados reais e, muitas vezes, dispersos corroboram essa situação.

Para a análise econômica, serão utilizadas ferramentas matemáticas que podem auxiliar na decisão de tomada do ponto de vista econômico. São elas: *payback* descontado, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR).

3.4.1 VPL

Também conhecido como valor líquido atual, o VPL consiste em uma ferramenta que é bastante adotada no mercado financeiro. Conforme Barrak (2018), em um determinado projeto, o VLP consiste no valor presente das suas entradas futuras de caixa subtraídos o valor presente do investimento inicial e as saídas futuras de caixa. A equação 13 representa como o VPL pode ser obtido.

$$VPL = I + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (13)$$

Sendo:

- I: o investimento inicial.
- t: o período de tempo.
- FC_t : o fluxo de caixa no período t.
- i: a taxa de desconto ou de atratividade mínima.

A taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade (TMA) consiste no custo do capital para se obter investimento inicial, assim o valor presente das entradas e saídas de caixa serão descontadas pela TMA, o que permite que o fluxo de caixa seja somado para se obter o VPL.

Há três resultados possíveis para o VPL: positivo, negativo ou zero. O VPL positivo (maior do que zero) representa que o investimento é viável, uma vez que a receita é maior do que as despesas. Já quando é negativo (menor do que zero), as despesas superam as receitas, o que torna o projeto inviável economicamente. Sendo o VPL zero, as despesas igualam-se às receitas.

3.4.2 TIR

Segundo Barrak (2018), TIR é a taxa que, adotada, iguala o valor do VPL a zero, ou seja, essa taxa assegura que o valor presente de caixa seja igual ao de saída. A equação 14 é utilizada para calcular a TIR:

$$VPL = 0 = -I + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (14)$$

Sendo:

- I: o investimento inicial.
- t: o período de tempo.
- FC_t : o fluxo de caixa no período t.
- TIR: a taxa interna de retorno.

Ao se calcular a TIR, há três possibilidades. São elas:

- 1) $TIR > TMA$. Nessa situação, o investimento é economicamente viável, já que a taxa de retorno é superior à taxa mínima de atratividade.
- 2) $TIR = TMA$. Para essa possibilidade, a taxa de retorno do projeto tem o mesmo valor da taxa mínima de atratividade, sendo, assim, o investimento atrativo.
- 3) $TIR < TMA$. Tem-se que a taxa de retorno esperada é inferior à taxa mínima de atratividade desejada.

3.4.3 *Payback* descontado e simples

O *payback* descontado é um indicador que demonstra o tempo necessário para que haja a recuperação financeira de determinado investimento. O *payback* simples, diferentemente do descontado, não considera o valor do dinheiro no tempo. Assim, o *payback* descontado é o tempo que o investimento leva para ser recuperado, sendo que há remuneração pela taxa de juros, a qual é representada pela TMA. A equação 15 demonstra o cálculo do *payback* descontado, representado por k.

$$I = \sum_{k=1}^T \frac{FC_k}{(1 + TMA)^k} \quad (15)$$

Sendo:

- FC_k : o fluxo de caixa no ano k.
- k: o ano considerado.
- TMA: a taxa mínima de atratividade.

3.4.4 Custo nivelado de energia

O custo nivelado de energia é a tradução do termo em inglês *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Segundo Barrak (2018), o cálculo desse parâmetro leva em consideração

a integração dos principais custos de geração por meio de uma respectiva tecnologia, além de ser utilizado para a comparação com outras que utilizam diferentes fontes de energia. O LCOE consiste na representação do custo por quilowatt-hora do investimento feito no projeto, considerando construção, operação e manutenção durante seu tempo de vida útil. A equação 16 demonstra o cálculo do LCOE.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + C\&O_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (16)$$

Sendo:

- LCOE: o custo nivelado de energia (R\$/kWh).
- I_t : o investimento inicial.
- t : representa o tempo de operação da planta em anos.
- C&O: o custo de operação e manutenção (R\$).
- E_t : energia gerada em kWh;
- i : a TMA.

3.4.5 Parâmetros estabelecidos

A fim de realizar a análise econômica da URE, levaram-se em consideração os custos de operação e manutenção (O&M), o investimento inicial, além das receitas geradas pela própria planta. Dessa forma, os dados foram obtidos a partir das literaturas disponíveis.

➤ Custos

O investimento inicial compreende os gastos com instalações, infraestrutura, terrenos, licenças, entre outros. Abdallah *et al.* (2018) apresentam que, para instalações de unidade dedicada ao tratamento térmico de RSU, o custo de investimento pode variar de 3.500 a 7.000 dólares para cada kW gerado pela unidade.

Silva *et al.* (2020) calculam o custo de investimento inicial da instalação utilizando a equação 17, sendo esse custo em função da potência elétrica (kW).

$$I = 15,797 \times P^{0.82} \quad (17)$$

Para este trabalho, será adotada a metodologia utilizada por Abdallah *et al.* (2018), sendo o custo de investimento inicial considerado de 7.000 dólares por kW gerado. No entanto, esse valor foi reajustado para o ano de 2022 a partir da inflação do dólar americano, valendo 8.381,83 dólares (Clube dos Poupadores, 2023).

Os custos de operação e manutenção fazem parte de uma URE de RSU, uma vez que são essenciais para garantir o bom funcionamento durante a sua vida útil. Dentro dos custos de manutenção, estão reparo de equipamento, troca de peças, limpezas, lubrificações e inspeções. Já no custo de operação entram impostos, custos de insumos, salários de funcionários, entre outros.

Conforme Silva *et al.* (2020), os custos com operação e manutenção podem chegar a 4% do investimento inicial. Para Carneiro (2015), em seu estudo, o custo de manutenção foi de 5,5% e o de operação, 2% do investimento inicial. Assim, para este trabalho, serão estabelecidos 5% do investimento inicial para o custo de manutenção e operação da usina.

➤ **Receitas**

Em seu estudo, Barrak (2018) considerou a venda de energia elétrica, a taxa de tratamento dos RSU e a venda de metais, que podem ser recuperados a partir do processo de recuperação energética, além da comercialização de créditos de carbono como fontes de receitas obtidas a partir da planta.

Conforme Barrak (2018), a receita obtida da comercialização da energia elétrica gerada pode ser obtida conforme a equação 18.

$$E_{el} = E_g \times C_{el} \quad (18)$$

Sendo:

- E_{el} : a receita de venda da energia elétrica (R\$/ano).
- E_g : energia gerada (MWh/ano).
- C_{el} : o custo da energia elétrica (R\$/MWh).

