



Estudo de alternativas para a gestão de
resíduos orgânicos da cidade do Rio de
Janeiro

Bruno de Oliveira Mattos
Lucas Oliveira Amim

Projeto Final em Engenharia Química e
Engenharia de Bioprocessos

Orientador:

D.Sc. Prof. Fábio de Almeida Oroski

Julho de 2022

Estudo de alternativas para a gestão de Resíduos Orgânicos da cidade
do Rio de Janeiro

Bruno de Oliveira Mattos

Lucas Oliveira Amim

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de
Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de
Engenheiro Químico e Engenheiro de Bioprocessos.

Aprovado por:

Aprovado por:

Flavia Chaves Alves, D.Sc.

Maristela Fujimoto, M.Sc.

Orientado por:

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Julho de 2022

Mattos, Bruno; Amim, Lucas

Estudo de alternativas para a gestão de resíduos orgânicos da cidade do Rio de Janeiro/
Bruno de Oliveira Mattos, Lucas Oliveira Amim - Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2022.

x, 126 p.; il.

(Projeto Final em Engenharia Química e Engenharia de Bioprocessos) – Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2022.

Orientadores: Fábio de Almeida Oroski

1. Geração de RSU. 2. Gestão de RSU da cidade do Rio de Janeiro. 3. Biometanização de
resíduos orgânicos. 4. Projeto de Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ) 5. Fábio de
Almeida Oroski I. Estudo de alternativas para a gestão de Resíduos Sólidos Urbanos da
cidade do Rio de Janeiro

Dedicatórias

Aos nossos pais e avós

Agradecimentos

Primeiramente, queremos agradecer ao professor Fábio pelo incentivo, contribuições e conversas durante a elaboração desse trabalho, muito obrigado por nos confiar as rédeas do trabalho e sempre se mostrar pronto a ajudar quando necessário.

Também aos nossos pais e avós por toda ajuda, que sempre nos motivaram e puderam prover de tudo que fosse possível para nos ajudar durante essa caminhada.

Aos amigos, principalmente os que fizeram parte da nossa jornada na graduação, sempre presentes para nos apoiar em momentos difíceis. Estes foram essenciais para tornar a jornada da graduação mais divertida e tranquila.

A todos os profissionais envolvidos no programa de graduação da Escola de Química.

A todos os pesquisadores referenciados neste trabalho, sem a pesquisa deles, este trabalho não seria concretizado.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico e de Engenheiro de Bioprocessos.

Estudo de alternativas para a gestão de resíduos orgânicos da cidade do Rio de Janeiro

Bruno de Oliveira Mattos
Lucas Oliveira Amim

Julho, 2022

Orientador: Prof. Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

É estimado que atualmente 50% da população resida em ambientes urbanos e até 2050 este número deverá chegar a até 70%. Acompanhado deste crescimento populacional nas cidades está a geração de resíduos sólidos urbanos, que vem se tornando tema de debates e discussões por conta do seu impacto socioambiental, principalmente relacionado à sua disposição final. Em especial os resíduos orgânicos, muitas vezes originados do alto desperdício de alimentos que ocorre nas residências e que possuem um alto potencial de tratamento e valorização. A cidade de do Rio de Janeiro, que possui a 2ª maior produção per capita de resíduos sólidos urbanos, tem um perfil de geração de resíduos com alta fração orgânica. A cidade destina grande parte desses resíduos para aterros sanitários, o que torna urgente considerar alternativas de destinação e valorização e para isto a metodologia deste trabalho se divide em 4 etapas. Na primeira são estudadas as principais tecnologias de tratamento de resíduos utilizadas e estudadas ao redor do mundo com o objetivo de avaliar, com base no perfil de geração de resíduos carioca, qual a estratégia com maior potencial de contribuir para uma gestão e disposição final mais sustentável dos resíduos descartados. Na segunda, são levantadas características operacionais, ambientais e econômicas com base nas vantagens e desafios técnicos enfrentados por cada uma das tecnologias. Como resultado desta avaliação, foi possível analisar que a biometanização apresenta grande potencial, mostrando vantagens em aspectos operacionais, ambientais e econômicos. A partir deste resultado tem-se a terceira etapa, em que são discutidos fatores operacionais, econômicos e possíveis utilizações finais do biogás produzido em uma futura planta na cidade do Rio de Janeiro. Por fim, na quarta etapa, este trabalho busca em casos internacionais de uso em escala da biometanização para tratamento de resíduos orgânicos em cidades lições aprendidas que indicam fatores críticos para o da implantação na cidade do Rio de Janeiro. Entre estes fatores estão: políticas públicas que foquem na expansão da coleta seletiva, no engajamento da população, no investimento em infraestrutura de coleta do lixo ou então na busca pela sinergia entre diferentes tecnologias de gestão de resíduos, uma vez que a biometanização apenas atua nos resíduos sólidos orgânicos gerados.

Índice

I. Introdução	12
II. Metodologia	20
III. Revisão Bibliográfica	23
IV. Resultados e Discussão	68
IV.1. Definição da estratégia de tratamento e valorização de RSU na cidade do Rio de Janeiro	68
IV.2. Geração de Biogás no Brasil.....	74
IV.3 Geração de Biogás no Rio de Janeiro	76
IV.4. Aspectos Operacionais da Produção de Biogás.....	78
IV.5. Produtos e Aplicações da Tecnologia.....	81
IV.6. Aspectos Econômicos	93
IV.7 Lições aprendidas a partir de Casos Internacionais	96
V. Conclusão	109
VI. Referências Bibliográficas	111
VII. Anexo	121
VII.1 Operação do Biodigestor	121
VII.2 Processo de Purificação dos Produtos da DA	123

Índice de Figuras

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	12
Figura 2- Imagem representativa da cadeia de suprimentos alimentícia e diferenciação dos pontos de desperdício e perda de alimentos (WWF 2021)	13
Figura 3 - Disposição Final Adequada x Inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em T/ano (ABRELPE 2020)	15
Figura 4 - Resultado nacional da gravimetria de Resíduos Sólidos Urbanos (ABRELPE 2020)	16
Figura 5 - Perfil da % de matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Domiciliares (Comlurb 2021)	17
Figura 6 - Perfil da % de matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Domiciliares de cada região da cidade do RJ em 2021 (Comlurb 2021)	18
Figura 7 - Visão geral da hierarquia de gestão de resíduos utilizada em Hong Kong (Tsui e Wong 2019)	24
Figura 8 - Lixão em área urbana de Itacoatiara (Foto: Divulgação/MPAM)	26
Figura 9 - Imagem de um aterro controlado operado pela empresa VR - Gestão de Resíduos Industriais	26
Figura 10 - Esquema representativo de um aterro sanitário moderno (Nanda e Berruti 2020).	27
Figura 11 - Aterro sanitário de Seropédica (CTR Seropédica)	28
Figura 12 - Processos térmicos e suas aplicações (Adaptado de Chanthakett et al., 2021).	33
Figura 13 - Geração de RSU e suas principais destinações finais (União Europeia 2020)	34
Figura 14 - Esquema ilustrativo do processo de Incineração de Resíduos e de formação do IBA e IFA (Y.Zhang et al., 2021)	35
Figura 15 - Custo de geração de energia globalmente nivelado em dólares/MWh (U.S. Department of Energy 2019)	38
Figura 16 - Etapas e reações do processo de gaseificação de RSU (Seo et al., 2018).	Erro! Indicador não definido.
Figura 17 - Tipos de reatores de gaseificação (Edu 2013,. Boilerinfo 2018)	Erro! Indicador não definido.
Figura 18 - Gaseificação de RSU para aplicação em usinas de energia.(Chanthakett et al., 2021)	48
Figura 19 - Comparação da geração de CO ₂ (eq) por tonelada de RSU entre aterro sanitário as técnicas de gaseificação citadas anteriormente.(Chanthakett et al., 2021)	49
Figura 20 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kuns et al., 2019)	52
Figura 21 - Papel da planta de digestão anaeróbica moderna na bioeconomia ((Tsui e Wong 2019)	55
Figura 22 - Diagrama básico do processo de compostagem de RSU (Hoang 2022)	57
Figura 23 - Representação esquemática de uma planta de produção de biogás (Wikimedia Commons 2010)	61

Figura 24 - Representação da potencial economia circular gerada pelo processo de biometanização (Jain et al., 2018)	63
Figura 25 - Visão da planta de produção de biometano a partir do biogás gerado no aterro de Seropédica,RJ (Urca Energia)	76
Figura 26 - Imagem de uma boca de fogão alimentado por biogás (Jain et al., 2018)	81
Figura 27 - Imagem de um motor de cogeração do tipo CHP usado para gerar energia a partir do biogás coletado em aterro (CHP Brasil)	82
Figura 28 - Imagem de um ônibus movido a biometano em Oslo, Noruega	87
Figura 29 - Seção de compostagem do digestato em uma planta de DA de Bassano del Grappa (VI), Italia	90
Figura 30 - Visão da planta de DA na cidade de Copenhagen	97

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Custos relacionados à implementação de aterros sanitários por etapa em R\$ (FGV e ABETRE 2009)	30
Tabela 2 - Quantidade de cinzas de fundo residuais geradas e reaproveitadas em determinados países (Ornebjerg et al., 2006)	36
Tabela 3 - Tipos de pirólise por aquecimento tradicional (Li, et al.,2022)	40
Tabela 4 - Um resumo do desempenho energético, de emissão de gases e de custos de várias tecnologias.(Chanthakett et al., 2021)	50
Tabela 5 - Potencial de produção de biogás e geração de energia alternativa a partir de tipos de substratos orgânicos (Anaerobic Digestion and Bioresources Association 2017)	65
Tabela 6 - Perfil da produção de biogás no cenário brasileiro (CIBiogás 2021)	75
Tabela 7 - Custo médio de purificação do biogás por escala (IRENA 2017)	85
Tabela 8 - Mitigação dos GEE's ao utilizar-se o biogás como combustível e como fonte de energia elétrica (Jain et al., 2018)	96

Índice de Quadros

Quadro 1 - Comparação das técnicas de tratamento do lixiviado produzido em aterros sanitários (Teng et al.,2021)	29
Quadro 2 - Efeitos da adição de aditivos/catalisadores em estudos recentes de pirólise de RSU. (adaptado de Lee et al., 2020)	42
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de reatores de gaseificação (adaptado de Chanthakett et al., 2021)	47
Quadro 4 - Aspectos positivos relacionados às plantas de DA (adaptado de Jain et al., 2018)	56
Quadro 5 - Técnicas de pré-tratamento de resíduos orgânicos para DA (adaptado de Grandó 2017)	62
Quadro 6 - Principais impurezas do biogás, problemas gerados e requisitos de qualidade para fins energéticos. (Kuns et al., 2019)	64
Quadro 7 - Plantas de biometanização de resíduos alimentares urbanos ao redor do mundo (Jain et al., 2018)	66
<i>Quadro 8 - Aspectos Operacionais das Tecnologias Estudadas na Revisão</i>	69
Quadro 9 - Aspectos Ambientais das Tecnologias Estudadas na Revisão	69
Quadro 10 - Aspectos Econômicos das Tecnologias Estudadas na Revisão	70
Quadro 11 - Análise comparativa das tecnologias de gestão de RSU estudados no capítulo de revisão (1ª parte)	71
Quadro 12 - Vantagens da geração de biometano a partir do biogás (Jain et al., 2018)	84
Quadro 13 - Pontos favoráveis e barreiras das possíveis utilizações do biogás	92
Quadro 14 - Boas práticas observadas no estudo de caso de Copenhague	99
Quadro 15 - Boas práticas observadas no estudo de caso de Milão	102
Quadro 16 - Principais fatores envolvidos no processo de biometanização	122
<i>Quadro 17 - Técnicas de remoção de água do biogás (Ryckebosch et al., 2011).</i>	123
Quadro 18 - Métodos para remoção de CO ₂ e H ₂ S do biogás	125

I. Introdução

Em 2011, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) apresentou uma estimativa de que um terço de toda a produção global de alimentos é perdida ou desperdiçada. Esse foi um marco que trouxe luz para a necessidade de uma investigação mais precisa a respeito da quantidade de alimentos perdidos e desperdiçados ao longo da cadeia de produção, de abastecimento e, por fim, pelo consumidor final; para entender os impactos que esse desperdício causa à sociedade e para construção e acompanhamento de planos de ação para mitigação deste desperdício.

Em 2015, a ONU lançou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que trouxeram as 17 metas globais a serem alcançadas até 2030 (Figura 1), abordando os principais desafios de desenvolvimento sustentável enfrentados no Brasil e no mundo. Esses objetivos possuem 3 pilares: erradicação da pobreza, proteção ao meio ambiente e garantia de paz e prosperidade para todos ao redor do planeta. Ao olhar para o 12º objetivo, “Consumo e Produção Responsáveis”, mais especificamente para o 12.3*, é possível enxergar que há uma grande preocupação de até 2030 reduzir pela metade o desperdício de alimentos per capita mundial, considerando todas as fases da cadeia alimentar.



Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015)

Um conceito importante que deve ser abordado quando se estuda sobre o assunto perda e desperdício de alimentos (Figura 2) é justamente a diferença entre esses dois termos. As **perdas de alimentos** ocorrem nas partes iniciais da cadeia de suprimentos, por exemplo, durante a colheita, transporte ou armazenamento. Isto é, todas as perdas acontecem antes do alimento chegar na etapa do varejo e consumidor final. O **desperdício de alimentos** refere-se a qualquer alimento cru ou cozido descartado, principalmente, nas etapas de varejo, alimentação e consumo da cadeia de suprimentos. (Schulze et al., 2016; Atkins et al., 2018; Kummu et al., 2012).



Figura 2- Imagem representativa da cadeia de suprimentos alimentícia e diferenciação dos pontos de desperdício e perda de alimentos (WWF 2021)

Em 2019, o relatório das Nações Unidas *Food Waste Index* estimou que aproximadamente 931 milhões de toneladas de alimentos foram desperdiçados, e desses, 61% aconteciam nas residências familiares, 26% no setor comercial, como restaurantes, e 13% nos pontos de vendas, como supermercados (United Nations Environment Programme 2021). Um estudo de 2016 da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação estimou que, em termos de calorias/alimentos, são perdidos ou desperdiçados 15% dos alimentos disponíveis para consumo humano na América Latina. 28% dessas calorias são perdidas ou desperdiçadas na fase de produção, outros 28% na fase de consumo, 22% no manuseio e armazenamento, 17% na distribuição e comercialização e 6% na fase de processamento (FAO, 2016).

Na última década, o desperdício de alimentos tem se tornado um reconhecido problema ambiental global. Não só a questão do desperdício de alimentos se tornou uma questão ética em um mundo onde, em 2020, aproximadamente 800 milhões de pessoas sofrem da fome (FAO, 2021), mas os impactos ambientais da produção de alimentos que são então descartados não podem mais ser ignorados. À medida que a população e a urbanização crescem, mais alimentos estão sendo produzidos e mais

alimentos estão sendo desperdiçados. Pela primeira vez na história da humanidade, mais de 50% da população global vive em cidades e, até 2050, há uma expectativa que esse número suba para mais de 70% (ONU, 2019). Essa concentração de pessoas está colocando a infraestrutura das cidades sob grande pressão - a necessidade de fornecer água potável, tratamento de esgoto, transporte, manter a higiene urbana, construir instalações de tratamento de resíduos, prestar serviços de educação e saúde. Fornecer todos esses serviços em cidades que crescem constantemente é uma tarefa enorme, que precisa ser planejada para conciliar o melhor para a população, para o meio ambiente e para a saúde econômica das cidades.

