



ESTUDO PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM ESTUDO DE CASO PARA
O MUNICÍPIO DE MAGÉ/RJ

Luiz Henrique Rodrigues da Silva Sobrinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Planejamento Energético, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Planejamento Energético.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Junior

Rio de Janeiro
Março de 2021

ESTUDO PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM ESTUDO DE CASO PARA
O MUNICÍPIO DE MAGÉ/RJ

Luiz Henrique Rodrigues da Silva Sobrinho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
PLANJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Junior

Aprovada por: Prof. Amaro Olímpio Pereira Junior
Prof. David Alves Castelo Branco
Prof. Luciano Basto Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

MARÇO DE 2021

Silva Sobrinho, Luiz Henrique Rodrigues da

Estudo Para Aplicação Da Tecnologia De Aproveitamento Energético De Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo De Caso Para O Município De Magé/RJ / Luiz Henrique Rodrigues da Silva Sobrinho – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

xi, 98: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 91-96.

1. Aproveitamento energético de resíduos. 2. Gestão de resíduos sólidos. 3. Produção de energia. 4. Desenvolvimento Sustentável. I. Pereira Junior, Amaro Olímpio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Dedico esta dissertação aos meus pais, por sempre acreditarem em meu potencial e ensinarem que o estudo é a maior ferramenta no alcance do sucesso. Ao meus amigos e família, pelo companheirismo e por me fazerem acreditar que essa conquista seria possível.

Agradeço a Deus por me manter forte, saudável e com fé mesmos nos momentos mais difíceis.

A minha mãe, Suelene Rodrigues da Silva, por me fazer acreditar que sou capaz de conquistar todos os meus sonhos e que nesta vida terrena devemos reproduzir valores e produzir conhecimentos para evolução do espírito, cultivando sempre a caridade e o amor ao próximo. Ao meu pai, Claronildo Patta do Nascimento, por me transmitir os valores que moldam o caráter de um homem íntegro e honesto, além da disciplina necessária para alcance dos objetivos da vida.

Agradeço ao meu orientador, Amaro Olímpio Pereira Junior, por me guiar de forma tranquila e solícita no andamento deste trabalho, me mostrando de forma clara e objetiva os caminhos possíveis para a elaboração de um trabalho coeso e eficaz no alcance dos objetivos propostos.

A todos os colegas discentes do Programa de Planejamento Energético da COPPE, pelo companheirismo no desenvolvimento das atividades acadêmicas e apoio na resolução dos problemas e na superação dos desafios que se desenharam no decorrer de todo o curso.

A todo o corpo docente e administrativo do Programa, pela elucidação de dúvidas, ensinamentos claros, pelo fornecimento de toda a estrutura necessária ao cumprimento desta jornada e pela presteza, educação e paciência.

E por fim, aos meus grandes amigos, companheiros nos momentos de alegria, dificuldades e lazer, que sempre acreditaram no meu potencial e que me transmitem as palavras mais sinceras de motivação nos momentos mais difíceis.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM ESTUDO DE CASO PARA
O MUNICÍPIO DE MAGÉ/RJ

Luiz Henrique Rodrigues da Silva Sobrinho

Março/2021

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Junior

Programa: Planejamento Energético

Diante das problemáticas comuns aos centros urbanos relacionadas à gestão e gerenciamento adequado de resíduos sólidos urbanos, além da demanda energética crescente no país, que englobam questões técnicas, econômicas, sociais e ambientais, soluções tecnológicas alternativas buscam contribuir de forma positiva em direção ao alcance dos objetivos e diretrizes estabelecidas nas normas vigentes que tratam destes assuntos, tanto a nível nacional quanto internacional.

Neste sentido, o trabalho buscar analisar os processos de incineração convencional, gaseificação e pirólise, três formas distintas de tratamento energético de resíduos utilizado em usinas de recuperação energética, para determinar a mais adequada, considerando-se aspectos econômicos e ambientais, para aplicação de um estudo de caso para implantação da tecnologia como alternativa tecnológica a gestão de resíduos na cidade de Magé/RJ.

Os resultados mostraram que a opção pode ser atrativa do ponto de vista econômico e ambiental, no entanto sua viabilidade é fortemente dependente de fatores que apresentam forte sazonalidade e volatilidade. A inclusão da reciclagem no processo de geração de energia considerando o estudo de caso proposto mostrou-se fundamental para que este se torne viável do ponto de vista técnico e econômico.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY FOR APPLICATION OF WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGY FROM
URBAN SOLID WASTE: A CASE STUDY FOR THE CITY OF MAGÉ/RJ

Luiz Henrique Rodrigues da Silva Sobrinho

March/2021

Advisor: Amaro Olímpio Pereira Junior

Department: Energy Planning.

In the face of the common problems in the urban centers related to the proper management of urban solid waste, in addition to the increasing energetic demand in the country, that involve technical, economic, social and environmental issues, alternative technological solutions aims to contribute positively in direction towards achieving the objectives and directives established in the current regulations that address these matters, in the national and international scale.

In this respect, the work aims to assess the conventional incineration, gasification and pyrolysis processes, three distinctive forms of solid waste treatment applied in waste-to-energy plants, to determine which is the most suitable, considering economic and environmental aspects, for the application of a case study to implement the technology as an alternative to solid waste management in the city of Magé/RJ.

The results show that the option could be attractive to an economic and environmental point of view. However, the viability is strongly dependent of factors that present strong volatility and seasonality. The inclusion of a pre-treatment process in the energy production showed to be fundamental for the technical and economic viability of the project.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Objetivo Geral.....	1
1.2	Estrutura do Trabalho	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos	5
2.1.1	Definição e Caracterização	5
2.1.2	Marco Legal.....	7
2.1.3	Panorama dos RSU no Brasil.....	12
2.1.4	RSU na cidade de Magé	15
2.2	Aproveitamento Energético de Resíduos	19
2.2.1	Tecnologias de recuperação energética.....	26
2.2.2	Estado da arte no Brasil e no mundo	47
2.2.3	Impactos Ambientais.....	49
3	Metodologia	53
3.1	Parâmetros de cálculo	54
3.1.1	Projeção Populacional	54
3.1.2	Geração média per capita de RSU na área de estudo.....	56
3.1.3	Estimativa do potencial de produção de eletricidade	56
3.1.4	Estimativa de receitas.....	57
3.1.5	Premissas de cálculo	63
3.2	Análise dos indicadores de viabilidade econômica.....	66
4	Estudo de Caso	68
4.1	Seleção da Localidade	68
4.2	Limitações do Método.....	70
4.3	Seleção da Tecnologia Aplicada.....	71
4.4	Coleta e Tratamento de Dados	74
5	Resultados e Discussão	75
5.1	Dados de entrada.....	75
5.1.1	Geração de RSU	75
5.1.2	Potencial de geração de eletricidade	78
5.1.3	Estimativa de Receitas	79
5.2	Indicadores de viabilidade econômica – TIR e VPL	81
6	Conclusão	86

6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	90
7	Referências Bibliográficas.....	91
8	Anexos	97
	ANEXO A – Resultados do Fluxo de Caixa para o Estudo Proposto	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Destinação final de RSU, por tipo de destinação. Fonte: ABRELPE (2019).	12
Figura 2: Geração de RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2019.	13
Figura 3: Coleta de RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2019.	13
Figura 4: localização do município de Magé. Fonte: Magé, 2015a.	16
Figura 5: Croqui da área do CTR Bongaba. Fonte: Magé, 2015.	18
Figura 6: visão geral do papel do tratamento térmico no manejo de resíduos. Fonte: Stantec, 2011.	21
Figura 7: visão geral das tecnologias de aproveitamento energético. Fonte: Stantec, 2011.	22
Figura 8: divisão do processo de conversão térmica de resíduos com base na concentração de oxigênio utilizada. Fonte, Stantec, 2011.	24
Figura 9: fluxograma esquemático do sistema de incineração convencional. Fonte: elaboração própria.	28
Figura 10: visão geral de uma usina de incineração convencional em estágio simples (CNI, 2019).	29
Figura 11: visão geral de um incinerador de duplo estágio. Fonte (adaptado. STANTEC, 2011).	31
Figura 12: visão geral de um incinerador de leito fluidizado. Adaptado, STANTEC (2011).	33
Figura 13: representação esquemática de configurações das plantas de recuperação energética com base em gaseificação. Adaptado de Arena (2012).	37
Figura 14: reator de leito fluidizado circulante. Fonte: Machado, 2015.	41
Figura 15: esquema de uma planta de conversão de energia de micro pirólise. Extraído de Maria (2004).	46
Figura 16: localização das plantas WtE no mundo. Fonte: CNI, 2019.	48
Figura 17: Projeção populacional. Dados medidos e estimados. Elaboração própria.	76
Figura 18: População estimada pelo método de análise de regressão.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de municípios e percentual por tipo de destinação de RSU por região em 2012. Adaptado de ABRELPE (2019).	13
Tabela 2: composição gravimétrica dos RSU em Magé. Fonte: Magé, 2015.	17
Tabela 3: principais características dos processos químicos para o tratamento térmico de resíduos. Adaptado de Arena (2012).	23
Tabela 4: Comparação entre vantagens e desvantagens dos principais dispositivos de geração usados em plantas de recuperação energética com base em gaseificação. Adaptado de Arena (2012).	38
Tabela 5: capacidade atual de algumas das tecnologias estudadas. Fonte: Adaptado de CNI (2019).	48
Tabela 6: métodos de projeção populacional com base em fórmulas matemáticas. Fonte: Adaptado de SPERLING (2014).	55
Tabela 7: geração per capita de RSU em função da faixa populacional. Fonte: PROSINOS (2014).	56
Tabela 8: condições de financiamento.	63
Tabela 9: parâmetros de cálculo das emissões do projeto. Fonte: Adaptado (CentroClima, 2005).	65
Tabela 10: valores dos parâmetros de cálculo das emissões evitadas em aterros sanitários. Fonte: IPCC (2001).	66
Tabela 11: custo de capital e operacional para tecnologias WtE estudadas. Fonte: Siddiqi(2020), Giz (2017)	73
Tabela 12: dados populacionais de entrada. Fonte: IBGE	75
Tabela 13: População estimada considerando os métodos matemáticos propostos... ..	76
Tabela 14: Estimativa da geração de RSU no horizonte de projeto para o Município de Magé. Elaboração própria.	77
Tabela 15: Potencial de geração de eletricidade e capacidade instalada nos cenários propostos.	79
Tabela 16: receitas anuais da usina com separação prévia.	80
Tabela 17: receita oriunda da incineração da massa bruta de RSU (sem separação prévia).	80
Tabela 18: Valores referentes aos custos adotados.	82
Tabela 19: resultados do VPL e TIR para os cenários propostos.	82
Tabela 20: taxa mínima de tratamento térmico para os cenários propostos.	83
Tabela 21: valor obtido pelo tratamento térmico e eletricidade produzida fornecida à rede.	84
Tabela 22: tarifa média por classe de consumo (09/2020). Empresa: ENEL RJ. Fonte: ANEEL.	84

1 Introdução

1.1 Motivação e Objetivo Geral

Uma abordagem que envolva um estudo detalhado sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), no Brasil demanda uma análise de caráter multidimensional, envolvendo questões sociais, econômicas, ambientais e culturais. Uma profunda discussão relacionada à gestão dos resíduos sólidos gerados nos centros urbanos, num primeiro momento tido como um material não aproveitável pela sociedade englobam desde o estudo de tecnologias apropriadas a sua correta forma de manejo e destinação final, a questões relacionadas ao próprio padrão de consumo da sociedade, seus hábitos, práticas e percepções a respeito do tema.

Controlar o desperdício e pensar em formas de tratar e dar uma destinação adequada ao lixo exige então um aprofundamento que vai além de questões técnicas, e sim humanas, sociais, que englobam o processo de geração e produção de bens, o meios com os quais os mesmos são obtidos, ou seja, extraídos da natureza e as técnicas empregadas no processo, além das práticas que envolvem seu consumo e descarte. No entanto, a discussão sobre as técnicas empregadas mostra-se igualmente importante, uma vez que permite a criação de uma base, um direcionamento à adoção de práticas de gestão de resíduos sólidos voltadas à redução dos seus impactos ambientais adversos e formas alternativas e ambientalmente amigáveis de aplicação de mecanismo de controle do desperdício, aproveitamento e destinação final.

O termo resíduo engloba diversos artefatos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente (EPE, 2014). Segundo Henriques (2004), sob sua percepção lixo é todo e qualquer resíduo resultante das atividades diárias do homem na sociedade e, segundo Machado (2015), a geração destes resíduos é consequência de grande parte das atividades realizadas pelo homem, frutos dos avanços tecnológicos, do crescimento populacional e do próprio padrão de consumo da sociedade.

Sendo assim, com o aumento da população nos centros urbanos e o padrão de consumo demasiadamente intensivo no uso dos bens e serviços atualmente, cresce também, a geração dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU. Este crescimento, por sua vez, levanta uma questão a respeito das formas adequadas de destinação deste volume crescente de resíduos sem causar danos ao bem-estar das populações e ao ambiente como todo.

Caso o resíduo sólido urbano não tenha um tratamento adequado, poderá acarretar sérios danos ao meio ambiente, entre eles a poluição do solo, alterando suas características físico-químicas que representará uma séria ameaça à saúde pública tornando este ambiente propício ao desenvolvimento de transmissores de doenças, além da contaminação às águas subterrâneas e do ar (Ladeira, 2013).

Diante disto, se faz necessário então que sejam desenvolvidas práticas relacionadas à gestão dos RSU gerados nos grandes centros que possibilitem a adoção de técnicas apropriadas e direcionadas à redução destes danos causados.

No arcabouço regulatório, a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei federal nº 12.305/1998) estabelece como objetivos, dentre outros, a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, bem como sua disposição final adequada. Considerando estes objetivos propostos, é de suma importância que se estimule a pesquisa técnico-científica e o desenvolvimento de estudos voltados à adoção de práticas que vão de encontro ao alcance dos objetivos estabelecidos pela Lei. No que diz respeito à destinação final, estes estudos se mostram importantes na promoção de alternativas ligadas a gestão adequada dos RSU e a minimização dos passivos gerados por práticas, embora comuns, inadequadas de destinação final de resíduos.

Embora ainda seja prática comum no Brasil a destinação do lixo gerado nos centros urbanos para aterros sanitários e lixões, o crescimento da pressão sobre a necessidade do estabelecimento de novas áreas adequadas para operação de novos aterros e os conhecidos impactos adversos oriundos da sua implantação, como a contaminação do solo, do lençol freático, a emissão de Gases do Efeito Estufa – GEE, dentre outros, cria a necessidade de aprofundamento sobre novos métodos alternativos de destinação final do lixo urbano, capazes de se adequar aos objetivos relacionados ao desenvolvimento sustentável e a manutenção do bem-estar e saúde da população.

Estudos voltados a este aprofundamento, além de oferecerem práticas que possibilitem a minimização destes impactos adversos já citados, ainda oferecem benefícios adicionais relacionados, como a geração de energia, através do aproveitamento do conteúdo energético contido no RSU, por exemplo, e a redução da emissão de gases do efeito estufa, como o metano, que tem potencial de aquecimento global (Global Warming Potential – GWP, em inglês) de 21 a 28 vezes¹ maior que CO₂. Além disso,

¹ Disponível em:

https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Global%20Warming%20Potential.pdf. Acesso em: 24/11/2020, às 10:30.

algumas destas práticas, como a reciclagem e a recuperação energética, por exemplo, permitem a produção e a exploração de produtos oriundos de uma fonte antes vista como algo sem utilidade para a sociedade. Somado a isto, destaca-se o estímulo a criação de emprego e renda e a qualificação de mão-de-obra oriunda das atividades relacionadas a tais práticas.

Em atenção especial ao aproveitamento energético de resíduos, destacam-se como pontos positivos, dentre outros, a possibilidade de geração de energia elétrica a partir dos RSU, através de processos de conversão termoquímica similares aos utilizados em termelétricas convencionais, gerando ganhos econômicos adicionais à destruição térmica do resíduo processado, com a comercialização da energia gerada e dos subprodutos do processo de destruição térmica. Adicionalmente, no processo ainda o calor gerado pode ser reaproveitado, aumentando sua eficiência, ou exportado para sua utilização em outro processo. O subproduto deste ainda pode ser reutilizado como insumo na construção civil, ou como fertilizante na agricultura.

Estudos voltados ao tema destacam a importância de sua aplicabilidade no Brasil, embora até hoje ainda não existam usinas em escalas comerciais deste tipo implantadas no país, como forma alternativa e adequada a destinação final de RSU. Ladeira (2015) destaca que, embora muito avançado em determinados países do mundo, no Brasil os estudos estão sendo ainda iniciados na tentativa de se aprimorar no aproveitamento energético a partir de resíduos sólidos. Brito (2013), em um estudo que buscou determinar a viabilidade econômica de uma Usina de Recuperação Energética – URE, destaca que a tecnologia será uma opção atraente considerando a necessidade de espaços cada vez maiores para deposição dos RSU, e que existe uma significativa tendência de que os preços para deposição em aterros sanitários tornem-se elevados.

Com o aprofundamento dos estudos relacionados a estas tecnologias, poderá ser possível, considerando o contexto econômico e social brasileiro, convergir alternativas para soluções de problemas comuns, como o incremento da oferta de energia provenientes de fontes alternativas na matriz elétrica nacional, além do encontro aos objetivos estabelecidos nas normas que tratam a adequada gestão de resíduos sólidos no país.

Exergando este potencial para aplicabilidade da tecnologia, considerando o cenário nacional da gestão de RSU e considerando os fatos expostos, este estudo buscou apresentar as principais tecnologias disponíveis atualmente relacionadas ao aproveitamento energético de resíduos em Usinas de Recuperação Energética – URE e, através do confronto das informações disponíveis e pesquisa à bibliografia a

respeito do assunto, buscou-se determinar, dentre três rotas tecnológicas para o tratamento através do aproveitamento energético de resíduos (incineração, gaseificação e pirólise), aquela que se adequaria a elaboração de uma análise financeira de aplicação de uma URE no município de Magé-RJ, situado na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Considerando as particularidades do município estudado e os dados disponíveis relacionados ao tema, este estudo apresenta uma alternativa à gestão de RSU no município, considerando a possibilidade de aplicação de uma URE de forma a tratar adequadamente os resíduos gerados na cidade, além de possibilitar a redução do volume de resíduos a ser transportado a aterros sanitários, produzindo ganhos econômicos e ambientais a partir da aplicação da tecnologia, considerando o cenário atual de gestão de RSU na localidade.

Este trabalho busca contribuir para a pesquisa científica a respeito da aplicação de técnicas alternativas de tratamento e destinação final de RSU em centros urbanos, de forma a contribuir com os objetivos estabelecidos na legislação que trata da gestão e o gerenciamento de RSU vigente no país e as políticas voltadas para preservação dos recursos naturais, do bem-estar das populações e da geração de energia de base sustentável.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho divide-se em seis capítulos:

O primeiro capítulo, de introdução, busca apresentar os conceitos relacionados ao resíduo, as motivações e o objetivo geral do estudo.

O segundo apresenta a revisão bibliográfica, apresentando um panorama dos RSU no Brasil e na localidade objeto do estudo de caso, além dos conceitos e definições a respeito das rotas tecnológicas a serem estudadas. Neste capítulo são descritas as tecnologias de aproveitamento energético de resíduos a partir da incineração, gaseificação e pirólise, apresentando as particularidades de cada processo, suas vantagens e desvantagens tecnológicas, econômicas e ambientais.

O terceiro descreve a metodologia utilizada para análise da tecnologia a ser aplicada no estudo de caso, os parâmetro de cálculo considerados para estimativa dos resultados e uma síntese dos indicadores de viabilidade econômica considerados na análise.

O quarto capítulo aborda o estudo de caso e os resultados oriundos da análise das tecnologias e da aplicação da metodologia empregada. Nele, é abordada a seleção da localidade, as limitações encontradas na aplicação do método e o processo de coleta e tratamento de dados.

Além disso, no quinto capítulo, os resultados são avaliados apresentando uma análise a respeito da conformidade dos resultados obtidos com o referencial teórico considerado no estudo. Esta parte do trabalho também apresenta uma discussão acerca dos resultados obtidos, avaliando-os sob a perspectiva dos questionamentos que fundamentaram a elaboração do estudo, além de uma análise acerca dos indicadores econômicos considerados.

O sexto capítulo compreende as conclusões obtidas a partir da elaboração do estudo. Nele serão apresentadas as principais contribuições do trabalho e as constatações que foram obtidas a partir da aplicação do estudo de caso, considerando os objetivos gerais propostos.

Ainda no último capítulo, são abordados questionamentos e recomendações para a elaboração de trabalhos futuros, considerando as limitações identificadas e os resultados obtidos, de forma a orientar e estimular a elaboração de novos estudos acerca do tema, podendo contribuir assim para a pesquisa científica e aprimoramento da discussão a respeito da temática abordada, além de compreender uma base sólida à sustentação dos resultados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

2.1.1 Definição e Caracterização

Segundo a lei que trata das diretrizes, objetivos, princípios e instrumentos relacionados à gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil (Lei 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos), estes são definidos como “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em

corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

A Lei, conforme já citado no capítulo anterior, estabelece como objetivo prioritário no gerenciamento de resíduos sólidos a redução do volume gerado, estabelecendo a obrigatoriedade da observância da ordem prioridade na sua gestão e gerenciamento.

A mesma Lei ainda apresenta uma classificação dos resíduos sólidos, tem como base sua origem e periculosidade. Nela, quanto à origem, os resíduos são classificados como: domiciliares, de limpeza urbana, sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais, de serviço de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, dos serviços de transportes e de mineração. Quanto à periculosidade, a lei classifica os resíduos como perigosos aqueles que “em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica; e os não perigosos como aqueles que se enquadram na definição de periculosidade anterior.

Chen (2018) divide os resíduos sólidos urbanos de forma mais simples, em apenas duas categorias: resíduos sólidos industriais, oriundos das atividades industriais; e os resíduos sólidos municipais, que são aqueles descartados em áreas urbanas, sendo composto predominantemente de resíduos domiciliares e uma porção menor de resíduos de origem em atividades comerciais. A Empresa de Pesquisa Energética – EPE classifica os resíduos sólidos quanto à sua origem (urbanos, industriais e agrícolas) e propriedades (inertes e combustíveis) (EPE, 2008).

Segundo Henriques (2004) os resíduos sólidos podem ser definidos como resto das atividades humanas, que são considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT em sua Norma Brasileira NBR nº 10004 considera que a sua classificação envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são conhecidos.

A mesma norma define os resíduos sólidos como:

“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.”

De acordo com Faria (2002, apud., Henriques, 2004), esta definição é muito ampla e pode estar equivocada ao incluir líquidos como resíduos sólidos. Ainda segundo o citado autor, uma conceituação mais elaborada expressa o lixo como resíduos sólidos urbanos produzidos individual ou coletivamente, pela ação humana, animal ou por fenômenos naturais, nocivos à saúde, ao meio ambiente e ao bem estar da população urbana, não enquadrado como resíduo especial. (KAPAZ 2001).

Ponto comum dentre tais definições apresentadas está na origem do resíduo sólido em si, resultante, portanto, de atividade humanas e que estes são capazes de gerar impacto adverso ao ambiente, evidenciando a necessidade de tratamento adequado e sua destinação final ambientalmente adequada. A literatura levanta alguns questionamentos a respeito da abrangência desta definição e os tipos de materiais que podem ser incluídos nela.

No entanto, face o exposto é possível enxergar a estreita relação entre os padrões e a dinâmica de consumo da sociedade como um todo e a geração do resíduo sólido propriamente dito. Isto pode ser constatado uma vez que, em nível nacional, a própria lei que institui as regras básicas para a gestão e gerenciamento de RSU no país inclui o princípio do poluidor-pagador e do protetor-recebedor, uma vez que os mesmos são diretamente responsáveis pela contribuição na geração ou não geração do resíduo sólido urbano.

A classificação do resíduo sólido como material combustível se mostra interessante aos objetivos deste estudo, uma vez que o processo de conversão termoquímica para obtenção de energia através do aproveitamento energético de resíduos está diretamente ligado às propriedades combustíveis presentes no RSU gerado nos centros urbanos.

2.1.2 Marco Legal

A responsabilidade pela proteção do meio ambiente, combate à poluição e oferta de saneamento básico a todos os cidadãos brasileiros está garantida na Constituição

Federal, que deixa ainda, a cargo dos municípios, legislar sobre assuntos de interesse local e de organização dos serviços públicos. A coleta, o transporte e a disposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos nos municípios brasileiros têm como ente legal o Executivo Municipal e, em grande parte, é executada pelas Companhias Municipais de Limpeza Urbana. (IBGE 2000, apud. Henriques, 2004).

Releva, ainda, destacar o art. 225 da Carta Magna, segundo o qual “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (Henriques, 2004). Além desta, a supracitada ainda destaca outros instrumentos ligados aos resíduos sólidos e a proteção do ambiente como um todo, como a definição da gestão de resíduo sólido como serviço público de interesse local e de caráter essencial, em seu artigo 30º, por exemplo.

A Constituição Federal de 1988, durante anos se apresentava como um dos instrumentos com figura de lei que envolvia as questões relacionadas aos resíduos sólidos no país. Para além dela, até que fosse promulgada uma lei norteadora relacionada ao tema, a Lei de crimes ambientais (9.605/98) também se apresentara como ferramenta relacionada à atuação dos órgãos de controle no que diz disposição final inadequada de RSU. No campo das normas e resoluções, até a promulgação da PNRS, toda a normatização voltada aos resíduos sólidos no país encontrava-se pulverizada em um extenso conjunto resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA e normas da Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA.

No entanto, somente com a promulgação da PNRS, permitiu-se a criação de um instrumento legal e centralizador que contribuísse de forma positiva ao correto gerenciamento dos resíduos sólidos, de forma que se permita a adoção de instrumentos, políticas e ações voltadas à minimização dos impactos ambientais relacionados aos resíduos sólidos, a saúde e ao bem-estar humano. A centralização do marco legal relacionado ao tema de certa forma facilitou a aplicação dos instrumentos necessários ao correto gerenciamento e gestão dos RSU no país.

Já citada anteriormente, a PNRS é a Lei em vigor que orienta a diretrizes gerais para o gerenciamento e a gestão de RSU no Brasil. Além daquilo que já fora mencionado, a mesma institui alguns princípios básicos no que diz respeito ao tema. A ordem de prioridade, um dos objetivos instituídos pela lei na gestão e gerenciamento, já mencionada no capítulo anterior se mostra como um balizador à atuação e ao processo

de tomada de decisão na esfera dos projetos e planos voltados às questões relacionadas aos RSU no país. Ainda em relação a estes princípios, cabe destaque a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, o desenvolvimento sustentável e a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública. Trazendo para a esfera do presente estudo, pode-se dizer que o mesmo contribui de forma positiva ao fortalecimento de questões ambientais, tecnológicas e econômicas na gestão de RSU no país.

A PNRS estabelece também importantes instrumentos voltados à gestão e gerenciamento de RSU. Considerando a esfera do aproveitamento energético, cabe destaque para a cooperação técnica e financeira entre a iniciativa pública e privada voltadas a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para o tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos e a pesquisa técnica científica.

Outro ponto importante é a Proibição de Lixão a partir de 2014, o que exigirá investimento em fiscalização e obras para instalação de sistemas capazes de tratar os resíduos e, quando não houver mais viabilidade técnica, ambiental e econômica para tal, dispor os rejeitos em aterros sanitários. Aqui é importante realçar o fato de que somente os rejeitos poderão ser dispostos em aterros sanitários (EPE, 2014) e a obrigatoriedade de adoção de sistemas capazes de tratar adequadamente o resíduo previamente à sua disposição final.

Para além, importante citar instrumentos como os planos de resíduos e os planos de gerenciamento integrado de resíduos sólidos e os planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

Os planos de resíduos abrangem a esfera nacional, estadual e federal e incumbem aos estados, municípios e união a sua elaboração e revisão. A Lei prevê ainda que os planos deverão prever, dentre outros, metas que visem à redução do volume resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada, além da elaboração de projetos e ações que visem o atendimento das metas previstas.

Na esfera da União, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), se apresenta como um instrumento da PNRS voltado a operacionalização de seus princípios, diretrizes e objetivos no âmbito nacional. Segundo MMA (2012), além de indicar planos de metas, programas e ações para mudanças positivas sobre o quadro atual dos resíduos sólidos no Brasil, o elaboração do plano permite a identificação de problemas

diversos relacionados ao resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação.

Destacam-se como metas relacionadas aos resíduos sólidos urbanos apresentadas no Plano, a eliminação dos lixões (com metas de reabilitação destas áreas), a redução da disposição de material reciclável em aterro e a recuperação do gás de aterro a cobrança pelos municípios por serviços relacionados ao gestão do RSU, em vinculação ao IPTU. Este tipo de sistema de cobrança abre a possibilidade para gestão pública municipal, destinatária deste recurso, fortalecer e desenvolver políticas e metas voltadas a adoção de técnicas financeiramente viáveis, voltadas ao tratamento adequado do resíduo sólido urbano.

Como não poderia deixar de ser, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos mantém estreita relação com outros planos nacionais tais como o de Mudanças do Clima (PNMC), de Recursos Hídricos (PNRH), de Produção e Consumo Sustentável (PPCS) e também harmoniza-se com a Política Nacional de Educação Ambiental e com a proposta de Plano Nacional de Saneamento Básico – PLAN SAB, evidenciando, desse modo, a abrangência e complexidade do tema em questão (MMA, 2012).

Com o objetivo de atualizar e criar novos mecanismos que estejam alinhados com as metas e objetivos estabelecidos na PNRS, a partir do estabelecimento de medidas que visem o aprimoramento das condições estruturais do saneamento básico no país, o novo marco regulatório do saneamento básico, instituído através da Lei federal nº 14.026/2020, além de estabelecer prazos para a destinação final ambientalmente adequada de rejeitos, assegura, dentre outros, que os serviços públicos de saneamento básico, incluindo-se o manejo de resíduos sólidos, deverão ter sua sustentabilidade econômica e financeira assegurada por meio da adoção de mecanismos de cobrança por estes serviços, através de taxas, tarifas e outros preços públicos.