O Leilão de Energia Nova A-5, no ano de 2021, realizado pela Aneel, pela primeira vez contratou um projeto de geração a partir de RSU, o que possibilita uma diversificação da matriz elétrica, além de garantir uma melhor destinação aos resíduos. Nesse

leilão, o preço médio do MWh gerado a partir de RSU foi de R\$ 549,40, sendo esse valor adotado para o custo de energia elétrica do projeto em estudo (EPE, 2021).

As prefeituras geralmente pagam um determinado valor para limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, assim, com a implantação da usina, o valor será destinado ao aproveitamento energético desses resíduos. O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir), em seu Relatório de Gestão de Resíduos Sólidos de 2019, estabeleceu que o custo por tonelada da coleta de RSU indiferenciada e seletiva vale R\$ 177,74, dessa forma será adotado esse valor como receita.

O reaproveitamento energético de RSU gera cinzas residuais que equivalem a 25% do peso dos resíduos tratados; essas são fontes secundárias de metais ferrosos, não ferrosos e vidros. A composição das cinzas geralmente se dá da seguinte maneira: 5 a 15% de metais ferrosos; 1 a 5% de metais não ferrosos; 10 a 30% de vidro e cerâmica; 1 a 5% de orgânicos não queimados; e 50 a 70% de minerais, sendo que essa variação vai depender do RSU reaproveitado energeticamente (Šyc *et al.*, 2020).

Alguns estudos, de acordo Chen *et al.* (2022), apontaram que cada tonelada de RSU pode produzir de 250 a 300 kg de cinzas residuais, ou seja, de 25%-30% da quantidade de resíduo tratada. Conforme Šyc *et al.* (2020), as cinzas residuais podem ser utilizadas como fonte de receitas, uma vez que o material poderá ser recuperado por meio de tecnologias apropriadas que seguem um mesmo princípio geral, ou seja, triturar a fração superdimensionada, peneirar as cinzas em várias frações de tamanho, em seguida aplicar a separação magnética para metais ferrosos e a separação de correntes parasitas para metais não ferrosos.

Barrak (2018) propôs em seu estudo a comercialização do alumínio e do ferro como metais recuperados da cinza para serem vendidos como sucatas a empresas do setor. Os possíveis valores que podem ser obtidos para a venda desses materiais estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores da venda de metal para sucata

| Metal | Preço de venda (R\$/kg) |
|--------------|--------------------------------|
| Ferro | 1,00 |
| Alumínio | 8,00 |

Fonte: Empresa Ferro Velho Litoral Limpo (2023).

Para o referido projeto, considera-se que 30% da massa de resíduo incinerada produz cinzas residuais. Desse valor 8% serão de material ferroso e 3% de metais não ferrosos.

A Tabela 10 apresenta os dados que serão adotados para a análise econômica da URE.

Tabela 10 - Dados que serão adotados para a análise econômica da URE

| Dados | Cenário 1 | Cenário 2 |
|-------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Estimativa da quantidade de RSU tratado (t/ano) | 51.194,10 | 45.583,51 |
| TMA (% a.a.) | 13,75 | 13,75 |
| Vida útil do projeto (anos) | 20 | 20 |
| Horas de funcionamento no ano da planta (h) | 8.000 | 8.000 |
| Preço da energia (R\$/MWh) | 549,40 | 549,40 |

Fonte: Autor (2022).

3.5 Análise da emissão de GEE

Para realizar esta análise, adotou-se a Ferramenta de Cálculo de Emissões de GEE no manejo de RSU, disponível no *site* do Governo Federal - Ministério das Cidades, a qual permite o cálculo das emissões de GEE utilizando a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Com a aplicação da calculadora, foi possível obter uma estimativa e comparação das emissões de GEE a partir de tecnologias adotadas para o tratamento dos RSU (Brasil, 2023).

Conforme o Roteiro para Redução das Emissões de GEE no manejo de RSU, a ACV foca no fluxo de materiais, o que contempla desde a extração da matéria-prima até a disposição final dos rejeitos. Assim, essa avaliação considera todas as emissões decorrentes do gerenciamento dos resíduos, independentemente do local ou do momento em que as emissões ocorrem, levando-se em consideração as emissões geradas ou evitadas pela tipologia e quantidade de resíduos ao longo da cadeia produtiva (Brasil, 2022).

A fim de verificar as emissões de GEE por parte do tratamento térmico dos RSU e realizar uma comparação, analisaram-se as seguintes tecnologias: tratamento térmico (combustão) e aterro sanitário, que é a mais adotada, em conjunto com a reciclagem de materiais. Assim, foram estabelecidos três cenários:

1º - Cenário-base: todo os RSU serão tratados termicamente, ou seja, por meio da combustão.

2º - Cenário 1: após a reciclagem de parte dos RSU, o restante receberá tratamento térmico.

3º - Cenário 2: realizada a reciclagem, o que resta será destinado ao aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Poder calorífico inferior (PCI)

a) **Cenário 1** – Todo o RSU gerado será reaproveitado energeticamente, ou seja, não será considerada a reciclagem como prioridade.

A partir da fração de RSU, retirados os rejeitos, obteve-se a composição gravimétrica para a região do Maciço de Baturité, representada na Tabela 5. Com esses dados e utilizando a equação de Dulong modificada, representada pela equação 8, além da Tabela 6, que apresenta a análise elementar e imediata para frações que fazem parte dos RSU, obteve-se o PCI, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Estimativa do PCI a partir da equação de Dulong modificada

| Gravimetria | Peso a partir da composição gravimétrica (kg) | Porcentagem (%) | PCI _{base úmida} (kcal/Kg) | PCI _{base úmida} (kJ/Kg) | Parcela de contribuição ao PCI _{úmido Total} (kJ/Kg) |
|-----------------|-----------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Fração orgânica | 34.384.095 | 67,16 | 933,36 | 3.905,16 | 2.622,71 |
| Papel/Papelão | 4.622.751 | 9,03 | 3.261,37 | 13.645,57 | 1.232,20 |
| Plástico | 7.472.810 | 14,60 | 5.787,09 | 24.213,17 | 3.535,12 |
| Metal | 1.023.882 | 2,0 | 344,06 | 1.439,53 | 28,79 |
| Vidro | 1.199.623 | 2,34 | 18,51 | 77,43 | 1,81 |
| Têxteis e couro | 2.490.937 | 4,87 | 3.889,03 | 16.271,70 | 792,43 |
| Total | 51.194.098 | 100% | | | 8.213,06 |

Fonte: Autor (2022).