Diretamente associado ao desperdício de alimentos, discutido anteriormente, está a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), que é um dos principais serviços que todo governo municipal deve fornecer amplamente para seus cidadãos, levando em conta os níveis variáveis do serviço, custos e impactos ambientais. A geração de RSU também está aumentando mais rapidamente do que qualquer outro poluente ambiental, incluindo a emissão de gases de efeito estufa (Jain et al., 2018). Como a população mundial está se tornando cada vez mais urbanizada e tendo acesso a maior consumo de produtos, mesmo havendo discrepâncias, o aumento da geração de resíduos está colocando uma enorme pressão nos governos locais, principalmente nas cidades em rápido crescimento da África, América Latina, Sudeste Asiático, China e Índia (Jain et al., 2018)

Analisando o contexto brasileiro, fica evidente que o Brasil ocupa uma posição incômoda quanto às perdas e desperdício de alimentos. As evidências indicam que o país alia características de países subdesenvolvidos no início da cadeia, tais como elevada perda pós-colheita e no escoamento da produção, com hábitos de consumo mais presentes em países ricos, caracterizados por concentrar o desperdício no final da cadeia (WWF 2017). Tendo em vista o grave problema que a sociedade brasileira vive com o desperdício alimentar, o gerenciamento do RSU, principalmente de resíduos orgânicos, se tornou um dos maiores desafios na administração das cidades. Segundo dados de 2019 da ABRELPE, (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), dos 79 milhões de toneladas de lixo

produzidos no Brasil em 2018, 92% (72,7 milhões) foram coletados. Isso representa um aumento de 1,66% em comparação a 2017, porém evidencia que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos locais de geração. Destes que foram coletados, 59,5% foram levados a aterros sanitários, o que equivale a 43,5 milhões de toneladas; enquanto os 40,5% restantes foram despejados em locais impróprios (Figura 3), que não contam com um conjunto de sistemas e medidas necessários para proteger a saúde das pessoas e o meio ambiente contra danos e degradações por 3001 municípios brasileiros. É necessário que as cidades sejam preservadas dos males causados pela geração crescente dos resíduos sólidos.

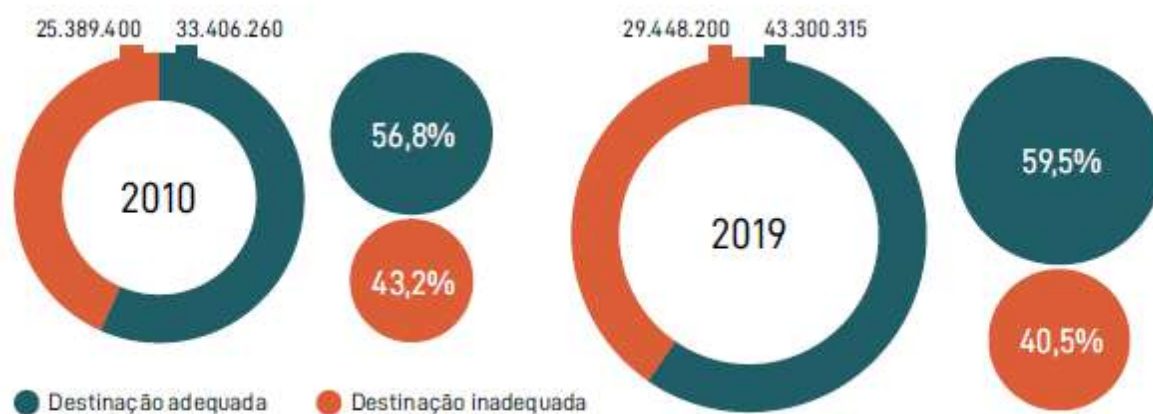


Figura 3 - Disposição Final Adequada x Inadequada de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em T/ano (ABRELPE 2020)

É estimado que até 2050 haja um aumento de 50% no total de resíduos gerados no Brasil, em comparação ao ano base de 2019. Para o mesmo período, a projeção de crescimento populacional esperado é de 12%, o que evidencia a influência decisiva na componente de perspectiva econômica nessa equação: o avanço gradual do Produto Interno Bruto (PIB) e consequente aumento do poder aquisitivo da sociedade (ABRELPE, 2020).

Com este cenário em mente, um grande aliado para a gestão responsável e otimizada destes resíduos sólidos é a análise gravimétrica do lixo, que é a determinação da percentagem de cada um dos componentes do lixo (papel, papelão, vidro, matéria orgânica), a partir da relação entre o peso do componente analisado e o peso total da amostra considerada (Comlurb 2001). Esta análise é essencial para

especificação e dimensionamento dos equipamentos usados na limpeza urbana. Nesse ponto, vale um olhar mais atento aos resíduos orgânicos, visto que compõem 45,3% do total de resíduos gerados nacionalmente e, que estes possuem grande potencial para receberem tratamento e seus produtos serem usados para geração de energia, produção de adubo e até obtenção de biocombustível, como será visto a seguir no trabalho (Figura 4).

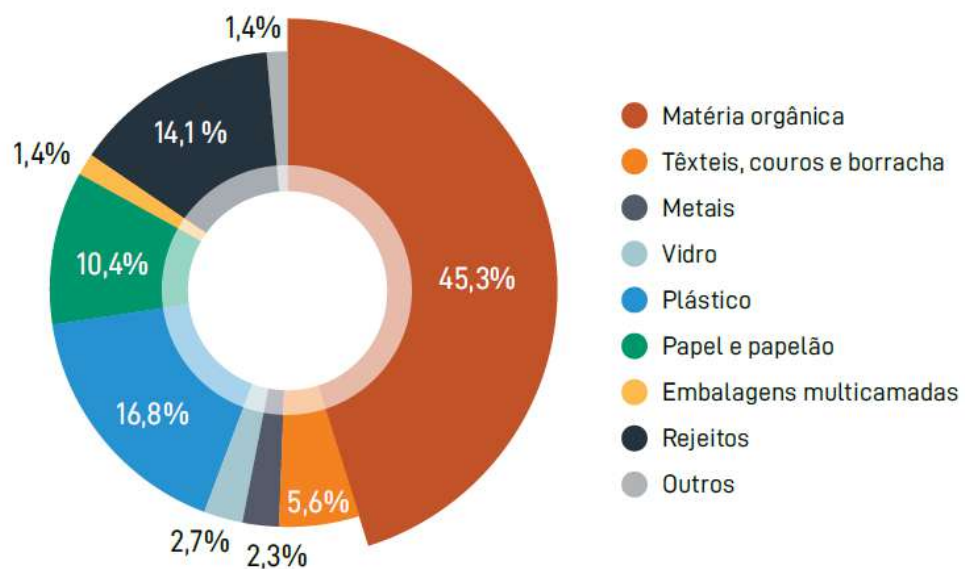


Figura 4 - Resultado nacional da gravimetria de Resíduos Sólidos Urbanos (ABRELPE 2020)

Quando se analisa a realidade do município do Rio de Janeiro, percebe-se que a quantidade de matéria orgânica encontrada no lixo é um importante parâmetro a ser avaliado, pois indica o maior ou menor poder aquisitivo da população, principalmente das áreas mais carentes. Na Figura 5 é mostrada a evolução do percentual de matéria orgânica gerada na cidade, indicando percentual em torno de 50%. Nas favelas, nos subúrbios e nos bairros da Zona Oeste o percentual de matéria orgânica está acima de 50%, o que indica uma maior manipulação de alimentos nas residências, que é facilmente identificado pela grande quantidade de cascas de batatas, folhagens comestíveis e restos de comida encontrados na catação. A esse fator soma-se ainda uma deficiência na armazenagem (falta em muitos casos refrigeração) e a aquisição de produtos mais “passados” (próximos ou que já passaram do chamado ponto de mesa), gerando um maior desperdício e uma perda prematura dos gêneros alimentícios (Comlurb, 2021).

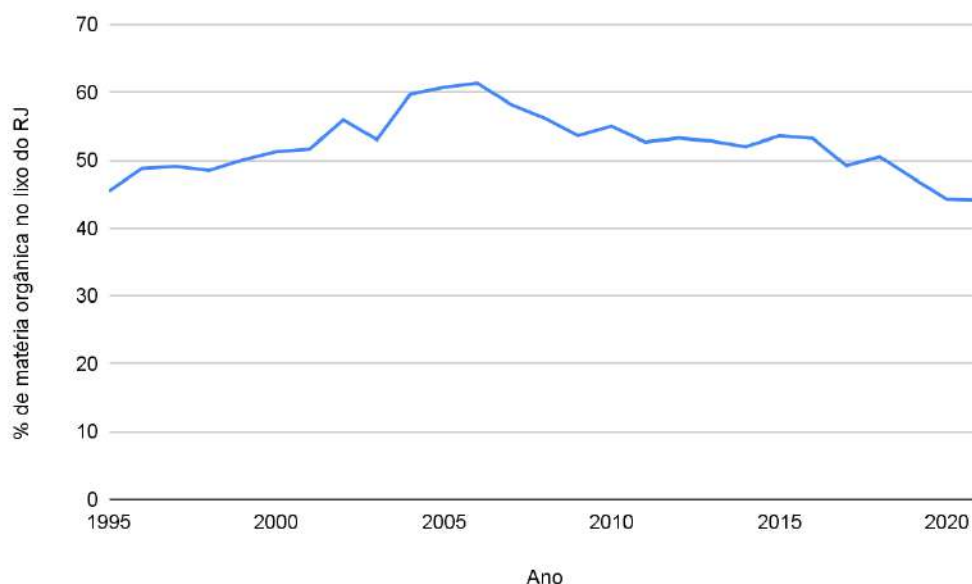


Figura 5 - Perfil da % de matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Domiciliares (Comlurb 2021)

Como é possível perceber pela Figura 5, desde o início dos anos 2000 houve um aumento da presença da matéria orgânica no lixo dos cariocas, atingindo seu ponto máximo em 2006, momento em que o país estava em uma crescente onda de desenvolvimento econômico e social, ocasionando um aumento do poder de compra da população e que pode ter levado ao aumento do consumo e posterior desperdício em excesso. De 1999 à 2018 a matéria orgânica representou pelo menos 50% dos resíduos sólidos domiciliares no RJ, para apenas em 2019 cair para 47,33%. Posteriormente, com a pandemia, nos anos de 2020 e 2021 houve uma redução desta fração, ficando em 44%, o que pode ser um indício da tentativa de reduzir o desperdício por conta da dificuldade financeira que atingiu grande parte da população decorrente da pandemia de Covid-19, em que muitos cariocas perderam seus empregos e viram suas rendas reduzidas bruscamente. Ao longo das duas décadas de estudos gravimétricos na cidade, as Zonas Norte e Oeste apresentaram os maiores percentuais de matéria orgânica (Figura 6), o que pode estar relacionado ao menor poder de compra dos moradores, fato que se repetiu na análise de 2021.

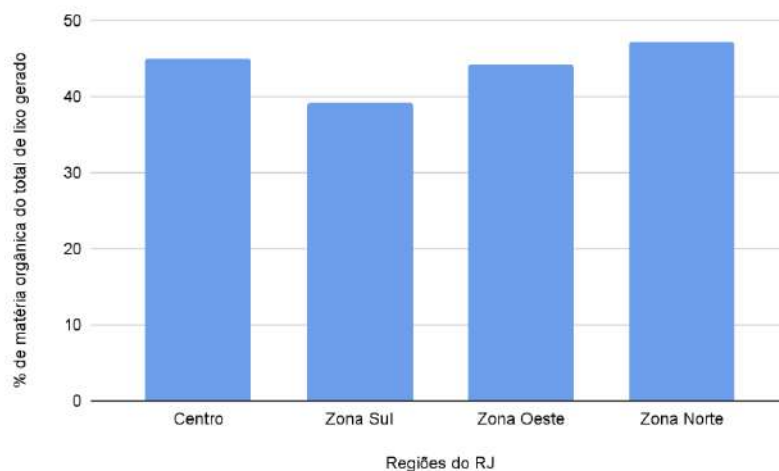


Figura 6 - Perfil da % de matéria orgânica presente nos Resíduos Sólidos Domiciliares de cada região da cidade do RJ em 2021 (Comlurb 2021)

Um dos fatores importantes para entender a problemática do lixo orgânico é a sua destinação, e os impactos gerados pela sua má gestão. Os resíduos sólidos urbanos, quando acumulados, propiciam a infestação de vetores que causam ameaças à saúde da população. Nos sistemas de drenagem, podem provocar entupimentos e, por consequência, enchentes. Nos rios, sua concentração promove a poluição das águas e o desequilíbrio da vida marinha. Em terrenos a céu aberto, contaminam o solo e o lençol freático, além de emitirem gases tóxicos na atmosfera.

Entre os anos de 2000 e 2009, o total de lixo público coletado para destinação final pela companhia de limpeza pública no município do Rio de Janeiro ultrapassou os 12 milhões de toneladas (Queiroz e Marafon 2015). A partir do ano de 2001, o quantitativo ultrapassou o número de um milhão de toneladas e não caiu desde então. Em 2019, dados da prefeitura do Rio indicavam que cerca de 10.000 toneladas de RSU eram coletados diariamente no Rio de Janeiro, aproximadamente 3.650.000 toneladas por ano (Rio Prefeitura 2019) – um cenário crítico em vista do fim da vida útil dos aterros disponíveis ao município (Queiroz e Marafon 2015). Com isso em mente, a discussão sobre a quantidade/caracterização tal como a destinação e formas alternativas de uso do lixo orgânico no Rio de Janeiro se mostra extremamente importante para os próximos anos que estão por vir e fazem surgir perguntas como: O que pode ser feito para melhorar a destinação final do RSU carioca? Existem tecnologias que possibilitam a geração de renda e empregos ao mesmo tempo que

tornam possível agregar valor aos resíduos descartados no município? Estas tecnologias são capazes de lidar com um RSU com perfil similar ao do Rio de Janeiro?

O objetivo principal do trabalho é avaliar quais estratégias de gestão e reaproveitamento dos resíduos orgânicos mais se aplicam à realidade da cidade do Rio de Janeiro.

Esse objetivo principal será alcançado através dos seguintes objetivos específicos deste trabalho:

- Estudo das vantagens, desafios técnicos e expectativas futuras das tecnologias de tratamento e valorização de resíduos;
- Definição de um conjunto de características operacionais, ambientais e econômicas que serão utilizadas para avaliar as técnicas estudadas;
- Análise da tecnologia escolhida no contexto da cidade do Rio de Janeiro, através da discussão de aspectos operacionais, econômicos e produtos finais gerados no processo.
- Estudo de boas práticas e aprendizados internacionais para a implantação da tecnologia escolhida

O trabalho será desenvolvido levando em consideração a grande fração orgânica presente no lixo do carioca que deriva do desperdício de alimentos que ocorre dentro das residências.

II. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada neste estudo. Para obter os resultados e respostas acerca da problematização apresentada neste trabalho, será feito um mapeamento das principais tecnologias de gestão de resíduos sólidos urbanos utilizadas ao redor do mundo, com a finalidade de estudar o que já é aplicado por outras cidades e explorar o nível de desenvolvimento destas tecnologias para, em seguida, analisar aspectos relacionados à implementação em escala comercial da tecnologia na cidade do Rio de Janeiro.