Este cenário normativo reforça a necessidade da adoção de técnicas que contribuam de forma significativas ao atendimento destes prazos, como é o caso das tecnologias de aproveitamento energético do resíduo sólido urbano, uma vez que esta permite o tratamento ambientalmente adequado do resíduo para correta destinação final dos rejeitos. Adicionalmente, garante a adoção de mecanismos econômicos que sustentem financeiramente a aplicação destas técnicas.

Na esfera estadual, a política estadual de resíduos sólidos, instituída pela Lei estadual nº 4.191/2003, em observância a PNRS, estabelece princípios, normas e procedimentos referentes à coleta, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento e

destinação final ambientalmente adequada de resíduos no estado do Rio de Janeiro, com vistas ao controle da poluição a minimização dos seus impactos ambientais.

A política estabelece ainda como objetivos, dentre outros, a erradicação de lixões, de forma a evitar o agravamento dos impactos ambientais gerados pelos resíduos sólidos, a valorização das atividades de segregação na origem e na coleta e o estímulo a implantação de novas tecnologias e processos não poluentes para o tratamento, reciclagem e disposição final de resíduos sólidos. Ainda prevê como ações do poder público para alcance dos objetivos propostos a minimização e eliminação do lançamento de poluentes através da adoção de tecnologias limpas e do tratamento de resíduos sólidos. Cabe destaque às ações que promovam a adoção de soluções consorciadas entre municípios na área de resíduos sólidos, o incentivo e investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que não agredam o meio ambiente e de produção mais limpa.

Percebe-se que na esfera estadual, o plano orienta de forma clara que o poder público deverá aplicar soluções adequadas ao tratamento de resíduos, estimulando então a adoção de soluções alternativas às práticas comuns de disposição de resíduos, como o aproveitamento energético, por exemplo. Adicionalmente, esta opção também se enquadra no que diz respeito à aplicação de soluções consorciadas entre municípios, levando em conta a capacidade de processamento das usinas atuais e volume gerado de resíduos em determinados municípios.

Ainda sobre a Lei, fica evidente que todo e qualquer resíduo sólido deverá, dentro dos princípios da mesma, passar por alguma forma de tratamento até que tenha seu destino final adequado. Importante citar ainda que o marco legal que institui a gestão e o gerenciamento de RSU no país estabelece ainda que “poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental”.

Esta possibilidade abre espaço para o aprofundamento dos estudos e o incentivo ao desenvolvimento de pesquisas que contribuam para a inserção de tecnologias que vão de encontro às diretrizes estabelecidas na PNRS, no que diz respeito ao aproveitamento do potencial energético dos resíduos sólidos, haja vista seu destaque como instrumento de gestão instituído pela Lei.

2.1.3 Panorama dos RSU no Brasil

Segundo dados mais recentes disponíveis da Associação Brasileira de Empresa de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, numa pesquisa que buscou apresentar uma síntese de informações sobre geração, coleta, coleta seletiva e destinação final, no ano de 2018 foram geradas no país 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, dos quais um total 72,7 milhões de toneladas (92%) foi coletado. A geração per capita apresentou um crescimento inferior à coleta (1% e 1,66% de aumento na geração e na coleta, respectivamente), se comparado ao ano de 2017. Do montante coletado, ainda segundo a pesquisa, 43,3 milhões de toneladas (59,5%) foi destinada de forma adequada a aterros sanitários. O restante, 29,5 milhões de toneladas (40,5%) foi despejado em locais inadequados, como lixões (23,5%) ou aterros controlados (17,5%), locais que não contam com uma estrutura adequada capaz de minimizar os impactos adversos oriundos da deposição de lixo urbanos no solo.



Figura 1: Destinação final de RSU, por tipo de destinação. Fonte: ABRELPE (2019).

Comparado ao crescimento populacional no período (0,40%) a geração teve um aumento um pouco maior, indicando o aumento na geração per capita.

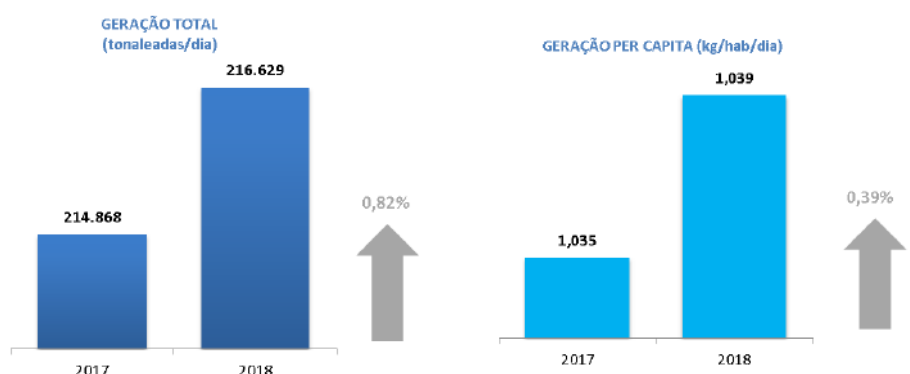


Figura 2: Geração de RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2019.

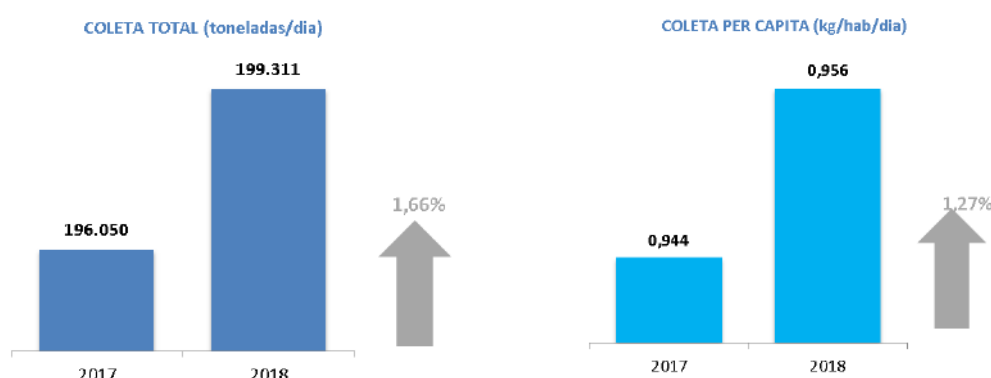


Figura 3: Coleta de RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2019.

Tomando em conta a distribuição da destinação final dos RSU em municípios por região, o mesmo estudo demonstrou que, no ano de 2018, a região sul concentrou maior parcela de municípios cujos resíduos foram encaminhados para aterros sanitários.

Tabela 1: Quantidade de municípios e percentual por tipo de destinação de RSU por região em 2012. Adaptado de ABRELPE (2019).

	Norte (%)		Nordeste (%)		Centro-Oeste (%)		Sudeste (%)		Sul (%)		BRASIL
Aterro Sanitário	93	20,7	454	25,3	162	34,7	820	49,2	1.040	87,4	2.569
Aterro Controlado	110	24,4	496	27,6	152	32,5	641	38,4	109	9,1	1.508
Lixão	247	54,9	844	47,1	153	32,8	207	12,4	42	3,5	1.493
Brasil	450	100	1.794	100	467	100	1.668	100	1.191	100	5.570

Tomando em conta essa distribuição, percebe-se que parcela considerável dos municípios brasileiros tem como destinação final para o RSU gerado lixões e aterros controlados. Estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde (ABRELPE, 2019). Diante deste cenário e considerando a elevada concentração da população urbana nos grandes centros urbanos, o que eleva este

quadro que relaciona a crescente geração de RSU e a demanda referente à correta destinação deste material nestas localidades, esta distribuição permite para além de entender, identificar em quais localidades a pressão exercida pelo manejo inadequado do RSU gerado possui maior significância considerando todo este conjunto de municípios. Diante disto, permite-se construir uma base para a linha de ação na direção do estabelecimento de mecanismos de priorização da aplicação de técnicas adequadas de manejo, isto quer dizer, entender onde se faz necessária uma ação prioritária em uma determinada localidade em relação a uma outra, de acordo com este grau de impacto e distribuição.

Apesar do aumento da participação dos aterros sanitários no cenário da destinação final de resíduos no país, quando a análise tange o aporte de recursos no setor, o cenário não se mostra positivo. Ainda segundo dados da ABRELPE (2019), em relação ao ano anterior, no ano de 2018 foram aplicados no setor de coleta R\$ 10 bilhões de reais, cerca de R\$ 4 por habitante ao mês, um declínio de 1,47%, em nível nacional.

O encolhimento dos investimentos refletiu-se num menor número de vagas no setor. Em comparação com o ano de 2017, em 2018 houve um recuo de 1,4% no número de pessoas formalmente empregadas no setor, concentrando maior parte da retração no setor público (2,8%) em relação ao setor privado (0,3%).

Cabe salientar, considerando o exposto, que mesmo com esse aumento considerado na coleta e destinação de RSU aos aterros sanitários, ainda parcela considerável dos resíduos gerados no país ainda é destinada para locais inadequados, que não oferecem o tratamento adequado para os resíduos e destinação final ambientalmente segura, elevando seu potencial da poluição hídrica, atmosférica, do solo e os riscos à saúde humana. Em pouquíssimos casos são aplicadas outras soluções, que poderiam trazer benefícios para as localidades. Isto se dá, provavelmente por razões financeiras, uma vez que tais soluções normalmente significam maiores investimentos (EPE, 2014). Com a tendência de crescimento da economia nacional, espera-se que esses valores aumentem nos próximos anos. Isso fará com que surja a necessidade muito forte de políticas públicas mais rigorosas para a regularização das condições dos aterros sanitários, além de mais incentivo econômico para a reciclagem e para o reaproveitamento energético dos RSU (Soares, et. al. 2016).

Percebe-se, portanto, que a operação de aterros sanitários, embora se apresente como uma solução comum e de extensa prática como forma de destinação final de RSU no Brasil, se encontra diretamente ligada a impactos ambientais que causam algum risco à saúde e ao bem-estar humano.

Diante dos problemas inerentes a operação destes aterros, tem-se uma maior dimensão da necessidade de se alinhar soluções ambientalmente atrativas que vão de encontro não somente as normas que regulam a gestão de RSU, mas que estejam somadas aos objetivos e metas estabelecidos em normas que regem outras questões, como a mitigação de impactos atrelados a mudança do clima, manutenção e regulação de serviços ecossistêmicos, além da inserção de tecnologia de renovável na matriz elétrica nacional.

Neste sentido, a tecnologia de aproveitamento energético dos RSU em UREs, embora pouco difundida no país, por possuir potencial de mitigação dos impactos adversos oriundos da disposição inadequada de RSU amplamente aplicadas no cenário nacional, se apresenta como uma alternativa que se enquadra e contribui de forma positiva para o alcance dos objetivos, metas e adoção de ações direcionadas ao aprimoramento da gestão e gerenciamento de RSU no país.

2.1.4 RSU na cidade de Magé

A cidade de Magé compõe um dos vinte e dois municípios da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro e Segundo Magé (2013) ocupa 8,3% do seu território. Magé vive acelerado processo de urbanização. De 2006 a 2008 a área urbanizada de Magé cresceu 45,77%, enquanto no Conleste (região de 12 municípios do Leste Fluminense – área de entorno do COMPERJ o crescimento observado foi de 27,23%. Já em relação ao número de domicílios particulares permanentes urbanos, no mesmo período o município apresentou crescimento de 7,51%, enquanto no Conleste o aumento foi de 4,94% (ONU-Habitat/UFF) (Magé, 2013).

O município possui extensão territorial de aproximadamente 390 km² e uma população estimada de 246.433 habitantes², distribuída em seis distritos. Segundo dados do Censo de 2000, o 1º distrito (sede – Magé) concentra 26,7% da população; Santo Aleixo (2º distrito) 5,1%; Rio D'Ouro (3º distrito) 4,1%; Suruí (4º distrito), 5,1%; Guia de Pacobaíba (5º distrito), 6,9%; Vila Inhomirim (6º distrito) 47,6%. A distribuição da população pelos distritos que compõem o município de Magé é definida pelas vias de acesso aos mesmos e pela proximidade com o município de Duque de Caxias que promove um verdadeiro vazamento populacional para o distrito de Inhomirim em Magé (Magé, 2013). A cidade fica a cerca de 50 km da capital e têm além do município de Caxias (a oeste),

² Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rj/mage.html>. Acesso em 01/12/2020, Às 11:03 hrs.

como limítrofes: Guapimirim (a leste), Petrópolis (ao norte) e a Baía de Guanabara (ao sul) (Magé, 2015).



Figura 4: localização do município de Magé. Fonte: Magé, 2015a.

Baseado no Censo Demográfico de 2010 e dados do próprio município, Magé possui densidade demográfica de 585,13 hab/ km² e taxa de urbanização para o mesmo ano de 94,68%. O Produto Interno Bruto – PIB per capita registrado para o ano de 2017 foi de R\$ 16.240,43.

Com relação ao manejo dos resíduos sólidos urbanos, segundo dados disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento – SNIS³, a taxa de coleta no município incluindo os resíduos domiciliares e públicos coletados com relação à população urbana no ano de 2018 foi de 1.05 kg/hab/dia e a taxa de cobertura do serviço de coleta em relação à população urbana foi de 90%. As despesas per capita com o manejo de RSU em relação à população urbana foram de R\$ 137,04 por habitante no mesmo ano. O custo considerando apenas a destinação final segundo dados mais recentes disponíveis é de R\$ 45,00 por tonelada de resíduo sólido urbano coletado.

Com relação a sua composição, a partir de estudo realizado por MAGÉ (2015) que disponibiliza informações acerca da composição gravimétrica dos RSU coletados no município, 97% da sua massa compreende fração orgânica (matéria orgânica, papel, papelão, plásticos, entre outros) e o restante é composto por material inorgânico (vidro e metais). O teor de umidade da massa considerado no estudo foi de 67% e apenas

³ Disponível em: http://appsniis.mdr.gov.br/indicadores/web/residuos_solidos/mapa-indicadores. Acesso em 01/12/2020, às 11:26.

3,24% são coletados em caçamba de serviço de limpeza. A tabela abaixo apresenta as frações dos materiais presentes no RSU coletado no município.

Fração Orgânica ⁴	(%)	Fração Inorgânica	(%)
Mat. Orgânica	39	Vidro	26
Papel/Papelão	17	Metais	74
Plástico Filme	9		
Plástico Duro	7		
Trapos	6		
Fraldas	2		
Espuma	1		
Borracha	1		
Couro	2		
Isopor	1		
Outros	15		

Tabela 2: composição gravimétrica dos RSU em Magé. Fonte: Magé, 2015.

Atualmente o RSU coletado no município é encaminhado para uma célula aterro sanitário situado no bairro de Bongaba, 6º distrito do município. A área da célula de aterro se encontra licenciada junto ao INEA, até o ano de 2021, sob a Licença de Recuperação e Operação nº IN003229, emitida no ano de 2019 e tendo como responsável legal o município de Magé. O aterro sanitário, implantado em uma área de 108.000 m², tem como finalidade ser o local de destinação final dos resíduos domiciliares do município, além de realizar a triagem de Resíduos de Construção Civil – RCC e trituração de resíduos de poda do município. Não se tem registros de usos anteriores na localidade. Segundo informações obtidas junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente do município, diariamente são encaminhados ao aterro uma média de 244 toneladas de RSU, recolhidas apenas no município.

A célula é parte de um projeto que visa recuperação e remediação de uma área que abrigava um antigo lixão no município, em área vizinha. Segundo dados da municipalidade, o lixão operou por 30 anos e foi encerrado no ano de 2011, passando a ter a sua área utilizada como aterro controlado, desativado em 2014 devido à constatação de irregularidades na sua operação, segundo informação da Secretaria Municipal de Meio Ambiente do município.

⁴ Caráter não biodegradável.

No ano de 2015, ainda segundo informações da Prefeitura, foi contratado serviço especializado para realização de diagnóstico e do já citado projeto básico de recuperação da área do antigo vazadouro. No diagnóstico foram encontradas deficiências como: camada de lixo implantada de maneira irregular, inexistência de cobertura em algumas partes do vazadouro, afloramento de líquidos lixiviados, inexistência de sistemas de drenagem superficial de taludes e bermas, inexistência de sistemas de coleta e drenagem de líquidos lixiviados (chorume), inexistência de sistema de coleta/drenagem de gases gerados, entre outros.

O projeto básico de recuperação da área, segundo Magé (2015) consiste na drenagem e queima de gases e drenagem e tratamento de lixiviados em sistema tipo "geotube". Um canal para escoamento do chorume foi aberto ao redor da antiga área do lixão, conforme ilustra o croqui da figura abaixo. O corpo receptor do efluente é o Rio Inhomirim (Magé, 2015).

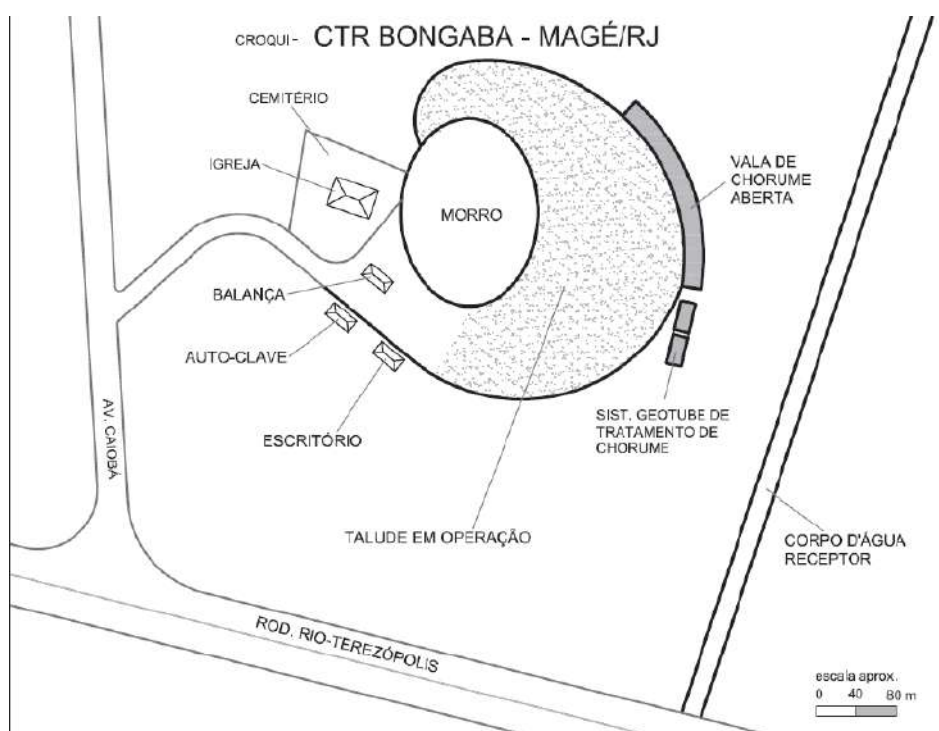


Figura 5: Croqui da área do CTR Bongaba. Fonte: Magé, 2015.

Considerando então o atual panorama dos RSU no município, assim como é na maioria dos centros urbanos brasileiros, o principal local de destinação final do lixo se dá em aterro sanitário e não há implantada nenhuma tecnologia que vise o tratamento adequado da massa de RSU coletado anterior a sua destinação final ambientalmente adequada. Em se tratando do caso particular do município de Magé, a situação se agrava uma vez que até recentemente todo o lixo coletado no município era

encaminhado para um lixão, causando agravamento dos problemas ambientais relacionados ao manejo inadequado de RSU.

Percebe-se então, diante disto, a existência da problemática comum aos centros urbanos no que diz respeito ao manejo dos RSU, encaminhados durante décadas a locais inadequados, como os lixões. Embora exista um projeto que vise à recuperação da área, os impactos ambientais adversos oriundos desta forma de destinação final ainda podem ser observados na localidade, como a contaminação das águas superficiais, do lençol freático, solo, atmosférica, entre outras.

Este fato reforça a necessidade da adoção de formas alternativas de manejo destes resíduos que possibilitem a redução da pressão sob a necessidade de implantação de novas áreas para operação de aterros sanitários. O projeto de recuperação citado não contempla adoção de formas alternativas de tratamento dos resíduos anterior à sua disposição final no aterro, desperdiçando um potencial adicional de mitigação dos impactos já constatados na região a partir dos estudos já elaborados na localidade.

O aproveitamento energético de resíduos, considerando o contexto da gestão dos RSU no município, pode se apresentar como uma opção que poderia oferecer uma contribuição adicional tanto à recuperação da área quanto ao aumento da vida útil da própria célula de aterro sanitário existente, uma vez que a tecnologia é capaz de reduzir de forma significativa o volume de RSU a ser encaminhado aos aterros, reduzindo assim o potencial de geração dos passivos ambientais já citados oriundos da operação da célula e permitindo a remediação da área já afetada pela antiga utilização desta como um lixão.

2.2 Aproveitamento Energético de Resíduos

A utilização de resíduos como um recurso para recuperação de materiais e energia tem se tornado uma opção cada vez mais atrativa a nível local e nacional ao redor do mundo (Wood et al., 2013). O aproveitamento energético de resíduos (*Waste to Energy - WtE*), segundo o citado autor, é o termo dado a um determinado processo em que a energia química contida no resíduo é extraída na forma de eletricidade, calor e/ou um combustível para uso descentralizado numa planta de aproveitamento energético.

Esta forma de aproveitamento energético oriunda dos resíduos gerados nos centros urbanos permite que o conteúdo energético contido nestes materiais seja recuperado e reutilizado em processos diversos por meio de sua conversão termoquímica, através da

utilização de dispositivos variados. A tecnologia transforma o resíduo urbano em energia elétrica e térmica por um processo amplamente utilizado ao redor do mundo, pois aproveita o poder calorífico contido nos resíduos sólidos para uso como combustível (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012).

No início de sua difusão, a falta de atenção aos mecanismos de controle de emissões dos gases gerados no processo de combustão acabou por gerar uma espécie de resistência da sociedade com relação a sua aplicabilidade. Isto se dá em parte devido a ausência de mecanismos de controle de emissão de poluentes nos antigos incineradores e a forma como estes eram utilizados, apenas como uma forma de redução do volume da massa de resíduos nos centros urbanos, se apresentando, nas palavras de Henriques (2004), como verdadeiras “caixas de queimar sem controle”.

Segundo Machado (2015), o desenvolvimento mais recente da tecnologia, incluindo a modernização dos sistemas de controle e tratamento de gases poluentes (entre eles NO_x, SO_x, HCl, dioxinas, furanos, etc.), promoveu ambiente para a maior aceitabilidade de unidades de Incineração baseadas em tecnologia Waste-to-Energy (WtE). As unidades de tratamento térmico de resíduos possuem métodos e equipamentos sofisticados para filtrar e abater as emissões atmosféricas nos níveis exigidos pela rigorosa legislação ambiental europeia. Além disso, essas unidades contam com equipamentos de monitoramento ambiental contínuo, em tempo real, e alarmes de interrupção, garantindo a segurança da comunidade e do meio ambiente (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012).

Como consequência deste desenvolvimento, têm-se atualmente uma visão mais positiva a respeito da aplicação da tecnologia considerando a dimensão ambiental e a geração de energia. A tecnologia *waste to energy* (WtE) – como é conhecida no mundo –, tem sido publicamente reconhecida como uma fonte de energia com menor impacto ambiental que a maioria das outras fontes de eletricidade (US EPA, 2003; Rechberger and Schöller, 2006, apud. Arena, 2012). O processo conta hoje com modernos sistemas de controle de poluição que permitem uma redução da carga de poluentes lançados na natureza, de forma que os mesmos estejam em acordos com os limites exigidos pela legislação e normas nacionais e internacionais vigentes.

O tratamento térmico de resíduos sólidos para obtenção de energia, além dos pontos positivos mencionados, segundo Stantec (2011), ainda pode ser parte de um sistema integrado de gerenciamento de resíduos, que pode desempenhar uma série de papéis importantes neste sistema, como por exemplo; reduzir o volume de resíduos e, portanto, a necessidade de novos aterros; permitir a recuperação de energia a partir do fluxo de

resíduos sólidos; destruir contaminantes que podem estar presentes na massa de resíduos e; eventualmente, reduzir a necessidade de transporte de resíduos por longas distâncias.

Esquemáticamente, o papel do tratamento térmico de resíduos no gerenciamento de resíduos pode ser ilustrado conforme a .



Figura 6: visão geral do papel do tratamento térmico no manejo de resíduos. Fonte: Stantec, 2011.

Como pode ser visto na figura, o tratamento térmico de resíduos para aproveitamento energético pode ser aplicado em alguns casos como uma forma de gerenciamento da massa de resíduos remanescente da separação da fração reciclável e orgânica. Esta separação pode resultar num aumento geral do potencial de aplicação da massa remanescente em usina *WtE* (Stantec, 2011).

Ao lado dos evidentes benefícios ambientais, sanitários e sociais que proporciona o aproveitamento energético de RSU já apresenta hoje alternativa tecnológicas maduras (EPE, 2014). Ainda segundo EPE (2014), diversas linhas de aproveitamento termoquímico de resíduos urbanos estão sendo desenvolvidas através da adequação, ou combinação, dos processos ou tecnologias para as especificações dos resíduos urbanos. Historicamente, em locais onde o custo de oportunidade da terra mostrou-se elevado e a população não concordou com a instalação de aterros em sua vizinhança, a solução foi buscar tecnologias que reduzissem a quantidade de lixo a ser disposta. O primeiro resultado obtido foi da incineração, que reduz em 92%, em média, a quantidade a ser disposta e, pelo aspecto energético, garante uma quantidade praticamente constante de energia térmica – que pode ser convertida em eletricidade (EPE, 2014).

Além dos benefícios já citados, ressalta-se que, ao término da vida útil do empreendimento, que já é superior à do aterro, é possível promover uma reforma ou

implantar sistema atual, sem demandar troca de local e mudança de logística, além de evitar novo custo de oportunidade de outras áreas (EPE, 2014).

Com o aumento do interesse a respeito de tecnologias que permitissem reduzir a saturação das áreas destinadas à operação e implantação de novos aterros, ao longo do tempo foram desenvolvidas formas alternativas para além do processo de incineração para o aproveitamento energético de resíduos. Segundo Wood *et al.* (2013), a obtenção de energia a partir de resíduos por tecnologias térmicas, incluem a combustão direta, ou incineração convencional, e tecnologias avançadas de conversão (Advanced Conversion Technologies – ACT - pirólise e gaseificação), ou recuperação de combustíveis secundários para subsequente recuperação energética (combustível sólido recuperado a partir de processos de tratamento mecânico biológico e biocombustíveis a partir do gás de síntese produzido a por meio de processos de gaseificação). A incineração convencional inclui a tecnologia *mass burning*, incineração em leito fluidizado, entre outras que serão discutidas com maior detalhe nas próximas seções. As tecnologias avançadas de conversão são menos consolidadas em escala comercial e envolvem processos tecnológicos mais complexos (Stantec, 2011).

Uma visão geral das tecnologias hoje consolidadas em usinas que utilizam o processo de incineração convencional e tratamentos térmicos avançados pode ser ilustrada na .



Figura 7: visão geral das tecnologias de aproveitamento energético. Fonte: Stantec, 2011.

A apresenta de forma resumida as principais características e particularidades dos processos químicos de conversão energética para o aproveitamento energético de RSU. A descrição de cada processo, bem como suas vantagens, desvantagens e particularidades serão discutidas em maior detalhe nas próximas seções. Em suma, os processos se diferenciam de acordo com sua finalidade, as condições operacionais, produtos gerados e o grau de limpeza e purificação dos gases.

Tabela 3: principais características dos processos químicos para o tratamento térmico de resíduos.

Adaptado de Arena (2012).

	<i>Incineração</i>	<i>Gaseificação</i>	<i>Pirólise</i>
Finalidade do Processo	Converter o resíduo a gases de fluxo de alta de temperatura. (CO ₂ e H ₂ O, principalmente).	Converter o resíduo a gases combustíveis de alto poder calorífico (CO ₂ , H ₂ e CH ₄ , principalmente).	Maximizar decomposição térmica de RSU em fases gasosas e condensadas.
Condições operacionais			
Ambiente de reação	Oxidante (quantidade de oxidante maior que a requerida pela combustão estequiométrica).	Redutor (quantidade de oxidante menor que a requerida pela combustão estequiométrica).	Ausente de qualquer oxidante.
Gás reagente	Ar.	Ar, oxigênio puro, ar enriquecido de oxigênio, vapor.	Nenhum.
Temperatura	Entre 850°C e 1200 °C	Entre 550-900 °C e 1000-1600 °C.	Entre 500 °C e 800 °C.
Pressão	Geralmente atmosférica	Geralmente atmosférica	Ligeira sobre pressão.
Produtos do Processo			
Gases produzidos	CO ₂ , H ₂ O	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄	CO, H ₂ , CH ₄ e outros hidrocarbonetos.
Poluentes	SO ₂ , NO _x , HCL, PCDD/F ⁵ , particulados.	H ₂ S, HCl, COS, NH ₃ , HCN, tar ⁶ , alkali ⁷ , particulado.	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, tar, particulado.
Cinzas	Cinzas do fundo podem ser tratadas para recuperação de metais ferrosos e não ferrosos e material inertes. Resíduos do controle de poluição do ar são tratados e destinados como resíduos industriais.	Relativa ao processo de combustão. Cinzas do fundo são comumente obtidas da escória de fundo que pode ser utilizada como insumo para construção de rodovias.	Normalmente com teor de carbono não desprezível. Tratado e destinado como resíduo industrial especial.
Limpeza dos gases	Tratados em uma unidade de controle de poluição para alcance dos padrões de emissão e então serem lançados.	É possível purificar o gás de síntese para alcance dos padrões de processos químicos de produção ou aqueles que envolvem dispositivos de alta eficiência de conversão energética.	É possível purificar o gás de síntese para alcance dos padrões de processos químicos de produção ou aqueles que envolvem dispositivos de alta eficiência de conversão energética.