Analisando a Tabela 11, verifica-se que o PCI_{úmido} total é igual a 8.213,06 kJ/kg ou 1962,97 kcal/kg. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), a depender do valor do PCI, há três situações a serem consideradas. São elas:

- 1) Para PCI < 1.675 kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável.
- 2) Para 1.675 kcal/kg < PCI < 2.000 kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico.
- 3) Para PCI > 2.000 kcal/kg, a queima bruta (*mass burning*) é tecnicamente viável.

Comparando o valor do PCI determinado na Tabela 8 com as situações consideradas por EPE (2014), conclui-se que se enquadra na segunda opção, no entanto, vale ressaltar que a composição gravimétrica dos RSU da região do Maciço de Baturité foi estabelecida com base na gravimetria dos resíduos do Brasil, conforme Abrelpe (2020). Uma vez que não foram encontrados na bibliografia estudos mais realísticos sobre a gravimetria dos RSU das cidades que compõem a região de estudo, é compreensível que futuramente,

com mais pesquisas na área, o PCI possa apresentar valores diferentes do determinado nesse projeto.

Conforme observado por Divino (2019), os materiais como papelão/papel, plástico, têxteis e couro apresentam um elevado PCI, visto que na sua composição elementar há alta concentração de carbono, aliado ao fato de conterem baixa umidade em relação a outros tipos de resíduos.

b) Cenário 2 – Será considerada a separação de parte do material de acordo com dados sobre a reciclagem.

Conforme a PNRS, a reciclagem é prioridade em relação ao tratamento dos resíduos sólidos, assim foi considerada para cálculo do PCI a reciclagem de materiais que compõem o RSU. De acordo com Cempre (2023), 23,1% de todo o plástico produzido em 2020 foram reciclados. No ano de 2019, 47,1% das latas de aço foram recicladas e a reciclagem de papel foi de 66,9%. O índice de reciclagem do vidro em 2018 representou 25,8%. Esses valores de reciclagem foram adotados, sendo a composição gravimétrica após a separação dos recicláveis apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 - Estimativa do PCI a partir da equação de Dulong modificada levando em consideração a reciclagem

| Gravimetria | Peso a partir da composição gravimétrica (kg) | Porcentagem (%) | PCI _{base úmida} (kcal/Kg) | PCI _{base úmida} (kJ/Kg) | Parcela de contribuição ao PCI _{úmido Total} (kJ/Kg) |
|-----------------|-----------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Fração orgânica | 34.384.095 | 75,43 | 933,36 | 3.905,16 | 2.945,67 |
| Papel/Papelão | 1.530.130,43 | 3,36 | 3.261,37 | 13.645,57 | 458,49 |
| Plástico | 5.746.590,87 | 12,61 | 5.787,09 | 24.213,17 | 3.053,28 |
| Metal | 541.633,55 | 1,19 | 344,06 | 1.439,53 | 17,13 |
| Vidro | 890.120,17 | 1,95 | 18,51 | 77,43 | 1,51 |
| Têxteis e couro | 2.490.936,66 | 5,46 | 3.889,03 | 16.271,70 | 888,43 |
| Total | 45.583.506,68 | 100% | | | 7.364,51 |

Fonte: Autor (2022).

Silva, Toneli e Palacios-Bereche (2017), em seu estudo, obtiveram um valor de PCI de $(6,50 \pm 1,29)$ MJ/kg, considerando-se a coleta indiferenciada; já aplicando a separação de materiais recicláveis, o PCI obtido foi de $(5,54 \pm 1,30)$ MJ/kg.

Em suas análises de influência da composição de RSU, Nordi (2015) estabeleceu cinco cenários, para os quais conseguiu os respectivos valores de PCI em MJ/kg:

- 9,23 – Cenário-base: considera a composição dos RSU como recebido (base úmida) sem qualquer separação anterior.

- 9,27 - Cenário 1: assumiu-se que 90% dos metais foram separados a partir do RSU total.
- 11,45 - Cenário 2: assumiu-se que 50% da matéria orgânica foi separada, supondo-se que essa separação possa acontecer na fonte.
- 6,81 - Cenário 3: presumiu-se que 90% de ambos, metal e plástico, foram separados.
- 9,28 - Cenário 4: supôs-se que 90% dos metais e vidros foram separados.

Comparando os cenários base com o 3, pode-se inferir, levando em consideração a reciclagem de materiais que apresentam um poder calorífico mais elevado, que o PCI tende a ser menor.

4.2 Eletricidade gerada e potência instalada

a) Cenário 1

As estimativas teóricas de geração de eletricidade e potência foram calculadas conforme as equações apresentadas no capítulo de métodos e materiais. Dessa forma, a partir da Equação 9, obteve-se uma eletricidade estimada em 29.432 MWh/ano, prevendo o reaproveitamento energético de 51.194,097 toneladas por ano de RSU. Levando-se em consideração o fator de utilização da planta, para o qual foi adotado o valor de 0,91, e utilizando as equações 10 e 11, obtiveram-se uma potência instalada de 3,36MW e uma eletricidade gerada final de 26.783,31 MWh, o que significa uma redução de 9% em relação ao valor calculado, conforme a equação 9.

Com base na equação 12 e considerando o valor de 1,62 kg/s para a taxa de combustão de RSU, encontra-se uma potência instalada de 3,27MW, bem próxima ao valor obtido pela equação 11. Esse valor está dentro da faixa que a Resolução normativa nº 482 da Aneel estabelece para a minigeração distribuída, o que permite que a fonte geradora, no caso a usina, possa ser conectada diretamente à rede de distribuição da concessionária de energia elétrica. Parte dessa energia será utilizada para alimentar a própria planta, sendo seu excedente utilizado para suprir a demanda local.

A Tabela 13 demonstra o consumo de energia elétrica, bem como seus consumidores no respectivo ano de 2021 para a região do Maciço de Baturité, de acordo com o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (Ipece). Assim, apoiado nos cálculos realizados de maneira teórica, a energia gerada a partir dos RSU pode atender a 14,52% do

consumo total de energia elétrica da região ou 33,10% do consumo residencial. Caso seja disponibilizada para o setor público, atenderá a aproximadamente 93,14%. Vale ressaltar que uma parte da eletricidade gerada na planta de incineração será utilizada pelos próprios equipamentos que a compõem.

b) Cenário 2

Para o cenário 2, o qual considera a taxa de reciclagem, a eletricidade estimada foi de 21.384,10 MWh/ano. Assim como no cenário 1, considerando o fator de utilização da planta e utilizando as equações 10 e 11, obtiveram-se uma potência instalada de 2,68MW e uma eletricidade gerada final de 21.384,10 MWh. A partir dos dados da Tabela 13, a energia gerada para o respectivo cenário poderá atender a 11,60% do consumo total de energia elétrica da região ou 26,43% do consumo residencial.