O estudo partirá de uma revisão bibliográfica que busca levantar o que está sendo estudado e aplicado para gestão de resíduos sólidos, mais especificamente resíduos orgânicos, nas cidades, quais as tecnologias, seus pontos positivos, os principais desafios técnicos de cada tecnologia e os produtos que podem ser gerados a partir deste resíduo. A metodologia proposta está dividida em quatro etapas:

Etapa 1: Revisão das estratégias de tratamento e valorização de RSU

Na primeira etapa são estudadas as principais estratégias de gestão de RSU, atualmente aplicadas e estudadas ao redor do mundo, com o objetivo de entender suas características e os principais desafios técnicos enfrentados na operação, inclusive tendo em mente o perfil do RSU na cidade do Rio de Janeiro. Entre as técnicas estudadas estão: o aterro sanitário, principal tecnologia utilizada no Brasil e mais especificamente no Rio de Janeiro para disposição final dos resíduos gerados, técnicas termoquímicas, como a incineração, gaseificação e a pirólise, chamadas de “*waste to energy*”, que tem como principal objetivo decompor o RSU em altas temperaturas e gerar energia e produtos ao final do processo e as técnicas biológicas de tratamento de RSU, entre elas a compostagem e biometanização, que utilizam rotas metabólicas de microorganismos, chamado de biodigestão, para tratar os resíduos, neste caso apenas os orgânicos, e gerar biofertilizantes e biogás ao final do processo.

Nesta etapa, as principais fontes de estudo foram a base de artigos Scopus, onde foi dado um maior foco em artigos de revisão, que possuem uma abordagem

mais crítica relacionada ao tema de estudo, e trazem mais exemplos de estudo e informações acerca de viabilidade operacional e econômica das técnicas em questão e as principais palavras chave utilizadas foram: “ **'nome da tecnologia'** *municipal solid waste*” para encontrar aplicações realmente voltadas para gestão e tratamento de RSU municipal. Também foram utilizados materiais e textos disponibilizados por organizações internacionais de pesquisa focadas em sustentabilidade e gestão consciente de RSU, como a *C40 Knowledge Hub* e a *Waste Management Research*.

Etapa 2: Seleção da estratégia a ser adotada no RJ

Na segunda etapa é feita a avaliação das técnicas estudadas na Etapa 1, a fim de definir qual a que melhor se encaixa no contexto carioca. Para isso, são definidas 3 dimensões principais de análise das estratégias utilizadas: (1) operacional, onde são analisados aspectos como área necessária para a instalação de uma planta comercial, necessidade de separação e pré-tratamento do RSU, entre outros fatores. (2) ambiental, para análise de pontos relacionados ao impacto que a estratégia tem no meio ambiente. (3) econômica, para análise de custos da planta e de possíveis fontes de capital a partir dos produtos gerados na operação. Os aspectos que compõem cada uma das dimensões, que podem ser de natureza positiva ou negativa, são explorados em uma avaliação qualitativa para a escolha da melhor estratégia para o Rio de Janeiro e que será analisada nas etapas seguintes.

Etapa 3: Aspectos críticos para a biometanização no RJ

A terceira etapa consiste em entender os principais aspectos relacionados à implantação de uma usina de biometanização na cidade do Rio de Janeiro. É estudado o contexto da tecnologia e da geração de biogás no Brasil e no estado do Rio de Janeiro, para o melhor entendimento da maturidade do setor de produção de biogás à nível nacional/estadual. Nesta etapa também são discutidos aspectos relacionados à operação da usina, como a escolha por uma abordagem centralizada ou descentralizada de gestão dos resíduos orgânicos da cidade e a escala de produção da usina de digestão anaeróbia; principais utilizações finais do biogás gerado na biodigestão de resíduos orgânicos e os aspectos econômicos da tecnologia, como os

custos de investimento inicial, os custos de operação e o possível capital que pode ser obtido a partir das diversas aplicações do biogás gerado.

Para esta etapa, a principal fonte de consulta foram relatórios da Agência Internacional de Energia a respeito do uso do biogás e da *World Biogas Association*, relatórios da CIBiogás e da ABiogás, além do livro da Embrapa “ Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato”.

Etapa 4: Estudos de casos internacionais e aprendizados para o Rio de Janeiro

A quarta etapa consiste em investigar aplicações práticas da biometanização em grandes cidades e entender os principais fatores relacionados ao sucesso dos projetos de implantação, como políticas públicas, engajamento da população, aspectos financeiros, barreiras enfrentadas, entre outros. Para a escolha das cidades estudadas, avaliou-se a tecnologia de tratamento dos resíduos orgânicos utilizada, focando na biometanização, e o perfil demográfico, buscando aquelas com maior população e densidade demográfica, que se assemelham mais à cidade do Rio de Janeiro. Por fim, é feita uma discussão a respeito dos principais pilares da biometanização observados nos casos internacionais e como cada um deles se encaixa no contexto do Rio de Janeiro, tendo em vista o histórico da gestão de RSU e as principais políticas adotadas na cidade relacionadas ao tema.

Para esta etapa, foi utilizado o *report* da *World Biogas Association* :“Global Food Waste Management: An Implementation Guide for Cities” para a escolha dos exemplos reais de aplicação. Para a discussão focada na cidade do Rio de Janeiro, as principais fontes de consulta foram relatórios de instituições e associações focadas no tema, como a Comlurb, ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) e o Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (ISLU).

III. Revisão Bibliográfica

De acordo com o Waste Atlas de 2018, cerca de 2 bilhões de toneladas de RSU são gerados globalmente a cada ano, dos quais quase 33% permanecem não coletados pelos municípios (Banco Mundial, 2018). Uma estimativa, do Banco Mundial em 2020, é de que a geração de RSU deverá aumentar para 3,4 bilhões de toneladas até 2050. No Brasil, do total de RSU recolhidos pelos municípios, cerca de 70% são destinados aos aterros, apenas 19% são reciclados e 11% são utilizados para valorização energética (Nanda e Berruti 2020).

A gestão de resíduos existe como serviço público desde 1751 e abrange literalmente todas as políticas e atividades necessárias para gerenciar resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, desde sua geração inicial até a disposição final (Hoornweg e Bada Thata, 2012). Historicamente, o objetivo inicial da gestão de RSU consistia na melhora sanitária das cidades, reduzindo os riscos associados ao descarte descontrolado de RSU. Porém, nas últimas décadas, com o aumento da geração de RSU por conta de uma expansão nunca antes vista no consumo da população global, o grande foco da gestão de RSU foi radicalmente transformado (Krook e Baas 2013). Passando da remoção e destinação para aterros e lixões o mais rápido possível para a expansão da utilização de tecnologias de tratamento *Waste to Energy*, com foco termoquímico e biológico. O objetivo final da gestão de RSU responsável está na conservação de recursos e proteção do meio ambiente. A ideia de “sustentabilidade” é o cerne da estratégia de gestão de RSU de qualquer país, com metas para diminuir possíveis cargas ambientais para as próximas gerações. Na Figura 7 tem-se um arquétipo da hierarquia de sustentabilidade dos níveis de gerenciamento de RSU.



Figura 7 - Visão geral da hierarquia de gestão de resíduos utilizada em Hong Kong (Tsui e Wong 2019)

Em países de maior renda, as tecnologias de conversão de RSU em combustíveis, calor e energia se encontram melhor estabelecidas, quando comparado à realidade de países de renda baixa ou média, como o caso do Brasil, em que ainda se esforçam para gerir de forma eficaz e segura a coleta, transporte e destinação de RSU. (Moya et al., 2017; Nanda e Berruti 2020).

Os resíduos, com destaque aos resíduos orgânicos, são uma fonte renovável de recursos que têm alto potencial para recuperar energia e se apresentam como recursos valiosos através da conversão em energia ou outras formas de valorização. Diferentes tecnologias de conversão de resíduos em energia, incluindo tecnologias de conversão termoquímica e biológica, estão disponíveis para transformar o RSU em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos para complementar as crescentes demandas de energia. A seguir, serão abordados e estudados algumas das tecnologias de gestão de resíduos mais utilizados atualmente ao redor do mundo, para entender como essas técnicas lidam com a RSU, os seus benefícios, desafios técnicos e perspectivas de desenvolvimento futuro.

III.1. Aterro Sanitário

Os aterros sanitários são locais onde os resíduos urbanos são enterrados e misturados com o solo para fins de eliminação e decomposição. Esse é um processo antigo que continua sendo a estratégia mais comum de disposição de resíduos em muitos países do mundo, porque sua logística é tecnicamente simples, é relativamente mais barato e com menor demanda de mão-de-obra para manutenção, quando comparado com outras opções de tratamento, como a reciclagem, combustão para produção de energia e compostagem (Dogaris 2020). Os aterros podem ser classificados em três tipos: aterros a céu aberto, aterros semi controlados e aterros sanitários (Narayana 2009).

Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), para o ano de 2020 o Brasil efetuou a disposição final de aproximadamente 79,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos coletados, na distribuição de 59,5% para aterros sanitários, 23% para aterros controlados e 17,5% para aterros a céu aberto. Inclusive, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estipulou, em 2010, a proibição do lançamento *in natura* de resíduos sólidos em aterros a céu aberto. Dessa forma, o fato de aproximadamente 17,5% do RSU ainda ter esse destino mostra o quanto o gerenciamento de RSU no Brasil ainda precisa evoluir.

Um aterro a céu aberto, também chamado no Brasil de “Lixão”, é uma área de terra onde o RSU é descartado em um ambiente aberto com contato com o ar (Figura 8). Como esses aterros são quase sempre mal administrados, eles se transformam em um atrativo para necrófagos, por exemplo, falcões, águias, abutres, corvos e outras aves, além de moscas, mosquitos e outros insetos, vermes, roedores e microrganismos patogênicos. Reclamações residenciais de bairro relacionadas ao mau cheiro persistente das áreas de aterro a céu aberto são bastante comuns. Por conta de todos esses problemas causados pelo despejo a céu aberto do lixo, países desenvolvidos apresentam leis que proíbem a prática (Nanda e Berruti 2020).



Figura 8 - Lixão em área urbana de Itacoatiara (Foto: Divulgação/MPAM)

Aterros controlados são aterros operados, localizados em lixões designados, onde os RSU são classificados no local, triturados e compactados antes do descarte (Figura 9). As pilhas de lixo descartadas são trituradas e niveladas com tratores ou esteiras e cobertas com uma camada de terra vegetal diariamente para evitar incômodos como a criação de aves necrófagas, animais, pragas e microorganismos. Embora os aterros semicontrolados sejam relativamente menos fétidos devido à cobertura do solo superficial, eles não são projetados para gerenciar a emissão de gás de aterro e a descarga de líquido lixiviado (LL) (Nanda e Berruti 2020).



Figura 9 - Imagem de um aterro controlado operado pela empresa VR - Gestão de Resíduos Industriais

Por outro lado, os aterros sanitários são variações avançadas de aterros semicontrolados. Além da triagem de resíduos sólidos no local, segregação, redução

de tamanho, adensamento e cobertura do solo, os aterros sanitários (Figura 10) também possuem instalações projetadas para coletar o chorume líquido e emissões de gases de aterro, como metano gerado na decomposição da matéria orgânica. Na figura 10 a seguir, é possível entender a estrutura interna do aterro sanitário, onde o RSU é depositado em um local com vedação, tanto inferior quanto superior, para diminuição do risco do percolamento de LL. Entre as camadas de RSU é depositada uma camada de terra, para não ocorrer a contaminação entre os blocos de RSU ali presentes, além de minimizar odores, vetores de doenças, incêndios e eliminação de resíduos (Nanda e Berruti 2020). Por fim, é possível observar que há uma preocupação em coletar e tratar os gases e o LL gerado na operação do aterro sanitário. O LL pode ser tratado por métodos físicos, físico-químicos e biológicos e o biogás coletado tem potencial para ser usado em motores de cogeração de energia elétrica, os chamados CHP (Combined Heat and Power), e ao passar por um processo de purificação robusto, pode ser injetado na rede de distribuição de gás local e até ser distribuído e comercializado como combustível veicular (Jain et al., 2018).

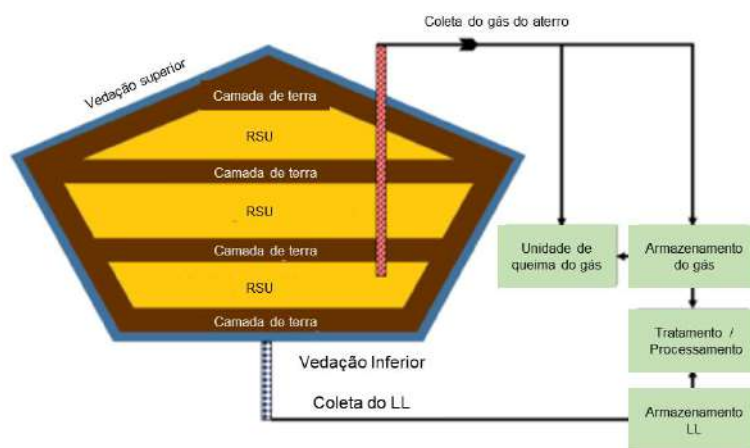


Figura 10 - Esquema representativo de um aterro sanitário moderno (Nanda e Berruti 2020).

Devidamente definidos dentro de um limite regional, distante das áreas residenciais, esses tipos de aterros são mais comuns em países desenvolvidos, mas também existem aterros sanitários em operação no Brasil, como o exemplo da Figura 11, na cidade de Seropédica, no Rio de Janeiro. Segundo dados da ABELPRE de 2019, 59,5% do RSU brasileiro tiveram como destinação final aterro sanitários.



Figura 11 - Aterro sanitário de Seropédica (CTR Seropédica)

Um grande desafio tecnológico dos aterros sanitários está justamente na gestão do LL, que se livre, percola através do solo e contamina corpos d'água subterrâneos e superficiais com seus poluentes e toxinas. A composição do LL depende de muitos fatores, incluindo a natureza dos resíduos presentes em um determinado aterro, clima, umidade, o conjunto de práticas aplicadas no aterro e a idade do chorume (Dogaris et al., 2020). De maneira geral, o lixiviado é constituído pelos seguintes componentes: Matéria Orgânica Dissolvida (MOD), expressa pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou pelo Carbono Orgânico Total (COT), incluindo ácidos fúlvicos e húmicos; Macrocomponentes Inorgânicos: Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , NH_4^{+} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , SO_4^{-2} e Elementos Traços: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn; Compostos Orgânicos Xenobióticos (COX) presentes em baixas concentrações, incluindo hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos alifáticos clorados, dentre outros componentes como boro, arsênio, bário, selênio, mercúrio e cobalto, que são encontrados em baixíssimas concentrações (CASTILHOS, 2006).

A remediação do lixiviado é alvo de sérias preocupações ambientais devido à sua alta concentração de matéria orgânica, como por exemplo, ácidos carboxílicos e sólidos dissolvidos, além de produtos químicos tóxicos, sais inorgânicos, metais pesados, amônia, minerais e compostos orgânicos xenobióticos (Wiszniewski et al., 2006; Pasalari et al., 2018). Os principais métodos de tratamento estão descritos, de forma resumida, no Quadro 1. Um parâmetro importante a ser levado em conta no

momento da escolha do método de tratamento do LL é o tempo em que os aterros estão em operação. A idade do aterro é um fator chave que pode afetar a composição e propriedades do lixiviado do aterro.