⁵ Polychlorinated dibenzodioxins, ou genericamente furanos.

⁶ Alcatrão

⁷ Álcali. Qualquer hidróxido de metais alcalinos.

Além disso, segundo Wood *et al.*, (2013), os processos de conversão também podem ser divididos em categorias que dependem diretamente da concentração de oxigênio utilizada, onde o processo de incineração convencional ocorre em um ambiente com oxigênio em excesso, o processo de oxidação parcial presente na gaseificação em concentração ligeiramente abaixo do nível estequiométrico e a pirólise em ausência deste, como pode ser visto na .

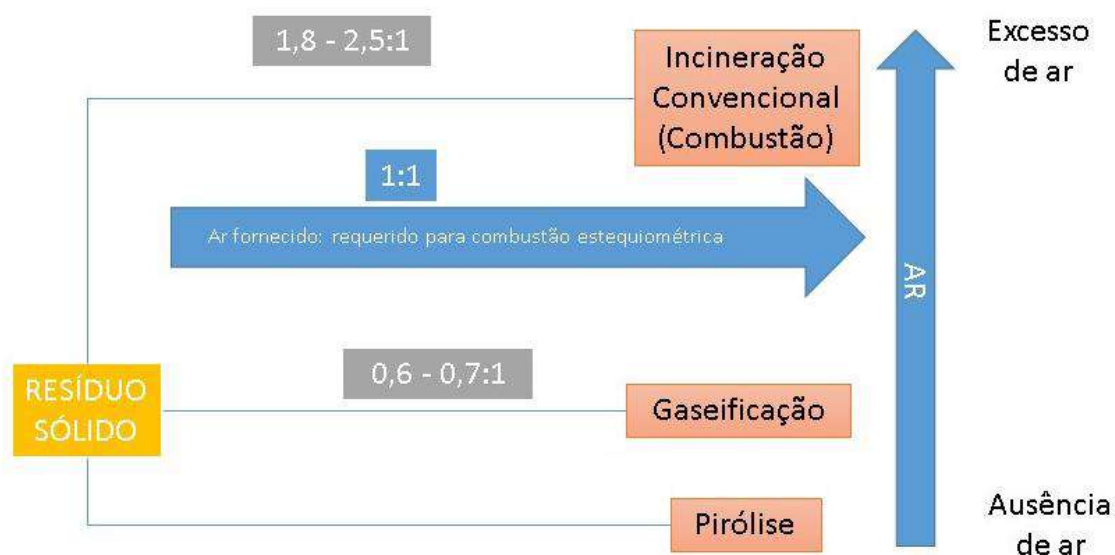


Figura 8: divisão do processo de conversão térmica de resíduos com base na concentração de oxigênio utilizada. Fonte, Stantec, 2011.

Em suma, o processo de tratamento térmico envolve a oxidação de materiais combustíveis existentes nos resíduos sólidos. Em termos gerais, segundo Stantec (2011) o processo de tratamento térmico para o aproveitamento energético de resíduos se divide em três etapas;

- **Secagem e desgaseificação**, onde o conteúdo volátil é liberado em temperaturas que variam entre 100 °C e 300 °C e o processo depende apenas do calor fornecido;
- **Pirólise e gaseificação**, onde a pirólise consiste na decomposição suplementar de substâncias orgânicas em ausência de oxigênio em temperaturas entre 250 °C e 700 °C para produção do gás de síntese (uma mistura contendo principalmente H₂ e CO), resíduos sólidos não voláteis e hidrocarbonetos condensados, e a gaseificação, que ocorre tipicamente em temperaturas entre 500 – 1000 °C e resulta na formação do gás de síntese. De forma geral, esta etapa se resume na conversão de matéria orgânica sólida à fase gasosa;

- **Oxidação**, onde o combustível gasoso criado na etapa anterior é oxidado, dependendo do método de tratamento térmico utilizado, em temperaturas que variam entre 800 e 1.450 ° C.

Considerando o potencial de produção de energia elétrica da tecnologia, um dos focos deste estudo, após as etapas de conversão termoquímica mencionadas, o produto combustível gerado poderá ainda ser acoplado a uma caldeira que alimentará um equipamento de ciclo de combustão externa ou após tratamento apropriado ser utilizado em um motor de combustão interna, ou utilizado em uma turbina a gás de ciclo combinado, que poderá ser comercializada produzindo então ganhos econômicos a partir da produção de eletricidade.

A eletricidade é facilmente transferida da planta de recuperação energética para a rede elétrica local, tornando-a disponível para todos os tipos de clientes, mesmo a uma distância através de conexões entre fronteiras. O potencial de venda desta eletricidade gerada possui um valor estimado de 16,5 bilhões de dólares/ano, assumindo o potencial de venda da eletricidade de 300 TWh/ano e um preço estável de 56 dólares/MWh (ISWA, 2015. apud. CNI, 2019).

No que se refere ao calor produzido, que também possui potencial de comercialização no mercado de energia, sua utilização tem ligação com suplemento que este fornece à produção de eletricidade, aumentando a eficiência geral da planta através do uso combinado, embora possa diminuir ligeiramente a produção desta. A venda de calor/resfriamento requer a existência de demanda local e o estabelecimento de uma rede de transmissão. O calor poderia ser fornecido a partir de plantas exclusivas de WtE ou de centrais combinadas de calor e eletricidade, e sua venda com geração combinada tem um valor de cerca de 9 bilhões de dólares/ano, assumindo um potencial de venda de calor de 400TWh/ano a um preço médio de 22,5 dólares/MWh (ISWA, 2015. Apud. CNI, 2019).

O presente estudo irá abordar as principais formas de geração de eletricidade através do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, considerando critérios relacionados à difusão e aplicabilidade, além da gama de estudos que permitam uma análise plausível da sua implantação ao nível deste estudo de caso, e são elas: a já citada incineração convencional, que consiste na queima da massa de resíduos sólidos em incinerador em tratamento prévio, gaseificação, que consiste na conversão da massa de resíduos em um gás combustível para posterior oxidação e aproveitamento energético em um ambiente em quantidade de oxigênio abaixo da necessária para que

ocorra combustão completa; e pirólise, onde o processo a produção do gás combustível ocorre na ausência deste.

Em cada uma destas opções de aproveitamento energético citadas, o design da planta e os dispositivos utilizados podem variar, assim como os sistemas de controle de poluição e tratamento de efluentes utilizados. Segundo EPE (2014), nestas opções é possível aplicar o conceito de cogeração, para o que é requerido identificar localizações adequadas para viabilizar o consumo térmico.

As próximas seções apresentam um aprofundamento no que diz respeito às particularidades que caracterizam as mais difundidas formas de obtenção de energia a partir de resíduos empregadas em UREs. Como o objetivo deste estudo é avaliar estas opções do ponto de vista da geração de energia elétrica e de potencial de mitigação de impactos ambientais adversos oriundos de práticas comuns de gestão de RSU, não serão apresentados em maior detalhe os aspectos tecnológicos e as técnicas empregadas para geração de produtos químicos, combustíveis líquidos, hidrogênio e produtos utilizados na indústria química, por exemplo.

2.2.1 Tecnologias de recuperação energética

2.2.1.1 *Incineração*

A incineração tem sido utilizada como um método para processar resíduos desde o início do século (Henriques, 2004). A incineração utiliza-se de processos que geram elevadas temperaturas quando da queima de RSU combustíveis em fornos na presença de oxigênio em excesso (Machado, 2015). As usinas de incineração do RSU podem utilizar o calor para produzir o vapor e, assim, abastecer um gerador de energia elétrica ou ser usado diretamente em processos industriais (ou para aquecimento) (EPE, 2014).

No passado, o principal objetivo da tecnologia de incineração resumia-se na redução da massa, do volume, e da periculosidade dos resíduos. Atualmente, além destes mesmos objetivos, e que podem resultar em redução superior a 90%, a tecnologia de Incineração se apropria do poder calorífico dos resíduos de natureza combustível, e propicia o aproveitamento da energia térmica decorrente do próprio processo de combustão. (Menezes, 2000, apud., Machado, 2015).

Os atuais incineradores distinguem-se das unidades antigas, principalmente pela forma como os resíduos são deslocados no interior do forno e pelos volumes de lixo que são eliminados (Henriques, 2004). Existem hoje diversas tecnologias para a incineração de

resíduos (Henriques, 2004), e são elas: combustão em estágio simples, ou *Mass Burning*, combustão em duplo estágio, ou modular, combustão em leito fluidizado e combustão em batelada.

A tecnologia *Mass Burning*, ou combustão em estágio único (algumas vezes tido como tecnologia acionada por grelha. Stantec, 2011), é a rota tecnológica mais difundida e empregada mundialmente para tratar os RSU e reaproveitar seu conteúdo energético (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012) e tem sido desenvolvida por mais de 100 anos para o aproveitamento energético a partir de resíduos sólidos urbanos (Stantec, 2011). Nela, é dispensado o tratamento prévio da massa de resíduos, sendo estes incinerados em sua forma bruta. Isto se dá principalmente devido ao fato da tecnologia ser normalmente aplicada em localidades onde o poder aquisitivo da população permite um maior consumo de alimentos pré-processados, o que proporciona um RSU com maior parcela de materiais que elevam o seu poder calorífico.

Os principais componentes de uma moderna usina convencional de incineração dos RSU são: poço de armazenamento do lixo, câmara de combustão, sistema de movimentação do lixo na câmara de combustão (grelha móvel, jateamento de ar comprimido, etc.), sistema de descarga das cinzas, sistema de geração de vapor, depurador de gases, filtros de sacos, ventilador e chaminé (EPE, 2014).

O sistema de movimentação opera através da ação de um sistema mecânico, onde o resíduo é inserido no incinerador pela parte inferior da câmara da combustão. Sujeitas ao fluxo ascendente de ar forçado, as partículas de menor dimensão entram em combustão no interior da câmara enquanto as de maior dimensão são depositadas no fundo do incinerador, onde também são queimadas.

Existem variantes acerca do sistema de movimentação do lixo no interior da câmara de combustão. O sistema de grelha pode ser do tipo inclinado e fixo, favorecendo a sucessiva exposição dos resíduos ao ambiente térmico, mediante o deslizamento gravitacional dos mesmos, desde o ponto de entrada na câmara de combustão, até o compartimento de recolhimento das cinzas (ash pit) (Machado, 2015). O sistema de grelha também pode ser do tipo móvel. Para estes sistemas, destacam-se os do tipo: *traveling gate*, onde os dispositivos mecânicos movem-se em único sentido; *reciprocating gate*, onde a movimentação dos dispositivos mecânicos ocorre em sentido contrário ao da massa de resíduos, promovendo maior grau de eficiência e de acumulação de cinzas (Machado, 2015); *conter direction over grate*, onde ocorre a movimentação alternada e em dois sentidos.

A figura e o fluxograma a seguir ilustram uma visão conceitual geral de uma usina de incineração convencional que utiliza a tecnologia *Mass Burning*.

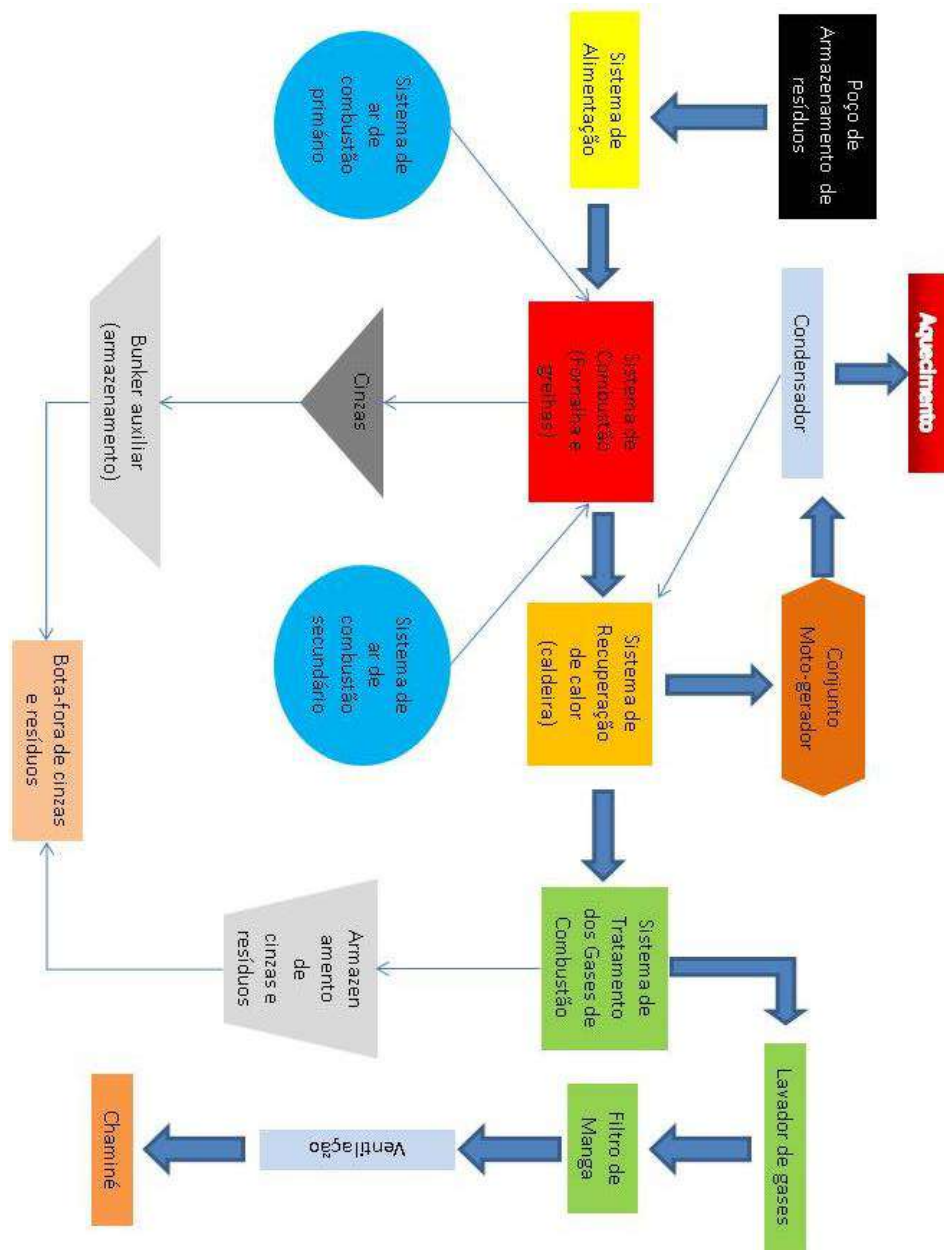


Figura 9: fluxograma esquemático do sistema de incineração convencional. Fonte: elaboração própria.

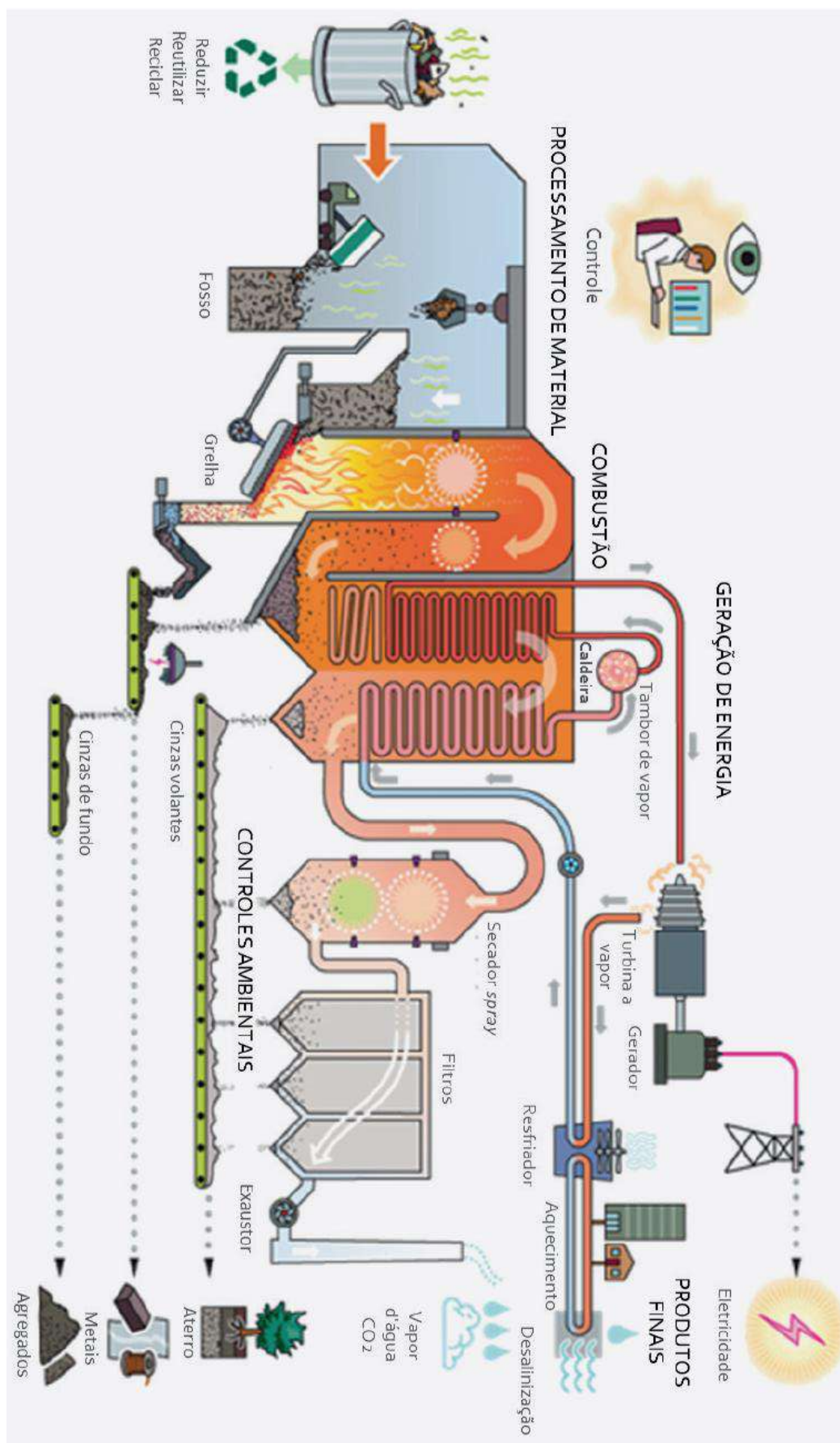


Figura 10: visão geral de uma usina de incineração convencional em estágio simples (CNI, 2019).

O processo de conversão termoquímica dos resíduos a partir da incineração ocorre sob diversos gradientes de temperatura. Num primeiro momento, o resíduo passa por um processo de perda de umidade, no compartimento de acesso ao incinerador. Ao ser lançado no compartimento, sob temperatura da ordem de 100°C, inicia-se o processo de perda de umidade por mecanismos de radiação ou convecção (Secagem e desgaseificação). Ainda antes de alcançar a câmara de combustão propriamente dita, sob baixa pressão atmosférica e temperatura da ordem de 250°C, inicia-se o processo de volatilização.

No processo de combustão de estágio simples (*Mass Burning*), o resíduo é incinerado em inicialmente condições sub-estequiométricas, onde oxigênio suficiente para combustão completa não está disponível (30% a 80% da requerida para combustão completa. Stantec, 2011) resultando na formação de gases de pirólise, que combinados então com excesso de ar, na razão entre ar e resíduo entre 1,5 e 2,0 e sob temperaturas que variam entre 600 °C e 1300 ° C (Machado, 2015), são queimados na porção superior da câmara de combustão, onde ocorre a oxidação completa (Stantec, 2011).

O processo de geração de eletricidade se dá através do direcionamento dos gases de fluxo que saem do incinerador para uma caldeira, onde o calor é transferido para o conjunto de tubos do superaquecedor, evaporador e economizador, respectivamente, onde o vapor superaquecido é transferido para uma turbina a vapor, onde a eletricidade é gerada (WSP, 2013). Ainda segundo o citado autor, o vapor também pode ser extraído da turbina em um estágio intermediário de baixa pressão, para otimização do processo, para suprimento de calor externo ou para suprimento industrial.

UREs que utilizam a tecnologia *Mass-Burning* podem alcançar uma eficiência de recuperação energética, assumindo que a energia do processo poderá ser convertida em eletricidade, que variam entre 14% e 27%, que pode ser aumentada caso ocorra recuperação de calor em conjunto com a eletricidade (60% ou mais. Stantec, 2011), ou com a utilização do Ciclo Combinado Otimizado. O processo de incineração convencional para produção de eletricidade podem gerar cerca de 450-700 kWh/t. de RSU (Oliveira *et al.*, 2018).

No Ciclo Combinado Otimizado, processo que utiliza os gases de exaustão de uma turbina a óleo ou a gás natural, esta última sendo mais comumente utilizada, para superaquecer o vapor de baixa temperatura oriundo da caldeira de incineração (EPE, 2008). A turbina a vapor abastecida de forma consorciada com o grupo-gerador permite ampliar a capacidade de geração de energia elétrica além da eficiência normalmente

esperada, podendo atingir até 900 kWh por tonelada de resíduo processado (EPE, 2014).

Ainda segundo o citado autor o gás natural utilizado ainda pode ser substituído pelo gás de lixo, drenado de um aterro ou biodigestor, fazendo assim com que toda energia gerada seja proveniente do lixo.

A eficiência da tecnologia se mostra reduzida em comparação com outras usinas térmicas devido às restrições de temperatura de queima, de modo a evitar a corrosão nos equipamentos. Com relação à escala, as unidades podem ser projetadas para alcançar a capacidade de processamento de 36.500 a 365.000 t/ano de resíduos, em múltiplos módulos, o que proporciona maior facilidade de manutenção.

No processo de incineração modular em duplo estágio, a massa bruta de RSU é introduzida na câmara primária e na qual ocorre, de forma efetiva, o processo de combustão (Machado, 2015). Na câmara secundária ocorre, de forma complementar, a queima da mistura entre partículas remanescentes do processo de combustão, dióxido de carbono, água e cinzas (Machado, 2015).

O primeiro estágio ocorre em temperatura que varia tipicamente entre 500 °C e 900° C (Brito, 2013), onde nela ocorre a volatilização de alguns compostos e a transformação dos resíduos não volatilizados em partículas de tamanho muito diminuto (Machado, 2015). Na câmara secundária, gradientes de temperatura que variam entre 750 °C e 1250 °C permitem a combustão completa das partículas remanescentes e gases gerados (Brito, 2013), em um ambiente rico em oxigênio.

Cabe destacar que em alguns casos incineradores de duplo estágio são consideradas como uma tecnologia componente da tecnologia da gaseificação, que será discutida com maior detalhe nas próximas seções.

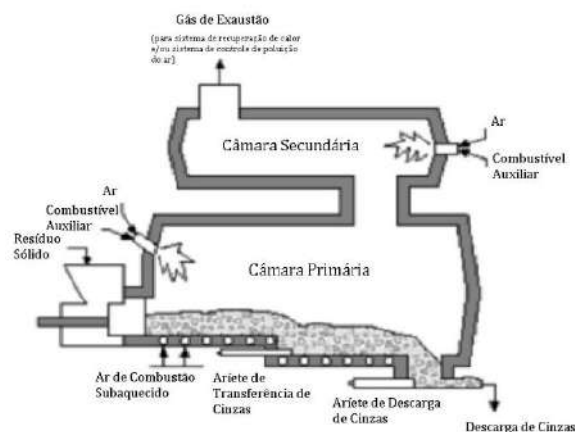


Figura 11: visão geral de um incinerador de duplo estágio. Fonte (adaptado. STANTEC, 2011).

O processo poderá necessitar ou não de fonte externa de combustível para manutenção da temperatura do processo. Neste caso, a combustão espontânea da massa de resíduos se dará em função do seu poder calorífico, que por sua vez é função da composição do resíduo a ser incinerado. Para os casos onde o poder calorífico se mostra insuficiente para que ocorra combustão espontânea, um suprimento externo de combustível, gás natural ou óleo diesel se faz necessário (GLP, Machado, 2015). Em geral, este auxílio faz-se necessário no momento da partida do incinerador (Henriques, 2004).

No processo de combustão em duas etapas ambas devem ocorrer em tempo suficiente para que o processo seja otimizado e atinja o máximo rendimento, minimizando a volatilização de metais pesados e emissão de substâncias nocivas. Para isto, o tempo de residência – tempo em que determinado material reside em um sistema – na câmara primária deve ser de 30 minutos (Machado, 2015) e na câmara secundária de 2 a 3 segundos (Brito, 2013). O longo tempo de residência também resulta numa cinza de melhor qualidade, isto é, com menor teor de carbono (Stantec, 2011).

No processo de combustão em leito fluidizado o a massa de resíduos é separada e a fração metálica é retirada com a finalidade de se obter um combustível sólido mais homogêneo. O combustível então é inserido na câmara de combustão, composta de um leito de material inerte (normalmente areia de sílica, calcário ou um tipo de material cerâmico. CNI, 2019) em uma grelha ou lâmina de distribuição. O material inerte é mantido em condição de fluido pelo ar que é injetado sobre ele e o material combustível é inserido dentro ou acima do leito através de dispositivos locados nas paredes da parede da câmara de combustão. A secagem e a combustão do combustível ocorrem no interior do leito, enquanto os gases combustíveis são retidos numa zona de combustão acima do leito (zona livre). O calor de combustão é recuperado através de dispositivos alocados no leito ou no ponto em que os gases de combustão saem da câmara (ou uma combinação dos dois). A geração de cinzas se dá em um volume maior se comparado ao processo de incineração convencional, e são removidas no fundo da câmara, de forma geral sendo gerenciadas similarmente às cinzas do processo de combustão convencional (Stantec, 2011).

Tanto no processo de incineração em duplo estágio, quanto no processo de leito fluidizado se faz necessário um processamento dos resíduos para obtenção de uma matéria prima homogênea, o que tornam ambos os processos mais complexos se comparados ao processo de incineração comum utilizado na tecnologia *Mass Burning*,

fazendo da última, por esta razão, a opção a ser mais considerada no processo de planejamento da implantação usinas de recuperação energética de resíduos sólidos.

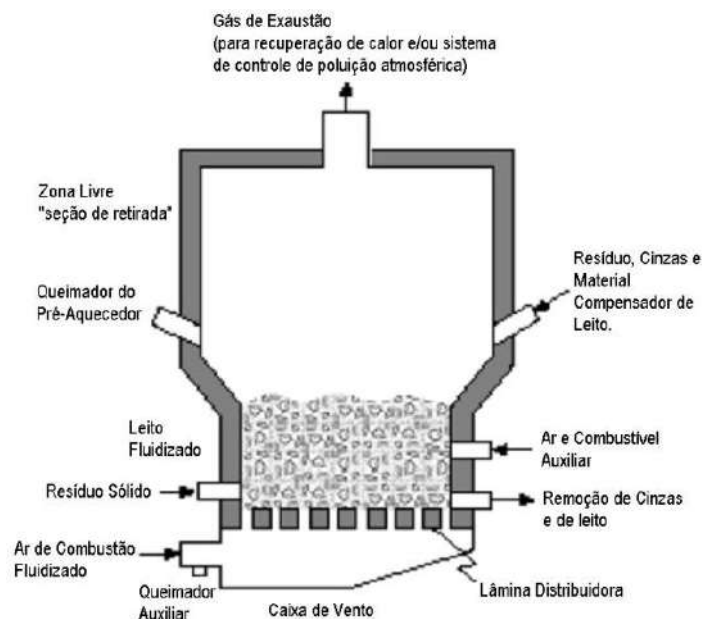


Figura 12: visão geral de um incinerador de leito fluidizado. Adaptado, STANTEC (2011).

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. A principal desvantagem para o tratamento de resíduos – conforme já mencionado – é a necessidade do processo de pré-tratamento dos materiais para atender aos requisitos bastante rigorosos de tamanho, poder calorífico, teor de cinzas, e assim por diante. Devido ao conteúdo heterogêneo dos RSU, pode ser difícil produzir um combustível que atenda aos requisitos mínimos em qualquer ponto. Assim, o leito fluidizado é amplamente aplicado à incineração de resíduos classificados como CDR (combustível derivado de resíduo) e lodos de esgoto (CNI, 2019).

O processo de combustão em batelada, como o próprio nome diz, não ocorre de maneira contínua. Neste processo, o incinerador é carregador para que posteriormente ocorra o processo de combustão e, durante o processo, nenhuma carga adicional de resíduos é adicionada ao dispositivo. Incineradores do tipo batelada tendem a tratar frações menores de resíduos se comparados a processos convencionais (normalmente dimensionados para tratar 50 a 3000 kg de resíduos por batelada) e normalmente são utilizados em áreas remotas (Stantec, 2011).

Neste tipo de incinerador, o resíduo é inserido na câmara primária por um operador e o calor inicial necessário requerido para ignição é fornecido por um queimador que é desligado uma vez que a combustão se torna autossustentável (Stantec, 2011).

O sistema opera de forma similar ao processo de combustão em duplo estágio, com duas câmaras de combustão onde, na primeira, os gases de combustão são criados a partir da injeção de ar fluxo ascendente (através de buracos) e então movidos para a câmara secundária onde o processo de combustão suplementar ocorre com ar adicional. Estes incineradores normalmente não utilizam recuperação de calor ou sistema de controle de poluição do ar, no entanto, se operados de maneira apropriada são capazes de operar dentro dos padrões de emissão (Stantec, 2011).