Tabela 13 - Consumo e consumidores de energia elétrica da região do Maciço de Baturité, segundo as classes no ano de 2021

| Classes de consumo | Consumo de energia elétrica (MWh) | | Consumidores de energia elétrica | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|
| | Valor | % em relação ao estado | Valor | % em relação ao estado |
| Residencial | 80.892 | 1,56 | 67.375 | 2,04 |
| Industrial | 6.399 | 0,27 | 99 | 1,61 |
| Comercial | 18.636 | 0,84 | 3.897 | 2,14 |
| Rural | 48.998 | 3,67 | 33.974 | 5,95 |
| Público | 28.753 | 1,80 | 2.067 | 4,01 |
| Próprio | 696 | 5,21 | 16 | 5,21 |
| Total | 184.373 | 1,45 | 107.427 | 2,62 |

Fonte: Adaptado de Ipece (2022).

Tabela 14 - Resumo de eletricidade gerada e potência instalada

| Situação | Eletricidade gerada (MWh) | Potência instalada (MW) |
|-----------|---------------------------|-------------------------|
| Cenário 1 | 26.783,31 | 3,36 |
| Cenário 2 | 21.384,10 | 2,68 |

Fonte: Autor (2022).

4.3 Análise econômica

a) Custos

- Investimento inicial

Como definido, o custo inicial de investimento será na proporção de 7.000 dólares para cada kW gerado. A partir do valor calculado para a potência gerada e realizando a conversão de dólar para real, obteve-se o valor do investimento inicial conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Investimento inicial – Cenário 1

| Parâmetros | Valor |
|----------------------------------------|----------------|
| Potência gerada (kW) | 3.360 |
| Valor considerado por kW gerado (US\$) | 8.381,83 |
| Valor do dólar (17/01/2023) em R\$ | 5,1007 |
| Custo de investimento obtido (R\$) | 143.650.752,94 |

Fonte: Autor (2023).

Segundo os dados apresentados, para uma planta com capacidade anual de aproveitar energeticamente 51,194 toneladas de RSU, gerando uma potência de 3,36MW, o custo de investimento inicial estimado é de R\$ 143.650.752,94.

Tabela 16 - Investimento inicial – Cenário 2

| Parâmetros | Valor |
|----------------------------------------|----------------|
| Potência gerada (kW) | 2.683 |
| Valor considerado por kW gerado (US\$) | 8.381,83 |
| Valor do dólar (17/01/2023) em R\$ | 5,1007 |
| Custo de investimento obtido (R\$) | 114.706.836,35 |

Fonte: Autor (2023).

Conforme os dados apresentados na Tabela 16, tem-se que, para uma planta cuja capacidade anual é de 45,583 toneladas de RSU, gerando uma potência de 2,68MW, o custo de investimento inicial determinado é R\$ 114.706.836,35.

- Operação e manutenção

Para esses custos, foi estabelecido que corresponderiam a 5% do valor do investimento inicial. Logo, tem-se que o custo de operação e manutenção da planta é:

- Cenário 1: R\$ 7.182.537,65.
- Cenário 2: R\$ 5.735.341,82.

b) Receitas

Assim como Barrak (2018), consideram-se como fontes de receitas para URE:

- A energia elétrica gerada.
- A receita proveniente do tratamento dos RSU.
- A comercialização dos metais que compõem as cinzas.

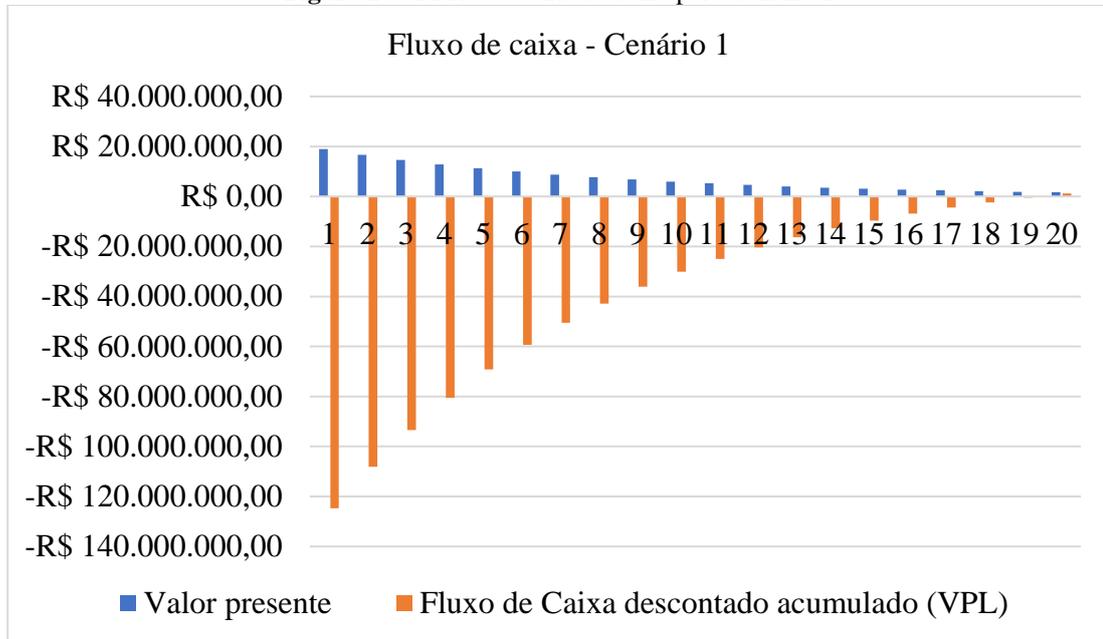
Tabela 17 - Receitas

| Receita | Valor anual (R\$) – Cenário 1 | Valor anual (R\$) – Cenário 2 |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Energia elétrica | 14.714.750,51 | 11.748.424,54 |
| Tratamento dos RSU | 9.099.238,80 | 8.102.012,48 |
| Venda do alumínio e ferro | 4.914.633,31 | 4.376.016,64 |

Fonte: Autor (2023).

A partir dos dados obtidos referente à potência instalada da usina e energia gerada, foi possível obter os valores do VPL, TIR, *Payback* Descontado e LCOE para os cenários considerados.