Quadro 1 - Comparação das técnicas de tratamento do lixiviado produzido em aterros sanitários (Teng et al.,2021)

Método	Princípios	Vantagens	Desvantagens	
Tratamento Convencional	Recirculação	Devolução do lixiviado coletado ao aterro. O sistema físico do aterro atua como biofiltro	Acelera a estabilização de resíduos de aterros sanitários, aumenta a quantidade de lixo degradado e reduz o volume de lixiviados do aterro	Material orgânico residual dissolvido se acumula e se torna mais difícil de tratar.
	Co-tratamento	O lixiviado do aterro é tratado juntamente com o esgoto sanitário	É conveniente, pois utiliza uma estrutura pré-existente, tornando a operação mais econômica	Torna o processo de desinfecção ineficiente
Tratamento Biológico	Degradação por reações aeróbias e anaeróbias	Os materiais orgânicos poluentes são degradados através de reações metabólicas bacterianas.	Processo simples, alta confiabilidade e bom custo benefício	Ineficaz contra material inorgânico e orgânico dissolvido não biodegradável
Tratamento Químico	Precipitação Química	Reagentes químicos reagem com substâncias solubilizadas e estas precipitam, facilitando a sua separação	Alta escalabilidade e baixo custo operacional	Baixa remoção de matéria orgânica dissolvida, necessita de controle de pH, formação excessiva de lodo
Tratamento Físico-Químico	Adsorção	Os poluentes são transferidos da fase líquida para a superfície de um sólido através de interações físico-químicas	Bom custo benefício e alta eficiência	Dificuldade de regeneração dos adsorventes e consequente alto consumo deste material
	Tratamento por membrana	Separação por tamanho e interações eletrostáticas entre as membranas e moléculas	Alta eficiência,baixo custo operacional, equipamentos simples e condições brandas de operação	Incrustação das membranas e formação de líquidos de lixiviados altamente concentrados ao fim do processo

Em termos financeiros, uma pesquisa da FGV em parceria com a ABETRE (Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes) de 2009

estimou os custos de implantação de aterros sanitários de diferentes capacidades, como mostrado na Tabela 1. O estudo destaca que o custo de implantação de aterros sanitários varia, de forma simplificada, em função de sua capacidade de recebimento total de resíduos, comumente mensurada pelo fluxo de recebimento diário (expresso em t/dia), bem como do tempo de vida útil do aterro. De modo geral, os aterros sanitários são repartidos em diferentes regiões, ou células. Inicialmente, apenas uma célula é aberta e operada durante um período médio de três a quatro anos até que sua capacidade tenha sido exaurida. Após tal período, faz-se necessário investimento incremental em uma nova célula e assim sucessivamente, até que a capacidade total do aterro seja completamente utilizada. Concluídas as operações, segue-se etapa de fechamento do aterro, geralmente por meio de cobertura vegetal. Após este fechamento, o aterro segue sendo monitorado até garantir que seus efeitos sobre o meio ambiente estejam devidamente estabilizados (FGV e ABETRE 2009). Nas 3 dimensões o custo que mais chama atenção é o de operação, que representa em média 87% dos custos totais do aterro sanitário, porém é necessário ter em mente que este valor está distribuído no período de operação de 20 anos do aterro em questão. Logo para calcular o custo por tonelada para aterros grandes, que é o mais próximo do caso do RJ, é necessário dividir o valor pelo número de anos da operação, em seguida pelos dias do ano, no caso 365 dias, e por 2000, que é a quantidade de toneladas depositadas diariamente. Desta forma chega-se ao valor de aproximadamente R\$32,00 por tonelada.

Tabela 1 - Custos relacionados à implementação de aterros sanitários por etapa em R\$ (FGV e ABETRE 2009)

Etapa	Grande 2000 ton/dia	Médio 1000 ton/dia	Pequeno 100 ton/dia
Pré-implantação	4.065.461	2.032.730	608.087
Implantação	18.169.781	9.084.890	2.669.178
Operação	461.494.052	230.747.026	45.468.163
Encerramento	6.488.889	3.244.444	486.667
Pós-Encerramento	35.575.984	17.787.992	3.212.354
Total	525.794.167	262.897.083	52.444.449

Embora sirvam como um depósito geológico de longo prazo de resíduos, os aterros sanitários também apresentam preocupações ambientais em termos de

poluição do ar, contaminação das águas subterrâneas, agravamento do aquecimento global e impactos na saúde dos habitantes de suas redondezas. O crescimento e o consumo acelerado da população global faz com que esta solução, sozinha, não seja viável, no longo prazo, para lidar com o RSU por uma simples questão: simplesmente não há terra suficiente disponível para receber a quantidade de RSU produzida diariamente. Em 2015, uma pesquisa realizada pela *Environmental Research & Education Foundation*, chegou à conclusão que em apenas 60 anos os EUA já não teriam espaço disponível para a construção e operação de novos aterros sanitários. Por fim, é importante ressaltar o aspecto social das localizações dos aterros/lixões. Como citado anteriormente no trabalho, a grande maioria dos lixões estão localizados em países com baixa renda da população, principalmente em centros urbanos mais pobres. Somado a isso, é comum países ricos “exportarem” seu lixo, normalmente hospitalares e eletrônicos, para aterros e lixões localizados em países mais pobres.

Já é possível observar na realidade da cidade do Rio de Janeiro, a falta de um local no município capaz de receber o lixo da população carioca, por conta da grande demanda de espaço que seria necessário para as 10 mil toneladas de lixo produzidas diariamente na cidade, dados da Prefeitura do Rio de Janeiro de 2019, fazendo com que a cidade precise levar seu lixo para municípios vizinhos. Esse transporte é altamente dispendioso para os cofres da cidade.

O que acontece localmente no Rio de Janeiro, e também é a realidade de muitas localidades do Brasil e ao redor do mundo, é a concentração da deposição de RSU em cidades mais pobres, ou partes mais empobrecidas dos centros urbanos, tornando-se um grave redutor da qualidade de vida da população em seu entorno, por conta dos odores, animais e insetos que se proliferam em tais condições e, conseqüentemente, as doenças originárias destes. Portanto, para os aterros que já se encontram em funcionamento representem um menor risco para a sociedade e para o meio ambiente, é necessária a aplicação de protocolos regulatórios que sejam capazes de definir parâmetros seguros para a instalação de revestimentos e coberturas de solo dos aterros sanitários, sistemas de coleta de chorume, sistemas de recuperação energética do gás metano gerado no aterro, bem como remediação

de aterros sanitários fechados; além de sua utilização em conjunto com outras tecnologias, para uma gestão de resíduos mais perene e robusta no longo prazo.

III.2. Tecnologias “*Waste to Energy*”

As tecnologias *Waste to Energy* (WtE) cobrem todos os processos térmicos e técnicas de geração de calor ou gás/óleo combustível a partir de RSU. (Makarichi et al., 2018).

A incineração WtE é a técnica mais amplamente aplicada e consiste na combustão projetada de materiais residuais em alta temperatura, com as principais saídas sendo calor e, possivelmente, geração de eletricidade (Makarichi et al., 2018). Em comparação, outras técnicas WtE, incluindo pirólise e gaseificação, são realizados a uma temperatura significativamente mais baixa e em um ambiente com menos oxigênio, envolvendo diferentes reações e rendimentos do produto. Em geral, as temperaturas moderadas na pirólise, em torno de 500°C a 550°C, com taxas de aquecimento mais rápidas, geram produtos líquidos. A gaseificação com altas temperaturas e taxas de aquecimento, em torno de 800°C a 1000°C, promove a geração de produtos gasosos (Chanthakett et al., 2021). As condições padrão e principais saídas destes processos térmicos WtE são mostrados na Figura 12.

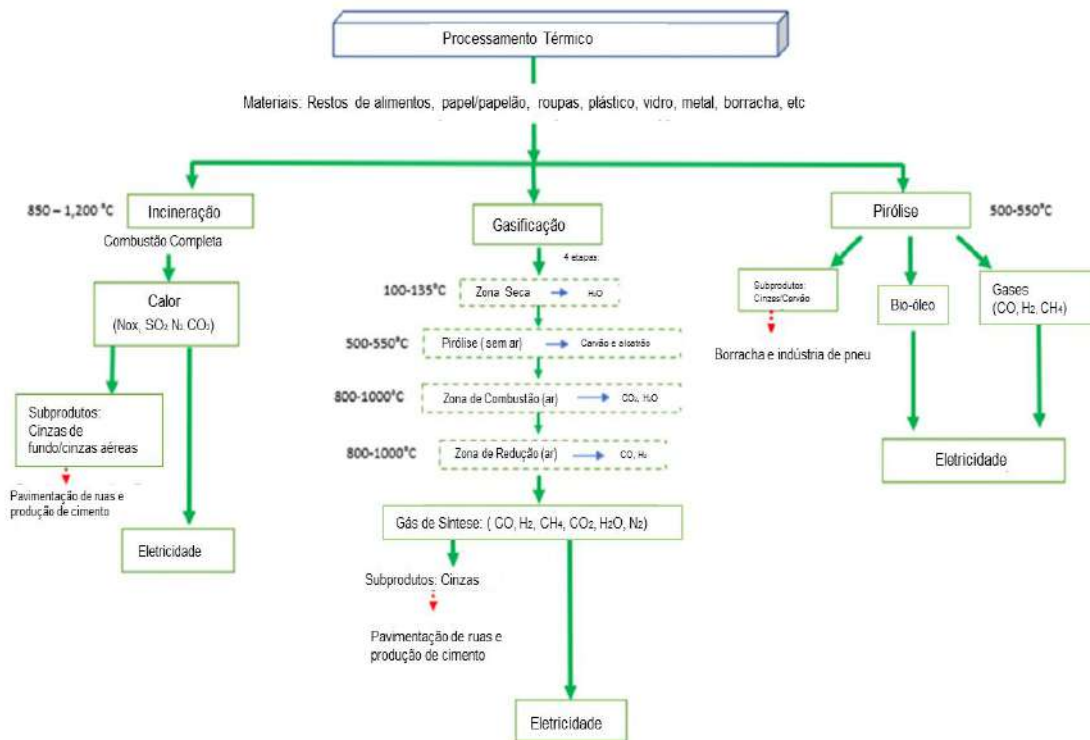


Figura 12 - Processos térmicos e suas aplicações (Adaptado de Chanthakett et al., 2021).

III.2.1. Incineração

Os resíduos sólidos gerados nas cidades têm alto potencial energético, tornando essa técnica de conversão de resíduos em energia a mais utilizada em grandes cidades, utilizando a combustão destes resíduos para geração de energia, vapor e calor. Além disso, é muito utilizado em países que possuem poucas porções de terra, e portanto, não dispõem de grandes áreas para depositar seu lixo, como o Japão, que incinera em média 78,5% de todos os seus resíduos. A incineração pode reduzir o peso e o volume de RSU em até 85% em peso e até 96% em volume (Zhang et al., 2021).

No começo de sua aplicação, a incineração era uma ferramenta tecnológica usada principalmente para a minimização do volume de RSU (economia de terra) e destruição de materiais perigosos, a incineração agora é frequentemente acompanhada de unidades de recuperação de energia e calor, e seus valores e eficiências melhoraram amplamente na aplicação. A Dinamarca e a Suécia são líderes em aplicações de incineração. Na Dinamarca, em 2005, a incineração gerou quase 5% de seu uso de energia e 14% de todo o consumo de calor doméstico em seus sistemas nacionais de energia. Essa técnica possui uma faixa ligeiramente menor do

fator de emissão de carbono (0,04–0,14 kg-CO₂/MJ) do que as usinas de energia baseadas em combustível fóssil, como as termelétricas. Para manusear a mesma quantidade de RSU, a necessidade de terra para incineração é significativamente menor do que o aterro. Em termos comparativos de escala de operação, uma planta de incineração com capacidade de processamento de um milhão de toneladas de RSU por ano, com vida útil de 30 anos, exige menos de 100.000 m² de terra, enquanto 30 milhões de toneladas de RSU requerem 300.000 m² de terra para operacionalização do aterro (Tsui e Wong 2019).

No gráfico da Figura 13, é possível ver os níveis de geração e o perfil do gerenciamento de RSU em países com diferentes características geográficas, onde países com grande disponibilidade de terras optam, em sua maioria, pela utilização de aterros sanitários, como por exemplo os Estados Unidos e Canadá. Enquanto os países com menor área, como Japão e Coreia do Sul, optaram pela utilização da incineração (União Europeia 2020).

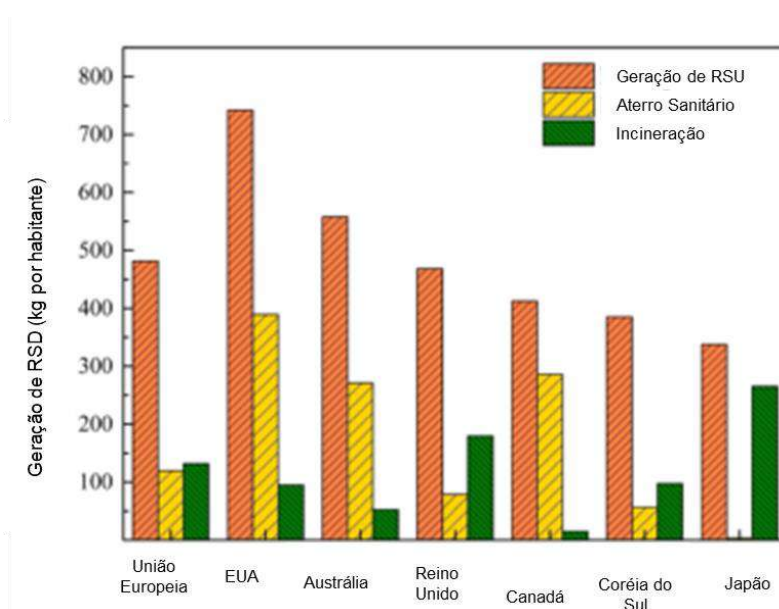


Figura 13 - Geração de RSU e suas principais destinações finais (União Europeia 2020)

No processo de incineração, representado na Figura 14, os resíduos não recicláveis são destinados para o processo de incineração. Esse processo é formado pela pré-desidratação; etapa importante quando há uma grande quantidade de matéria orgânica presente no lixo; o que é cada vez mais comum nas grandes cidades,

inclusive no caso do Rio de Janeiro, onde aproximadamente metade do RSU é resíduo orgânico. Na combustão, que ocorre na câmara de combustão, são gerados dois subprodutos: cinzas de fundo residuais (*bottom ash*) (IBA) que permanecem após a combustão na grelha e cinzas aéreas (*fly ash*) (IFA) que são removidas dos gases de exaustão. Estas, normalmente são conectadas ao sistema de controle de poluição do ar, representado neste caso pela utilização de carvão ativado, que fazem parte do sistema de incineração (Zhang et al., 2021)

Para incinerar uma tonelada de RSU em uma usina de transformação de resíduos em energia, 200-250 kg de IBA e 10 a 30 kg de IFA são gerados, respectivamente (Tian et al., 2020).