2.2.1.2 Gaseificação

Gaseificação, ou combustão indireta, consiste na conversão do resíduo sólido em combustível por meio de reações parciais de oxidação onde oxigênio é adicionado na razão sub-esquiométrica em relação aos materiais sólidos (Reed, 1991, apud., Lombardi, 2011, tradução) onde reações parciais de oxidação da matéria orgânica ocorrem, liberando energia térmica e aquecendo o sistema (Lombardi, 2011). A tecnologia tem sido usada por mais de um século, mas apenas recentemente tem utilizado o RSU como matéria prima (Stantec, 2011).

A produção de eletricidade através do processo de gasificação tem como produto base para sua geração o gás de síntese, assim como no processo de pirólise. Este gás é composto por uma mistura H_2 e CO e pequenas quantidades de CH_4 , N_2 , H_2O (Stantec, 2011). Este gás contém grandes quantidades de produtos oxidados de forma incompleta contendo um determinado calor específico, podendo ser utilizados em equipamentos de processos distintos, em diferentes ocasiões e locais (Arena, 2012), externa ou internamente à unidade, em um segundo estágio de combustão para gerar calor ou eletricidade (Stantec, 2011). Para produção de eletricidade, o sistema de conversão energética de resíduos pode ser acoplado a uma turbina a vapor, turbinas a gás ou a motores de combustão interna. A depender do equipamento utilizado, o gás gerado deverá passar por uma etapa preliminar de purificação, antes de sofrer oxidação, de forma a tender os requisitos específicos de utilização destes equipamentos.

Os diferentes tipos de processos de gaseificação de resíduos são geralmente classificados de acordo com o meio oxidante: o processo pode ser realizado pela oxidação parcial com ar, ar enriquecido de oxigênio ou oxigênio puro; por oxidação a vapor; por gaseificação por plasma. A oxidação parcial com ar produz um gás diluído por nitrogênio atmosférico (em torno de 60%) que possui poder calorífico variando entre 4 a 7 MJ/m³. Já a oxidação parcial com ar enriquecido de oxigênio, tem como objetivo a

obtenção de um gás de alto poder calorífico por meio da redução do teor de nitrogênio no ar, o que permite a realização de processo auto térmico (sem necessidade de suprimento fonte de combustível externa), sem grande consumo de oxigênio. A oxidação parcial com oxigênio puro produz um gás de síntese livre de nitrogênio atmosférico e com poder calorífico variando entre 10 e 15 MJ/m³. A gaseificação a vapor produz um gás de síntese de médio poder calorífico (15 – 20 MJ/m³), elevada concentração de hidrogênio e livre de nitrogênio. Esta configuração não inclui reações exotérmicas, sendo então necessária uma fonte externa de energia para as reações de gaseificação endotérmicas (*allo-thermal process*⁸). A gaseificação por plasma utiliza como fonte de calor tochas de arco de plasma que criam um arco elétrico e produzem temperaturas na ordem de 15.000 °C, que por sua vez permitem um controle de temperatura independentemente de flutuações na qualidade do material e no fornecimento do agente oxidante (Arena, 2012. Tradução).

O processo de gaseificação, segundo Arena (2012) e Stantec (2011), ocorre em três etapas distintas, a saber:

1. Secagem e aquecimento, que ocorre em temperaturas na ordem de 160 °C, combinando fases líquidas, porosas e de vapor sob a qual vapor e líquidos migram. Nesta etapa, o resíduo passa por um duto de desgaseificação onde é aquecido para redução do seu teor de umidade;
2. Remoção de material volátil, ou devolatilização, que ocorre em temperaturas na ordem de 700 °C, onde ocorrem reações de quebra, transferências de calor e massa, liberação de H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O, NH₃, vapores de hidrocarbonetos condensados (*tar*) e resíduos sólidos devolatilizados (*char*, i.e, resíduo sólido remanescente). Uma vez que a liberação destes componentes demanda hidrogênio para ligação molecular, pode-se afirmar que nesta fase ocorre depleção de hidrogênio da matriz carbonácea original do resíduo.
3. Reações químicas, que ocorrem em concentrações de oxigênio no ar em razão subestequiométrica (entre 25 e 50%). No processo “auto-térmico” (*allo thermal process*. Arena, 2012), a combustão parcial dos gases, vapores e material residual fornecem o calor necessário para quebra dos hidrocarbonetos condensados e gaseificação da material residual, e manter fixa a temperatura do

⁸ Também chamada da gaseificação indireta uma vez que o calor é fornecido indiretamente pelo transporte de calor para o reator e não produzido no gaseificador.

<http://www.sciencedirect.com/topics/engineering/allothermal-gasification>. Acesso em: 19/03/2020, 11:16 am.

gaseificador. No processo que necessita de uma fonte externa de energia para que ele ocorra, o calor necessário pelo processo endotérmico é fornecido pela queima de material residual ou gases separadamente, ou pela utilização de tochas de plasma ou material de leito fluidizado.

As tecnologias WtE baseadas no processo de gaseificação podem operar de forma isolada ou como parte de um sistema integrado ou modular combinando processo de pirólise, gaseificação e/ou combustão (Arena, 2012). Ainda segundo o citado autor, estas configurações podem ser delineadas como uma combinação de três seções: produção do gás de síntese, que define sua quantidade e qualidade; utilização do gás de síntese, indicando que este pode ser inserido em um dispositivo de conversão energética e então, para uma dada turbina a vapor, motor a gás ou turbina a gás (levando em conta sua temperatura, calor específico e grau de pureza); e limpeza do gás de síntese/combustão.

Com relação ao layout das usinas que utilizam o processo de gaseificação para produção de energia, segundo Arena (2012), ainda existem duas configurações usualmente utilizadas em plantas WtE que utilizam o processo de gaseificação, que dependem da sucessão com a qual as seções de utilização e limpeza do gás são utilizadas, e são elas: gaseificadores de energia (*power gasifiers*), onde o gás é limpo e então queimado, e os gaseificadores de calor (*heat gasifiers*), onde o gás produzido é queimado, para então o gás de fluxo remanescente ser purificado. Nos gaseificadores de calor o gás produzido no reator é queimado em uma câmara de combustão, produzindo um gás de fluxo, que é direcionado a uma caldeira a vapor para produção de energia térmica onde, após isto, ocorre o processo de limpeza dos gases de combustão (). Nestes gaseificadores, a seção de limpeza consiste no possível pré-tratamento do gás para remoção de contaminantes, antes de ser direcionado para o combustor, para depois ir para um sistema de controle de poluição do ar (*Air-Pollution Control – APC*) para limpeza dos gases de combustão. Atualmente, é o tipo de configuração mais utilizada em plantas de recuperação energética a base de gaseificação em operação (Arena, 2012).

Nos gaseificadores de energia, o gás produzido passa por um processo de limpeza antes de ser direcionado a um dispositivo de conversão energética, para atender as características requeridas pelo dispositivo de uso final. A seção de limpeza é uma interface entre as características do gás produzido e aquelas requeridas pelo dispositivo de uso final (Arena, 2012). Neste processo o resíduo poderá passar por um pré-tratamento para separação da fração orgânica da massa de resíduos e recuperação da

fração reaproveitável, para então ser inserido em um gaseificador para obtenção do gás de síntese. Em contrapartida, depois de resfriado e limpo este gás produz energia quando alimenta uma máquina de combustão interna conectada a um gerador elétrico (Henriques, 2004). O efluente gerado no processo de limpeza dos gases passa por um sistema de controle de poluição do ar para então ser lançado na atmosfera. As cinzas geradas no processo de produção do gás são coletadas no reator e poderão ser destinadas a um aterro sanitário ou reaproveitadas na construção civil, para produção de telhas e blocos de concreto ou agricultura, por exemplo.

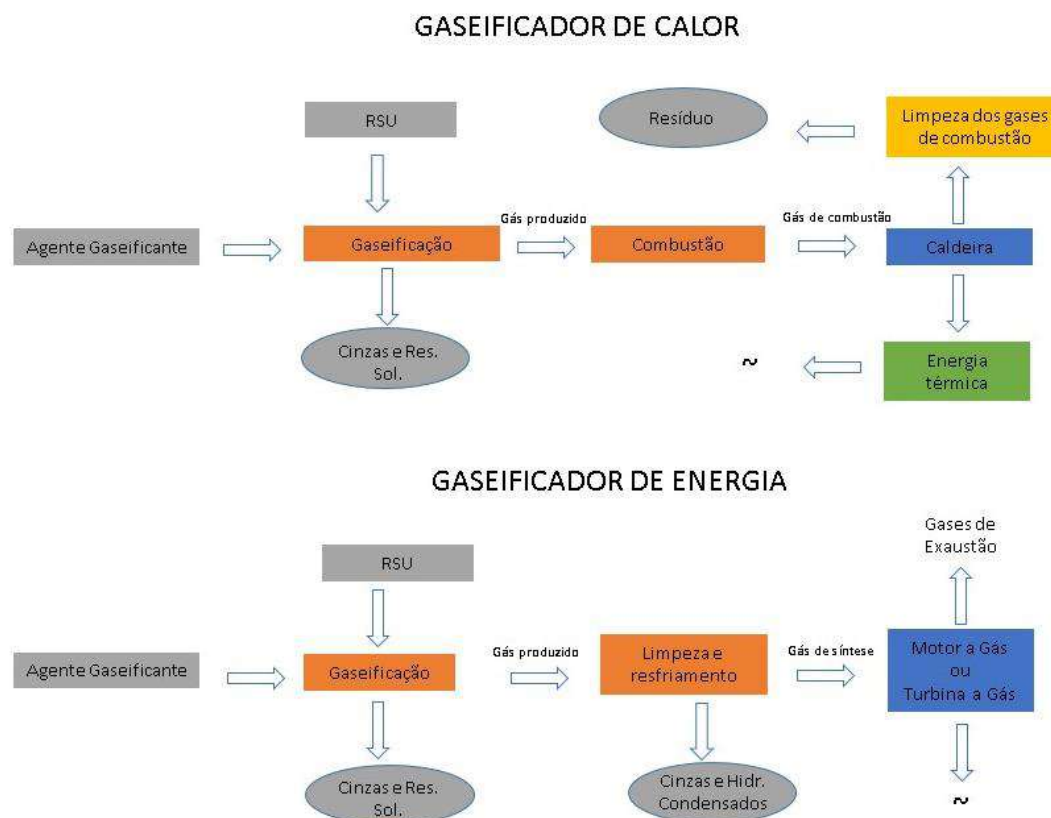


Figura 13: representação esquemática de configurações das plantas de recuperação energética com base em gaseificação. Adaptado de Arena (2012).

Em comparação com o processo de incineração, a gaseificação poderá alcançar níveis maiores de eficiência elétrica (27,8% contra 22,5% do processo de incineração) devido à combustão homogênea na fase gasosa ser mais eficaz e controlável. Se o gás produzido for queimado em uma turbina a gás de ciclo combinado ou em um motor de combustão interna, o processo retorna uma eficiência ainda maior (35,5% e 25%, respectivamente), sendo necessário, no entanto, um processo de purificação e resfriamento do gás para atender aos requisitos de qualidade do gás de entrada (Dung. *et al.*, 2018).

Neste ciclo de conversão energética, o sistema conectado a uma turbina a vapor se mostra como a opção mais simples uma vez que o gás de síntese pode passar pelo processo de combustão sem a necessidade de purificação. Além desta configuração, o gás produzido no reator poderá ainda ser utilizado como combustível em um incinerador convencional, conectado a uma caldeira, assim como a um motor de combustão interna ou a uma turbina a gás.

A tabela a seguir sintetiza as principais vantagens e desvantagens das configurações disponíveis ao processo de conversão energética de RSU disponíveis baseados em gaseificação.

Tabela 4: Comparação entre vantagens e desvantagens dos principais dispositivos de geração usados em plantas de recuperação energética com base em gaseificação. Adaptado de Arena (2012).

Dispositivo de conversão energética	Eficiência da planta	Vantagens	Desvantagens
Turbina a vapor	15-24%	Elevada eficiência. Componentes da turbina isolados dos produtos de combustão. Longos intervalos de manutenção, alta disponibilidade e trabalho específico (kJ/kg produzido)	Caro. Cargas parciais reduzem eficiência. Plantas exigem grandes espaços.
Turbina a gás	20-30%	Alta eficiência elétrica. Conjunto compacto. Longa manutenção e alta disponibilidade.	Componentes da turbina são expostos aos produtos da combustão. Cargas parciais reduzem eficiência. Moderadamente caro
Motor a gás	14-26%	Alta eficiência elétrica, relativamente de baixo custo, durável e confiável. Cargas parciais afetam eficiência de forma marginal.	Componentes do motor são expostos aos produtos de combustão. Manutenção curta e alto custo e baixa disponibilidade.

Segundo Henriques (2004), a eficiência das plantas de incineração é limitada por restrições técnicas, como a temperatura do vapor, no sentido de prevenir a corrosão causada pelos traços de HCl em temperaturas muito elevadas. Consequentemente, ocorre uma limitação da temperatura do vapor direcionado a turbina, o que compromete a eficiência geral da planta. Ainda segundo o referido autor, como o gás proveniente do processo de gaseificação, em alguns casos, passa por um processo de limpeza e resfriamento, ele pode atingir temperaturas mais elevadas sem comprometer a

integridade dos dispositivos envolvidos, podendo aumentar a eficiência da planta em 30% em relação à incineração.

Atualmente existem diversas tecnologias disponíveis no que diz respeito à conversão termoquímica de resíduos sólidos por meio do processo de gaseificação. Estes processos diferenciam-se basicamente nos parâmetros: forma de aquecimento do gaseificador (direta ou indiretamente aquecido); pressão no interior de reator (acima ou não da atmosférica); faixa de temperatura de operação; forma com a qual a massa de resíduos é inserida no gaseificador e sua movimentação em seu interior; agente oxidante utilizado, conforme já citado (ar, oxigênio puro ou ar enriquecido de oxigênio).

Segundo Arena (2012), essas tecnologias para reatores em sua maioria estão aplicadas em processos de cogeração a partir do gás de síntese com base em gaseificadores de calor (*heat gasifiers*).

No processo de gaseificação, as tecnologias disponíveis para os reatores responsáveis pelo processo de conversão termoquímica dos resíduos sólidos dividem-se atualmente em gaseificadores de leito fixo, leito fluidizado, fluxo arrastado, de forno rotativo (*Rotary kiln*), de grelha móvel e de plasma.

Nos reatores de leito fixo um leito profundo de resíduos está presente em quase todo o volume do reator e diferentes zonas podem ser distinguidas em uma ordem que depende da direção fluxo dos resíduos e do meio gaseificante. Essas zonas não são fisicamente fixas e movem-se para de forma ascendente e descendente, a depender das condições de operação (Arena, 2012). Os reatores de leito fixo dividem-se em dois tipos, ambas com a alimentação do resíduo pelo seu topo e diferenciando-se pela forma com a qual é dada a injeção do oxidante em seu interior, sendo estes: com a tomada do agente oxidante no fundo, promovendo um movimento de contra fluxo dos resíduos com relação aos gases (*updraft reactors*, i.e, fluxo ascendente), passando por fases distintas (secagem, pirólise, redução e oxidação) sucessivamente; ou com a injeção do oxidante pelos lados ou pelo topo do reator (*downdraft reactors*, i.e, fluxo descendente), promovendo, assim, a passagem dos resíduos pelas fases distintas em ordem diferente daquela onde ocorre o contra fluxo com relação à injeção do oxidante. Nos reatores de fluxo ascendente o resíduo é seco no topo e partes dos resíduos devolatilizados precipitam e queimam produzindo calor. O metano e os gases ricos em hidrocarbonetos condensados deixam o reator pelo topo e as cinzas caem da grelha para coleta no fundo (Arena, 2012). Nos reatores de fluxo descendente parte dos resíduos é queimada, produzindo um leito de resíduos devolatilizados no fundo por onde os gases passam,

produzindo um gás de síntese de melhor qualidade, que deixa o reator pela base, com as cinzas coletadas abaixo da grade (Arena, 2012).

Os reatores de leito fluidizado (*fluidized bed reactors*) são também divididos em dois tipos: gaseificadores de leito fluidizado borbulhante (*bubbling fluidized bed reactors* - LFB) e os reatores de leito fluidizado circulante (LFC). Nesta categoria de reator, a velocidade de circulação do gás oxidante produz uma força de arraste tal que as partículas tenham um comportamento fluidizado, daí o termo empregado para sua denominação. Em reatores de leito fluidizado, material sólido granulado e inerte, tal como areia, calcário ou alumina, é mantido em suspensão no ambiente de combustão, sob condições turbulentas, por meio da injeção de jato de ar ascendente. A eficiente transferência de calor para a massa de resíduos em combustão é garantida pelo calor emitido a partir do próprio leito aquecido de material sólido granulado (Machado, 2015).

Nos reatores LFB o oxidante é injetado em fluxo ascendente mediante velocidade de “fluidização” compreendida entre 0,5 a 3,0 m/s (Machado, 2015), sobre uma espécie de arco distribuidor que transpassa um leito composto de material inerte situado no fundo do reator (normalmente sílica ou olivina⁹). Os resíduos são injetados sob o leito a partir de um ou mais pontos nas laterais do reator e o comportamento fluidizado das partículas promove uma intensa mistura e contato entre gases e sólidos, permitindo que sejam possíveis altas transferências de massa e calor no interior do sistema.

Este tipo de reator não possui partes móveis, o que torna sua manutenção mais simples e barata (Arena, 2012). Para evitar uma espécie de derretimento das cinzas, o que comprometeria o comportamento fluidizado das partículas, estes reatores operam em temperaturas inferiores a 900 °C.

Nos reatores LFC, o termo circulante se dá pelo fato de ocorrer nestes a recirculação de sólidos no sistema, para manutenção do seu estado de equilíbrio. Esta manutenção se faz necessária uma vez que a velocidade superficial do gás é superior à velocidade terminal dos sólidos (da ordem de 3,0 a 9,0 m/s. Machado, 2015), provocando um arraste de partículas do leito, alterando este estado de equilíbrio. Por esta razão, nestes reatores uma espécie de ciclone é utilizado com a função de captar estas partículas arrastadas para estas sejam retornadas ao leito por meio de um precipitador. A figura abaixo ilustra o funcionamento de um reator de leito fluidizado do tipo circulante.

⁹ A olivina é um nesossilicato muito comum em rochas ígneas básicas, sendo também um importante mineral industrial, usado como abrasivo, por exemplo. <https://www.ufrgs.br/minmicro/Olivina.pdf>. Acesso em: 30/04/2020, às 11:24.

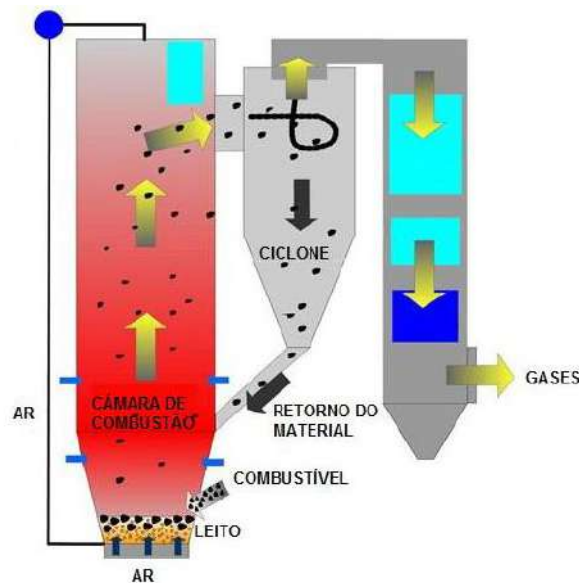


Figura 14: reator de leito fluidizado circulante. Fonte: Machado, 2015.

Os reatores de leito fluidizado destacam-se pela sua adaptabilidade a variação na composição da massa de resíduos, apresentar elevadas taxas de combustão devido a ação erosiva do material do leito e consequente exposição de partículas menores ao ambiente, além da tecnologia assegurar a mínima geração de resíduos sólidos remanescentes, cinzas e garantir a completa combustão dos resíduos, devido ao comportamento turbulento do leito fluidizado.

Os reatores de fluxo arrastado (*entrained flow gasifiers*) tem por característica sua alta pressão de operação, em torno de 25 bar. Nestes, partículas combustíveis são adicionadas a água para produzir um lodo, com concentração de sólidos acima de 60 %. Aqui a água serve como um meio transportador, moderador de temperaturas e também como reagente. O lodo é inserido no gaseificador com oxigênio pressurizado ou ar. Parte do combustível é queimada no topo do reator, promovendo a formação de calor em altas temperaturas (1200 – 1500 °C) para rápida conversão dos resíduos em um gás de síntese de alta qualidade. As cinzas derretem nas paredes do reator e são descarregadas numa câmara de resfriamento onde os metais são encapsulados no material resfriado (Arena, 2012).

Os reatores de forno rotativo (*Rotary kiln gasifiers*) são amplamente utilizados em aplicações variadas, desde a incineração industrial de resíduos até a produção de cimento e têm como objetivos promover a movimentação e mistura de sólidos dentro e fora de uma zona de alta temperatura durante a reação (Arena, 2012). O forno é levemente inclinado na direção de descarga e a movimentação dos sólidos processados se dá através do controle de sua velocidade de rotação. Segundo Arena (2012), estes

reatores podem ser utilizados como parte de um processo de conversão termoquímica em duas etapas, onde, numa primeira etapa os resíduos são gaseificados a temperaturas na faixa de 450 °C e, após separação da fração recuperável de resíduos (ferro, alumínio e outros resíduos), o gás produzido e o material sólido remanescente são inseridos em uma câmara de combustão e são incinerados a 1300 °C, onde as cinzas são derretidas vitrificadas. A possibilidade de recuperação da fração metálica reutilizável do material processado possibilita uma considerável redução do volume de resíduos, em até 200 vezes o seu volume original (Arena, 2012).

Os gaseificadores de Grelha Móvel (*moving grate gasifiers*) são o tipo de reator mais utilizado em UREs à base de combustão. Essa movimentação constante da grelha permite alimentação contínua do forno incinerador, permite o movimento do leito e das cinzas na direção da extremidade de descarga da grade e estimula a mistura do material processado (Arena, 2012).

A gaseificação de arco de plasma utiliza uma corrente elétrica que passa por um gás (ar) para criar plasma que gaseifica o resíduo em moléculas simples (Stantec, 2011). O plasma térmico é uma mistura de íons, elétrons e partículas neutras, e é capaz de destruir qualquer ligação química (CNI, 2019). Nestes gaseificadores de plasma (*plasma gasifiers*) o resíduo não tratado é inserido – em sua maioria, em um gaseificador de leito móvel – entrando em contato com tochas de plasma geradas eletricamente, geralmente a pressão atmosférica e a temperaturas na ordem de 1500 °C a 5000 °C, onde a matéria orgânica é convertida em um gás de síntese de alta qualidade e a fração inorgânica é vitrificada em escória inerte (Arena, 2012). A alta temperatura e a baixa pressão do gás, promove o movimento dos elétrons da molécula do gás na direção do lado positivo da voltagem aplicada, tornando-o positivamente carregado, transportando uma corrente elétrica e gerando calor (Stantec, 2011). Ainda o segundo Arena (2012) o citado autor, mesmo sendo normalmente utilizado em um processo de estágio único para conversão termoquímica de resíduos, ainda existe a possibilidade de utilização destes num processo em duplo estágio, onde se utiliza um gaseificador convencional num primeiro estágio enquanto o segundo utiliza o gaseificador de plasma para redução do teor de hidrocarbonetos condensados (tar) no gás de síntese e aumento da eficiência de conversão.

A gaseificação por plasma, segundo CNI (2019), tem como pontos positivos as altas temperaturas permitidas, altas taxas de transferência de calor, menor dimensão das instalações e maior potencial de controle do processo devido ao uso da eletricidade como entrada, dissociando a geração de calor do potencial de oxigênio.

Ainda segundo o citado autor, a utilização da eletricidade também se apresenta como um inconveniente, pois aumenta consideravelmente o custo do processo. Somado a isto, está à falta de dados sobre sua confiabilidade, impedindo a utilização em grandes escalas.

Unidades que utilizam a tecnologia de gaseificação necessitam de sistemas APC para redução de emissões indesejáveis no ar, embora o tipo de sistema utilizado varie de acordo com a forma com a qual o gás de síntese é processado (Stantec, 2011), o que não será discutido em detalhe neste estudo. Embora sistemas de gaseificação geralmente aparentem apresentar emissões acumuladas ligeiramente menores se comparados a UREs de incineração convencional, os resultados tem como base testes em escala piloto, não em operações em escala comercial (Stantec, 2011).

Existem duas diferenças entre os sistemas de controle de poluição do ar para o sistema de gaseificação e incineração convencional (Stantec, 2011). Primeiro, alguns sistemas de gaseificação, como discutido anteriormente, apresentam um sistema de purificação do gás produzido anterior ao processo de combustão (gaseificadores de energia), logo o controle das emissões é baseado no controle de qualidade do gás de síntese. Segundo, dependendo da composição do gás de síntese, ele pode ser encaminhado de forma direta ao combustor, o que permite a utilização de um sistema APC mais próximo ao convencional, embora estes sejam menores e não necessitem de certos componentes que normalmente seriam necessários em um sistema APC convencional (Stantec, 2011).

Com relação ao resíduo gerado, este compõe apenas 1% do volume original caso as cinzas de fundo sejam comercializadas para outras aplicações. Caso não ocorra este reaproveitamento, então o material residual irá compor de 10% a 20% do volume original. A capacidade de produção de eletricidade varia entre 0.4 a 0.8 MWh/t. anual de RSU. Com relação a sua escala, as usinas de gaseificação de RSU normalmente são construídas com capacidade fixa, em módulos, que podem alcançar uma capacidade de processamento que varia entre 40.000 a 100.000 toneladas por ano (Stantec, 2011)

2.2.1.3 Pirólise

Apesar de se apresentar como uma tecnologia ainda pouco difundida se comparada à incineração propriamente dita e apresentar algumas dificuldades já citadas nas seções anteriores, o processo de conversão térmica de RSU através do processo de pirólise se

apresenta como uma opção que vêm ganhando força no contexto de usinas de recuperação energética ao redor do mundo.

A pirólise é um estágio da gaseificação, mas pode ser aplicada por si só como uma forma de tratamento de resíduos (CNI, 2019). O processo consiste decomposição térmica da matéria-prima em faixas de temperaturas que variam entre 400 °C e 900 °C, sob a ausência de oxigênio. Esta é uma tecnologia que consiste na geração de energia a partir do gás de síntese (*syngas*), um dos produtos finais do processo, além do material sólido residual (*char*) e líquido (óleos oxigenados).

O gás de síntese e estes óleos podem ser utilizados diretamente como combustível de uma caldeira ou refinado para usos de maior qualidade como combustível para motores, produtos químicos e outros usos (Stantec, 2011). O gás também pode ser usado em motores de combustão para operar o gerador; se o *syngas* for purificado, ele pode ser usado em um turbina de gás de ciclo combinado para maior eficiência (BELGIORNO, 2033. apud. CNI, 2019).

Segundo Dung et. al (2018), este se apresenta como um processo mais eficiente se comparado à tecnologia de incineração, pois possui dispositivos de conversão energética mais eficientes, como uma turbina a gás de ciclo combinado ou um motor de combustão interna. Entretanto, em sua forma bruta, o gás de síntese carrega consigo uma gama de contaminantes como o ácido sulfídrico, carvão, amônia e material particulado, trazendo a necessidade de um sistema de tratamento do gás gerado para se torne aplicável a um motor (Dung, et. al. 2018).

O processo de pirólise exige um pré-tratamento e homogeneização da massa de resíduos, o que reduzir a eficiência do processo. Segundo Dung et. al (2018), os produtos gerados a partir do processo de pirólise, gás de síntese (*syngas*), alcatrão (*tar*) e carvão (*char*) possibilitam a recuperação de energia, podendo ser utilizados em processos de combustão em caldeiras conectadas a uma turbina a vapor; ou após um processo de purificação, serem utilizadas em uma turbina a gás de ciclo combinado e num motor de combustão interna. O gás produzido no processo irá conter frações de metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e outros hidrocarbonetos (Maria, 2004).

A pirólise requer energia térmica que geralmente é aplicada indiretamente por condução térmica através das paredes de um reator de contenção, uma vez que o ar ou o oxigênio não é intencionalmente introduzido ou usado na reação. A transferência de calor das paredes do reator ocorre enchendo o reator com gás inerte, que também fornece um meio de transporte para a remoção de produtos gasosos (Stantec, 2011).

O processamento de resíduos neste tipo de tecnologia ocorre em temperaturas na faixa de 500-550 °C e são amplamente utilizadas em plantas industriais (Chen *et al.*, 2015, apud. Dung *et al.*, 2018). Em temperaturas menores se comparadas ao processo de gaseificação e incineração convencional, ocorre uma menor volatilização de carbono e outros poluentes, como metais pesados e precursores de dioxinas. As temperaturas relativamente baixas permitem uma melhor recuperação do metal antes que os produtos residuais de pirólise entrem na câmara de alta temperatura onde são vitrificados (Stantec, 2011).

Atualmente, uma variada gama de opções de produção de energia a partir de resíduos através do processo de pirólise estão disponíveis no mercado. A proporção de cada produto do processo será fortemente dependente da temperatura de reação, tempo de residência e taxa de calor (*heating rate*) (Dung *et al.*, 2018, Tradução). O gás produzido pode ser queimado em uma câmara de reação separada para produzir energia térmica que pode então ser utilizada para produzir vapor para produção de eletricidade (Stantec, 2011).