Figura 20 - Fluxo de caixa da usina para Cenário 1



Fonte: Autor (2023).

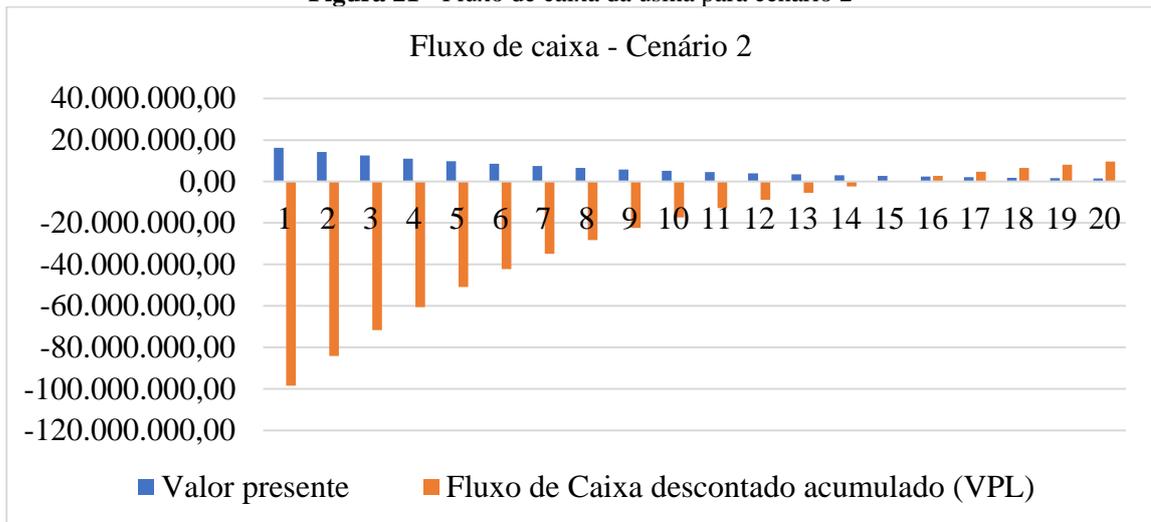
A Figura 20 e a Tabela 18 demonstram que, para o cenário 1, a URE de RSU dedicada ao tratamento térmico é viável economicamente, apresentando um VPL (positivo) de R\$ 1.134.596,44 e uma taxa interna de retorno de 13,89% (maior do que a taxa mínima de atratividade). O *payback* descontado que representa o tempo de retorno do investimento é de 19 anos. Já o custo nivelado de energia obtido foi de R\$ 0,97 por kWh.

Tabela 18 – Dados adotados e obtidos – Cenário 1

| | |
|---------------------------|------------------|
| TMA | 13,75% ao ano |
| VPL | R\$ 1.134.596,44 |
| TIR | 13,89% ao ano |
| Payback descontado | 19 anos |
| LCOE | 0,97 (R\$/kWh) |
| Resultado | Viável |

Fonte: Autor (2023).

Para o cenário 2, a análise econômica também se mostrou viável, conforme demonstrado na Figura 21 e Tabela 19. Obteve-se um VPL positivo de R\$9.549.709,13 e o tempo de retorno do investimento é de 14 anos.

Figura 21 - Fluxo de caixa da usina para cenário 2

Fonte: Autor (2023).

Tabela 19 - Dados adotados e obtidos – Cenário 2

| | |
|---------------------------|------------------|
| TMA | 13,75% ao ano |
| VPL | R\$ 9.549.709,13 |
| TIR | 15,16% |
| Payback descontado | 14 anos |
| LCOE | 0,97 (R\$/kWh) |
| Resultado | Viável |

Fonte: Autor (2023).

Para os dois cenários estabelecidos, pode-se inferir que, se a TMA for menor, o VPL aumentará positivamente, tornando o projeto ainda mais viável, consequentemente o retorno do investimento seria em um período abaixo do calculado.

O LCOE obtido para as situações apresentadas foi de R\$ 0,97 por kWh ou R\$ 970,00 por MWh. Esse valor, de acordo com Silva *et al.* (2020), consiste no preço mínimo de venda de energia elétrica para que o projeto seja considerado viável de maneira econômica. Como o LCOE obtido foi superior ao valor de venda do Leilão de Energia Nova A-5, no ano de 2021, economicamente o projeto não seria viável por esse parâmetro. No entanto, a tendência é que o valor da tarifa seja reduzido ao longo dos anos, uma vez que possivelmente mais usinas sejam projetadas, consequentemente haverá uma redução dos custos, o que levará a uma redução do LCOE.

4.4 Análise da emissão de GEE

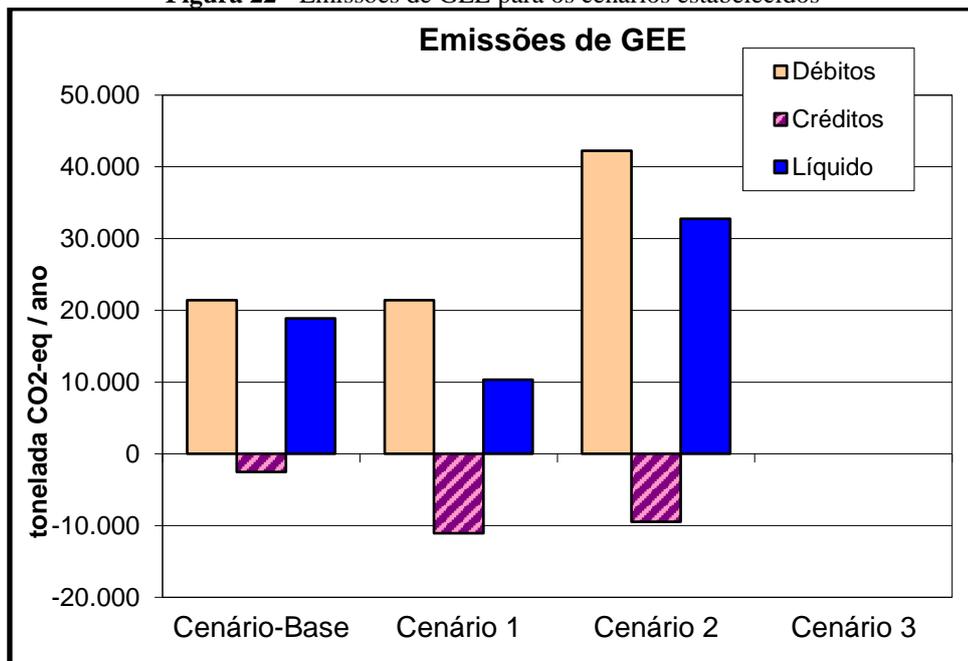
A partir da utilização da calculadora de emissões de GEE e utilizando as taxas de reciclagem estabelecidas no projeto, foram obtidas as emissões para os cenários definidos, representadas na Figura 22. O resultado líquido consiste nas emissões geradas (débito) no

cenário estabelecido somado ao valor das emissões evitadas (créditos), a partir da possível substituição de matérias-primas primárias, no caso da reciclagem, e de combustíveis fósseis (Brasil, 2022).