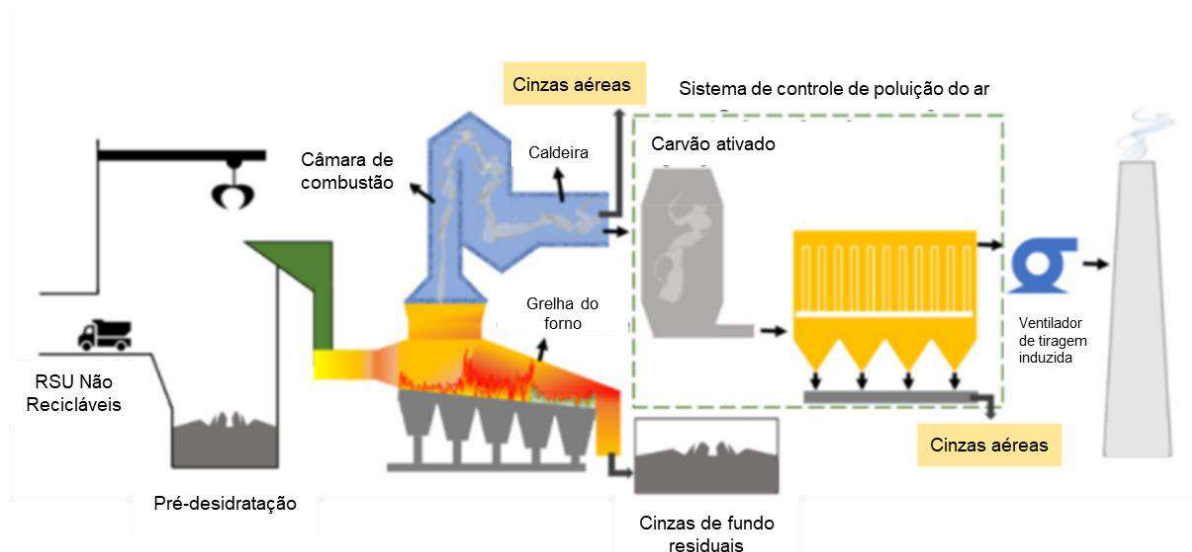


Figura 14 - Esquema ilustrativo do processo de Incineração de Resíduos e de formação do IBA e IFA (Y.Zhang et al., 2021)

A composição química das cinzas apresenta CaO , SiO_2 e Al_2O_3 ; além disso, esses subprodutos apresentam uma concentração alta de determinados metais pesados, tais como Zn, Ba, Pb e Cu (Jiaqi, 2021). Com a tabela 2 pode-se perceber o grande potencial de reutilização que as cinzas residuais (IBA) possuem, principalmente em aplicações estruturais, por conta de sua composição química rica em silício e cal (Ornebjerg et al., 2006).

Tabela 2 - Quantidade de cinzas de fundo residuais geradas e reaproveitadas em determinados países (Ornebjerg et al., 2006)

País	Toneladas de cinza produzidas (2003)	Toneladas de cinza reutilizadas (2003)	% de cinza reutilizadas (2003)
Dinamarca	644.626	629.278	97,6
França	2.995.000	2.366.000	79,9
Alemanha	3.140.000	2.025.700	64,5
Holanda	1.075.000	950.000	88,4
Reino Unido	725.000	410.000	56,6
Estados Unidos	9.000.000	500.000	5,6

A IFA traz grande preocupação para os especialistas do meio ambiente e de saúde, por conta da presença de contaminantes perigosos, como dioxinas, sulfatos, furanos e outros ácidos. Muito estuda-se a respeito da utilização de agentes imobilizadores para estes contaminantes e para os metais pesados, citados anteriormente, para que a IFA possa ser reutilizada, agregando valor a este subproduto (Zhang et al., 2021).

Uma das principais maneiras de imobilizar e realizar o tratamento destas cinzas é as incorporando em materiais de construção civil, tais quais tijolos e cimento. Porém, existe um desafio tecnológico. Embora as cinzas aglutinantes usadas tipicamente na produção de cimento, e a IBA e a IFA compartilhem composições químicas semelhantes, como o alto conteúdo de Ca, Si, Al e Fe, apenas um volume limitado de cinzas brutas da incineração de RSU pode ser usado como substitutos do cimento ou das matérias-primas na produção de cimento/concreto (Jiaqi 2021). A incorporação da IBA com concreto como agregados é limitada pela presença de alumínio metálico nas cinzas residuais, que reage com o ambiente básico do concreto, gerando gás hidrogênio, que induz a expansão e rachaduras de pastas de cimento ou produtos de baixa densidade e baixa resistência (Jiaqi 2021). Já a incorporação da IFA no concreto é limitada por seu alto teor de cloretos e sulfato. Cloretos solúveis em concreto armado causam corrosão em vergalhões de aço e fissuras no concreto e fissuração do concreto (Nguyen et al., 2018). Conseqüentemente, pré-tratamentos são necessários para produzir materiais à base de cimento incorporados com cinzas de RSU para que tenham um desempenho padrão.

Os pré-tratamentos mais utilizados industrialmente são (Jiaqi 2021):

- Lavagem com água - A lavagem com água é o método industrial mais comum para remover sais solúveis (por exemplo, NaCl, KCl ou CaCl₂) de cinzas da incineração de RSU, particularmente IFA.
- Envelhecimento - O envelhecimento é uma série de processos de oxidação, hidratação e carbonatação, que ajudam a diminuir a lixiviação de metais pesados.

Embora pesquisadores estejam investigando maneiras de lidar com as cinzas geradas pelo processo de incineração, existe um fator chave que limita a incineração como uma opção de gerenciamento do RSU, principalmente nos países do hemisfério sul: a grande quantidade de resíduos orgânicos provenientes do descarte de alimentos. De maneira geral, os alimentos possuem em sua composição 70% de água e a sua queima necessita de uma quantidade alta de energia, sendo muitas vezes necessário adicionar combustíveis fósseis para tornar viável a queima (Brown 2015). Isso faz com que o processo de geração de energia seja, em muitos casos, ineficiente ([C40 Knowledge Hub](#), 2019). A incineração é o processo mais custoso de gestão de RSU, tanto em termos de construção da planta de incineração, quanto a sua manutenção, como fica bem claro na Figura 15.

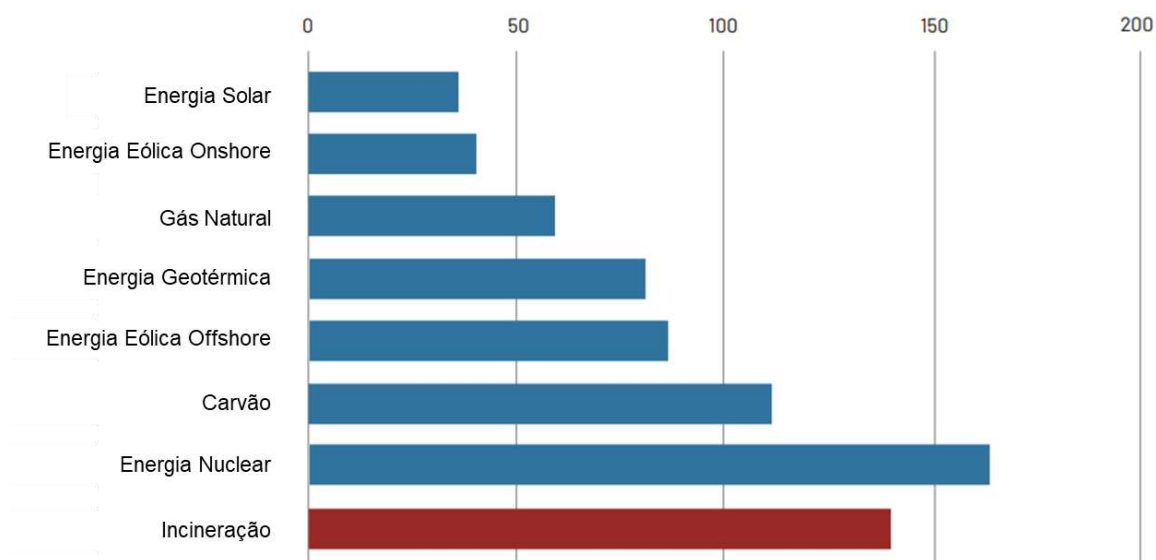


Figura 15 - Custo de geração de energia globalmente nivelado em dólares/MWh (U.S. Department of Energy 2019)

É estimado que, considerando a receita obtida por parte das empresas a partir de impostos coletados pela gestão do RSU e venda da eletricidade/calor gerado no processo, os custos de capital inicial para implantação de uma planta de incineração variem entre USD \$190-1000 por ton/ano, essa alta amplitude é decorrente das diferentes legislações ambientais da região em que se deseja instalar uma planta de incineração, e seus custos operacionais variam entre USD \$30-55 por tonelada. Além dos custos fixos relacionados ao processo de incineração, ainda existem custos variáveis, que podem chegar a até 20% dos custos totais do processo, referentes à adequação dos sistemas de controle de poluição do ar no decorrer do tempo e das novas legislações que são criadas (Moon 2020). Nos EUA, pelo menos 31 incineradores de RSU foram fechados entre 2000 e 2020, em grande parte devido ao encargo financeiro causado por requisitos de controle de poluição (Baptista e Perovich 2019). Os incineradores exigem um fornecimento constante de resíduos para poder continuar funcionando e se tornarem uma opção viável na lente econômica. Essa característica da tecnologia muitas vezes dificulta as políticas e programas destinados a reduzir o desperdício na fonte nos locais em que é utilizado.

Por fim, o processo de incineração possui potencial para economia de área necessária para armazenamento de resíduos, destruição de resíduos contaminados, e posterior geração de energia a partir do calor gerado na queima. Porém, ainda é uma técnica altamente custosa, poluente e com baixa eficiência energética. Além disso, há

uma grande pressão e preocupação da sociedade em relação a essas plantas de incineração. Portanto, a introdução de uma dessas plantas em qualquer localidade enfrentará um grande debate e resistência da população local, sendo assim, mais um limitante para a escolha desta estratégia de gestão do RSU.

III.2.2. Pirólise

A pirólise é um processo onde um rejeito passa por uma degradação térmica sem presença de oxigênio ou substâncias oxidativas. O rejeito em si, pode ser convertido em bio-óleos, biocarvão ou até em biogás. Isto faz com que a pirólise seja de fato vista como um processo que tem o potencial de transformar os RSU em produtos com maior valor agregado (Li et al.,2022). O uso da pirólise como uma forma de diminuição do impacto ambiental e social dos RSU é válido, já que o processo mostrou que pode transformar boa parte dos RSU em combustíveis, ou substâncias que têm menor impacto ambiental ao serem descartadas. (Chen, et al., 2014)

Ao realizar uma comparação de escalas com uma planta de incineração que opera na base de milhares de ton/dia, a pirólise se mostra como uma alternativa de escala mais flexível para a operação, o que tem chamado a atenção de pequenas cidades que precisam se preocupar com o transporte dos RSU por grandes distâncias (para as grandes cidades), e também das grandes cidades, já que estão procurando cada vez mais maneiras alternativas e mais sustentáveis e até rentáveis para o processamento da grande quantidade de resíduo.

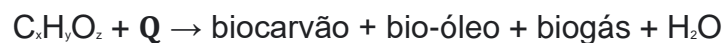
O processo de pirólise por aquecimento tradicional pode ser dividido classicamente entre 3 categorias, lenta (0,1–1,0 °C/s), rápida (10–200 °C/s) e flash (>1000 °C/s). As 3 categorias citadas têm variáveis de processo como a própria taxa de aquecimento, tempo de residência e diâmetro máximo de partícula. (Li et al., 2022)

Na tabela 3 são ilustradas as diferenças entre os 3 tipos de pirólise por aquecimento tradicional, mostrando alguns parâmetros de processo citados acima.

Tabela 3 - Tipos de pirólise por aquecimento tradicional (Li, et al.,2022)

Tipo	Taxa de Aquecimento (°C/s)	Tempo de Residência (s)	Diâmetro da partícula (mm)
Pirólise Lenta	0,1 - 1,0	450 - 550	5 - 50
Pirólise Rápida	10 - 200	0,5 - 10	<1
Pirólise Flash	>1000	<0,5	<0,2

Para ilustração da energia necessária para completar um processo pirolítico, a reação simplificada do processo de pirólise térmica pode ser retratada como:



Onde Q é descrito como o calor que precisa ser fornecido para que as reações possam acontecer.

A grande maioria dos processos atuais são realizados utilizando a pirólise lenta (Chen et al., 2014). Apesar disso, existem diversos estudos sobre a utilização da pirólise rápida ou flash para RSU que tenham passado por pré-tratamentos, como a retirada de umidade pela utilização de um pré-tratamento térmico (que é sugerido em todos os processos de pirólise), a transformação do RSU em pellets, separação do RSU em partes específicas como restos de comida, madeira, papel e resíduos plásticos, além de processos de trituração para diminuição do diâmetro de partícula processada para a adequação do material a ser processado. Além disso, a relação entre temperatura contra tempo de residência no reator deve ser bem pensada. Para processos com temperaturas mais amenas, ou com taxa de aquecimento menos agressivas, o tempo de residência no reator é consequentemente maior, fazendo com que o calor fornecido durante todo o processo seja parecido com os processos rápidos/flash. (Li et al., 2022, Chen et al., 2014)

As tecnologias utilizadas para plantas de pirólise térmica comerciais, são combinadas com outros tipos de tecnologia para agregar mais valor ainda ao produto final do processo, como por exemplo os processos de pirólise-gaseificação. Esse processo recebe grandes contribuições na literatura, muitas vezes apontados como

alternativas para processos *waste-to-energy* convencionais, como a incineração, por exemplo. (Smith et al., 2001; Li et al., 2007)

Além disso, também se percebe que a grande maioria das plantas projetadas para pirólise recebem como alimentação no reator o RSU pré tratado, e não RSU cru, logo, acredita-se então, que o pré-tratamento é uma parte necessária e crucial do processo. O pré-tratamento inclui a separação de materiais, diminuição do diâmetro máximo de partícula (Triturador), algum processo de secagem para reduzir a umidade presente no material (principalmente na parte orgânica). (Chen et al., 2014)

O processo de pirólise a partir de alimentação com RSU gera também produtos que precisam de um processo de tratamento secundário. Tanto o produto sólido (biocarvão), líquido (bio-óleo) e gasoso (biogás/gás de síntese), precisam de tratamento posterior para serem comercializados. Essa necessidade se dá por conta da pouca discriminação do material que entra no reator, o pré-tratamento da alimentação não é suficiente para assegurar a qualidade do produto final sem um tratamento secundário. Por conta disso, pode-se reforçar ainda mais o quanto é benéfico o acoplamento da tecnologia de pirólise com outros processos como por exemplo a gaseificação (Chen et al., 2014).

Um dos usos mais difundidos do óleo gerado pelo processo de pirólise é como um combustível líquido que pode ser utilizado em veículos. Contudo, esse óleo não pode ser usado diretamente do fim do reator pirolítico sem um pré -tratamento posterior ao processo, devido ao seu baixo poder calorífico e por ser contaminado por teores de água residual e compostos orgânicos oxigenados que acabam passando pelo reator, principalmente quando é de conhecimento geral que os RSU são especialmente ricos em umidade e tem uma carga orgânica muito elevada, quando se olha, por exemplo, para a cidade do Rio de Janeiro. (Li et al., 2020)

Como alternativa mais recente ao processo de pirólise puramente térmica, pode-se citar também a pirólise catalítica. Existem artigos mais recentes (Lee et al., 2020, Hoang et al., 2022)), que mostram que o uso de materiais aditivos no processo de pirólise, pode gerar um produto final (no caso da pirólise, principalmente o óleo de pirólise) com melhor qualidade, ou até pode-se dizer, com qualidade mais aceitável.