Segundo Dung *et al.*, (2018), em comparação com a tecnologia de incineração, o processo de conversão por pirólise possui maior eficiência de geração de energia elétrica (27,8% contra 22,5% na incineração), podendo atingir valores ainda maiores se combinados a turbinas de ciclo combinado ou motores de combustão interna. No entanto, segundo estudo conduzido por Baggio *et al.* (2008), o processo requer uma fonte de energia adicional, na ordem de 9% do conteúdo energético da massa de resíduos para manutenção da reação. Segundo Dung *et al.* (2018), presume-se que o calor seja sustentado pelo gases de combustão quente, sendo comumente utilizados nas plantas comerciais. Vale destacar que as cinzas geradas no processos podem ser utilizadas na própria usina em um processo de combustão para produção energia adicional, ou ser utilizada como uma espécie de insumo para atividades externas à usina (agricultura, construção civil, entre outras).

A figura abaixo descreve de forma resumida como se dá o processo de geração de energia pelo processo de pirólise. O modelo de planta de geração considerado neste estudo é o “*micro-rotary kiln pyrolysis reactor*” (reator de pirólise para forno micro rotativo) descrito por Maria (2004), devido a sua maior difusão, ser o modelo mais utilizado atualmente no mercado europeu segundo consulta a bibliografia e maior disponibilidade de informações.

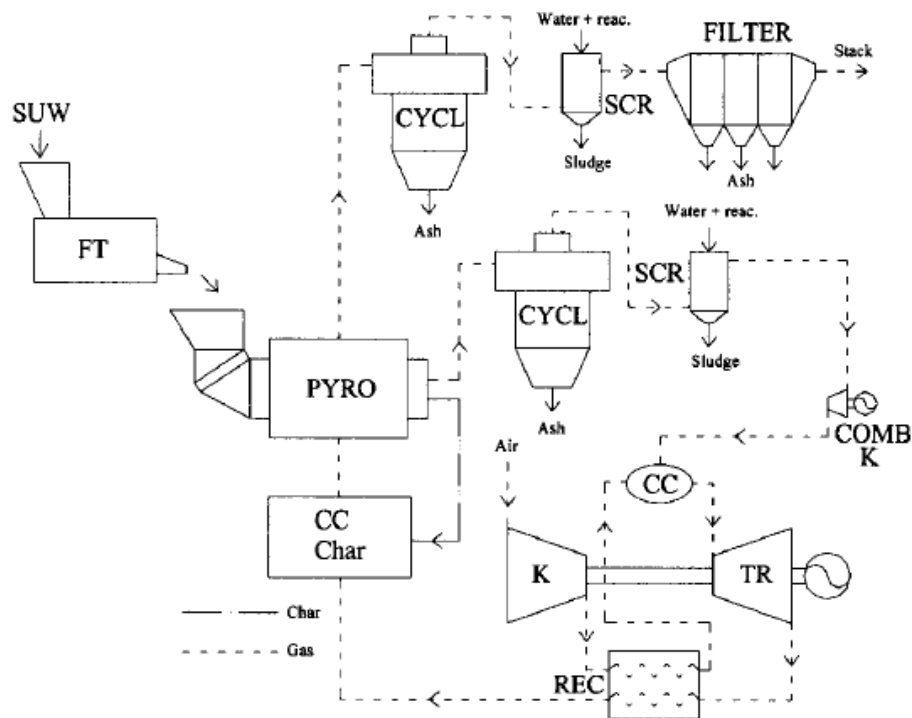


Figura 15: esquema de uma planta de conversão de energia de micro pirólise. Extraído de Maria (2004).

A massa de resíduos (SUW) sofre um breve pré-tratamento para redução de seu volume é inserida no reator (PYRO). A fração sólida do processo é então utilizada numa câmara de combustão de pirólise (CC char) de forma a fornecer o calor necessário requerido para degradação termal. Os gases e os hidrocarbonetos condensados (*tar*) são lavadas de partículas sólidas em um ciclone (CYCL) e então resfriadas, com uma limpeza adicional em uma espécie de esfregão seletivo (SCR). Nesse dispositivo o resíduo é condensado e separado, enquanto que a temperatura do gás é reduzida à faixa de 320-330 K. Após o tratamento o combustível é direcionado a um compressor (COMB K) antes de ser injetado na câmara de combustão da turbina a gás (CC). A turbina a gás é composta por um compressor (K), expansor (TR) e um recuperador (REC). Os gases de exaustão da saída do recuperador (REC) são utilizados como oxidantes para combustão de carvão na câmara de pirólise. Os gases da resultantes da combustão do carvão são purificados em um ciclone, numa espécie de esfregão e em filtros antes de serem lançados na atmosfera.

Este sistema se apresenta como uma solução interessante para produção interna de energia a partir de resíduos e biomassa (Maria, 2004). Seus resíduos se tratados podem ser reduzidos de 0.1 a 0.3 toneladas por tonelada de resíduo a ser processado, caso não ocorra o tratamento destes, seu volume pode ultrapassar 30 % de sua massa original. O processo é capaz de reduzir o volume de resíduos a serem destinados a

aterros em até 90% (Stantec, 2011). Ainda segundo o citado autor, a produção de eletricidade pode alcançar a ordem de 0.5 a 0.8 MWh por tonelada anual de resíduo sólido urbano processado. Os gases de fluxo oriundos da combustão do gás de pirólise podem ser tratados em sistemas APC que não possuem diferenças significativas se comparados aos utilizados para tratamento do gás de fluxo oriundo plantas de incineração por grelhas.

2.2.2 Estado da arte no Brasil e no mundo

Segundo dados da OCDE (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico) (CNI, 2019), são mais de 2 mil plantas em operação em todo o mundo, destas, 460 estão situadas na união europeia e declaram tratar 65 milhões de toneladas por ano. Na América do Norte, 85 plantas operam o tratamento de quase 16 milhões de toneladas/ano de resíduos (ISWA, 2012). Na Coreia do Sul, 35 plantas WtE que estão em operação (WTER) tratam 3 milhões de toneladas/ano; o Japão possui uma estrutura ligeiramente diferente de cerca de 1.100 plantas de WtE que tratam 35 milhões de toneladas/ano, o que dá uma média de 30 mil toneladas/ano de capacidade por planta. Já, na Europa, a capacidade média anual de cada planta é de 150 mil toneladas (CNI, 2019).

O estabelecimento e a difusão desta tecnologia permite um aumento considerável na oferta de energia elétrica. Segundo dados da EPE (2014a), no ano de 2011 o aproveitamento energético dos RSU gerados no planeta ofertou 90 TWh de eletricidade¹⁰, o que equivale a 83% do consumo residencial brasileiro em 2010, o que demandou 2.000 usinas onde os principais consumidores desta eletricidade e do calor disponibilizado foram: EUA (28%), Alemanha (20%) e Japão (10%). Ainda segundo dados do autor supracitado, a Finlândia foi o país quem deteve maior parcela de sua matriz elétrica oriunda desta fonte (4%). A figura abaixo ilustra a localização das URE ao redor do mundo.

¹⁰ World Bank, 2010; CEWEP, 2008; EPA 2007a.



Figura 16: localização das plantas WtE no mundo. Fonte: CNI, 2019.

Conforma já citado anteriormente e ilustra a figura, a tecnologia WtE atualmente no mundo se concentra nos EUA, Europa e Ásia, com destaque para o Japão. No Brasil, atualmente não existem instaladas plantas em escala comercial. A tabela a seguir resume a capacidade estimada das tecnologias analisadas e a localização no mundo.

Tabela 5: capacidade atual de algumas das tecnologias estudadas. Fonte: Adaptado de CNI (2019).

<i>Processo</i>	<i>Capacidade anual estimada (toneladas)</i>	<i>Continentes/países onde são aplicadas</i>
Combustão sobre grelhas móveis	<168 milhões	Ásia, Europa e América
Combustão sobre fornos rotativos	>2 milhões	Japão, EUA e UE
Leito fluidizado circulante	>11 milhões	China, Europa
Leito fluidizado borbulhante	>0,2 milhão	EUA
Gaseificação	>1 milhão	Japão, Canadá e França

Como se pode perceber, maior parcela dos resíduos que são encaminhados às usinas WTE que utilizam a tecnologia de combustão por grelhas. No entanto, segundo dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2019) os novos processos de recuperação energética de resíduos estão constantemente avançando e uma alternativa mais acessível financeiramente pode emergir.

Conforme já mencionado, não existem no Brasil plantas WTE em escala comercial em operação, no entanto estão em curso projetos para aplicação de usinas em diversas

fases¹¹. No entanto, segundo estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2014), considerando a composição gravimétrica comum ao lixo produzido nos centros urbanos e fatores técnicos inerentes a produção de energia em usinas WTE que utilizam o processo de incineração convencional, estima-se que o país possua um potencial de produção de eletricidade a partir de RSU em usinas de recuperação energética que utilizam o processo de incineração de aproximadamente 237 mil GWh, que correspondem a uma capacidade instalada de 3,2 GW distribuídos em 106 unidades capazes de tratar todo o RSU produzido no país.

2.2.3 Impactos Ambientais

Assim como em outros processos de combustão, UREs são capazes de liberar pequenas quantidades de uma ampla gama de componentes na atmosfera. Apenas uma pequena quantidade destes são considerados como poluentes e demandam atenção, sendo em sua maioria sujeitas à limites regulatórios (Stantec, 2011). Além das descargas atmosféricas, cabe destaque à outras descargas possíveis do processo que podem ou não existir, a depender do design da unidade de tratamento térmico e dos equipamentos de controle utilizados.

Conforme já citado, assim como em processos convencionais que se baseiam no aproveitamento energético de resíduos, as tecnologias descritas para produção de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos produzem descargas que merecem atenção, uma vez que podem se apresentar como elementos limitantes a aplicação das tecnologias. Estas descargas podem ser basicamente divididas em emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos.

As emissões atmosféricas incluem material particulado presente nos gases de combustão, nas áreas de depósito de resíduos e, caso não haja um eficiente controle operacional, no manuseio de cinzas; produtos de combustão incompleta, como monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (VOCs – *Volatile Organic Compounds* – e matéria orgânica, predominantemente presente no gás de combustão oriundo da incineração de resíduos orgânicos); Substâncias ácidas que contribuem para formação de substâncias ácidas na atmosfera, como SO_x, NO_x, HCl e HF; Metais

¹¹Disponível em: <https://abren.org.br/2020/11/29/recuperacao-energetica-solucao-para-cumprir-o-plano-e-a-politica-nacional-de-residuos-solidos-estado/>. Acesso em: 06/01/2021, Às 14:26 hrs.

Pesados, comumente presentes no material particulado emitido no processo de combustão; e dioxinas e furanos¹².

As fontes de emissões podem ser pontuais ou fugitivas. Emissões pontuais são aquelas resultantes de um único ponto, como em uma chaminé, por exemplo. Estas são consideradas como as de maior significância para processos de combustão, e para seu controle, equipamentos de Controle de Poluição do Ar (APC - *Air Pollution Control*) são incorporados no sistema de exaustão a fim de controlar a liberação de poluentes na atmosfera (Stantec, 2011). Emissões fugitivas são aquelas que não são liberadas a partir de um único ponto, e sim de um fonte baseada em uma área específica sendo, portanto, não passivas de controle. Elas incluem poeira, odor e VOCs e podem ser minimizadas a partir da adoção de sistemas de que atuam sob pressão negativa (Stantec, 2011).

A produção de efluentes líquidos irá depender diretamente do tipo de sistema de controle de poluição do ar utilizado. Geralmente unidades de aproveitamento energético de resíduos são projetadas para que se tenham uma descarga nula de efluente líquidos oriundo do processo, com a exceção de sistemas que utilizam purificadores úmidos no sistema de controle de poluição do ar (APC). Além destes, o efluente líquido gerado nas unidades de tratamento térmico advém das águas pluviais e o efluente sanitário gerado nas instalações. Segundo Stantec (2011), o efluente líquido residual gerado nas unidades de tratamento térmico pode resultar: do sistema de controle de poluição do ar, normalmente é oriundo do tratamento dos gases de fluxo; Água residual oriunda coleta, tratamento e armazenamento das cinzas (normalmente reutilizadas na remoção de escórias); água residual do ciclo água/vapor resultante do preparo da água de alimentação da caldeira e sua drenagem (em muitos casos reutilizados no processo de incineração e no processo de tratamento de controle de poluição do ar); efluente sanitário gerado nas instalações de apoio. As unidades de tratamento térmico que utilizam sistemas úmidos de controle de poluição do ar também podem estar projetadas para não produção de efluente líquido, no entanto, devem estar munidas de dispositivos de tratamento do efluente gerado nos purificadores para serem utilizados no interior da própria unidade.

Os resíduos sólidos gerados nas unidades de tratamento térmico podem variar com base no design da planta, e consistem em: resíduos rejeitados (removidos previamente

12 Substâncias organocloradas que podem estar presentes nos RSU. Classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) apresentam elevado potencial tóxico e danoso à saúde humana. O maior risco de contaminação por dioxinas ocorre em função de sua deposição e diluição na água; enquanto a contaminação via ingestão responde por 98% dos casos, e somente 2% é devida a inalação (Caixeta, 2005. apud., Machado, 2015).

ao processo de combustão), cinzas de fundo, sucata metálica, resíduos do sistema de controle de poluição do ar, escória, resíduo oriundo dos filtros utilizados no tratamento de águas residuais, gipsita e carvão ativado carregado (Stantec, 2011). Os rejeitos são removidos uma vez que podem comprometer a eficiência de combustão, além de causar danos aos equipamentos utilizados no processo, geralmente compõe 2% do volume de resíduo recebidos na planta e são encaminhados para tratamento alternativo. As cinzas¹³, após coleta e resfriamento, podem ser utilizadas como agregado construtivo substituto (Stantec, 2011). Os resíduos dos sistemas de controle de poluição do ar normalmente são encontrados nos filtros utilizados nos pontos de emissão de descargas atmosféricas das unidades. Compostos normalmente de limo, cinzas e carbono, compõe 2 a 4% da massa original de resíduos e, uma vez que são classificados como resíduos tóxicos (Stantec, 2011), são gerenciados separadamente às cinzas de fundo. Segundo o citado autor, outros resíduos oriundos deste sistema são: materiais reagentes (carbono ativado), ou resíduos recuperados através do tratamento de efluentes.

Como já fora mencionado, a tecnologia empregada em UREs, devido às dificuldades inerentes aos mecanismos de controle de emissões atmosféricas e falta de consenso a respeito dos limites em relação a concentração de determinados poluentes, além da exigência de especificidade de mão-de-obra no tocante a manutenção e operação dos equipamentos, passou a enfrentar da ordem da aceitação deste tipo de tecnologia por parte de órgãos ambientais, instituições e sociedade.

Embora, como já se mostrou, as técnicas a respeito dos mecanismos de tratamento dos gases gerados e controle de emissões atmosféricas tenham evoluído de forma considerável, ainda se destaca como principal impacto ambiental negativo do uso da tecnologia as emissões de poluentes na atmosfera. Mesmo se apresentando como uma tecnologia que evita emissões oriundas da disposição do lixo em aterros e lixões, à nível local, poderá ocorrer num primeiro momento um aumento da emissão de poluentes devido a operação de uma unidade de recuperação energética.

Atenção também deve ser dada a questão dos níveis de ruído a nível local. Caso não haja um planejamento da operação que vise a utilização de sistemas que contenha a poluição sonora oriunda da utilização dos equipamentos empregados no processo, este também poderá ser uma impacto ambiental negativo a ser considerado.

¹³ Material mineral heterogêneo gerado após combustão dos resíduos composto de escória, metais, material cerâmico, vidro, material orgânico residual e outros materiais inorgânicos não combustíveis. Fonte: Stantec, 2011.

Além disso, têm-se a questão dos odores gerados a partir do armazenamento dos resíduos. Para que sejam evitados, devem-se prever mecanismos de contenção dos odores que permitam uma mistura destes com o vapor gerado no processo de incineração, para posterior tratamento, lavagem e emissão dentro dos padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais de controle.

Atenção especial deve ser dada à questão das emissões, pois o material a ser lançado na atmosfera a partir do processo de incineração apresenta, embora em níveis inferiores aos permitidos pela legislação, normas e diretrizes que abordam o assunto, contém dioxinas e furanos. As dioxinas e furanos são substâncias organocloradas que podem estar presentes nos RSU, ou serem formadas sob temperaturas em torno de 300 °C, durante a etapa de resfriamento dos gases, após a incineração. Classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) apresentam elevado potencial tóxico e danoso à saúde humana. O maior risco de contaminação por dioxinas ocorre em função de sua deposição e diluição na água; enquanto a contaminação via ingestão responde por 98% dos casos, e somente 2% é devida a inalação (Caixeta, 2005, apud., Machado, 2015).

Embora as dioxinas existam naturalmente no ambiente, as antrópicas provêm de uma variedade de processos de combustão, incluindo as siderúrgicas, fornos de cimento, veículos a diesel, ônibus, restaurantes, lareiras residenciais, fogueiras, churrascos, motores a jato, incêndios florestais, etc. A incineração de resíduos representa apenas uma pequena fração dessas emissões, graças às normas estabelecidas na década de 90 (ABRELPE e PLASTIVIDA, 2012).

Como impactos ambientais positivos destacam-se a redução das emissões de GEE à nível global e da diminuição da dependência de aterros sanitários e utilização de combustíveis fósseis nos processos de produção de energia, a redução da massa de resíduos a serem encaminhadas à aterros, a mitigação dos impactos ambientais oriundos da operação de aterros sanitários, como a proliferação de insetos, roedores e vetores de doenças, a geração de chorume contribuindo de forma positiva a manutenção da qualidade da água subterrânea e superficial. Além disso, a nível social e econômico destacam-se a geração de empregos, a qualificação da mão-de-obra no setor e o estímulo a cadeia produtiva do setor de reciclagem. Cabe destacar também a geração de receita líquida adicional através da geração e comercialização de energia elétrica, de fonte renovável e, em alguns casos, do calor remanescente do processo, para processos industriais diversos e/ou aquecimento.

Como impactos negativos, além dos passivos ambientais já mencionados nesta seção, como a geração de poluentes atmosféricos e possibilidade de produção de efluentes líquidos e efluentes gasosos, a depender do processo de recuperação e tratamento utilizado, existe o inconveniente social que advém da não aceitação relacionada com o grau de limpeza da tecnologia no diz respeito as emissões geradas e os atuais custos de instalação, que podem alcançar a ordem de até \$1300 (dólares canadenses) por tonelada anual projetada (STANTEC, 2011).

3 Metodologia

O presente estudo abordará a elaboração de um estudo de caso a partir de uma análise econômica e de impactos ambientais da geração de energia, na forma de eletricidade, a partir do aproveitamento energético de resíduos sólidos, por se tratar de uma tecnologia amplamente utilizada em todo o mundo e possuir ampla difusão em países desenvolvidos, como Estados Unidos, Japão e alguns países da Europa. Segundo Machado (2015) a elaboração do estudo de caso é uma prática que investiga e analisa um conjunto de dados dentro de um contexto real e seu desenvolvimento se fundamenta tanto na realização de uma investigação bibliográfica, a fim de coletar dados necessários, como em pesquisa quantitativa e na prática de cálculos teóricos. Seguindo esta lógica, o estudo procurou aprofundar-se na temática apresentada na busca se obter os conhecimentos necessários no que diz respeito à tecnologia estudada a partir dos resultados encontrados nesta análise.

Para a análise econômica será utilizada como base a análise econômica preliminar adotada por Brito (2013), que buscou determinar a viabilidade econômica da implantação de um projeto de geração de energia elétrica utilizando a tecnologia de geração WtE, operando em cogeração e utilizando como combustível o CDR (Combustível Derivado de Resíduos – *Refuse-Derived Fuel* –, adaptadas as particularidades deste trabalho). Seguindo esta base metodológica, será elaborada uma estimativa de fluxo de caixa, demonstrando as receitas e custos ao longo do horizonte determinado para o projeto. De acordo com Hirschfeld (2000, apud. Brito, 2013), o fluxo de caixa é a apreciação das contribuições monetárias ao longo do tempo a uma caixa simbólica já constituída, destaque-se que as convenções de entradas de dinheiro são positivas e as saídas negativas.

Assim, considerando os custos inerentes à implantação de uma planta de recuperação energética para produção e comercialização de energia elétrica, além das receitas

oriundas dos produtos obtidos a partir da sua operação, poderá se ter uma noção da estimativa de lucro líquido obtido e se a tecnologia tem condições ou não de se apresentar como uma alternativa factível à gestão de RSU no município.

Os custos do projeto contemplam: o custo inicial de investimento, diluído em um custo de financiamento considerando linhas de créditos disponíveis no cenário nacional, o custo de operação e manutenção (O&M). As receitas consideradas englobam a comercialização da energia elétrica produzida na planta, dos créditos de carbono emitidos a partir do balanço das emissões evitadas de GEE e a taxa de destruição térmica a ser cobrada pelo tratamento do lixo urbano. A partir dos resultados obtidos poderá ser estimado o lucro líquido anual considerando um horizonte de projeto de 20 anos. Seguindo a referência metodológica proposta, estimam-se a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL).

Propõe também estimar os indicadores econômicos considerando a retirada de materiais metálicos e vidros da massa de RSU coletadas e analisar o potencial que a retirada destes matérias possui de influenciar os resultados inicialmente obtidos. Também será realizada uma análise a respeito da estimativa da taxa de tratamento térmico mínima a ser cobrada tal que seja suficiente para, somada as fontes de receita oriundas da comercialização da energia elétrica e da comercialização dos créditos de carbono, sejam igualados os custos operacionais e de financiamento relacionados à implantação e operação do empreendimento.

3.1 Parâmetros de cálculo

3.1.1 Projeção Populacional

Os dados básicos de entrada para cálculo dos indicadores financeiros considerados no estudo são compostos pelos dados populacionais e de geração de RSU por habitante. Os dados populacionais serão extrapolados para o horizonte do projeto utilizando modelos matemáticos de projeção. Para o refinamento dos resultados populacionais obtidos, será utilizada análise de regressão não linear com utilização de ferramenta computacional Solver¹⁴, do software Microsoft Excel, para melhor aproximação e ajuste. Para o presente estudo são considerados os métodos de projeção aritmética, projeção geométrica, taxa de crescimento decrescente e crescimento logístico, e os resultados

¹⁴ Suplemento do Microsoft Excel utilizado para teste de hipóteses. Disponível em: <https://support.microsoft.com/pt-br/office/definir-e-resolver-um-problema-usando-o-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. Acesso em: 07/01/2021, as 14:30 hrs.

obtidos serão comparados com dados disponíveis na bibliográfica consultada, a partir de uma análise gráfica para escolha do método mais adequado a extrapolação dos dados e realização da análise de regressão. A tabela a seguir resume as características de cada método.

Tabela 6: métodos de projeção populacional com base em fórmulas matemáticas. Fonte: Adaptado de SPERLING (2014).

Método	Descrição	Taxa de Crescimento	Formula de projeção	Coeficientes
Projeção aritmética	Crescimento populacional segundo uma taxa constante. Método utilizado para estimativas de menor prazo. O ajuste da curva também pode ser feito por análise de regressão.	$\frac{dP}{dt} = Ka$	$P_t = P_0 + Ka \cdot (t - t_0)$	$Ka = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0}$
Projeção geométrica	Crescimento populacional função da população existente a cada instante. Utilizado para estimativas de menor prazo. O ajuste da curva também pode ser feito por análise de regressão.	$\frac{dP}{dt} = Kg \cdot P$	$P_t = P_0 \cdot (1 + i)^{(t-t_0)}$	$Kg = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0}$ $i = e^{Kg} - 1$
Taxa decrescente de crescimento	Premissa de que, na medida em que a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor. A população tende assintoticamente a uma população de saturação. Os parâmetros também podem ser estimados por regressão linear.	$\frac{dP}{dt} = Kd \cdot (P_s - P)$	$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-Kd \cdot (t-t_0)}]$	$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$ $Kd = \frac{-\ln\left[\frac{(P_s - P_2)}{(P_s - P_0)}\right]}{t_2 - t_0}$
Crescimento logístico	A população cresce assintoticamente a um valor de saturação. Os valores também podem ser estimados por regressão não linear. Condições necessárias: $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 \cdot P_2 < P_1^2$. Para aplicação, os dados devem estar equidistantes no tempo.	$\frac{dP}{dt} = K1 \cdot P \cdot \left(\frac{P_s - P}{P_s}\right)$	$P_t = \frac{P_s}{1 + c \cdot e^{K1 \cdot (t-t_0)}}$	$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$ $c = (P_s - P_0)/P_0$ $K1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln\left[\frac{P_0 \cdot (P_s - P_1)}{P_1 \cdot (P_s - P_0)}\right]$

A partir do cálculo das projeções populacionais para o horizonte de projeto proposto utilizando os métodos matemáticos expostos, pode-se então determinar, a partir do cruzamento dos resultados obtidos com taxas pré-estabelecidas de geração média per capita de RSU no cenário nacional e disponíveis na bibliografia consultada, a geração total de RSU no período considerado na análise.

3.1.2 Geração média per capita de RSU na área de estudo

A taxa de geração per capita de RSU no município gerada considerada neste trabalho é função direta da população do município. A tabela a seguir, que tem como referência o Termo de Referência Geral estabelecido pelo Ministério das Cidades (2009) para “Elaboração de Projetos de Engenharia e Estudos Ambientais de Obras e Serviços de Infraestrutura de Sistemas Integrados de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos” apresenta as taxas de geração média per capita de RSU de acordo com as faixas populacionais dos municípios brasileiros. Segundo PRO-SINOS (2014) o relatório propõe taxas para uso na elaboração de plano de gestão de resíduos sólidos no Brasil e, sendo assim, entende-se que satisfazem aos objetivos deste trabalho.

Tabela 7: geração per capita de RSU em função da faixa populacional. Fonte: PROSINOS (2014).

Faixa de População (habitantes)				Geração per (kg/hab.dia)	Média capita
até	15000			0,6	
de	15001	a	50000	0,65	
de	50001	a	100000	0,7	
de	100001	a	200000	0,8	
de	200001	a	500000	0,9	
de	500000	a	1000000	1,15	

Estimada massa de RSU gerada no período em análise considerada, deve-se buscar avaliar se a tecnologia é aplicável considerando o ponto de vista do conteúdo energético dos RSU coletados, função da sua disponibilidade e composição gravimétrica.

3.1.3 Estimativa do potencial de produção de eletricidade

Para isto, o estudo buscou determinar a estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI), uma vez que a tecnologia de incineração, conforme já mencionado, se apropria deste, propiciando a energia térmica decorrente do processo de combustão necessária a produção de eletricidade. Este é um parâmetro que é diretamente dependente da composição gravimétrica do RSU gerado no município. Segundo Themelis (2003) o PCI é função direta da fração da matéria orgânica (FO), Papel (P), Plástico (PI), Vidro (V), Metais (M) e o teor de umidade (H_2O) da massa de RSU. A fração de água existente no material orgânico (folhas, madeira, material em decomposição e etc.) deve ser excluída por estar considerada na variável H_2O (Oliveira, 2018). A expressão matemática formulada pelo citado autor, utilizada neste trabalho para o cálculo do PCI (kcal/kg) é descrita pela Equação :

(3.1)

$$PCI \left(\frac{kcal}{kg} \right) = \frac{18500 * Y_{combustível} - 2636 * Y_{H2O} - 628 * Y_{vidros} - 544 * Y_{metais}}{4,185}$$

Onde $Y_{combustível}$, Y_{H2O} , Y_{vidros} , Y_{metais} representam a proporção de cada elemento para cada unidade de massa de RSU, indicando portanto o percentual de cada material considerando e citando anteriormente para efeito de cálculo.

Segundo EPE (2014), de fato, a incineração dos RSU com poder calorífico inferior a 1675 kcal/kg apresenta dificuldades técnicas e exige a adição de combustível auxiliar. Embora a classificação segundo PCI não deva ser considerada como definitiva para estabelecer a destinação de RSU, considera-se que:

- Para $PCI < 1675$ kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável;
- Para 1675 kcal/kg $< PCI < 2000$ kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- Para $PCI > 2000$ kcal/kg, a queima bruta (“mass burning”) é tecnicamente viável.

Após estimativa do PCI da massa de RSU coletada na área considerada para aplicação do estudo de caso poderá ser estimada, considerando a eficiência da planta, a capacidade de produção de eletricidade por unidade de massa de RSU na usina.

3.1.4 Estimativa de receitas

Para composição dos indicadores econômicos a serem analisados, cumpre ressaltar que a variação de alguns parâmetros básicos, como custo inicial de investimento, custo de operação e manutenção, preço de mercado da energia elétrica, fatores de emissão, taxa de juros do financiamento, amortização, carência, além do preço de comercialização dos certificados de emissões evitadas no mercado podem influenciar diretamente os resultados finais obtidos e o desempenho do projeto.

O cálculo das receitas oriundas da comercialização de energia elétrica produzida é função da massa de RSU processada na usina, do PCI estimado, da eficiência da planta, do valor normativo da eletricidade no mercado de energia elétrica e do consumo da própria planta. Desta forma, a estimativa da receita anual oriunda da eletricidade produzida pode ser obtida da seguinte forma:

(3.2)

$$R_{elet} \left(\frac{R\$}{ano} \right) = PCI \left(\frac{MJ}{ton} \right) * \frac{1}{3600} \left(\frac{h}{s} \right) * \eta_{tec} * RSU \left(\frac{ton}{ano} \right) * P_{eletricidade} \left(\frac{R\$}{MWh} \right) * (1 - CP)$$

Onde,

R_{elet} = Receita anual oriunda da comercialização de eletricidade;

$PCI \left(\frac{MJ}{ton} \right)$ = Poder calorífico inferior estimado da massa de RSU;

η_{tec} = Eficiência da tecnologia;

$RSU \left(\frac{ton}{ano} \right)$ = Massa de RSU coletada no período;

$P_{eletricidade} \left(\frac{R\$}{MWh} \right)$ = Preço da eletricidade no mercado de energia elétrica;

CP = Consumo próprio da planta.