Dessa forma, obtiveram-se os resultados:

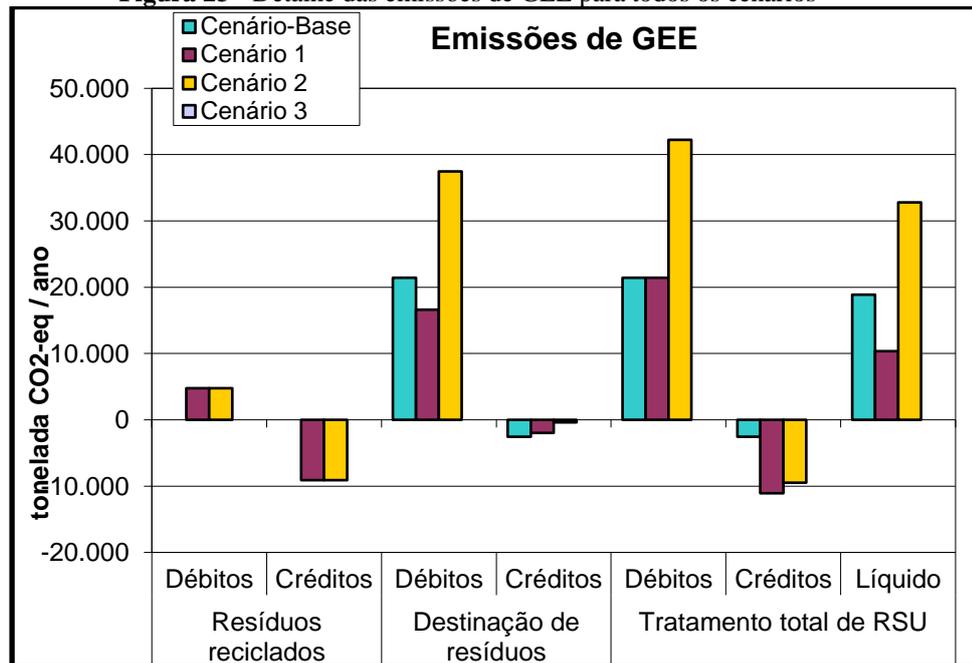
- 1) Para o cenário-base, no qual 100% dos RSU recebem tratamento térmico, o resultado líquido de emissões de GEE é 18.882 toneladas de CO₂ equivalente por ano.
- 2) No cenário 1 (reciclagem e tratamento térmico), as emissões chegam a 10.344 toneladas de CO₂ equivalente por ano.
- 3) Para o cenário 2 (reciclagem e aterro sanitário), as emissões de GEE representam 32.774 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Figura 22 - Emissões de GEE para os cenários estabelecidos



Fonte: Ferramenta de cálculo de emissões de GEE no manejo de RSU (2023).

De acordo com o Roteiro para Redução de Emissões de GEE no manejo de RSU, dentre as medidas de redução das emissões de GEE, estão a reciclagem dos resíduos secos, que implica um menor uso de matéria-prima e gastos energéticos com sua produção por meio de fontes primárias, a incineração de resíduos e o aproveitamento energético pela incineração (Brasil, 2022). Assim, o cenário 1 apresentou a menor emissão de GEE, o que se infere que o tratamento térmico aliado à reciclagem proporciona aos RSU uma destinação final ambientalmente adequada, contribuindo para a redução de GEE.

Figura 23 - Detalhe das emissões de GEE para todos os cenários

Fonte: Ferramenta de cálculo de emissões de GEE no manejo de RSU (2023).

A Figura 23 apresenta uma comparação dos três cenários em uma estrutura mais detalhada. Para os resíduos reciclados, são exibidos os débitos e créditos nos cenários 1 e 2. Para a destinação de resíduos, são representados os respectivos cenários, os débitos (emissões geradas) e créditos (emissões evitadas). Já para o tratamento total dos RSU, são evidenciados os débitos, créditos e resultado líquidos dos cenários abordados (Brasil, 2022).

O cenário 2, em termos de emissões de GEE, não se mostra como o mais viável, já que apresentou, dentre os estabelecidos, o maior valor de emissão de GEE. Assim, para uma gestão mais eficiente dos RSU, a aplicação de tecnologias de reaproveitamento energético, aliada à reciclagem, além de outras medidas, pode vir a ser positiva para a região do Maciço de Baturité no que diz respeito à atenuação da emissão de GEE.

5 CONCLUSÕES

A estimativa da fração gravimétrica dos RSU da região do Maciço de Baturité permitiu obter o valor do PCI dos resíduos, a partir do qual foi possível afirmar se a usina de recuperação é viável em termos energéticos. Esse valor também foi importante para quantificar uma possível geração de energia elétrica e obtenção de potência a partir da combustão dos RSU.

Para a geração de energia elétrica, dois cenários foram considerados. Conforme os resultados obtidos, a energia elétrica gerada quando todos os resíduos são disponibilizados para reaproveitamento energético é maior em relação ao segundo cenário, o qual leva em conta a reciclagem, que é prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos de acordo com a PNRS. Mesmo sendo um valor menor, ainda é representativo, o que permite que o aproveitamento energético não concorra com a reciclagem, que gera renda para diversos trabalhadores.

A análise econômica, para os dois cenários estabelecidos, mostrou-se favorável. O VPL foi positivo, ou seja, as receitas obtidas superam os custos. Apesar da dificuldade no levantamento do custo de implantação da usina, uma vez que maioria dos equipamentos são fornecidos por empresas internacionais e os dados sobre os valores não são tão divulgados, foi possível obter uma estimativa do tempo de retorno do investimento da usina.

Um dos pontos que culminam na viabilidade da usina é a quantidade de RSU gerados pelos municípios que formam o Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Região do Maciço de Baturité. A integração dos municípios é de fundamental importância, pois, caso algum deixe de integrar o plano, significa uma quantidade menor de resíduos, conseqüentemente uma nova análise de viabilidade deve ser realizada.