Os catalisadores em si, não conseguem alterar o equilíbrio de uma reação, porém como os reatores de pirólise geralmente não trabalham na região de equilíbrio químico, a composição do produto que sai do reator pirolítico pode ser determinada por cinética química ao invés da termodinâmica. Dessa forma, a utilização de catalisadores ou aditivos pode ser traduzida em melhorias no rendimento do processo de pirólise (Lee et al., 2020).

Esse pode ser considerado um avanço relativamente recente no processo de pirólise para tratamento de RSU. O quadro 2 mostra alguns dos principais exemplos de trabalhos recentes no que se refere à incorporação de aditivos/catalisadores no processo de pirólise térmica e alguns dos efeitos observados com alimentação envolvendo RSU (Lee et al., 2020).

Quadro 2 - Efeitos da adição de aditivos/catalisadores em estudos recentes de pirólise de RSU. (adaptado de Lee et al., 2020)

Alimentação Pirólise	Aditivo/ Catalisador	Razão de Alimentação	Efeitos	Referência
Lodo de papel e RSU	MgO	19:1	MgO reduziu a massa residual de orgânicos oxigenados O MgO reduz a massa de resíduos, emissão de poluentes, energia de ativação, aumenta as proporções de hidrocarbonetos alifáticos e reduz a proporção de compostos oxigenados.	Fang et al., 2018
RSU	MgO, CaO	5:1	Dolomita calcinada favorece hidrocarbonetos de cadeia longa, craqueamento e formação de gás de síntese	Veses et al., 2020
RSU	CaO, Carvão de pirólise	CaO: 0–7%, carvão: 0–40%,	5% CaO e 30% de carvão reduzem a taxa de produção de alcatrão em 2,79% e 5,68%, respectivamente. (alcatrão é um subproduto, efetivamente aumenta o rendimento)	Song et al., 2018
Restos de alimento	CO ₂	Atmosfera de CO ₂	Mais H ₂ , CO e CH ₄ são gerados a 400–700 °C. CO ₂ inibe a adição de radicais livres em fase gasosa e a desidrogenação de compostos lineares.	Lee et al., 2020
RSU	Carvão (de RSU pirolisado)	Carvão:voláteis = 0,4 - 2,2	Aumenta o rendimento da geração de compostos voláteis como o H ₂	Wand et al., 2020

Munir et al., (2021) realizaram um estudo sobre as alternativas de métodos “*waste-to-energy*” onde a pirólise foi mostrada com um custo de capital inicial de USD \$400-700 por tonelada, por ano de operação. Ao mesmo tempo, o custo operacional fica em torno de USD \$50-80 por tonelada, por ano de operação. (Kumar et al., 2017) A grande variação entre os valores acontece visto que nas plantas estudadas, existe uma grande variação entre tipo de pré-tratamento utilizado, pós-tratamento e purificação de produtos. No geral, esses valores são relativamente altos quando comparados com outros processos e como visto no próprio estudo de Munir, o valor se mostra como uma grande barreira para a implementação do processo em larga escala no tratamento de RSU.

Além da barreira econômica, a questão da escala de processo também é muito contundente. Quando se fala de tratamento de RSU, sobretudo em grandes cidades como o Rio de Janeiro, o volume de RSU gerado é extremamente alto, o que limita o uso da pirólise como solução única, dado que seriam necessárias múltiplas plantas. Comparativamente, o processo tem dificuldade em chegar à quantidade de processamento de outros tratamentos estudados como principalmente a gaseificação e a biometanização. Neste sentido, a sua aplicação faz sentido em combinação com outras alternativas para tratamento do RSU. Outro ponto de atenção é o que o produto gerado após a pirólise (principalmente o bio-óleo) é de baixa pureza quando comparado aos produtos de outros tratamentos, além do grande volume de coque que é deixado no reator pirolítico após certo tempo de tratamento. (Lee et al., 2020)

Com o avanço das tecnologias de catálise pirolítica, espera-se que a pirólise se torne um processo mais economicamente viável, gere um produto com maior grau de pureza e precise de menores temperaturas médias para atingir o seu objetivo, tornando-se assim um tipo de tratamento mais atrativo para o mercado e governos quando se fala de RSU.

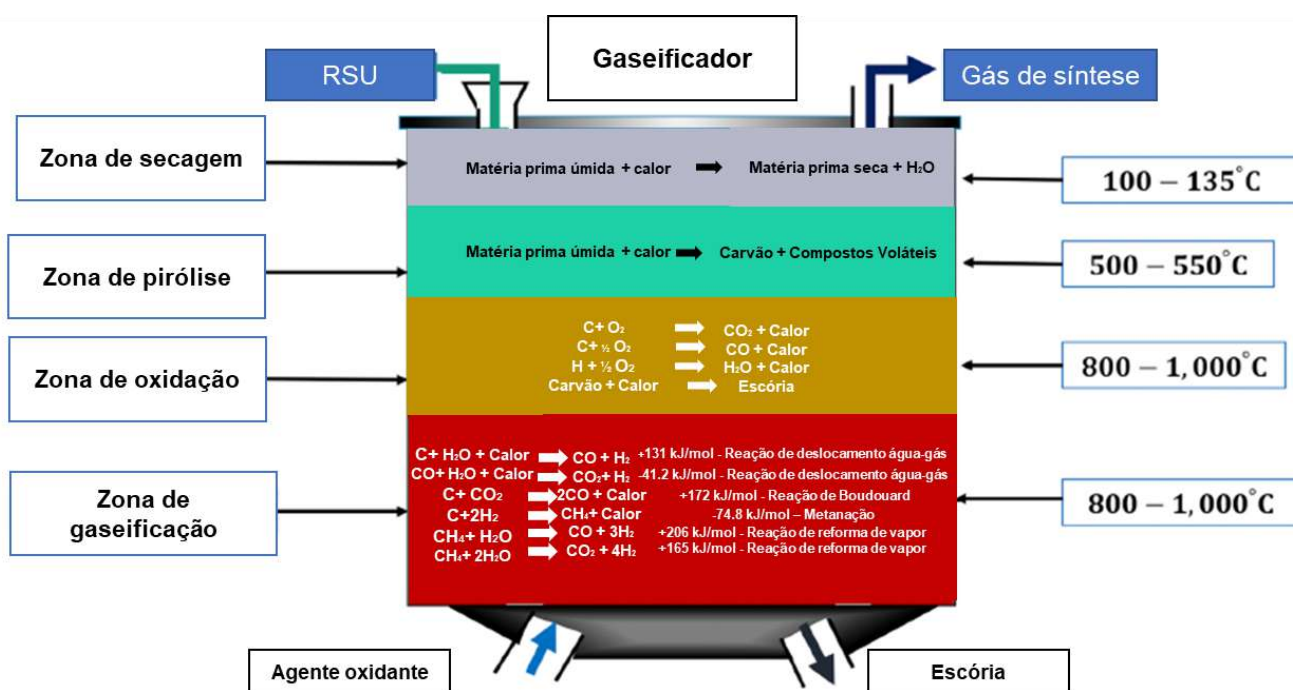
III.2.3. Gaseificação

A decomposição térmica de biomassa em um ambiente pobre em oxigênio, incluindo pirólise e gaseificação, pode converter eficientemente as frações orgânicas

da biomassa em produtos gasosos e líquidos, deixando resíduos de alcatrão e biocarvão. Os produtos gasosos da decomposição térmica de RSU, principalmente H₂ + CO, são matérias-primas promissoras para o fornecimento de energia a partir do desperdício, e que muitos autores consideram atualmente como uma fonte renovável de energia (Lee, et. al 2021).

A gaseificação é um processo que transforma matérias-primas contendo carbono em gás de síntese, através de um conjunto de reações químicas em alta temperatura acontecendo em um ambiente com presença de oxigênio limitado. O processo de gaseificação é baseado em reações exotérmicas e endotérmicas. Ambas as reações ocorrem simultaneamente na câmara de gaseificação. Além dessa diversidade na natureza das reações, elas também ocorrem/são ativadas em diferentes temperaturas (Chanthakett et al., 2021)

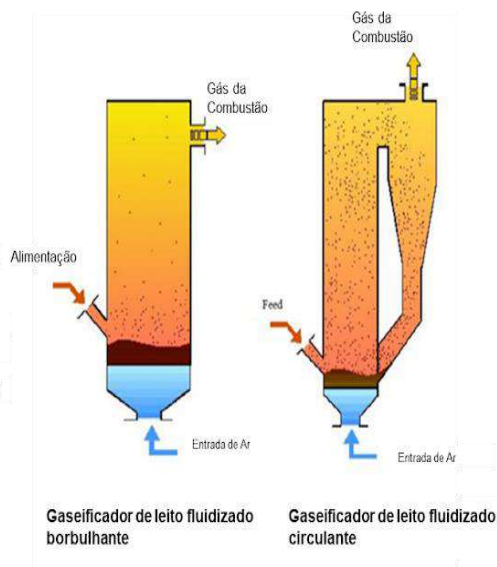
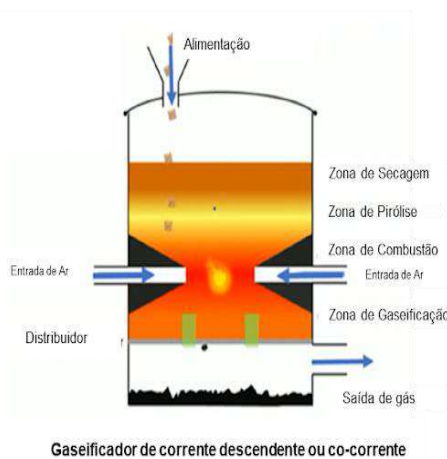
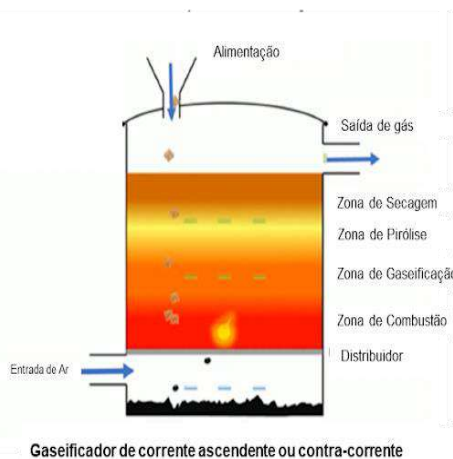
A gaseificação consiste em quatro etapas: secagem, zona de pirólise, oxidação e zona de gaseificação (Seo et al., 2018) como mostrado na Figura 16.



A matéria-prima, que nesse caso é o RSU, é alimentada no reator, em seguida, passa por diferentes zonas de temperatura. Em primeiro lugar, a zona de secagem

fornece uma temperatura de cerca de 100–135°C. Esta zona é para evaporar a umidade da matéria-prima de entrada. Em seguida, a zona de pirólise produz gás e vaporiza os resíduos de carvão a temperaturas de 500–550°C, os resíduos reagem constantemente com o oxigênio na zona de oxidação (combustão) em uma temperatura entre 800–1000°C. Nessa parte, o resíduo (carvão ou escória) pode ser produzido. Por último, o material carbonáceo na câmara pode ser transformado na zona de gaseificação em uma mistura de gases. Normalmente, ambas as zonas de oxidação e gaseificação operam entre 800 e 1000°C. Além disso, as reações químicas em gaseificador são controladas pelo agente oxidante, o que afeta o desempenho de gaseificadores de resíduos. Os agentes oxidantes comuns incluem ar, oxigênio, vapor, d' água e CO₂ (Deng et al., 2017).

Nas últimas décadas, muitos tipos de gaseificadores foram desenvolvidos, além de diversas pesquisas e estudos que estão em andamento focados no aprimoramento e otimização do processo de gaseificação. Na Figura 17 têm-se alguns exemplos de reatores. Os gaseificadores de leito fixo são a tecnologia de gaseificação mais simples que consiste em um sistema de movimentação lenta para o processamento do RSU. Usa agentes oxidantes e tem longo tempo de residência, algo em torno de 900–1800 segundos e em alta pressão (Materazzi et al., 2013). O sistema de movimento lento tem a forma de um cilindro com espaço onde a matéria-prima é alimentada no topo do reator enquanto o agente de gaseificação é adicionado na parte inferior. O reator se move lentamente com alta pressão entre 1 e 100 bar e fornecendo temperatura em torno de 500–1200°C resultando em alta conversão de carbono (Nuamah et al., 2012). Gaseificadores de leito fixo incluem reatores de corrente ascendente e descendente como mostrado na Figura 17, que se diferenciam na configuração do reator.



A aplicação de gaseificadores de leito fluidizados na decomposição de RSU vem sendo amplamente estudada e foi comprovada a possibilidade de manutenção de uma temperatura uniforme no reator, ao passo que uma alta taxa de transferência de calor é mantida, fazendo com que esses gaseificadores possam ser amplamente usados como usinas de energia de grande escala, tornando-se assim, uma excelente alternativa para gestão do RSU de grandes cidades (Kersten et al., 2005; Kirnbauer et al., 2012; Nilsson et al., 2014). Nos processos de leito fluidizado, o RSU é alimentado no reator, então o meio de fluidização (ar) é injetado junto com areia para ativar a reação na temperatura de operação de cerca de 800–900°C. Olivares et al., 1997 e Timmer (2008) descobriram que o calcário calcinado pode levar ao aumento do desempenho do reator, aumentando a temperatura e o tempo de residência. Reatores de leito fluidizados podem manter a faixa de temperatura entre 700 e 1000°C e a matéria-prima pode ficar mais tempo na reação, que resulta em maior transferência de calor e uma maior conversão de carbono (Materazzi et al., 2013).

No Quadro 3 são descritas as principais informações a respeito dos reatores de gaseificação.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de diferentes tipos de reatores de gaseificação (adaptado de Chanthakett et al., 2021)

Reator	Condições Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Corrente ascendente	Tipo de resíduo: RSU, biomassa Tamanho do resíduo: até 100 mm Temperatura: 500-1200°C Tempo de residência: 900 – 1800 seg Pressão: 1-100 bar	<ul style="list-style-type: none"> . Alta performance e eficiência térmica . Permite a decomposição de resíduos de diversos tamanhos, umidades e tipos . Reator com poucas complicações operacionais . Pouca geração de cinzas . Alto sucesso na obtenção de reações entre RSU e agentes gaseificantes 	<ul style="list-style-type: none"> . Alta produção de carvão e escória e pouca produção de gás de síntese . RSU precisa receber um pré-tratamento para sua homogeneização
Leito Fixo	Tipo de resíduo: RSU, biomassa Tamanho do resíduo: até 100 mm Temperatura: 500-1200°C Tempo de residência: 900 – 1800 seg Pressão: 1-100 bar	<ul style="list-style-type: none"> . Baixa produção de carvão e escória . Alto tempo de residência . Reator com poucas complicações operacionais . Alta performance de conversão . Processo com baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> . Limitação no tamanho dos resíduos da matéria prima . Requer baixa umidade e homogeneidade da matéria prima . Dificuldade na geração de calor inicial e no controle do calor dentro do reator . Requer sistemas de refrigeração na fase de produção do gás de síntese
Leito Fluidizado Borbulhante	Tipo de resíduo: RSU, biomassa, esgoto Tamanho do resíduo: até 100 mm Temperatura: 800 - 1000°C	<ul style="list-style-type: none"> . Operação simples . Boa capacidade de gerar combustão . Baixa concentração de resíduos 	<ul style="list-style-type: none"> . Restrição de tamanho da matéria prima . Requer uma etapa de pré-tratamento da matéria prima

	Tempo de residência: varia de minutos a horas Pressão: 1-30 bar	. Bom controle de temperatura . Baixo custo de manutenção	
Circulante	Tipo de resíduo: RSU, biomassa, esgoto Tamanho do resíduo: até 100 mm Temperatura: 700 - 1000°C Tempo de residência: varia de minutos a horas Pressão: 1-30 bar	. Alta conversão de carbono . Baixa concentração de resíduos . Baixo tempo de residência em um reator . Flexibilidade na natureza dos insumos de alimentação do reator	. Alto custo de investimento inicial . Reator com maior complexidade técnica e de difícil controle

O gás de síntese gerado no processo de gaseificação pode ser usado como uma matéria prima na indústria química e bioquímica, para produção de compostos de maior valor agregado e biocombustíveis, como metanol, etanol, além de poder ser utilizado como gás de combustão para geração de energia elétrica, através de um acoplamento de um sistema de turbinas acionadas pelo vapor gerado pela planta. Esse tipo de utilização de RSU como matéria prima de produtos subsequentes e/ou energia está relacionado ao conceito de valorização de resíduos, que consiste em gerar produtos de maior valor agregado e com alta relevância econômica, materiais que teriam um descarte que não utilizam esse potencial do RSU como matéria prima (Chanthakett et al., 2021)

Na Figura 18 é possível ver uma ilustração de uma integração de uma planta de gaseificação com um sistema de geração de energia elétrica a partir do vapor gerado da queima do gás de síntese. A figura mostra o conceito de “fechar o ciclo do lixo”, onde a RSU coletada nas residências, gera, ao final do processo, a energia elétrica que abastece a mesma residência.