Para o cálculo da receita oriunda da comercialização dos certificados de emissões evitadas, os créditos de carbono, buscou-se obter um balanço que leva em consideração as emissões evitadas oriundas da substituição tecnológica, sujeitas a um fator de conversão pré-estabelecido, e aquelas oriundas das emissões provenientes da operação de aterros sanitários (emissões de linha de base), além das emissões da própria usina (Emissões de Projeto). As emissões oriundas da substituição tecnológica levam em conta as emissões evitadas a partir da quantidade de eletricidade que seria produzida na ausência da tecnologia, portanto a partir de fontes fósseis. O cálculo tem como referência a metodologia proposta por Siddiqi (2020), excetuando-se a determinação do custo da emissão evitada, e é descrito da seguinte forma.

(3.3)

$$RE_{ev} \left(\frac{R\$}{ano} \right) = P_{cred. carb.} \left(\frac{R\$}{tCO_2} \right) * (Emissões de Linha de Base - Emissões de Projeto)$$

Onde,

$RE_{ev} \left(\frac{R\$}{ano} \right)$ = Receita oriunda das emissões de CO₂ evitadas;

$P_{cred. carb.}$ = Valor de mercado do crédito de carbono (R\$/tCO₂eq), fixado com base no valor da cotação do ativo na época da realização dos cálculos.

Para o cálculo das emissões evitadas em aterros sanitários, propõe-se utilizar o método *default* definido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) ¹⁵. O método permite calcular a produção de metano oriunda da deposição de RSU em aterros sanitários e, segundo o próprio IPCC, apresenta uma estimativa anual razoável das emissões caso a quantidade e a composição do RSU depositado apresentem pouca variação ao longo do tempo. A partir desta estimativa, aplica-se um fator de conversão de emissão de metano em CO₂ equivalente, obtido a partir do potencial de aquecimento global (GWP – *Global Potential Warming*) do metano, que estima a medida com a qual determinado gás contribui para o aquecimento global. Sendo assim, a estimativa é obtida a partir da fórmula que segue:

(3.4)

$$EE_{aterro_{CO_2}} \left(\frac{tonCO_2}{ano} \right) = GWP * \left[\left(RSU \left(\frac{ton}{ano} \right) * L_0 \right) - R \right] * (1 - ox)$$

$$L_0 \left(\frac{MtCH_4}{MtRSU} \right) = MCF * DOC * DOCf * F * \frac{16}{12}$$

Onde,

$EE_{aterro_{CO_2}}$ = emissões evitadas da deposição de RSU em aterros sanitários.

L_0 = Potencial de geração de metano;

MCF = Fator de correção de metano;

DOC = Carbono orgânico degradável (fração de uma unidade de Carbono em uma unidade de RSU) = 0,4 (Papel e Papelão) + 0,17 (Folhas) + 0,15 (Matéria Orgânica Total) + 0,3 (Madeira);

DOCf = Fração do DOC dissimulada; O valor sugerido pela metodologia do IPCC é 77%;

F = fração do volume de CH₄ no gás de aterro. O valor sugerido pela metodologia do IPCC é 50%;

R = CH₄ recuperado (Gg/ano);

OX = fator de oxidação;

GWP = Potencial de aquecimento global do metano (CO₂ equivalente)¹⁶.

¹⁵ IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Capítulo 5. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5_Waste.pdf.

¹⁶ Disponível em: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

A emissões evitadas oriundas da substituição tecnológica, outro valor que compõe as emissões da linha de base, neste estudo irá considerar um fator de emissão médio anual que é calculado de acordo com a ferramenta metodológica aprovada pelo Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL e têm como objetivo estimar a contribuição, em termos de redução de emissões de CO₂, de um projeto de MDL que gere eletricidade para a rede¹⁷. O fator é multiplicado pela eletricidade produzida no período pela usina e assim obtêm-se as emissões evitadas a partir da substituição da tecnologia, conforme descrito abaixo.

(3.5)

$$EEtec \left(\frac{tCO_2}{ano} \right) = f \left(\frac{tCO_2}{MWh} \right) * Eletricidade \text{ produzida } \left(\frac{MWh}{ano} \right)$$

Onde,

EEtec = emissões evitadas pela substituição tecnológica em relação a fontes fósseis;

f = fator de conversão, obtido com base em um valor médio anual estimado pelo método de análise de despacho;

Estimadas as emissões da linha de base pela soma das Equações e , calculam-se as emissões do projeto, ou seja, oriundas da operação da própria usina. O cálculo tem como base a metodologia disponível no trabalho desenvolvido por CentroClima (2005)¹⁸, que levam em conta as emissões oriundas da incineração controlada de RSU (1), da queima de combustível auxiliar (GLP) (2) e da combustão da biomassa presente na massa de RSU (3).

Para as emissões relativas a incineração de resíduos sólidos (1) leva-se em conta a queima da fração de plásticos e borrachas do lixo, uma vez que metais vidros e cerâmicas são coletados na etapa que precede a incineração e a fração da matéria orgânica dos resíduos não será considerada uma vez que se tratam de emissões biogênicas¹⁹.

A partir disto é aplicado o coeficiente de conversão para a massa de CH₂ relativa ao CO₂ e então as emissões para incineração de RSU é calculada.

¹⁷ https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html.

¹⁸ UNFCCC MDL DCP – GS CDM. Projeto: USINAVERDE: Incineração de resíduos sólidos urbanos, com carga similar ao RDF, evitando emissões de metano e provendo geração de eletricidade para autoconsumo. ANEXO II. Rio de Janeiro, 2005.

¹⁹ Emissões que advém de fontes naturais, como plantas e árvores (matéria orgânica). Fonte: elaboração própria.

(3.6)

$$E_{inc.RSU} = RSU * Vol. CH_2 * Coef. Convers\~ao \left(\frac{tCO_2}{tCH_2} \right) * \eta$$

Onde,

$E_{inc.RSU}$ = Emissões da incineração de RSU (tCO₂/ano);

RSU = Massa de RSU processado (t/ano);

$Vol. CH_2$ = Volume de plásticos e borrachas nos RSU coletados (tCH₂/tRSU).

η = Eficiência de queima do processo.

Para (2) será considerado o consumo de GLP na proporção de resíduos consumida na usina e o fator de conversão do volume correspondente em CO₂. O fator de conversão é obtido a partir da parcela de butano e propano, ambos componentes do GLP, e suas relações de massa com o CO₂. Assim, a fração de GLP consumida poderá ser obtida a partir da seguinte equação:

(3.7)

$$E_{GLP} \left(\frac{tCO_2}{ano} \right) = RSU * GLP * Coef. Convers\~ao \left(\frac{tCO_2}{tGLP} \right)$$

$$Coef. Convers\~ao = (\%propano * Massa (CO_2/prop)) + (\%but * Massa(CO_2/Butano))$$

Onde,

E_{GLP} = Emissões oriundas da queima de GLP na usina;

RSU = Massa de RSU processada (tRSU/ano);

$Vol. GLP$ = Massa de GLP consumido em função do volume de RSU processado (tGLP/tRSU);

$Coef. Convers\~ao$ = Massa de CO₂ correspondente a massa de GLP utilizada;

$\%propano$ e $\%but$ = Fração de propano e butano na composição do GLP;

$Massa (CO_2/prop)$ e $Massa(\frac{CO_2}{Butano})$ = Relação de Massa entre os componentes do GLP e CO₂.

Para o cálculo das emissões oriundas do processo de combustão de biomassa (3), tem-se como base a composição gravimétrica do RSU gerado na área de estudo, conteúdo energético da biomassa (TJ/t.), fator de emissão de CH₄ para combustão de biomassa e resíduos (kg CH₄/TJ), GWP para 100 anos do CH₄ (tCO₂-eq/t. CH₄), N₂O (t.CO₂-eq/t. N₂O) e o fator de emissão de N₂O para combustão de biomassa e resíduos (kg

N2O/TJ). As emissões neste caso levam em conta apenas os componentes da biomassa que contribuem significativamente para o efeito estufa (CH₄ e N₂O). A equação proposta tem como base o trabalho realizado por Centro Clima (2005) e pode ser descrita da seguinte forma:

(3.8)

$$E_{biomass} = RSU * Biomass \left(\frac{tonBiomass}{tonRSU} \right) * CE_{biomass} \left(\frac{TJ}{ton} \right) (CH4_{bio_{comb}} * CH4_{GWP} + N2O_{bio_{comb}} * N2O_{GWP})$$

Onde,

$E_{biomass}$ = Emissões oriundas da combustão de biomassa (tCO₂/ano);

$Biomass$ = proporção em massa da biomassa em relação ao RSU;

$CE_{biomass}$ = Conteúdo energético da Biomassa;

$CH4_{bio_{comb}}$ = Fator de emissão de CH₄ para combustão de biomassa;

$N2O_{bio_{comb}}$ = Fator de emissão de N₂O para combustão de biomassa;

$CH4_{GWP}$ e $N2O_{GWP}$ = potencial de aquecimento global do metano e do óxido nitroso, respectivamente.

Desta forma, estimam-se as emissões do projeto a partir das somas de (1), (2) e (3).

A taxa de destruição térmica, outra fonte de receita possível dentro deste cenário de aplicação de tecnologia de aproveitamento energético de RSU, leva em conta um valor a ser cobrado pelo tratamento térmico do RSU. Neste caso as receitas computadas terão relação direta com a massa de RSU processada no período. O valor pode ser calculado da seguinte forma:

(3.9)

$$Rev_{tt} \left(\frac{R\$}{ano} \right) = taxa \text{ trat. térmico} \left(\frac{R\$}{tonRSU} \right) * RSU \left(\frac{tonRSU}{ano} \right)$$

Onde, Rev_{tt} corresponde a receita oriunda da taxa cobrada pelo tratamento térmico de e RSU corresponde a massa de RSU coletada anualmente no município e destinada ao tratamento térmico.

3.1.5 Premissas de cálculo

Dito isto, para composição da análise proposta, o estudo adotou as seguintes premissas:

- O consumo energético do transporte não será considerado, uma vez que a proposta envolve apenas a análise do ponto de vista da alternativa tecnológica e, sendo assim, o custo energético relacionado ao processo de coleta e transporte será o mesmo nas situações com ou sem implantação da usina.
- O valor normativo da eletricidade considerado foi de R\$ 184,00/MWh, considerando preço de longo prazo (energia incentivada) de comercialização no mercado livre, para o mês de outubro de 2020²⁰;
- A usina irá operar durante 8.000 horas anuais (Brito, 2013).
- A eficiência de produção de eletricidade e o consumo próprio da planta das tecnologias em análise levou em consideração o estudo realizado por Dong. et. al. (2018);
- A taxa de cobertura do serviço de coleta de RSU em relação a população urbana, indicador do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS, considerada neste estudo foi de 99%²¹.
- No presente trabalho assume-se que o valor necessário ao investimento seja adquirido mediante financiamento junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) Finem – Geração de Energia²². A tabela a seguir expõe as condições de financiamento com as quais se pôde construir a análise dos indicadores econômicos considerados.

Tabela 8: condições de financiamento.

Taxa de Juros - Componente pré-fixado da Taxa de Longo Prazo - TLP ²³ , IPCA, remuneração do BNDES, e Taxa de Risco de Crédito	8,6% a.a.
Prazo de carência	12 meses
Capitalização dos Juros	Anual
Periodicidade da amortização	12 meses
Prestação	Anual
Prazo total	240 meses

²⁰ Boletim Abraceel – Outubro de 2020. Disponível em:

<https://abraceel.com.br/biblioteca/boletim/2020/10/boletim-abraceel-outubro-2020/>.

²¹ Disponível em: http://appsniis.mdr.gov.br/indicadores/web/residuos_solidos/mapa-indicadores.

²² Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>.

²³ Componente pré-fixado da taxa publicada pelo Banco Central do Brasil. Pode ser consultada no portal do BNDES.

- O custo de investimento e o custo operacional levados em consideração neste trabalho têm como base os trabalhos realizados por Siddiqi (2020) e Giz (2017). Os valores, por se tratarem de cotações em moeda estrangeira foram convertidos à moeda corrente nacional considerando cotação do câmbio no momento da composição dos valores.
- A capacidade máxima projetada da usina levou em consideração a quantidade de RSU gerada ao final do período considerado no horizonte de projeto (20 anos), estimada a partir dos pressupostos mencionados anteriormente. Assim, considerou-se a implantação de usina com capacidade tal que, ao final da sua vida útil, seja possível tratar todo o RSU coletado no município.
- Os valores inerentes a aquisição do imóvel não serão computados, pois se considera que são responsabilidade da administração pública, isto é, a própria realizará a doação do terreno para implantação da usina.
- A taxa de destruição térmica sobre o resíduo processado foi ajustada utilizando análise de regressão não linear, a partir de um valor normativo inicial (R\$ 60,00) por tonelada processado, com referência ao utilizado no estudo realizado por EPE (2014c), para um VPL nulo, de forma que a taxa contribua para a obtenção de receitas que sejam capazes de cobrir somente os custos totais, oferecendo assim uma base para cálculo do valor a ser cobrado pelo tratamento de RSU por entidades da administração pública, por exemplo, no caso de empreendimentos oriundos de iniciativa de consórcios municipais, empresas e autarquias públicas, por exemplo, na gestão de RSU.
- O fator de emissão médio anual considerado neste estudo leva em conta o fator de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho, levando em conta o valor mais recente disponível, para o ano de 2019, fixado em 0,102 tCO₂/MWh.
- Neste estudo ficou estabelecida uma taxa de desconto de 8,6% a.a., em termos reais, que têm como base a taxa de juros do financiamento de 100% do investimento junto ao BNDES;
- O valor de mercado da tonelada de CO_{2eq} considerado na análise levou em conta a cotação média do crédito de carbono futuro para o mês de outubro do ano de 2020, fixada em 24,93€²⁴.

²⁴ Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 01/04/20221, às 10:44 hrs.

- O potencial de aquecimento global (GWP) do metano considerado neste estudo tem como base o valor disponível em tabela fornecida pelo IPCC, do seu quinto relatório de avaliação²⁵, fixada em 28.
- O conteúdo energético conservado a partir da retirada dos materiais metálicos e vidro no processo não será contabilizado.
- No cálculo das emissões da incineração de RSU é considerado que todo o volume de plástico é constituído de polímeros derivados de CH₂ e que toda combustão irá gerar dióxido de carbono e água. Também será considerada uma eficiência de queima de 90 % e a fração dos plásticos e borrachas levará em conta a composição gravimétrica do lixo segundo dados disponíveis na bibliografia consultada.
- Para o cálculo das emissões de projeto, os valores dos parâmetros fixos utilizados foram obtidos com base nos estudos realizados por CentroClima (2005) e Oliveira (2004). A tabela a seguir expõe os valores utilizados para os parâmetros considerados nas etapas de cálculo destas emissões.

Tabela 9: parâmetros de cálculo das emissões do projeto. Fonte: Adaptado (CentroClima, 2005).

Cálculo das Emissões do Projeto	
1- Emissões da incineração de resíduos sólidos urbanos	
Eficiência da queima (%)	90
Comp. Grav. de plásticos e borrachas (base úmida)	
Borracha (%)	0,97
Plástico Duro (%)	7
Plástico Filme (%)	9
Total	16,97
Massa de CH ₂ (t. de CH ₂ /t. de CO ₂)	0,1697
Coeficiente de Conversão (tCO ₂ /tCH ₂)	3,14
2 - Emissão da Combustão de GLP	
Massa de GLP (kg/t.RSU)	8
%Propano (kg propano /kg GLP)	0,43
%Butano (kg propano /kg GLP)	0,57
Rel. Massa (CO ₂ /Propano)	3
Rel. Massa (CO ₂ /Butano)	3,03
3 - emissões da combustão de biomassa	
% de biomassa no lixo	38,6
Conteúdo energético (TJ/t)	0,008
Fator de emissão de CH ₄ p/combustão (tCH ₄ /TJ)	0,3
GWP p/ CH ₄ (tCO ₂ -eq/tCH ₄)	28
Fator de emissão do N ₂ O para combustão (tN ₂ O/TJ)	0,004

²⁵ Disponível em: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

GWP para o N2O (tCO2-eq/tN2O)	296
-------------------------------	-----

- Para o cálculo das emissões evitadas em aterros, os parâmetros que compõem a Equação foram obtidos seguindo referência metodológica proposta por CentroClima (2005) e IPCC (2001). Os valores adotados estão resumidos na tabela abaixo:

Tabela 10: valores dos parâmetros de cálculo das emissões evitadas em aterros sanitários. Fonte: IPCC (2001).

Parâmetro	Valor
Carbono orgânico degradável – DOC	0,186
Fração de carbono orgânico dissimulada – DOCf	0,77
Fator de conversão de carbono/metano – F	0,5
Metano Recuperado – R ²⁶	0
Fator de Oxidação	0,1

3.2 Análise dos indicadores de viabilidade econômica

Estimadas as receitas e custos ao longo do horizonte do projeto, propõe-se o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica considerados neste estudo (TIR, VPL). O Método do Valor Presente Líquido (VPL) também chamado de Método do Valor Anual Líquido tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado uma série de receitas e dispêndios, Hirschfeld (2000). Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa, segundo Hirschfeld (2000) é, portanto, a somatória algébrica dos valores presentes envolvidos neste fluxo de caixa (Brito, 2013). A Equação ilustra o cálculo do VPL:

(3.10)

$$VPL = \frac{F_1}{(1+i)^1} + \frac{F_2}{(1+i)^2} \dots \frac{F_n}{(1+i)^n} - F_0$$

Onde,

VPL = Valor presente líquido de um fluxo de caixa;

n = número de períodos da série do fluxo;

F_n = valor do fluxo de caixa ao final de uma unidade do período da série;

i = taxa de desconto.

²⁶ Representando no método Default da metodologia do IPCC pelo parâmetro R (metano recuperado). A metodologia recomenda que o metano recuperado e subsequentemente lançado não deve ser descontado das emissões brutas. (Cap. 5, pág 10, IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories).

O VPL será calculado considerando os seguintes cenários:

- 1) Toda a massa de RSU encaminhada a usina será incinerada, sem qualquer tipo de separação de recicláveis;
- 2) Antes de ser encaminhada ao tratamento térmico e conversão termoquímica, a fração de vidros e metais é separada da massa de RSU;

Assim poderá ser estimado um dos impactos financeiros da retirada de materiais que podem ser reinseridos na cadeia produtiva e que influenciam negativamente no poder calorífico da massa de RSU e o grau de influência que esta separação pode ter nos ganhos econômicos e na atratividade do investimento.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa que faz com que o valor atualizado dos benefícios seja igual aos valores atualizados dos custos, sendo um método que depende exclusivamente do Fluxo de Caixa de sistemas de produção, constitui uma medida relativa que reflete o aumento no valor do investimento ao longo tempo tendo em vista os recursos demandados para produzir o fluxo de receitas (Brito, 2013).

A atratividade de um determinado sistema de produção pode ser interpretada sob a ótica da TIR uma vez que o mesmo pode ser considerado economicamente viável quando este supera a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é equivalente à taxa de desconto. O seu cálculo é feito quando são iguais as receitas e custos retornadas ao período inicial do investimento, anulando-se portanto, o VPL. Existe um método matemático para o cálculo da TIR, no entanto, para fins de simplificação a mesma será obtida através da ferramenta disponível no software Microsoft Excel.

O estudo propõe também, a partir dos resultados obtidos, uma análise sobre o ponto de vista do custo que deverá ser coberto pelas receitas oriundas da taxa de tratamento térmico a ser cobrado pela destruição térmica do RSU, outra fonte de receita oriunda da implantação deste tipo de tecnologia. Considerando o atual panorama da gestão de RSU, onde os RSU são em sua maioria encaminhado à aterros sanitários, a taxa considerada será aquela usualmente cobrada pelos aterros privados para o tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Segundo EPE (2014c), o pagamento das prefeituras pode variar entre R\$ 11 e 60 R\$/t, sendo este último o valor mais comum cobrado pelos aterros no cenário atual e, portanto, o valor utilizado como ponto de partida para realização da análise.

Em suma, propõe-se estimar qual pode ser a taxa mínima a ser cobrada pelo titular do serviço de tratamento térmico de RSU que seria suficiente para cobrir o “gap” financeiro compreendido entre as receitas oriundas da comercialização da eletricidade gerada e da comercialização dos créditos de carbono e os custos de uma URE, considerando as premissas pré-estabelecidas neste estudo. Essa taxa mínima, dentro dos cálculos teóricos apresentados, pode ser obtida a partir de um VPL nulo ($VPL = 0$), ou seja, valor a partir do qual um investimento pode ser tornar atrativo do ponto de vista financeiro, onde os custos se igualam as receitas no valor atual.

Isto é possível uma vez que todas as demais variáveis que compõem o fluxo financeiro em análise tem base no mercado, podendo esta ser então ajustada, se as demais forem mantidas fixadas, a fim de que a partir dela seja possível ter mais um indicador de atratividade da tecnologia frente a destinação de RSU à aterros.

A taxa mínima será estimada neste estudo a partir da utilização da ferramenta de teste de hipóteses Solver, do Microsoft Excel. Nela o teste de hipóteses tratará como objetivo igualar a zero o VPL, mantendo-se como única variável a taxa de tratamento térmico e como restrições variáveis irrestritas não negativas e o método de aplicação GRG não linear.

A análise do ponto de vista da taxa de destruição térmica mínima busca fornecer um elemento adicional a atratividade do investimento, uma vez que permite comparar se a taxa que pode ser cobrada tem um valor de mercado próximo ao que é usualmente empregado nos aterros sanitários, fornecendo assim uma sustentação adicional a hipótese desta alternativa tecnológica ser ou não atrativa dentro do contexto observado.

4 Estudo de Caso

4.1 Seleção da Localidade

Seguindo os objetivos gerais deste estudo, para que seja possível realizar uma análise que reflita com proximidade a realidade de uma determinada situação, se faz necessário que estejam disponíveis dados que permitam a elaboração de estimativas fiéis ao contexto apresentado dentro da temática abordada. Além disso, deve-se dispor de elementos que contribuam satisfatoriamente para a obtenção de resultados que possibilitem enxergar com clareza a temática abordada e a realidade estudada.

Para isto, a escolha da região onde será aplicada o estudo de caso levou em conta o questionamento sobre o quanto esta reflete de forma satisfatória o atual panorama e o cenário da gestão de resíduos sólidos urbanos, permitindo assim a aproximação e uma generalização deste estudo com realidade dos centros urbanos.

Conforme mencionado nas seções anteriores, na cidade de Magé os resíduos são encaminhados a um local que já abrigara um lixão, um aterro controlado e hoje um aterro sanitário, realidade comum a maior parte dos municípios brasileiros. Guarda relação comum também com a situação atual dos centros urbanos nacionais, a ausência no município de tecnologias de tratamento dos RSU coletados na cidade, além do município não dispor de uma programa de coleta seletiva ou cooperativa de catadores em operação, apresentando-se então como uma localidade que, considerando o contexto geral da gestão de RSU, já comentada anteriormente, permite refletir de forma satisfatória a realidade da maior parte dos centros urbanos brasileiros, no que diz respeito à gestão de RSU.

Outro ponto importante está na disponibilidade de dados acerca dos parâmetros que servem como base para aplicação da análise. Conforme descrito na seção que trata do panorama da gestão de RSU no município, a partir da pesquisa literária e consulta a base de dados do próprio município, pode-se perceber que existem dados suficientes para a realização das estimativas consideradas no estudo. Destaca-se também que os dados municipais disponíveis são relativamente recentes, oferecendo uma melhor descrição da realidade estudada.

Destaca-se também nesta etapa, considerando a tecnologia em estudo, verificar se a localidade atende os requisitos mínimos no que diz respeito ao potencial de geração de energia a partir de RSU considerando sua composição gravimétrica, medidas pela estimativa do seu poder calorífico. Além disso, a localidade deverá atender quantidades mínimas de geração de RSU a serem processados, valores estes disponíveis na literatura, para que a elaboração de um estudo para implantação da tecnologia WtE seja aplicável.

Sendo assim, considerando o método de seleção adotado, entende-se que os dados disponíveis e, portanto, a região administrativa do município de Magé atende satisfatoriamente as necessidades relacionadas ao alcance dos objetivos propostos neste estudo. Adicionalmente, os resultados obtidos poderão servir como base para o melhor entendimento da possibilidade de aplicação da tecnologia estudada considerando a realidade proposta, podendo ser tanto utilizado como base para

trabalhos futuros, como para outras iniciativas que busquem aplicar no cenário apresentado às ferramentas analisadas.

4.2 Limitações do Método

As principais limitações do método proposto têm base nas estimativas decorrentes das premissas de cálculo estabelecidas para as etapas de cálculo da análise. De acordo com Hauser (2007, apud., Brito, 2013), fazer projeções de médio e longo prazo dos preços da eletricidade não é tarefa fácil, pois a produção e distribuição de energia são fortemente reguladas no Brasil e a oferta depende das circunstâncias climáticas. Desta forma, o método proposto encontra-se limitado pela fixação de um preço da eletricidade e, desta maneira, a aproximação dos resultados obtidos nesta análise com o cenário real pode ser limitada por esta volatilidade dos preços praticados no mercado nacional de eletricidade.

Outro fator que pode variar consideravelmente ao longo do tempo e fora utilizado de forma fixa neste estudo é o valor do crédito de carbono. Segundo Teixeira et. al. (2010) o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, mecanismo oficial que certifica projetos que contribuem efetivamente para a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa – GEE e que facilita o cumprimento das metas de reduções de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto²⁷, é o mecanismo de flexibilização que oferece maior risco ao investidor, pelo alto grau de incerteza e pela burocracia que existe até a efetiva aprovação dos projetos pela ONU, além do alto custo de transação envolvido (em torno de US\$ 100.000 a US\$150.000). Estes riscos, ainda segundo o mesmo estudo, estão associados ao tratado de Quioto, que tem prazo de validade, além dos riscos associados a performance do projeto. Percebe-se então que uma fixação do valor de comercialização da tonelada de carbono evitada tem o potencial de afastar os resultados do estudo da realidade no que diz respeito a estimativa da obtenção de receitas oriundas deste parâmetro.

Como fora mencionado na abordagem da proposta metodológica do estudo, o potencial de conservação de energia através da reciclagem não é considerado neste estudo, embora para as estimativas de produção de eletricidade e emissões atmosféricas se considere que a fração de recicláveis (metais e vidros) é separada da massa de resíduos antes de ser encaminhada ao tratamento térmico. Além de possibilitar o aumento o PCI

²⁷ Instrumento criado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), na COP-3, na cidade de Kyoto, em Dezembro de 1997. Nele foram estabelecido que, dentre outras metas, países integrantes do Anexo I do documento deverão reduzir a emissões de GEE em pelo menos 5% em relação aos níveis emitidos pelos países em 1990.

dos RSU e, portanto, o potencial de produção de eletricidade da usina, o processo possibilita uma economia no consumo de eletricidade em processos industriais, uma vez que estes materiais são reinseridos na cadeia produtiva. Estima-se, segundo dados disponíveis em EPE (2014) e considerando a matriz brasileira, que o vidro e o metal têm potencial de economia de eletricidade de 0,111 kWh/kg e 1,052 kWh/kg, respectivamente. Considerando a realidade proposta para este estudo e as características dos RSU gerados na área de estudo e o valor médio de R\$ 112,86/MWh para a energia conservada através da reciclagem (EPE, 2014b), receitas adicionais podem ser obtidas, refinando os resultados e contribuindo positivamente para a determinação da competitividade econômica da tecnologia frente às formas comuns de manejo e gestão de RSU empregadas no cenário nacional.

4.3 Seleção da Tecnologia Aplicada

A seleção da tecnologia a ser aplicada no estudo de caso levou em consideração fatores relacionados a aplicabilidade, difusão da tecnologia no cenário atual de produção de energia e custos operacionais e implantação do empreendimento, além de questões relacionadas ao potencial que a tecnologia possui de produzir impactos adversos ou não à saúde, bem-estar e ao ambiente como um todo.

A aplicabilidade da tecnologia diz respeito à complexidade de operação, compreendendo o nível de exigências operacional para manutenção do processo e a mão-de-obra exigida, além dos custos de capital (Capex) e operação (Opex). A difusão diz respeito ao grau de utilização da tecnologia no cenário mundial, em especial para países em desenvolvimento, que poderão servir como elemento balizador ao caso nacional. Os custos englobam o custo de implantação destas usinas e de operação e manutenção.

Os impactos ambientais oriundos da operação das usinas que utilizam as rotas tecnológicas consideradas neste estudo foram analisados sob o ponto de vista dos resultados de estudos realizados por realizado por Dong., et. al. (2018) e Maria (2004). Dong et., al. (20118) utilizou ferramentas da Avaliação do Ciclo de Vida – ACV (*Life Cycle Assessment – LCA*, da sigla em inglês) como parâmetro para percepção da magnitude dos impactos oriundos da implantação destas UREs. A Avaliação (ou Análise) do Ciclo de Vida é uma técnica que estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais (positivos e negativos) ao longo da vida de um produto ou serviço,

desde a extração da matéria-prima até a destinação final²⁸, que, segundo o estudo, é beneficiada pela quantificação destes impactos.

O autor ainda afirma que esta é uma ferramenta que permite obter uma estimativa confiável dos impactos das tecnologias de tratamento térmico de RSU. No entanto, a maior parte dos estudos realizados neste sentido limitam-se ao processo de incineração convencional, dispondo-se assim de um volume maior de dados disponíveis para análise.

O ACV teve como base de dados uma análise teórica das tecnologias de incineração, gaseificação e pirólise, além de estudos de caso de plantas comerciais. As categorias de impactos avaliadas foram divididas em impactos não tóxicos (aquecimento global, acidificação, eutrofização terrestre, formação de ozônio fotoquímico) e tóxicos (toxicidade humana via ar, sólidos e ecotoxicidade via sólidos). A unidade funcional considerada foi 01 tonelada de RSU recebida na planta e a fronteira do projeto compreende o momento que o resíduo entra na usina, o pré tratamento, conversão térmica e a utilização dos produtos produzidos (calor, gás de síntese, cinzas, resíduos).