Dentre os cenários estabelecidos na análise de emissão de GEE, o de reciclagem dos resíduos, associado ao seu aproveitamento energético por meio da combustão, mostrou-se viável, uma vez que a reciclagem de resíduos reduz o uso de matéria-prima, bem como o gasto energético para a produção do material. Além disso, a geração de energia pelo seu reaproveitamento diminui o consumo de combustíveis que liberam uma maior quantidade de GEE.

Assim, este trabalho pode fomentar o interesse dos órgãos municipais responsáveis pela gestão e gerenciamento dos RSU no que diz respeito ao uso de tecnologias que possibilitam o seu aproveitamento energético, além da utilização de aterros sanitários. A comparação com outras tecnologias possibilitará saber qual a mais indicada para as especificidades do município, levando em consideração a gravimetria dos RSU. Essas tecnologias, aliadas a outras medidas definidas na PNRS, permitirão uma maior gestão dos resíduos.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, Mohamed; SHANABLEH, Abdallah; SHABIB, Ahmad; ADGHIM, Mohamad. Financial feasibility of waste to energy strategies in the United Arab Emirates. **Waste Management**, [S.l.], v. 82, p. 207-219, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18306482#f0015>. Acesso em: 18 jan. 2023.
- ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- Abrelpe. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Abrelpe, 2020.
- AMULEN, Judith; KASEDDE, Hillary; SERUGUNDA, Jonathan; LWANYAGA, Joseph D. The potential of energy recovery from municipal solid waste in Kampala City, Uganda by incineration. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v.14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100204>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522000277#e0050>. Acesso em: 18 abr. 2022.
- ANEEL. **Resolução Normativa 482/2012**. Brasília, DF: Aneel, 2012.
- ATEŞ, Funda; MISKOLCZI, Norbert; BORSODI, Nikolett. Comparison of real waste (MSW and MPW) pyrolysis in batch reactor over different catalysts. Part I: Product yields, gas and pyrolysis oil properties. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 133, p. 443-454, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413001351>. Acesso em: 29 abr. 2022.
- BARRAK, Érika. **Análise técnica e econômica da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos através da incineração e do gás de aterro sanitário**. 2018. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.
- BASTOS, Bruno Quaresma. **Tecnologias de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.
- BIANCHI, Michele; BRANCHINI, Lisa; PASCALE, Andrea de. Combining Waste-to-Energy steam cycle with gas turbine units. **Applied Energy**, [S.l.], v. 130, p. 764-773, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191400258X>. Acesso em: 4 jan. 2023.
- BRASIL. **Calculadora de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU**. Brasília, DF: Ministério das cidades. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/proteger-antigo/calculadora-de-200bemissoes-de-gases-de-efeito-estufa-gee-no-manejo-de-rsu>. Acesso em: 24 out. 2023.

BRASIL. **Diagnóstico temático**: manejo de resíduos sólidos urbanos - visão geral. Brasília, DF: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2022a.

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. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 maio 2019.

BRASIL. **Roteiro para Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/proteger/roteiro-para-reducao-das-200bemissoes-de-gases-de-efeito-200bestufa-gee-no-manejo-de-rsu>. Acesso em: 24 out. 2023.

CAMPOS, Victor Arruda Ferraz de; SILVA, Valter Bruno; CARDOSO, João Sousa; BRITO, Paulo S.; TUNA, Celso Eduardo; SILVEIRA, José Luz. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.107>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121009733?via%3Dihub>. Acesso em: 2 dez. 2021.

CARDOZO, Bárbara Cristina; MANNARINO, Camille Ferreira; FERREIRA, João Alberto. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190040>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/v88qtgPDk8hwLKJnmgtyG9K/?lang=pt#:~:text=Identificou%20Dse%20o%20total%20de,20%25%20do%20total%20de%20incineradores>. Acesso: 22 abr. 2022.

CARNEIRO, Maria Luisa Nerys de Moraes. **Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: estudo de caso da planta de Zabalgardi/Bilbao adaptada para a realidade brasileira. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CEMPRE. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 4. ed. São Paulo: Cempre, 2018.

CEMPRE. **Taxas de reciclagem**. São Paulo: Cempre, 2023. Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CEWEP. **Municipal waste treatment in 2019**. Cewep, 2021.

CHEN, Dan; ZHANG, Yingying; XU, Yao; NIE, Qing; YANG, Zhanbin; SHENG, Wenyu; QIAN, Guangren. Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials—a review. **Royal Society of Chemistry**, [S.l.], 2022. DOI: 10.1039/D1RA08050D. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d1ra08050d#:~:text=Studies%20have%20found%20that%20the,APC%20residues%20and%20fly%20ash>. Acesso: 29 jan. 2023.

CHEN, Dezhen; YIN, Lijie; WANG, Huan; HE, Pinjing. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. **Waste Management**, [S.l.], v. 34, n. 12, p. 2466-2486, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14003596>. Acesso em: 29 abr. 2022.

CLUBE DOS POUPADORES. **Simulador: calcular inflação em dólar**. Disponível em: <https://clubedospoupadores.com/simulador-inflacao-dolar>. Acesso: Acesso em 18 mar. 2023.

CNI. **Recuperação energética de resíduos sólidos**: um guia para tomadores de decisão. Brasília, DF: CNI, 2019.

CRUZ, Patricia Azevedo de Oliveira Sthefaní da. **Gaseificação**: processo alternativo para a recuperação energética e eliminação de resíduos sólidos urbanos. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Hidráulica e Saneamento Ambiental) – Programa de Graduação em Hidráulica e Saneamento Ambiental, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2016.

DALMO, Francisco César; SIMÃO, Nathalia Machado; LIMA, Heleno Quevedo de; JIMENEZ, Ana Carolina Medina; NEBRA, Silvia; MARTINS, Gilberto; PALACIOS-BERECHE, Reynaldo; SANT'ANA, Paulo Henrique de Mello. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 212, p. 461-474, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618337181>. Acesso em: 2 nov. 2022.

DELTAWAY ENERGY. **Waste and Biomass Power Plant Design and Operation**. Disponível em: <https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>. Acesso em: 22 abr. 2022.

DIVINO, Natalia Citti de Castro. **Avaliação do potencial de rejeitos das associações de catadores como combustível derivado de resíduo – CDR**. 2020. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Programa de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

EPA. **Site da United States Environmental Protection Agency**. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 26 abr. 2022.

EPE. **Leilão de Energia Nova A-5 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/leilao-de-energia-nova-a-5-2021>. Acesso em: 18 jan. 2023.