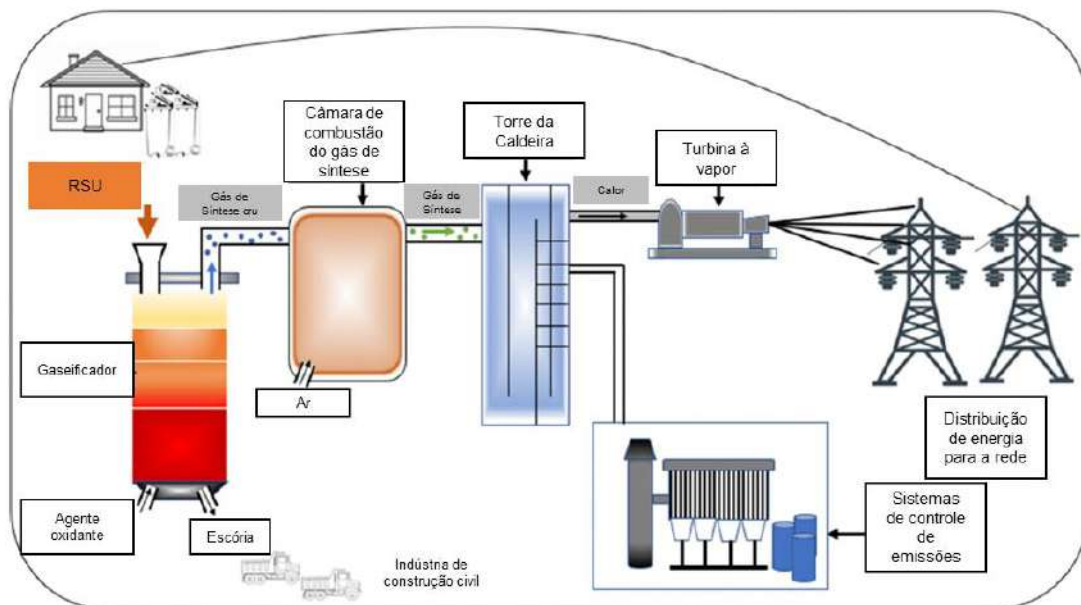


Figura 18 - Gaseificação de RSU para aplicação em usinas de energia.(Chanthakett et al., 2021)

Uma grande preocupação no estudo de estratégias de gestão de resíduos sólidos é a geração de gases de efeito estufa. No gráfico da Figura 19 é possível observar a comparação na geração de gás CO₂ entre a utilização de aterros sanitários e o processo de gaseificação. Os dados indicam que o aterro pode produzir 55,63% de CH₄ e 37,14% de CO₂ em volume total de gases produzidos, o que é superior a todos os gaseificadores no mercado (Eklund et al., 1998). Em termos comparativos, atualmente há em desenvolvimento o reator de gaseificação de plasma que produz o nível mais baixo de CH₄, em torno de 0,1% (Lars e Waldheim, 2018). No caso do CO₂, reatores de leito fluidizado e gaseificadores de leito fluidizado circulante produzem uma quantidade de CO₂ em torno de 25% do volume total de gases (Lars e Waldheim, 2018; Majidi e Kamalan, 2017). Com base nisso, é possível afirmar que a aplicação de gaseificação pode contribuir para a redução da emissão de GEE, quando comparado à performance dos aterros sanitários.

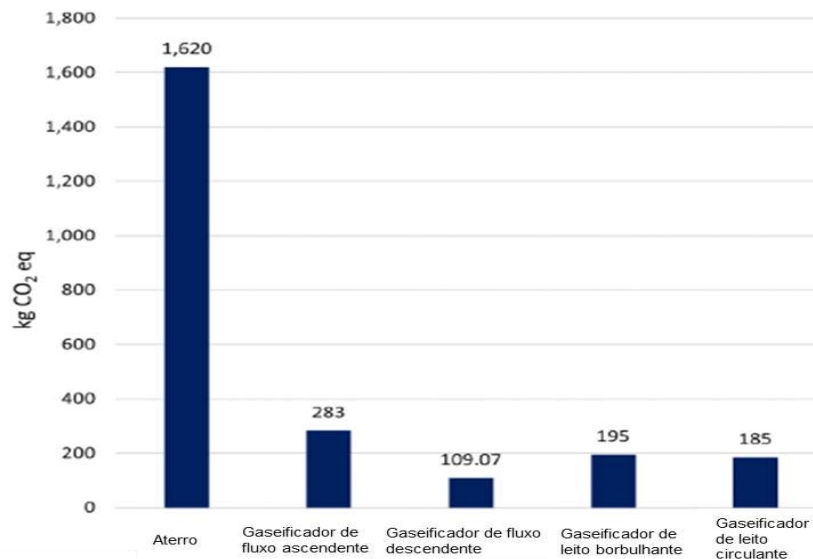


Figura 19 - Comparação da geração de CO₂ (eq) por tonelada de RSU entre aterro sanitário as técnicas de gaseificação citadas anteriormente.(Chanthakett et al., 2021)

Na Tabela 4 são descritos o desempenho energético, de emissão de gases e de custos relacionados à instalação e operação de uma planta de gaseificação de RSU. O custo de tratamento por tonelada de RSU do processo de gaseificação ainda é mais alto que em aterros sanitários, ainda que o reator de leito fluidizado circulante apresente um custo/ton bem reduzido comparado aos outros reatores. Entretanto, a gaseificação apresenta uma melhor performance de emissões e de aproveitamento energético do RSU, com isso, os ganhos de capital inerentes à gaseificação através do uso do gás de síntese para geração de energia elétrica e como plataforma química para obtenção de produtos com maior valor agregado, torna essa tecnologia atrativa.

Tabela 4 - Um resumo do desempenho energético, de emissão de gases e de custos de várias tecnologias.(Chanthakett et al., 2021)

Aspectos	Performance Energética		Performance de Emissões		Performance Econômica	
	Conteúdo Energético (MJ/Nm ³ do RSU)	Geração de Eletricidade (kWh/h)	Gases de Efeito Estufa (kg CO ₂ eq)	Partículas (mg/Nm ³)	Custo/Ton de RSU (\$USD)	Valor de mercado (Valor da eletricidade gerada em \$USD/ton de resíduos)
Reatores de Gaseificação						
Leito fixo ascendente	5	571	283	0,7	1216	54,13
Leito fixo descendente	6	571	109,07	0,7	424	54,13

Leito fluidizado borbulhante	14	547	195	1	306	51,86
Leito fluidizado circulante	14	547	185	1	271	51,86

A gaseificação já é usada para certas categorias de RSU, incluindo embalagens e materiais de plástico e papel. No entanto, para a RSU contendo matéria orgânica, o pré-tratamento é geralmente necessário, devendo-se considerar o consumo de energia adicional do pré-tratamento no balanço energético e econômico geral (Tsui e Wong 2019).

Assim como na incineração, um desafio técnico da gaseificação é a grande porcentagem de matéria orgânica presente no RSU e seu alto nível de umidade, além de outras impurezas com baixa taxa de calor, que tornam a queima mais difícil e demanda uma quantidade excessiva de energia para o sistema, tornando o coeficiente final do processo, muitas vezes, negativo (Lee 2021). Isso pode ser um grande problema para a utilização desta técnica em regiões onde o RSU possui grande fração de matéria orgânica, como no Rio de Janeiro, o que pode exigir uma etapa prévia de secagem do RSU recebido na planta, ou a separação do material orgânico para que este seja tratado de uma outra maneira. Uma outra dificuldade identificada desta técnica é a restrição de tamanho da matéria prima, demandando um pré-tratamento do RSU.

Um estudo abrangente do Banco Mundial de 1998 examinou as usinas de gaseificação instaladas na década de 1980 e chegou a resultados desanimadores: A maioria das usinas de gaseificação foi retirada de operação. Nas Filipinas, apenas 1-5% dos gaseificadores instalados 3-6 anos antes ainda estavam operando. Os resultados de outros países foram semelhantes. A análise detalhada da situação de 24 gaseificadores na Indonésia revelou: “Quase nenhum dos projetos identificados se tornou totalmente comercial, e a maioria se mostrou insustentável por razões técnicas, financeiras/econômicas e institucionais” (Agência Internacional de Energia 2004). Apenas com subsídios significativos alguns dos projetos de gaseificação examinados produziram alguns benefícios para os usuários.

As principais dificuldades apontadas estão relacionadas a alta dependência do suporte das empresas fornecedoras da tecnologia de gaseificação, por ser um conhecimento muito restrito e que necessita de mão de obra altamente qualificada. Além disso, à época, a conversão de energia do processo era muito abaixo do esperado e na grande maioria das plantas, o óleo diesel era usado como combustível juntamente com o gás de síntese para alimentar o gaseificador. O grau de pureza do gás gerado no processo térmico pode se tornar um desafio operacional, uma vez que a sua queima para gerar energia produz fuligem e alcatrão, e com uma baixa pureza, esses materiais se acumulam e podem diminuir a vida útil do motor de combustão e requer manutenção constante do mesmo, elevando os custos.

Entretanto, o cenário parece estar se tornando mais promissor para a tecnologia. Ao longo da pesquisa na literatura, foi possível encontrar uma planta de gaseificação em operação com escala comercial encontrada que está localizada na cidade de Edmonton, Canadá. A planta é operada pela empresa Enerkem, com capacidade anual de 100.000 toneladas e tem como objetivo produzir biometanol e bioetanol a partir do gás de síntese gerado no processo de gestão de RSU não reciclável e não compostável seco da cidade de Edmonton. Além disso, a empresa possui outros projetos em fase de construção e em desenvolvimento no Canadá, Holanda e na Espanha, com escalas de tratamento que variam de 200.000 ton/ano a até 400.000 ton/ano.

De maneira geral, os grandes desafios enfrentados para a utilização da gaseificação na gestão de RSU de uma grande cidade, como o Rio de Janeiro, consiste no investimento para redução do custo operacional da planta, aumento da eficiência da conversão de carbono, aumento da eficiência na posterior geração de energia elétrica e no controle da qualidade do RSU que será usado como insumo, necessitando de processos robustos de pré-tratamento. Por fim, por ser uma tecnologia ainda pouco empregada, os custos de investimento em uma planta são muito elevados e ainda há uma grande barreira tecnológica a ser superada por novos entrantes.

III.3. Rotas Biológicas - Digestão Anaeróbia

As rotas biológicas usadas no tratamento de resíduos orgânicos municipais que serão abordadas nesta revisão têm como ponto de partida, a digestão anaeróbia (DA). A DA é um processo bioquímico que envolve a degradação de recursos orgânicos em substâncias simples, resultando na produção de biogás através da atividade metabólica de um microrganismo (Nwokolo et al., 2020). Na figura 20 tem-se as etapas do processo de DA.

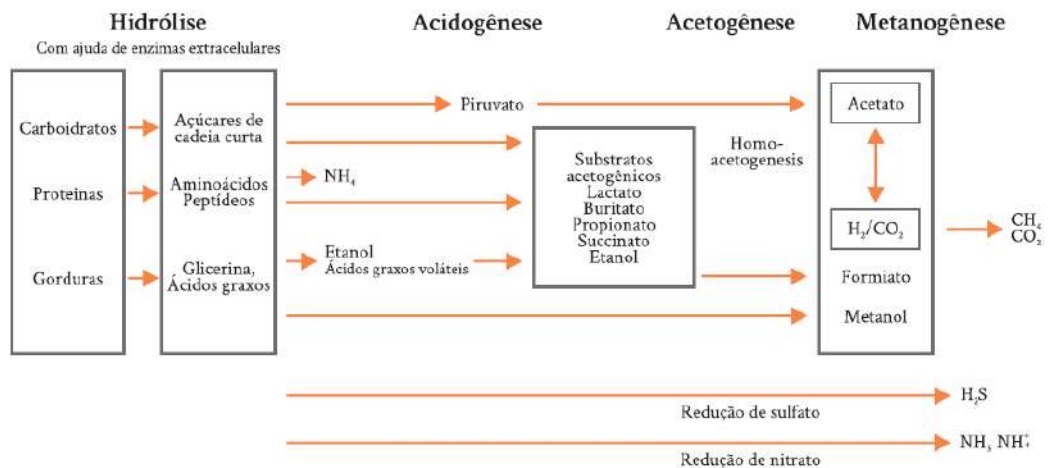


Figura 20 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Kuns et al., 2019)

Na etapa de hidrólise, compostos biopoliméricos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios são degradados em compostos solúveis em água (Sawyer et al., 2019). Esse processo ocorre pela ação de enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas. Quando a matéria orgânica presente é complexa e de difícil degradação, a hidrólise tem grande importância na velocidade global de degradação, podendo ser considerada como etapa limitante da velocidade da DA (Kuns et al., 2019). Na fase seguinte, a acidogênese, conhecida como estágio de fermentação, as bactérias convertem glicose, aminoácidos e lipídios em ácidos orgânicos, ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono (CO_2) e gás hidrogênio (H_2) (Sarker et al., 2019). Nesta fase é produzido o principal insumo para os microrganismos metanogênicos, o CH_3COOH , ácido acético.

A terceira etapa da digestão anaeróbia é considerada crítica ao processo, sendo conduzida por um grupo de bactérias denominadas acetogênicas. Nessa etapa, os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos

de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono (Kuns et al., 2019).

No estágio da metanogênese, os ácidos graxos voláteis, são convertidos em acetato, H₂ e CO₂. O acetato, dióxido de carbono e o gás hidrogênio produzidos nesta etapa são convertidos em biogás (CH₄). Ao final do processo há também o produto da digestão em fase sólida, chamada na literatura de digestato (*digestate*, em inglês).