Os resultados do estudo mostraram que o processo de pirólise e gaseificação, ambos acoplados a uma turbina a gás (ciclo combinado) possuem maior potencial de reduzir os passivos ambientais gerados, devido à maior eficiência de produção de energia destes e a redução da carga de emissões atmosféricas oriunda da combustão do gás de síntese. Além disso, ficou demonstrado que o processo de incineração convencional moderno no momento é superior em relação aos processos de gaseificação e pirólise, e isto se dá devido aos modernos sistemas de tratamento e limpeza dos gases de fluxo, o uso de ciclos combinados de calor e energia, além da reciclagem das cinzas.

Desta maneira, a partir dos resultados expostos na análise supracitada, percebe-se que, mesmo possuindo uma superioridade no que diz respeito à mitigação de impactos ambientais, as tecnologias de pirólise e gaseificação podem ser superadas pela incineração convencional, caso estejam previsto no processo dispositivos de controle de poluição e tratamento dos gases de fluxo gerados dentro do padrão de modernidade do atual estado de arte da tecnologia.

Levando-se em conta o aspecto relacionado à aplicabilidade, segundo Giz (2017) as tecnologias de gaseificação e pirólise não são processos que podem ser considerados

²⁸ Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/consultorias/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>. Acesso em: 14/01/2021.

como simples de se manusear por si só e sua operação requer bom entendimento da composição do resíduo fornecido e sólidos conhecimentos a respeito do processo. Além disso, ainda segundo o mesmo autor um processo de gaseificação e pirólise livre de problemas requer mão de obra altamente especializada. Adicionalmente, o autor considera que, devido à ausência de experiências de sucesso com o tratamento de grandes volumes de RSU em sua forma bruta, estes são indicados como uma opção ao tratamento final de resíduos específicos, como solo contaminado, resíduo dos serviços de saúde, resíduos industriais e comerciais, não sendo portanto recomendados para o tratamento de resíduos sólidos municipais, devido a sua heterogeneidade, e quantidade gerada. Por fim, segundo Dong., et. al. (2018) a heterogeneidade típica do RSU é o principal impeditivo a aplicação dos sistemas a base da tecnologia de pirólise e gaseificação .

No que diz respeito aos custos de implantação e operação das usinas, a tabela abaixo ilustra a composição de custos típica das usinas de aproveitamento energético de RSU que utilizam das rotas tecnológicas estudadas:

Tabela 11: custo de capital e operacional para tecnologias WtE estudadas. Fonte: Siddiqi(2020), Giz (2017)

Tecnologia	Capex (\$/t)	O&M (\$/t)
Incineração	234 – 585	23,4 – 40.95
Gaseificação	624 – 702	35,1 – 46,8
Pirólise	624 – 702	35,1 – 46,8

Pode-se perceber que os custos por tonelada processada de RSU no processo de incineração convencional são menores em comparação ao do processo de gaseificação e pirólise. Isto se dá pela maior exigência técnica e operacional do sistema de aproveitamento energético que tem como base estas duas últimas alternativas. Conforme já mencionado, o processo de incineração convencional de RSU para obtenção de eletricidade se dá de forma mais simples, sem necessidade de pré-tratamento e homogeneização da massa de RSU, uma menor exigência de controle operacional e de temperatura do processo, o que contribui para que o custo total da tecnologia seja inferior frente às demais alternativas tecnológicas analisadas.

Face o exposto, entende-se que a tecnologia mais adequada à aplicação no estudo de caso é a incineração convencional ou *mass burning*, com um sistema acoplado a um

turbina a vapor para geração de energia e com sistema de recuperação de calor. Em resumo, a escolha se dá com base nos seguintes fatores:

1. O processo de incineração é o mais utilizado no mundo, com capacidade instalada para processar mais de 160 milhões de toneladas anuais;
2. Permite o tratamento e a conversão termoquímica dos RSU em sua forma bruta, não exigindo pré-tratamento ou homogeneização da massa de resíduos;
3. Em comparação com a pirólise e gaseificação, possui requisitos técnicos menos exigentes no que diz respeito ao controle do processo, manutenção de equipamentos e qualificação de mão-de-obra;
4. Considerando o sistema de gestão de RSU existente na localidade objeto desta análise, onde existe apenas a coleta do material bruto e destinação ao aterro sanitário, a utilização de tecnologias de pirólise e gaseificação não se mostra adequada²⁹;
5. O processo de incineração é aplicável considerando a geração anual de RSU gerado município a ser processado (entre 50.000 e 100.000 t/ano);
6. A incineração é um processo mais barato se comparado ao demais estudados, sendo mais adequada a aplicação em países em desenvolvimento;
7. Apesar de ser um processo menos eficiente se comparado às demais opções estudadas, se forem previstos mecanismos modernos de limpeza dos gases de fluxo, o uso de ciclos combinados de energia e calor, e reciclagem das cinzas geradas, o processo de incineração poderá ser superior a gaseificação e pirólise.
8. Usinas de gaseificação e pirólise não são indicadas para o tratamento de grandes volumes de resíduos em sua forma bruta.

4.4 Coleta e Tratamento de Dados

A coleta dos dados necessários a elaboração da metodologia proposta, além dos cálculos teóricos propostos tiveram como base pesquisa a bibliografia disponível referente ao assunto. A pesquisa bibliográfica buscou reunir artigos, publicações em periódicos científicos, cartilhas e notas técnicas, planos, políticas e programas dos órgãos públicos nacionais e internacionais, empresas públicas e da iniciativa privada responsáveis gestão, controle e planejamento de projetos e iniciativas relacionadas ao tema, além de teses de doutorado, dissertações de mestrado e trabalhos de conclusão de curso já realizados que tratam dos assuntos aqui discutidos. Cabe citar também como fonte dos dados utilizados neste estudo o levantamento de normas, diretrizes e

²⁹ Giz (2017).

leis em vigor na legislação nacional e internacional que regulam e instituem mecanismos de gestão e o gerenciamento de RSU.

Os dados de entrada a respeito da composição dos RSU gerados no município onde é aplicado o estudo de caso, além dos dados populacionais que permitiram a realização dos cálculos propostos foram obtidos por meio de informações coletadas junto a Prefeitura Municipal de Magé, tanto em seu Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), quanto em trabalhos técnicos contratados pela gestão municipal relacionados a gestão de RSU no município. As estimativas de geração média per capita de RSU teve como base manual para elaboração de projetos de gerenciamento de resíduos sólidos, do Ministério das Cidades. Os parâmetros adotados para o cálculo dos indicadores econômicos aqui analisados, como eficiência, PCI, dentre outros abordados nas seções anteriores, tiveram como base, dentre outros, os trabalhos realizados por Dong., et. al., (2018), CentroClima (2005), Themelis (2004) e IPCC (2001). Os dados de entrada relativos aos parâmetros financeiros considerados levaram em conta os estudos realizados por Sidiqqi (2020), Giz (2017), ABRACEEL (2020), EPE (2014a), EPE (2014b), EPE (2018) e Brito (2013).

O tratamento dos dados foi realizado por meio da aplicação dos cálculos teóricos propostos e interpretação de resultados obtidos na bibliografia consultada, que serviram como base para interpretação dos resultados e elucidação das percepções acerca de sua aplicação de forma que seja possível construir uma base com elementos suficientes para cobrir todos os questionamentos que motivaram a realização do presente trabalho.

5 Resultados e Discussão

5.1 Dados de entrada

5.1.1 Geração de RSU

Conforme já discutido, a geração de RSU é função direta da população da área de estudo no horizonte de projeto e da taxa de geração média per capita de RSU. Os dados de entrada para aplicação da metodologia proposta e obtenção dos resultados estão resumidos na tabela a seguir:

Tabela 12: dados populacionais de entrada. Fonte: IBGE

	<i>Ano</i>	<i>Pop.</i>
<i>0</i>	2000	205830
<i>1</i>	2010	227322
<i>2</i>	2020	246433

A partir destes dados é possível calcular os coeficientes que compõem as equações dos métodos matemáticos propostos. O resultados dos cálculos das projeções estão resumidos na tabela a seguir:

Tabela 13: População estimada considerando os métodos matemáticos propostos.

Ano	População	População Estimada (hab.) (Método)			
	Observada (hab.)	Aritmética	Geométrica	Decrescente	Logística
2000	205830	205830	205830	205830	205830
2010	227322	226131	225218	228229	227322
2020	246433	246433	246433	246433	246432
2021		248463	248661	248054	248198
2022		250493	250909	249642	249936
2023		252523	253178	251197	251646
2024		254553	255468	252720	253329
2025		256583	257778	254212	254984
2026		258613	260109	255674	256611
2027		260644	262461	257105	258211
2028		262674	264834	258507	259783
2029		264704	267229	259881	261327
2030		266734	269645	261226	262844

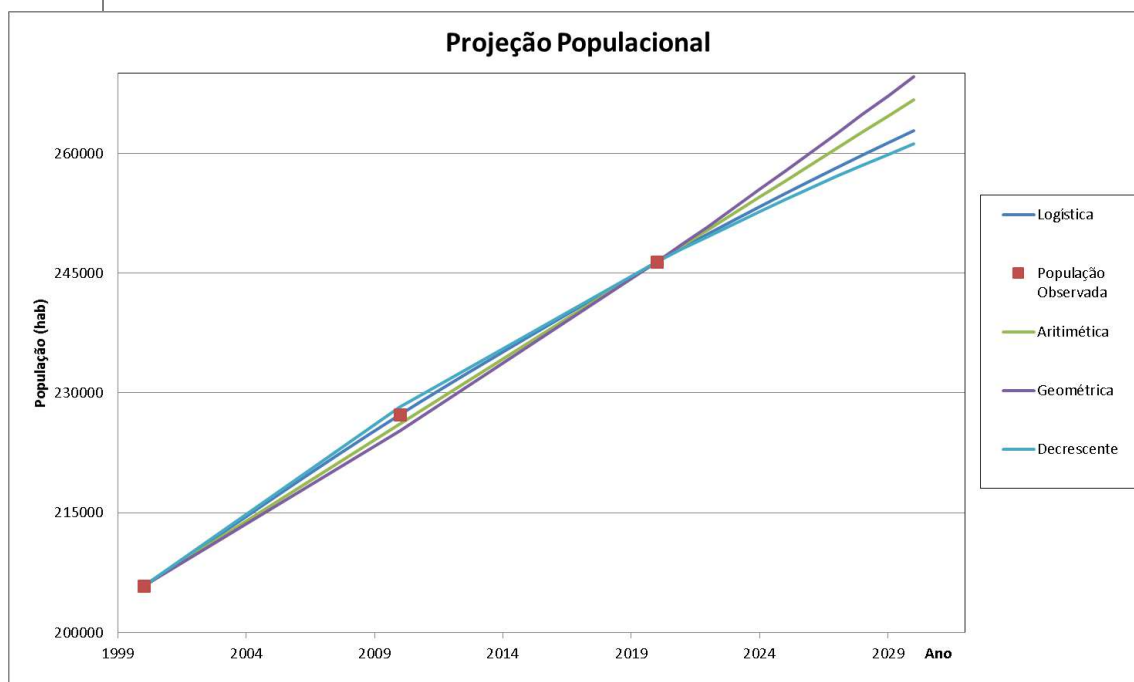


Figura 17: Projeção populacional. Dados medidos e estimados. Elaboração própria.

A comparação gráfica dos resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos matemáticos de projeção populacional permitiu observar que a curva que melhor se ajusta aos dados observados é a do crescimento lógico, devido a sua maior aproximação com os dados censitários, sendo esta portanto aplicada ao análise de regressão não linear.

A análise de regressão não linear permitiu o ajuste dos coeficientes do método previamente calculados matematicamente com o objetivo de reduzir o do resíduo (erro) observado entre os dados estimados e os disponíveis. O resultado do ajuste pode ser observado abaixo:

Nomenclatura	Ano	População		Ano	População
		Observada	Estimada		Estimada
P0	2000	205830	205830	2030	262844
P1	2010	227322	227322	2031	264334
P2	2020	246433	246432	2032	265795
	2021		248198	2033	267230
	2022		249936	2034	268637
	2023		251646	2035	270018
	2024		253329	2036	271371
	2025		254984	2037	272698
	2026		256611	2038	273999
	2027		258211	2039	275273
	2028		259783	2040	276522
	2029		261327		

Figura 18: População estimada pelo método de análise de regressão.

Aplicando a taxa média de geração per capita de RSU de 0,9 kg/hab.dia, função do tamanho da população conforme , a geração anual de RSU estimada para o município no horizonte de projeto pode ser calculada.

Tabela 14: Estimativa da geração de RSU no horizonte de projeto para o Município de Magé. Elaboração própria.

Ano	População Projetada	Geração total de RSU (t/dia)	Ano	População Projetada	Geração total de RSU (t/dia)
2021	248198	223,378	2031	264334	237,901
2022	249936	224,942	2032	265795	239,216
2023	251646	226,481	2033	267230	240,507
2024	253329	227,996	2034	268637	241,773
2025	254984	229,486	2035	270018	243,016
2026	256611	230,950	2036	271371	244,234
2027	258211	232,390	2037	272698	245,428
2028	259783	233,805	2038	273999	246,599
2029	261327	235,194	2039	275273	247,746
2030	262844	236,560	2040	276522	248,870

5.1.2 Potencial de geração de eletricidade

A estimativa do PCI nos dois cenários propostos (com e sem separação de recicláveis), conforme já mencionado, considerou os dados disponíveis da composição gravimétrica do RSU do município de Magé. Os dados de entrada utilizados no cálculo foram os seguintes:

$Y_{combustível}$ - Composição em base seca, constituída por matéria orgânica (15,13%), papel/papelão (16,49%), borracha (0,97%), Plástico (15,52%), têxteis (9,7%);

Y_{H_2O} – Obtida através do teor de umidade da massa de RSU, fixado em 60%;

Y_{vidros} – 0,78%;

Y_{metais} – 2,22%.

Aplicando-se a Equação e considerando o cenário onde toda a massa de RSU é encaminhada para incineração, o PCI calculados foi o seguinte:

$$PCI \left(\frac{kcal}{kg} \right) = \frac{18500 * (0,58) - 2636 * (0,6) - 628 * (0,0078) - 544 * (0,022)}{4,185}$$

$$PCI = 1772 \text{ kcal/kg}$$

Considerando a prévia retirada da fração de materiais metálicos e vidros do material a ser encaminhado ao tratamento térmico, o PCI calculado foi o seguinte:

$$PCI \left(\frac{kcal}{kg} \right) = \frac{18500 * (0,596) - 2636 * (0,6) - 628 * (0) - 544 * (0)}{4,185}$$

$$PCI = 2140 \text{ kcal/kg}$$

Percebe-se a partir dos resultados obtidos que o PCI é aumentado de forma considerável se retirada a fração destes materiais da massa de RSU, provocando um aumento médio de aproximadamente 20%. Considerando os cenários estudados, a capacidade de produção de eletricidade estimada vai de 460 kWh/t, no cenário sem prévia retirada de metais e vidros, para 560 kWh/t no cenário que inclui etapa de triagem prévia.

A tabela a seguir ilustra o potencial de geração de eletricidade nos dois cenários considerados e a capacidade instalada da usina em relação a quantidade de RSU processada.

Tabela 15: Potencial de geração de eletricidade e capacidade instalada nos cenários propostos.

Ano	Com triagem prévia		Sem triagem prévia		Ano	Com Triagem prévia		Sem triagem prévia	
	Produção de eletricidade (MWh/ano)	Cap. Instalada (MW)	Produção de eletricidade (MWh/ano)	Cap. Instalada (MW)		Produção de eletricidade (MWh/ano)	Cap. Instalada (MW)	Produção de eletricidade (MWh/ano)	Cap. Instalada (MW)
2021	32335	5,1	27602	4,3	2031	34437	5,4	29396	4,6
2022	32561	5,1	27795	4,3	2032	34627	5,4	29559	4,6
2023	32784	5,1	27985	4,4	2033	34814	5,4	29718	4,6
2024	33003	5,2	28172	4,4	2034	34997	5,5	29875	4,7
2025	33219	5,2	28356	4,4	2035	35177	5,5	30028	4,7
2026	33431	5,2	28537	4,5	2036	35353	5,5	30179	4,7
2027	33639	5,3	28715	4,5	2037	35526	5,6	30326	4,7
2028	33844	5,3	28890	4,5	2038	35696	5,6	30471	4,8
2029	34045	5,3	29062	4,5	2039	35862	5,6	30613	4,8
2030	34243	5,4	29231	4,6	2040	36025	5,6	30752	4,8

Evidencia-se em consequência disto um aumento do potencial de geração de energia da tecnologia a partir da inclusão de uma processo prévio de triagem da massa de RSU a ser destinada à conversão termoquímica para produção de eletricidade. A partir daí é possível observar

Em referência à bibliografia consultada, os resultados a partir do PCI estimado para a massa bruta de RSU, evidenciam a necessidade de inclusão de uma etapa prévia de pré-tratamento de forma a aumentar o seu poder calorífico, uma vez que o mesmo neste cenário se mostrou insuficiente por si só para manter um processo sustentável de produção de eletricidade ($PCI < 2000 \text{ kcal/kg}$).

Considerando as duas situações analisadas (com e sem a retirada de materiais recicláveis), o PCI obtido foi maior que o mínimo indicado para o processo de incineração se torne viável tecnicamente, portanto, apenas na situação onde ocorre a retirada de materiais recicláveis (vidros e metais) do material a ser destinado ao tratamento térmico.

5.1.3 Estimativa de Receitas

Para o cálculo das receitas anuais oriundas da comercialização da energia elétrica produzida foi considerada uma eficiência de incineração de 22,5% e um consumo próprio da planta de 20% (Dong. et. at., 2018). As receitas oriundas da comercialização da eletricidade produzida, dos créditos de carbono e da taxa a ser cobrada pelo tratamento térmico dos RSU (considerando o exposto nas premissas de cálculo),

portanto, foram calculadas a partir da aplicação das Equações , e . Os resultados para os cenários analisados seguem nas e .

Embora na análise do PCI já tenha sido mostrado que o processo de incineração é dependente neste caso em específico de um procedimento prévio de pré-tratamento da massa de RSU, as estimativas também foram realizadas considerando a aplicação da técnica neste caso, uma vez que a escolha da alternativa tecnológica, como já fora mencionado, não deve estar baseada somente pela estimativa do poder calorífico e, sendo assim, a obtenção dos resultados poderá fornecer dados adicionais a respeito da alternativa mais apropriada considerando os cenários propostos.

Tabela 16: receitas anuais da usina com separação prévia.

Ano	Eletricidade (R\$/ano)		Emissões evitadas (R\$/ano)		Destruição Térmica (R\$/ano)	
2021	R\$	4.985.120,57	R\$	22.652.791,50	R\$	4.467.564,00
2022	R\$	5.020.028,74	R\$	22.811.417,08	R\$	4.498.848,00
2023	R\$	5.054.374,53	R\$	22.967.487,13	R\$	4.529.628,00
2024	R\$	5.088.178,02	R\$	23.121.092,91	R\$	4.559.922,00
2025	R\$	5.121.419,12	R\$	23.272.143,16	R\$	4.589.712,00
2026	R\$	5.154.097,83	R\$	23.420.637,88	R\$	4.618.998,00
2027	R\$	5.186.234,24	R\$	23.566.668,33	R\$	4.647.798,00
2028	R\$	5.217.808,27	R\$	23.710.143,25	R\$	4.676.094,00
2029	R\$	5.248.819,90	R\$	23.851.062,64	R\$	4.703.886,00
2030	R\$	5.279.289,24	R\$	23.989.517,76	R\$	4.731.192,00
2031	R\$	5.309.216,27	R\$	24.125.508,62	R\$	4.758.012,00
2032	R\$	5.338.560,83	R\$	24.258.852,68	R\$	4.784.310,00
2033	R\$	5.367.383,17	R\$	24.389.823,74	R\$	4.810.140,00
2034	R\$	5.395.643,13	R\$	24.518.239,27	R\$	4.835.466,00
2035	R\$	5.423.380,87	R\$	24.644.281,80	R\$	4.860.324,00
2036	R\$	5.450.556,22	R\$	24.767.768,81	R\$	4.884.678,00
2037	R\$	5.477.209,36	R\$	24.888.882,81	R\$	4.908.564,00
2038	R\$	5.503.340,28	R\$	25.007.623,82	R\$	4.931.982,00
2039	R\$	5.528.928,90	R\$	25.123.900,57	R\$	4.954.914,00
2040	R\$	5.554.015,38	R\$	25.237.895,60	R\$	4.977.396,00

Tabela 17: receita oriunda da incineração da massa bruta de RSU (sem separação prévia).

Ano	Eletricidade (R\$/ano)		Emissões evitadas (R\$/ano)		Destruição Térmica (R\$/ano)	
2021	R\$	4.057.464,86	R\$	22.546.400,36	R\$	4.467.564,00
2022	R\$	4.085.877,15	R\$	22.704.280,94	R\$	4.498.848,00
2023	R\$	4.113.831,70	R\$	22.859.617,98	R\$	4.529.628,00
2024	R\$	4.141.344,87	R\$	23.012.502,34	R\$	4.559.922,00
2025	R\$	4.168.400,30	R\$	23.162.843,17	R\$	4.589.712,00
2026	R\$	4.194.998,00	R\$	23.310.640,47	R\$	4.618.998,00

2027	R\$	4.221.154,31	R\$	23.455.985,07	R\$	4.647.798,00
2028	R\$	4.246.852,89	R\$	23.598.786,15	R\$	4.676.094,00
2029	R\$	4.272.093,73	R\$	23.739.043,69	R\$	4.703.886,00
2030	R\$	4.296.893,18	R\$	23.876.848,55	R\$	4.731.192,00
2031	R\$	4.321.251,24	R\$	24.012.200,71	R\$	4.758.012,00
2032	R\$	4.345.135,22	R\$	24.144.918,51	R\$	4.784.310,00
2033	R\$	4.368.594,16	R\$	24.275.274,45	R\$	4.810.140,00
2034	R\$	4.391.595,37	R\$	24.403.086,86	R\$	4.835.466,00
2035	R\$	4.414.171,53	R\$	24.528.537,43	R\$	4.860.324,00
2036	R\$	4.436.289,96	R\$	24.651.444,46	R\$	4.884.678,00
2037	R\$	4.457.983,35	R\$	24.771.989,64	R\$	4.908.564,00
2038	R\$	4.479.251,70	R\$	24.890.172,97	R\$	4.931.982,00
2039	R\$	4.500.078,66	R\$	25.005.903,62	R\$	4.954.914,00
2040	R\$	4.520.496,93	R\$	25.119.363,25	R\$	4.977.396,00

Percebe-se a partir dos resultados obtidos que os mesmos são diretamente afetados pelo processo de separação da fração metálica e de vidros da massa de RSU, do ponto de vista do potencial de produção de eletricidade e emissões evitadas, afetando consequentemente as receitas operacionais estimadas. Como já foi mencionado nas premissas de cálculo que balizaram este estudo, os potenciais ganhos econômicos oriundos da conservação de energia a partir do processo de reciclagem não são computados nesta análise e, sendo assim, pode-se perceber que caso este fator estivesse incluso na abordagem os resultados financeiros anuais poderiam ser ainda maiores.

As receitas oriundas da comercialização dos créditos de carbono, maior fonte de receita observada a partir da operação da URE, também são diretamente afetadas, uma vez que também são em parte função da produção de eletricidade da usina, embora o peso da inclusão do processo de tratamento prévio seja menor neste fonte de receita se comparada a receita obtida na comercialização da eletricidade produzida, por exemplo.

5.2 Indicadores de viabilidade econômica – TIR e VPL

Tendo como base as receitas estimadas e os custos oriundos da implantação e operação da usina, obteve-se o resultado líquido financeiro da aplicação da tecnologia no horizonte de projeto proposto. O lucro líquido em cada período pode ser observado a partir do Fluxo de Caixa, calculado com base nas premissas de cálculo apresentadas no trabalho e nos resultados obtidos na aplicação da metodologia.

O Fluxo de Caixa é função das receitas estimadas e dos custos iniciais de investimento, de operação e manutenção. Os valores iniciais de investimento estimados, além dos

parâmetros da planta, como já dito, são função da capacidade de processamento da usina, esta por sua vez função da massa de RSU gerada ao final do horizonte de projeto considerado. Os parâmetros da planta e o valor inicial de investimento estão resumidos abaixo e foram baseados no trabalhos de Giz (2017), Siddiqi (2020) e Brito (2013), além dos dados da .

Tabela 18: Valores referentes aos custos adotados.

<i>Item</i>	<i>Cenário de investimento</i>
<i>Investimento inicial (R\$)</i>	162.000.000,00
<i>Capacidade máxima (t/a)</i>	100.000
<i>Potência total (MW)</i>	5,6
<i>Disponibilidade (horas/ano)</i>	8000
<i>Custo de O&M (R\$/tRSU)</i>	192,00

A partir dos resultados obtidos em cada período pode-se determinar então o Fluxo de Caixa, que incluem os custos e as receitas em cada período. O resultado para os cenários propostos pode ser observado nas tabelas do Anexo A. Estimadas as entradas e saídas do Fluxo de Caixa em cada período, pode-se então determinar o VPL e a TIR do investimento nos dois cenários propostos. Os resultados encontram-se resumidos na

Tabela 19: resultados do VPL e TIR para os cenários propostos.

<i>Cenário</i>	<i>VPL</i>	<i>TIR</i>
<i>Incineração da massa bruta de RSU</i>	R\$11.135.353,96	9 %
<i>Separação prévia de vidros e metais</i>	R\$13.738.743,83	10%

O VPL estimado nos dois cenários se mostrou positivo, indicando que o investimento pode ser atrativo do ponto de vista financeiro. A TIR também nos dois cenários supera a TMA e, portanto, também reforça a sinalização de atratividade do investimento do ponto de vista financeiro. Esta condição se dá pela forte influência que a comercialização dos créditos de carbono possui no resultado financeiro do empreendimento, que compõe mais da metade da parcela das receitas operacionais.

Cabe destaque neste aspecto o ganho financeiro que a inclusão do processo de reciclagem proporciona ao investimento, aumentando expressivamente o VPL. Isto se dá pelo aumento do potencial de produção de eletricidade, função do PCI aumentado pela retirada de materiais que contribuem negativamente ao conteúdo energético da massa de RSU encaminhado ao tratamento. Além do aumento do potencial de produção de eletricidade, o aumento do potencial de receitas oriundas da comercialização dos

créditos de carbono também tem influência neste aumento expressivo da estimativa do VPL do investimento, uma vez que as emissões evitadas também são função da eletricidade produzida, conforme já discutido na seção que trata da metodologia proposta.

Para análise da taxa mínima a ser cobrada pelo tratamento térmico dos RSU encaminhado ao processo de incineração, a utilização do testes de hipóteses a partir da ferramenta Solver do Microsoft Excel permitiu estimar qual seria o valor mínimo a ser cobrado tal que as receitas operacionais sejam capazes de cobrir todos os custos relacionados ao projeto, mantendo assim a atratividade do investimento ponto de vista financeiro.

Os resultados mostraram que a taxa mínima que pode ser aplicada por tonelada de RSU encaminhado ao tratamento térmico, considerando o estudo de caso proposto, se mostra dentro dos valores que são atualmente cobrados pelas empresas responsáveis pela destinação de RSU , em ambos os cenários propostos. Os valores estimados podem ser observados na .

Tabela 20: taxa mínima de tratamento térmico para os cenários propostos.

<i>Cenário</i>	<i>Taxa de Tratamento Térmico mínima (R\$/tRSU)</i>
<i>Incineração da massa bruta de RSU</i>	43,45
<i>Separação prévia de vidros e metais</i>	39,58

Pode-se perceber que em ambos os casos, a taxa mínima a ser cobrada pelo tratamento térmico tal que todos os custos possam ser cobertos pelas receitas operacionais, aplicadas a TMA do investimento, se encontra dentro da média de preços praticados pelas empresas responsáveis pela serviço de destinação final.

É importante citar que uma taxa adicional referente ao tratamento térmico, em se tratando de um material onde o ônus relativo ao seu correto manejo e destinação final ambientalmente adequada está atribuído à órgãos da administração pública, acabaria por incorrer em custos adicionais repassados a população atendida pelo serviço, que já paga pelos serviços de destinação e manejo destes materiais através de taxas cobradas por estes órgãos. No entanto, os resultados mostram que de certa forma, considerando a ocasião da implantação da tecnologia, este repasse adicional à população relativo ao tratamento do RSU poderia ser evitado, inclusive, acarretando em uma redução de custos no que diz respeito as tarifas pagas pelos órgãos da administração pública à concessionária responsável pelo serviço de distribuição de energia elétrica na região de

aplicação do estudo de caso, relacionadas à execução de serviços da própria administração e gestão pública.

Isto pode ser explicado pelo fato de que, caso somados os valores obtidos por unidade de eletricidade (MWh) fornecida à rede pela usina, considerando a taxa de tratamento térmico e o valor normativo considerado de comercialização da energia elétrica no mercado livre, ainda assim este valor total seria consideravelmente inferior as tarifas atualmente praticadas pelas concessionárias responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica aos órgãos da administração pública. As tabelas a seguir ilustram tal quadro.

Tabela 21: receita mínima oriunda do tratamento térmico e eletricidade produzida fornecida à rede.

Fonte de receita	Com triagem prévia	Sem triagem prévia
Taxa de Tratamento Térmico mínima (R\$/MWh)	93,73	70,72
Valor Normativo (R\$/MWh)	184,00	184,00
Valor Total (R\$/MWh)	277,73	254,72

Tabela 22: tarifa média por classe de consumo (09/2020). Empresa: ENEL RJ. Fonte: ANEEL³⁰

Classe de Consumo	Tarifa média de fornecimento (R\$/MWh)	
	Sem Imposto	Com imposto (PIS, COFINS e ICMS)
Iluminação Pública - IP	375,25	594,76
Poder Público – PP	667,61	990,64
Serviço Público (água, saneamento, esgoto)	479,94	763,33

A tabelas acima permitem comparar os valores das tarifas médias praticadas pela empresa responsável pelo serviço de distribuição e fornecimento de energia elétrica à serviços da administração pública na área onde é aplicado o estudo de caso (ano de 2020) e a tarifa que poderia ser paga pela aquisição da energia produzida pela usina, incluindo o valor normativo da eletricidade e a tarifa referente ao MWh de eletricidade produzida em virtude do tratamento térmico dos RSU.