EPE. **Nota Técnica DEA 18/14**. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FEAM. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos**: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2012.

FERRO VELHO LITORAL LIMPO. **Empresa de sucatas**. Disponível em: <https://litorallimpo.com.br/empresa/>. Acesso em: 14 abr. 2023.

GOMES, Simone. **Potencial Energético dos resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, PR, Brasil**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2014.

IPECE. **Perfil das Regiões de Planejamento**: Maciço de Baturité. Fortaleza: Ipece, 2022.

KABIR, Zobaidul; KHAN, Imran. 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, p. 1-13, 2020.

KAMI, Eduardo Choozo Arenas. **Análise Termoeconômica de Sistema Híbrido Solar Térmico Integrado à Unidade de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa C.; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, Distrito de Columbia: Banco Mundial, 2018.

LEITE, Filipe Ferreira de Oliveira. **Alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos para o estado de Minas Gerais no contexto da economia circular**. 2020. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

LONATI, Giovanni; CAMBIAGHI, Alberto; CERNUSCHI, Stefano. The actual impact of waste-to-energy plant emissions on air quality: a case study from northern Italy. **Detritus**, v. 6, p. 77-84, 2019. DOI: 10.31025/2611-4135/2019.13817. Disponível em: <https://digital.detritusjournal.com/articles/the-actual-impact-of-waste-to-energy-plant-emissions-on-air-quality-a-case-study-from-northern-italy/221>. Acesso em: 23 abr. 2022.

MAMEDE, Maurício Cuba dos Santos. **Avaliação econômica e ambiental do aproveitamento energético de resíduos sólidos no Brasil**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

MENDONÇA, Anny Key de Souza; BORNIA, Antonio Cezar. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: análise das políticas públicas. **MIX Sustentável**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 109-122, 2019. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n2.109-122>.

MUTZ, Dieter; HENGEVOSS Dirk; HUGI, Christoph; GROSS, Thomas. Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento: opções em Waste-to-Energy na gestão de resíduos sólidos urbanos. Deutsche Gesellschaft für Internationale

Zusammenarbeit, 2017. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/biblioteca/publicacoes/gestao-integrada-de-rsu/393-um-guia-para-tomadores-de-decisao-em-paises-emergentes-ou-em-desenvolvimento>. Acesso em: 27 abr. 2022.

NORDI, Guilherme Henrique. **Avaliação técnico-econômica de usinas WTE (Waste-to-Energy) baseadas em ciclos de potência a vapor**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2015.

NOVAKOWSKI, Graciela Alves de Borba; TRINDADE, Vilson; PIOVEZANA, Leonel. Consórcios intermunicipais para gestão de resíduos sólidos: estudo da viabilidade econômica no município de Formosa do Sul (SC). In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 8., 2017, Santa Cruz do Sul. **Anais [...]**. Santa Cruz do Sul: Unisc, 2017.

POLI, Dora de Castro Rubio; ZANCHETA, Márcio Nestor; BOARI, Zoroastro de Miranda; MELDONIAN, Nelson Leon; MOURA, Claudia Lucia de; JIURGIU, Paulo Adriano. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, Londrina, v. 8, n. 8, p. 9-31, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17921/1890-1793.2013v8n8p9-31>. Disponível em: <https://revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/2217>. Acesso em: 29 abr. 2022.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. Tratamento de Resíduos de Serviços de Saúde. **Portal Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/tratamento-de-residuos-de-servicos-de-saude/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

PORTELLA, Márcio Oliveira; RIBEIRO, José Cláudio Junqueira. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, Caxias do Sul, v. 4, n. 1, p. 115-134, 2014.

RAJAEIFAR, Mohammad Ali; GHANAVATI, Hossein; DASHTI, Behrouz B.; HEIJUNGS, Reinout; AGHBASHLO, Mortaza; TABATABAEI, Meisam. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 79, p. 414-439, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.109>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306147>. Acesso: 17 abr. 2022.

SANTOS, Dulcínea. Valorização energética de resíduos sólidos urbanos: materiais para caldeiras de centrais de incineração. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Viçosa (MG), v. 25, n. 2, p. 98-120, 2013.

SANTOS; Rafaela Ediene dos; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambeli; BERNAL; PICIONIERI, Andressa; FILHO, Geraldo Lúcio Tiago; SILVA; Fernando das Graças Braga da. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718311435#bib21>. Acesso em: 17 jan. 2023.

SEMA. **Plano Regional de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Região Maciço de Baturité**. Fortaleza, Sema, 2018.

SILVA, Elissando Rocha da. **Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento**. 2015. 204 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2015.

SILVA, Elissando Rocha da; TONELI, Juliana Tófano de Campos Leite; PALACIOS-BERECHE, Reynaldo. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019179023>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/9yLypv9jfnwK8QbyCjnd5qk/?lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2022.

SILVA, Leo Jaymee de Vilas Boas da; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; MENSAH, Johnson Herlich Roslee; GONÇALVES, Andriani Tavares Tenório; BARROS, Regina Mambeli. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119316313>. Acesso em: 17 jan. 2023.

SINIR. **Site do Sinir**. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 13 abr. 2023.

ŠYC, Michal; SIMON, Franz Georg; HYKŠ, Jiri; BRAGA, Roberto; BIGANZOLI, Laura; COSTA, Giulia; FUNARI, Valério; GROSSO, Mário. Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. **Journal of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 393, 122433, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122433>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420304222#bib0045>. Acesso em: 17 jan. 2023.

TAYIBI, S.; MONLAU, F.; BARGAZ, A.; JIMENEZ, R.; BARAKAT, A. Synergy of anaerobic digestion and pyrolysis processes for sustainable waste management: a critical review and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 152, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111603>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121008790>. Acesso em: 20 abr. 2022.

TSILEMOU, Konstantinia; PANAGIOTAKOPOULOS, Demetrios. Approximate cost functions for solid waste treatment facilities. **Waste Management & Research**, [S.l.], v. 24, p. 310-322, 2006. DOI: [10.1177/0734242X06066343](https://doi.org/10.1177/0734242X06066343). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16941990/>. Acesso em: 2 jan. 2023.

TURBINA A VAPOR. **Siemens**. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/steam-turbines/industrial-steam-turbines.html>. Acesso em: 12 set. 2022.

ZHOU, Hui; MENG, AiHong; LONG, YanQiu; LI, QingHai; ZHANG, YanGuo. An overview of characteristics of municipal solid waste fuel in China: physical, chemical composition and heating value. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 36, p. 107-122, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.024>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002512?via%3Dihub>. Acesso em: 28 abr. 2022.