Considerando as classe de consumo abordadas, o valores atualmente praticados e estabelecendo um comparativo entre a receita que poderia ser obtida pela usina por Megawatt-hora (considerando a própria produção de eletricidade da usina e a taxa mínima de tratamento térmico), percebe-se que mesmo quando se consideram valores sem a incidência de impostos, a tarifa média que poderia ser praticada pela usina à

³⁰ Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita> >. Acesso em: 07/04/2021, às 18:46 hrs.

estes órgãos ainda é inferior ao valor que é adotado pela concessionária de energia elétrica local pelo fornecimento e distribuição de eletricidade para serviços da administração pública.

Visto isto, o eventual custo adicional praticado pela usina e que poderia ser pago pelo destinador (neste caso, a própria administração pública) estaria internalizado ao valor pago pelo Megawatt-hora de eletricidade adquirida diretamente junto à usina, evitando assim este eventual repasse de uma taxa adicional, relativa ao tratamento térmico, à população afetada pelo serviço. Este é um cenário que pode promover positivamente a adoção desta técnica ainda sob uma perspectiva política, considerando o atual quadro de maior aceitabilidade desta frente à população e órgãos de fiscalização e controle, além da ausência de um ônus adicional sob esta perspectiva do custo do tratamento térmico, o que poderia desencadear em um eventual desgaste da gestão pública perante à população,

Além disso, a opção pela compra de eletricidade oriunda da própria usina pela administração pública oferecia uma alternativa para redução de custos no que diz respeito ao consumo de energia elétrica suficiente ao atendimento da demanda destes serviços. Portanto, a depender da demanda de consumo de eletricidade dos órgãos da gestão pública pelos serviços utilizados nesta comparação, toda esta poderia ser suprida pela própria usina, sob um custo consideravelmente menor ao que é atualmente praticado, possibilitando uma redução de gastos e alinhamento da gestão à um consumo de energia de base sustentável.

Sendo assim, a partir dos resultados obtidos é possível perceber que o valor mínimo para cobrir o lastro compreendido entre as receitas oriundas da operação da usina e seus custos de operação e manutenção fortalece um cenário de aplicação do investimento sem necessidade de repasse deste custo adicional a população pelo tratamento térmico dos resíduos encaminhados ao aproveitamento energético. No entanto, considerando que os valores obtidos são fatores de variáveis que possuem alta volatilidade nos seus preços de mercado, como o preço da eletricidade e da tonelada de CO₂ evitado, evidencia-se a necessidade de uma análise do ponto de vista de quais seriam os valores mínimos tais que o investimento ainda assim pode ser atrativo do ponto de vista financeiro dentro do contexto apresentado.

Caso sejam mantidos os preços de comercialização da eletricidade produzida e a taxa de tratamento térmico a ser cobrada pelo responsável pela operação da usina, considerando o cenário que prevê a queima bruta da massa de RSU, uma pequena

desvalorização do valor de mercado do crédito de carbono (acima de 2%) já é capaz de colocar em risco a viabilidade econômica do empreendimento. No cenário que prevê prévia separação da fração de vidros e metais é ainda admitida uma desvalorização do ativo de 6,5%. Isto reforça a hipótese da forte dependência que a viabilidade do empreendimento possui em relação aos preços de um ativo que possui um elevado grau de risco, conforme já discutido. Além disso, tal fato indica que é provável que, em cenários de forte desvalorização do ativo, ocorra a necessidade de que sejam praticados preços mais elevados pelo tratamento térmico do RSU, acima daqueles praticados na operação de aterros sanitários. Para fins de exemplo, uma desvalorização de 20% no ativo provocaria a necessidade de um aumento de 133% na taxa de destruição térmica para o caso da incineração da massa bruta de RSU e de 110% no caso da incineração com pré-tratamento para que o empreendimento continue sendo atrativo do ponto de vista financeiro para o estudo de caso analisado, considerando um preço fixo de comercialização da eletricidade.

Por fim, os resultados mostram que a implantação da usina considerando o estudo de caso proposto e as premissas de cálculo consideradas na metodologia proposta pode ser viável sob o ponto de vista financeiro, no entanto esta viabilidade pode ser fortemente influenciada positivamente ou negativamente por fatores tais como:

1. O preço de comercialização do crédito de carbono;
2. O preço de comercialização da eletricidade produzida;
3. Valor do câmbio;
4. Os custos incorridos na certificação do projeto no MDL e aquisição do imóvel;
5. A composição gravimétrica do RSU típico da região onde se pretende instalar o empreendimento;
6. A taxa de tratamento térmico a ser cobrada pelo ente responsável pela operação da usina;
7. A previsão ou não de uma etapa de pré-tratamento que permita a triagem do RSU a ser processado, com a separação de recicláveis.

6 Conclusão

Diante da presente análise, que buscou fornecer uma referência metodológica para análise da aplicação da tecnologia de aproveitamento energético de resíduos através de Usinas de Recuperação Energética, com a apresentação de um estudo de caso que fosse capaz de apresentar elementos suficientes para aproximar os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia a realidade exposta, a fim de que estes possam

servir de base para a elaboração de projetos e trabalhos futuros e contribuir para o desenvolvimento da pesquisa científica acerca da temática abordada, tem-se que, sob o ponto de vista econômico e ambiental a tecnologia possui capacidade de apresentar retornos aceitáveis dentro de determinado um cenário econômico.

Como fora discutido, em análise ao atual estado da arte das tecnologias analisadas nesta pesquisa, aquela que mais se adequa ao tratamento térmico do resíduo sólido típico dos centros urbanos e, sendo assim, a escolhida para aplicação do estudo de caso é a incineração convencional. Embora esta tecnologia possa ser superada em termos de eficiência, produção de eletricidade e, portanto, de mitigação de impactos ambientais em comparação com as tecnologias de pirólise e gaseificação, esta superioridade hoje, segundo revisão bibliográfica, pode ser compensada devido à utilização de modernos sistemas de limpeza de gases, de sistemas combinados de calor e energia e de reciclagem de cinzas.

Além disso, a tecnologia de incineração convencional *mass burning* é a mais difundida no cenário mundial e possui os menores custos de implantação e operação se comparada às alternativas estudadas.

Adicionalmente, a revisão bibliográfica mostrou que a tecnologia é ainda a mais indicada para o processamento de grandes volumes de resíduo, além de dispensar pré-tratamento e homogeneização da massa, procedimentos indispensáveis ao processo de gaseificação e pirólise. Estes fatores traduzem simplicidade ao processo, que por sua vez indicam menor exigência de qualificação técnica e custo sem que seja comprometida a capacidade de mitigação de impactos ambientais oriundas da operação de formas comuns de destinação de RSU e da produção de energia a partir de fontes fósseis.

Diante dos cenários propostos, o estudo de caso mostrou que a implantação da tecnologia como alternativa à destinação de RSU no município de Magé pode ser atrativa do ponto de vista econômico e ambiental. Na dimensão ambiental, ela se apresenta como um elemento mitigador dos impactos oriundos da operação do aterro sanitário atualmente em operação, contribuindo para o aumento da sua vida útil e reduzindo, portanto, a pressão sobre a necessidade de novas áreas para a implantação de novos aterros mediante crescente de geração de RSU na região para o período em análise. Reforçam este quadro a tendência de crescimento da população mediante resultados da aplicação do modelo de projeção populacional realizado para obtenção dos dados de entrada para realização dos cálculos teóricos.

O resultado da análise dos indicadores de viabilidade econômica mostrou que, embora tecnicamente a aplicação da tecnologia seja dependente de uma etapa prévia de tratamento para elevação do poder calorífico inferior da massa de resíduos destinadas à conversão termoquímica, a incineração bruta da massa de RSU é capaz de se mostrar atrativa do ponto de vista econômico, apresentando VPL >0 e TIR superior à taxa de desconto aplicada. No entanto, a aplicação de uma etapa prévia de separação de materiais recicláveis (vidro e metais) da massa de RSU a ser incinerada se mostrou capaz de aumentar consideravelmente os valores estimados do VPL e afastou a TIR da TMA, sendo portanto uma opção mais adequada para aplicação da tecnologia do ponto de vista financeiro. Adicionalmente, embora a inclusão do processo de triagem prévia para retirada de vidros e metais seja somente analisado do ponto de vista do potencial de produção de eletricidade, mostrou-se que esta etapa possui também potencial de conservação de energia (aproximadamente 1,2 kWh/kg), que pode ser comercializada, contribuindo positivamente para a estimativa do resultado financeiro da implantação da tecnologia, sendo portanto um fator que, embora não computado na análise, reforça a necessidade de inclusão desta etapa no processo. Cabe destacar também, com inclusão da etapa de triagem, o estímulo a cadeia produtiva da reciclagem, a qualificação de obra e criação de empregos diretos e indiretos.

Com o objetivo de fornecer elementos adicionais que reforcem a análise, o estudo mostrou que, do ponto de vista da taxa a ser cobrada pelo tratamento térmico, o valor mínimo a ser aplicado tal que as receitas operacionais obtidas sejam capazes de cobrir todos os custos incorridos na implantação e operação do projeto é próximo aos valores de mercado atualmente adotados para destinação do RSU coletado. Este resultado mostra ainda que a aplicação da alternativa tecnológica no estudo de caso proposto não necessariamente poderá incorrer em taxas repassadas à população atendida pelo tratamento térmico. Portanto, sob a ótica de empreendimentos da gestão pública, por exemplo, não ocorreria a necessidade da aplicação de uma taxa de tratamento térmico adicional àquelas já adotadas para o correto manejo e destinação final do RSU coletado na região de aplicação do estudo de caso, para o caso da contratação da energia elétrica oriunda da operação da usina para atendimento da demanda dos serviços da administração. Os resultados mostraram que valores aplicados considerando o ambiente de contratação livre e a taxa mínima de tratamento térmico capaz de cobrir os custos inerentes à implantação, operação e manutenção da usina somados são inferiores às tarifas médias aplicadas pela distribuidora local para o fornecimento e distribuição de eletricidade, para o caso de serviços da administração pública.

Embora os resultados desta pesquisa mostrem que a aplicação da tecnologia possui a capacidade de gerar retorno financeiro positivo, além do potencial de mitigação dos impactos ambientais já discutidos, cabe destacar a forte dependência que estes resultados têm com variáveis de alta volatilidade de preços praticados em seus respectivos mercados, em especial ao valor do crédito de carbono.

Para o estudo de caso abordado, fica evidente que uma pequena variação no valor de mercado do ativo já é suficiente para colocar em risco a viabilidade econômica do empreendimento, principalmente para o caso onde os RSU são incinerados em sua forma bruta. Isto pode levar a necessidade de aplicação de taxa mais elevadas a serem cobradas pelo tratamento térmico do RSU tais que ainda sejam capazes de cobrir todos os custos relacionados ao projeto.

Uma vez que a viabilidade do empreendimento é fortemente ligada ao valor de mercado de um ativo de alto risco e volatilidade, este risco pode ser transferido para o investimento, ainda que os resultados mostrem que este possui potencial retorno financeiro e potencial mitigador de impactos ambientais comuns da gestão de RSU. Sendo assim, entende-se que este estudo pode servir como uma base preliminar para um aprofundamento acerca relação entre o risco que a aplicação da tecnologia possui frente a variação dos preços praticados no mercado das fontes de receitas possíveis a partir de sua aplicação.

O estudo proposto mostrou que a tecnologia de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos, considerando os processos de incineração convencional, pirólise e gaseificação, além do estudo de caso proposto para um município que guarda estreitas relações com o atual panorama dos RSU de maior parte dos centros urbanos brasileiros, possui potencial atrativo econômico e ambiental para se firmar como uma alternativa adequada a gestão de RSU. No entanto, o presente trabalho também evidenciou a necessidade da realização de pesquisas complementares a fim de fornecer maior sustentação aos resultados obtidos. Assim, poderá a pesquisa científica contribuir e estimular de maneira significativa a adoção de técnicas que contribuam para os objetivos, metas estabelecidas no cenário nacional no que diz respeito à gestão ambientalmente adequada de RSU, de geração de energia por fontes alternativas e sustentáveis, de redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, do estímulo a cadeia produtiva da reciclagem e ao desenvolvimento sustentável.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Diante da realização do presente trabalho, a pesquisa levantou alguns questionamentos que, para fins de simplificação do modelo ou mesmo que estes pudessem oferecer um volume de informações que poderiam ultrapassar os objetivos e as metas da análise proposta e da metodologia apresentada, não foram abordados de forma aprofundada. Sendo assim, esta seção busca fornecer sugestões, dentro da temática proposta, que possam servir como elemento de entrada para a realização de trabalhos futuros, uma vez que é objetivo do mesmo contribuir para a pesquisa científica e para o melhor conhecimento acerca da difusão da tecnologia no cenário nacional. Diante disto, abaixo seguem as sugestões elaboradas com base nos questionamentos e nas necessidades identificadas no decorrer da elaboração desta análise, sendo elas:

- Estudar a influência que a variação dos preços da eletricidade e dos créditos de carbono possuem na atratividade do empreendimento, avaliando economicamente o empreendimento sob a ótica da sazonalidade dos preços da comercialização das fontes de receita, considerando os mecanismos de comercialização disponíveis no mercado e o marco regulatório.
- Avaliar a influência da reciclagem nas receitas e na análise dos indicadores de viabilidade econômica.
- Estudar a possibilidade de inclusão de operações consorciadas com municípios vizinhos para aumento das receitas e diluição de custos, além da possibilidade de oferecer uma alternativa à gestão de RSU de uma região e não apenas de um município.
- Avaliar economicamente o empreendimento considerando outras opções de financiamento, de forma a reduzir os encargos fornecendo elementos adicionais a possibilidade de retorno real do investimento.
- Analisar os potenciais ganhos econômicos oriundos da comercialização das cinzas no mercado da construção civil e agrícola;
- Analisar a tecnologia sob a perspectiva de contratação da eletricidade produzida em outros mercados, com base em Valores de Referência Específico – VRE, mecanismos de compensação sob a perspectiva da mini geração distribuída (Resolução ANEEL nº 482/20112).
- Avaliar a contribuição da difusão da tecnologia considerando a possibilidade do fortalecimento da rede de abastecimento, atendimento de demanda futura sob a perspectiva da eletromobilidade no cenário nacional, abordando sobretudo

uma análise dos custos relativos à substituição frente à fontes fósseis de combustíveis.

7 Referências Bibliográficas

ABNT, 2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Classificação de Resíduos Sólidos. NBR 10.004.

ABRELPE, 2019. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 25 de novembro de 2020, 11:08:11.

ARENA, U. “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification”, a review. *Waste Management* (2012), v. 32, Issue 4. pp. 625-639, Caserta, Italia. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 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*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. *Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm.

BRITO, A, P., 2013, *Análise Econômica Preliminar Da Implantação De Incinerador De Resíduos Sólidos Urbanos Na Região De Bauru*. Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Bauru, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91722>>. Acesso em: 6 de novembro de 2020, 16:53:21.

CENTRO DE ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE O MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS – CENTRO CLIMA. *Projeto do mecanismo de desenvolvimento limpo. Usina verde: Incineração de resíduos sólidos urbanos, com carga de composição similar ao RDF, evitando emissão de metano e promovendo geração de eletricidade para autoconsumo*. Rio de Janeiro, rev. 02, anexo 02, 2005. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_desenvolvimende_limp/submetidos/aprovados termos_resolucao_1/publicacoes/27/Documento-de-Concepcao-do-Projeto.pdf.

CHEN, Y. “Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology”, *Journal of Cleaner Production* 192 (2018). pp. 262-269, Taipei, Taiwan. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.260>.

CNI, 2019. *Recuperação Energética de Resíduos Sólidos: um guia para tomadores de decisão*. Confederação Nacional da Indústria – CNI. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2019/4/recuperacao-energetica-de-residuos-solidos-um-guia-para-tomadores-de-decisoes/>. Acesso em: 17 de julho de 2020, 14:56:58.

DONG, et. al. “Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants”. *Science of the Total Environment* 626 (2018). pp. 744-753, Albi Cedex, França. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Série Recursos Energéticos*. Nota Técnica DEN 06/08. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/mme_epe_aproveitamento_rsu_ms.pdf.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Série Recursos*

Energéticos. Nota Técnica DEA 16/14. Rio de Janeiro, 2014a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2016%20-%20%20Economicidade%20e%20Competitividade%20do%20Aproveitamento%20Energético%20d%5B1%5D.pdf>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Série Recursos Energéticos*. Nota Técnica DEA 18/14. Rio de Janeiro, 2014b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>.

GESELLCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT – GIZ. “*Waste-To-Energy Options In Municipal Solid Waste Management – A guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*”, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322772063_Waste-to-Energy_Options_in_Municipal_Solid_Waste_Management_A_Guide_for_Decision_Makers_in_Developing_and_Emerging_Countries. Acesso em: 5 de novembro de 2020, 15:45:47.

HARAGUCHI, M., et. al. “Stochastic cost-benefit analysis of urban waste-to-energy systems”, *Journal of Cleaner production* (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.099>. Acesso em: 26 de outubro de 2020, 16:54:07.

HENRIQUE, R. M., 2004, *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: uma abordagem metodológica*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <<http://antigo.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/rachelh.pdf>>. Acesso em: 3 de dezembro de 2020, 14:15:21:00.

LADEIRA, N. C. *Estudo prospectivo de tecnologias para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 122p. Dissertação de M.Sc., Escola de Química, 2013.

MACHADO. C. F., 2015, *Incineração: Uma Análise do Tratamento Térmico dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru/SP*. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em:

<http://monografias.poli.ufri.br/monografias/monopoli10013010.pdf>. Acesso em: 7 de julho de 2020, 14:57:00.

MAMADE, M, C, S., 2013, *Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em:

<
http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265334/1/Mamede_MauricioCubadosSantos_M.pdf>. Acesso em: 11 de novembro de 2020, 15:26:14.

MARIA, F, D. “Life cycle assessment of waste to energy micro-pyrolysis system: Case study for an Italian town.” *International Journal of Energy Research* 28 (2004). pp 449-461. Perugia, Itália. doi: <10.1002/er.977>.

MILLER, L, N, P, S. *Potencial De Usinas Waste-To-Energy No Nordeste Brasileiro: Projeção e Análise Comparativa De Impactos Na Esfera Ambiental E No Setor Energético*. Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 18, n. 4, p. 1374-1397, 2018. Disponível em: < <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2975>>. Acesso em: 6 de janeiro de 2021, 14:30:58.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. *Elaboração de Projetos de Engenharia e Estudos Ambientais de Obras e Serviços de Infraestrutura de Sistemas Integrados de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos*. Termo de Referência Geral. 2009. Disponível em:

NASCIMENTO NETO, P. MOREIRA, T, A. *Política nacional de resíduos sólidos – reflexões a cerca do novo marco regulatório nacional*. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 15, 2010. Disponível em: http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/rbciamb/PDFs/15-04_RBCIAMB-N15-Mar-2010-Materia02_artigos225.pdf. Acesso em: 27 de novembro de 2020, 14:45:18.

OLIVEIRA, D, E, P., et. al. *Análise de Potencial da Produção de Energia a Partir da Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de São Paulo*. Interciência, vol. 43, n. 11, 2018. Disponível em: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/339/33957918007/html/index.html#:~:text=Os%20resultados%20obtidos%20indicaram%20que,155%C3%97106%2Fano>. Acesso em: 2 de setembro de 2020, 14:04:46.

PLASTIVIDA; ABRELPE, 2012. *Recuperação Energética, Resíduos Sólidos Urbanos*. Caderno Informativo. Plastivida – Instituto Sócio-ambiental dos plásticos. ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MAGÉ, 2015a. *Vazadouro de Bongaba – Magé/RJ. Projeto Básico de Recuperação Ambiental, Versão Preliminar*. Magé, Rio de Janeiro.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MAGÉ. 2015b. *Vazadouro de Bongaba – Magé/RJ. Ensaios Executados*. Magé, Rio de Janeiro.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MAGÉ, 2013. *Plano Municipal de Saneamento Básico – Água e Esgoto de Magé*. Relatório R10 – Relatório Final Consolidado – Versão Final (após audiência pública), RL-12027-PLD-SAN-EVT-003, Magé, Rio de Janeiro.

SIDDIQI, A., et. al. “Urban waste to energy recovery assessment simulations for developing countries”, *World Development*, v. 131 (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104949>. Acesso em: 17 de julho de 2020, 14:57:01.

STENTEC, 2011. “Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices”, *Stantec Consulting Ltd*. Disponível em: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/waste-management/garbage/bcmoeewteemissionsrevmar2011.pdf>. Acesso em: 17 de julho de 2020, 14:56:55.

THEMELIS N, J. 2003. “An overview of the global waste-to-energy industry”. *Waste Management. World*. pp. 40-47. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292745689_An_overview_of_the_global_waste-to-energy_industry.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO – TCE-ES. *Orientações para Elaboração do Projeto Básico de Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos* (2018). Disponível em: https://www.mpc.es.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/20190805-MANUAL_RESIDUOS_SOLIDOS.pdf.

PRO-SINOS, 2014. *Elaboração dos Planos Municipais e Regional de Saneamento Básico dos Municípios do Consórcio Pró-Sinos, Produto 3, Prognóstico de Alternativas, Objetivos e Metas. Tomo 3 – Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos, Revisão 0*. Disponível em:

http://www.saoleopoldo.rs.gov.br/download_anexo/SLEO_3_T4_rev0.pdf. Acesso em: 26 de outubro de 2020, 16:54:55.

TEIXEIRA, E, M, L, C., *et al.*, *Mercado de Créditos de Carbono*. 2010. Disponível em: http://www.infobibos.com /Artigos/2010_2/CreditoCarbono/index.htm. Acesso em: 4 de novembro de 2020, 15:45:46.

VON SPERLING, M. 2014. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Minas Gerais. Editora UFMG. 4 ed., 472 p. Disponível em: <<https://www.etg.ufmg.br/wp-content/uploads/2018/09/tim1-2018-2-estudos-populacionais-texto-apoio.pdf>>. Acesso em: 20 de outubro de 2020, 16:55:58.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2009. *Termo geral de referência. Elaboração de Projetos de Engenharia e Estudos Ambientais de Obras e Serviços de Infraestrutura de Sistemas Integrados de Destinação Final de Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/11_TRProjRSU_Geral2010_2011.pdf>. Acesso em: 26 de outubro de 2020, 16:54:30.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2001. “*Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*”. Disponível em: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>.

8 Anexos

ANEXO A – Resultados do Fluxo de Caixa para o Estudo Proposto

Cenário – Incineração da massa bruta.

Ano	Receita Operacional Anual Estimada			Despesas		Fluxo de Caixa Livre
	Venda da Energia	Créditos de Carbono	Destruição térmica	Operacionais	Investimento	
0					R\$ 162.600.000,00	-R\$ 162.600.000,00
1	R\$ 4.057.464,86	R\$ 22.546.400,36	R\$ 4.467.564,00	R\$ 14.286.376,16		R\$ 11.751.189,88
2	R\$ 4.085.877,15	R\$ 22.704.280,94	R\$ 4.498.848,00	R\$ 14.386.416,13		R\$ 12.034.248,92
3	R\$ 4.113.831,70	R\$ 22.859.617,98	R\$ 4.529.628,00	R\$ 14.484.844,42		R\$ 1.895.808,67
4	R\$ 4.141.344,87	R\$ 23.012.502,34	R\$ 4.559.922,00	R\$ 14.581.718,57		R\$ 1.653.685,96
5	R\$ 4.168.400,30	R\$ 23.162.843,17	R\$ 4.589.712,00	R\$ 14.676.981,03		R\$ 1.589.712,30
6	R\$ 4.194.998,00	R\$ 23.310.640,47	R\$ 4.618.998,00	R\$ 14.770.631,80		R\$ 1.329.869,27
7	R\$ 4.221.154,31	R\$ 23.455.985,07	R\$ 4.647.798,00	R\$ 14.862.728,44		R\$ 1.204.327,90
8	R\$ 4.246.852,89	R\$ 23.598.786,15	R\$ 4.676.094,00	R\$ 14.953.213,39		R\$ 1.111.856,19
9	R\$ 4.272.093,73	R\$ 23.739.043,69	R\$ 4.703.886,00	R\$ 15.042.086,65		R\$ 827.531,13
10	R\$ 4.296.893,18	R\$ 23.876.848,55	R\$ 4.731.192,00	R\$ 15.129.405,78		R\$ 765.656,18
11	R\$ 4.321.251,24	R\$ 24.012.200,71	R\$ 4.758.012,00	R\$ 15.215.170,77		R\$ 618.947,65
12	R\$ 4.345.135,22	R\$ 24.144.918,51	R\$ 4.784.310,00	R\$ 15.299.266,52		R\$ 373.022,65
13	R\$ 4.368.594,16	R\$ 24.275.274,45	R\$ 4.810.140,00	R\$ 15.381.865,69		R\$ 274.451,49
14	R\$ 4.391.595,37	R\$ 24.403.086,86	R\$ 4.835.466,00	R\$ 15.462.853,17		R\$ 99.092,18
15	R\$ 4.414.171,53	R\$ 24.528.537,43	R\$ 4.860.324,00	R\$ 15.542.344,09		-R\$ 45.075,92
16	R\$ 4.436.289,96	R\$ 24.651.444,46	R\$ 4.884.678,00	R\$ 15.620.223,31		-R\$ 137.822,98
17	R\$ 4.457.983,35	R\$ 24.771.989,64	R\$ 4.908.564,00	R\$ 15.696.605,96		-R\$ 338.060,58
18	R\$ 4.479.251,70	R\$ 24.890.172,97	R\$ 4.931.982,00	R\$ 15.771.492,04		-R\$ 439.317,57
19	R\$ 4.500.078,66	R\$ 25.005.903,62	R\$ 4.954.914,00	R\$ 15.844.823,99		-R\$ 538.364,02
20	R\$ 4.520.496,93	R\$ 25.119.363,25	R\$ 4.977.396,00	R\$ 15.916.716,93		-R\$ 664.463,19

Cenário – com pré-tratamento (separação prévia de vidros e metais)

Ano	Receita Operacional Anual Estimada				Despesas		Fluxo de Caixa Livre
	Venda da Energia	Créditos de Carbono	Destruição térmica		Operacionais	Investimento	
0						R\$ 162.600.000,00	-R\$ 162.600.000,00
1	R\$ 4.985.120,57	R\$ 22.652.791,50	R\$	4.467.564,00	R\$ 14.286.376,16		R\$ 12.785.236,73
2	R\$ 5.020.028,74	R\$ 22.811.417,08	R\$	4.498.848,00	R\$ 14.386.416,13		R\$ 13.075.536,66
3	R\$ 5.054.374,53	R\$ 22.967.487,13	R\$	4.529.628,00	R\$ 14.484.844,42		R\$ 2.944.220,64
4	R\$ 5.088.178,02	R\$ 23.121.092,91	R\$	4.559.922,00	R\$ 14.581.718,57		R\$ 2.709.109,68
5	R\$ 5.121.419,12	R\$ 23.272.143,16	R\$	4.589.712,00	R\$ 14.676.981,03		R\$ 2.652.031,10
6	R\$ 5.154.097,83	R\$ 23.420.637,88	R\$	4.618.998,00	R\$ 14.770.631,80		R\$ 2.398.966,51
7	R\$ 5.186.234,24	R\$ 23.566.668,33	R\$	4.647.798,00	R\$ 14.862.728,44		R\$ 2.280.091,09
8	R\$ 5.217.808,27	R\$ 23.710.143,25	R\$	4.676.094,00	R\$ 14.953.213,39		R\$ 2.194.168,67
9	R\$ 5.248.819,90	R\$ 23.851.062,64	R\$	4.703.886,00	R\$ 15.042.086,65		R\$ 1.916.276,25
10	R\$ 5.279.289,24	R\$ 23.989.517,76	R\$	4.731.192,00	R\$ 15.129.405,78		R\$ 1.860.721,45
11	R\$ 5.309.216,27	R\$ 24.125.508,62	R\$	4.758.012,00	R\$ 15.215.170,77		R\$ 1.720.220,59
12	R\$ 5.338.560,83	R\$ 24.258.852,68	R\$	4.784.310,00	R\$ 15.299.266,52		R\$ 1.480.382,43
13	R\$ 5.367.383,17	R\$ 24.389.823,74	R\$	4.810.140,00	R\$ 15.381.865,69		R\$ 1.387.789,79
14	R\$ 5.395.643,13	R\$ 24.518.239,27	R\$	4.835.466,00	R\$ 15.462.853,17		R\$ 1.218.292,35
15	R\$ 5.423.380,87	R\$ 24.644.281,80	R\$	4.860.324,00	R\$ 15.542.344,09		R\$ 1.079.877,80
16	R\$ 5.450.556,22	R\$ 24.767.768,81	R\$	4.884.678,00	R\$ 15.620.223,31		R\$ 992.767,63
17	R\$ 5.477.209,36	R\$ 24.888.882,81	R\$	4.908.564,00	R\$ 15.696.605,96		R\$ 798.058,60
18	R\$ 5.503.340,28	R\$ 25.007.623,82	R\$	4.931.982,00	R\$ 15.771.492,04		R\$ 702.221,86
19	R\$ 5.528.928,90	R\$ 25.123.900,57	R\$	4.954.914,00	R\$ 15.844.823,99		R\$ 608.483,17
20	R\$ 5.554.015,38	R\$ 25.237.895,60	R\$	4.977.396,00	R\$ 15.916.716,93		R\$ 487.587,61