A DA de resíduos alimentares ocorre em duas faixas ótimas de temperatura, 35-40°C, chamado de processo mesofílico e 55-60°C, chamado de processo termofílico. A maior parte das plantas de DA operam na faixa mesofílica, pois menos calor é necessário para manter essa temperatura, facilitando a operação e manutenção das plantas. Os reatores termofílicos, embora exijam maior atenção para operar, são instalados por acelerarem as taxas de degradação, criando maiores rendimentos de biogás e reduzindo os patógenos no digerido produzido. Algumas cidades ao redor do mundo já implementaram a DA para tratar seus resíduos orgânicos domiciliares, como: Munique (Alemanha), Milão (Itália), Madri(Espanha), Viena(Áustria), Oslo(Noruega), Hinjewadi, Pune (India) (Jain et al., 2018). Inclusive, a cidade do Rio de Janeiro possui uma planta de pequena escala em operação no Ecoparque do Caju.

Em relação ao processo de co-digestão, as cidades podem se beneficiar da possibilidade de tratar seus resíduos alimentares junto com o lodo de águas residuais de estações de tratamento de esgoto, onde as regulamentações ambientais permitem. Esse método vem ganhando força nas cidades porque existem benefícios relacionados à integração do tratamento do lodo e resíduos orgânicos e alimentares. Estações de tratamento de águas residuais ou instalações de recuperação que normalmente têm altos requisitos energéticos se beneficiam do alto teor energético dos resíduos de alimentos. Enquanto o processo de DA se beneficia da capacidade já existente das plantas de tratamento de águas residuais, necessitando de um capital para adequação das instalações já existentes. A co-digestão torna possível realizar a DA dos resíduos alimentares e do lodo de esgoto em uma mesma planta, tornando o processo economicamente mais viável (Jain et al., 2018).

O produto sólido da digestão pode ser usado como composto que fornece o mesmo valor que os condicionadores orgânicos na aplicação de correção da terra (Tsui e Wong 2019), diminuindo a dependência de fertilizantes químicos, aumentando a retenção de umidade do solo e reduzindo as necessidades de irrigação (Tsui e Wong 2019). Existem várias tecnologias comumente conhecidas como processamento do digerido para refinar a qualidade deste produto, para uso subsequente no setor agrícola, como condicionador de solo e fertilizante orgânico.

A pluralidade dos produtos e processos envolvendo a DA é sua maior força, na Figura 21 está esquematizado o potencial que a DA tem de fechar o ciclo natural dos nutrientes, ao mesmo tempo que sustenta os princípios da sustentabilidade, conectando-se a diversas tecnologias inovadoras, como a de biorrefinaria. O conceito de biorrefinaria é análogo ao conceito de valorização de resíduos mencionado anteriormente na tecnologia de gaseificação. Além disso, a DA possibilita a geração de biogás que pode ser convertido em eletricidade, e a geração de digestato, que quando usado como biofertilizante torna a prática agrícola mais sustentável. Mostrando que, assim como a técnica de gaseificação, os a DA é capazes de integrar o conceito de valorização de resíduos, agregando valor e relevância comercial ao RSU descartados pela população (Tsui e Wong 2019).

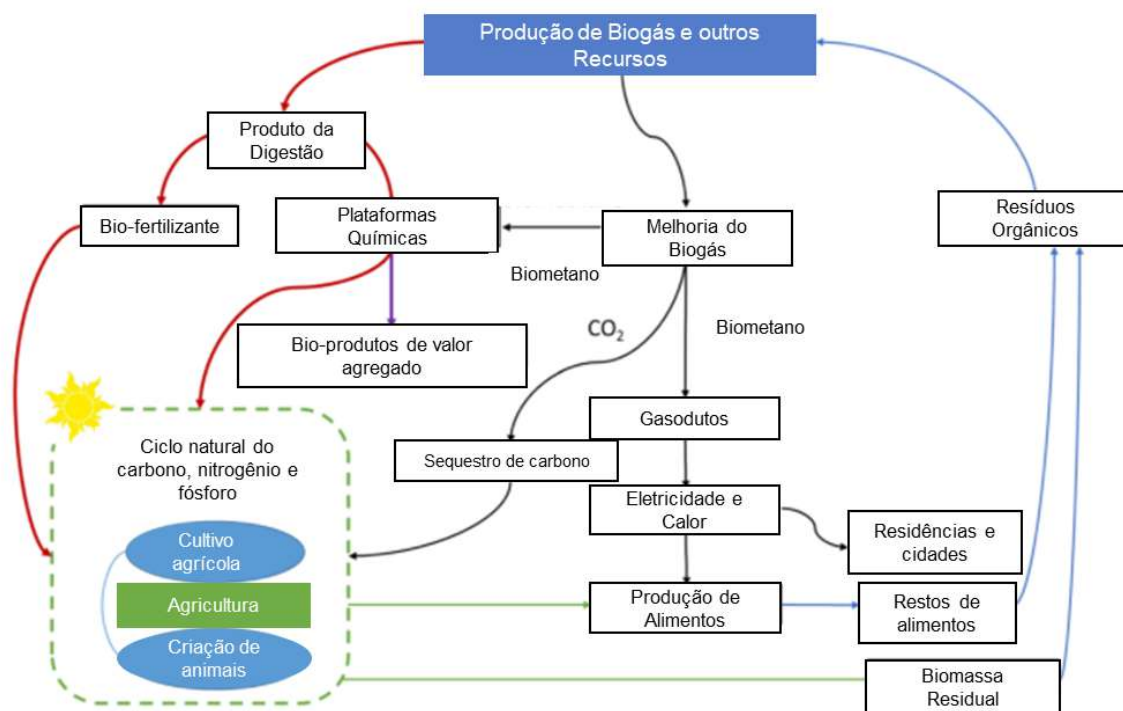


Figura 21 - Papel da planta de digestão anaeróbica moderna na bioeconomia ((Tsui e Wong 2019)

De maneira geral, a DA apresenta múltiplos como ambientais, econômicas, energéticas e de saúde pública. Em contrapartida, os principais desafios envolvendo essa técnica estão relacionados à qualidade do RSU obtido a partir da coleta municipal e a possível necessidade de pré-tratamento destes resíduos e o alto tempo de residência que o material orgânico precisa ficar retido nos biodigestores para a formação dos produtos de interesse, o que pode ser um ponto chave de complexidade da operação, levando em conta o recebimento contínuo de RSU que a unidade recebe a partir da coleta urbana.

Quadro 4 - Aspectos positivos relacionados às plantas de DA (adaptado de Jain et al., 2018)

Aspectos Positivos	Principais Pontos
Produção de Energia Renovável	Geração de eletricidade para a própria planta e entorno, distribuição na rede elétrica; Redução da dependência de energia de combustível fóssil
Mitigação dos Impactos Ambientais	Redução das emissões de gases de efeito estufa ao substituir combustíveis fósseis como carvão e petróleo, pelo biogás para o fornecimento de energia e calor para edifícios, residências e indústria
Contribuição para o estabelecimento de uma economia circular	A DA possibilita a recirculação de nutrientes e matéria orgânica nos solos ao devolvê-los na forma de biofertilizante
Melhoria da qualidade do ar urbano	Evitando a liberação descontrolada de metano de aterros, que atuam como precursores de ozônio na atmosfera, deteriorando a qualidade do ar com o passar do tempo
Contribuição para a segurança alimentar	Restauração de solos através da reciclagem de nutrientes, matéria orgânica e carbono Aumento do rendimento das plantações através do uso de biofertilizante rico em nutrientes
Melhoria da saúde e saneamento através de uma melhor gestão de resíduos sólidos	Tratamento e reciclagem de resíduos orgânicos para redução de odores e a propagação de doenças por despejo descontrolado Prevenir a propagação de doenças por meio de coleta e devida gestão de lixo orgânico
Desenvolvimento econômico e criação de empregos	Geração de empregos no curto prazo para a construção das plantas e fabricação de equipamentos de DA, e geração de emprego no longo prazo para a manutenção e operação da planta manutenção

III.3.1. Compostagem

A compostagem é um processo biológico que pode ser apontado como uma das soluções possíveis para RSU, já que o % em massa de resíduos orgânicos é muito alto. A compostagem se baseia na quebra dos resíduos orgânicos, com o objetivo de gerar ao final do processo fertilizantes (Hoang et al., 2022). Nesta análise da tecnologia de compostagem, será dado um foco em estudos e aplicações centralizadas, tendo em vista o aproveitamento da infraestrutura de gestão de RSU pré-existente na cidade do Rio de Janeiro.

Além da produção de fertilizantes orgânicos, o calor gerado pelo processo de compostagem também é considerado um de seus produtos. Na literatura, estima-se que, dependendo do tipo de material alimentado ao processo de compostagem, seria possível haver uma geração de 3-16 MJ ao total de energia, para cada kg de matéria

orgânica composta. (Klejment et al., 2008). Além disso, foi estimada uma recuperação em torno de 38% do calor gerado no processo de compostagem. (Irvine et al., 2010). Isso pode ser um indício de mais uma utilização possível do processo de compostagem, já que o calor gerado pode ocasionalmente servir para reduzir o custo de operação do processo.

Sua implementação pode mitigar os efeitos da liberação de gases estufa liberados na decomposição do material orgânico gerado nas cidades em lixões, controlados ou a céu aberto, ao mesmo tempo pode transformar o material composto em fertilizantes orgânicos de maior valor agregado. (Song et al., 2021)

Um diagrama básico da compostagem está esquematizado na Figura 22.

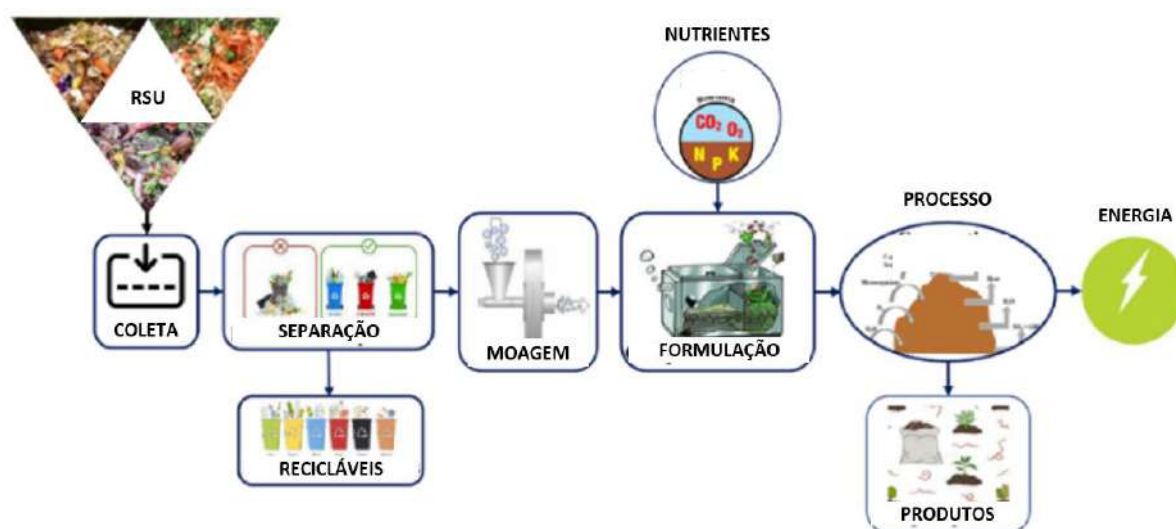


Figura 22 - Diagrama básico do processo de compostagem de RSU (Hoang 2022)

Para que o processo de compostagem tenha maior rendimento, é necessário a separação do material coletado, já que a presença de metais pode alterar a condição ótima para a sobrevivência dos microrganismos presentes. Existem muitos fatores que precisam ser controlados para um maior rendimento no processo como: O tamanho de partícula adotado (aproximadamente 15 mm), umidade (60 - 70%), a possível utilização de um agitador mecânico, a temperatura (40 - 65 °C), o teor de oxigênio incorporado (15 - 20%), a relação de carbono/nitrogênio presente no material (25 - 30), a porosidade do material a ser composto (35 - 70%) e o pH (5,5 - 8,0). (Munir et al.,

2021). Para um processo de compostagem, principalmente em larga escala, todos esses pontos devem ser analisados e, se possível, otimizados. (Wang et al., 2019)

No que diz respeito à técnica escolhida para o processo de compostagem, elas se dividem em três grandes grupos: O sistema de leiras, a pilha estática aerada e a compostagem em sistemas fechados.

No sistema de leiras, um monte de resíduos é deixado junto e revirado diversas vezes sem a utilização de um agitador mecânico. A viragem constante faz com que a temperatura do material como um todo abaixe, ao mesmo tempo permite que ar seja incorporado na mistura lentamente, e a movimentação do material também ajuda na homogeneização do meio e redução do tamanho médio de partícula. (Kumar et al., 2018)

Já no sistema que utiliza a pilha estática aerada, a matéria orgânica presente não é agitada, nem revirada por nenhum componente físico. O recipiente contendo o resíduo orgânico é munido de dutos porosos onde o ar é bombeado com a pressão desejada. Um ponto crítico é a quantidade de ar que é incorporada na mistura a cada segundo. Por ser um processo sem agitadores, ou auxílio de virada, é muito utilizado em efluentes com maior umidade, como lodo com altas taxas de matéria orgânica a ser aerobiamente degradada num processo de compostagem. (Kumar et al., 2018)

Nos sistemas fechados, o material a ser tratado é colocado em recipiente fechado, que pode ser de grande ou pequena dimensão, como túneis, sacos agitados, recipientes de plástico para menores escalas, entre outros. Um controle de temperatura é realizado no meio e a agitação mecânica volta a estar presente. É muito comum a utilização de túneis rotatórios de grandes dimensões para auxiliar na mistura do material a ser composto, a sua rotação auxilia na quebra das partículas de material e a sua aeração ajuda na manutenção da temperatura escolhida e disponibilidade de oxigênio para os microrganismos presentes no processo. Segundo Wang et al., 2019 é o tipo de processamento dentre os três mais utilizado para tratamento de RSU na Índia, que é um país que aposta muito forte na compostagem como alternativa. (Kumar et al., 2018)

Titus et al., 1980 realizaram um estudo na cidade de Nagpur, na Índia, para determinação do tempo necessário para o processo de compostagem realizar o tratamento de RSU com diferentes frações orgânicas e diferentes graus de trituração dos resíduos. A fração orgânica foi misturada à terra fina em diferentes proporções para obter uma mistura contendo 100, 50, 40 e 30% de fração orgânica. O estudo revelou que o RSU contendo 30-40% fração compostável necessitou de 25 a 30 dias para formar composto maduro com viragem em dias alternados. Os resíduos sólidos contendo maiores quantidades de frações orgânicas (60-70%) exigiram um tempo maior, de cerca de 50 dias. Este processo pode ser reduzido para cerca de 30 dias, se a redução de tamanho anterior foi realizada utilizando outro método para trituração e diminuição das partículas presentes no meio. Com o aumento da frequência de giro de 5 dias, o composto pôde ser preparado em 30 dias. Concluiu-se que para os resíduos sólidos com maior fração orgânica, a trituração é necessária para minimizar o tempo de compostagem. O custo total da produção do composto foi de US \$25–30 por tonelada, enquanto seu valor de mercado era de US \$33,5-42 por tonelada. O governo indiano, juntamente com a iniciativa privada, desde 2010 vêm investindo na solução de compostagem para solucionar parte da grande quantidade, em toneladas, de lixo doméstico gerado em um país com mais de 1,3 bilhões de pessoas.

Entretanto, a prática de compostagem enfrenta algumas barreiras que dificultam sua operacionalização, entre elas os altos custos com transporte, a necessidade de grandes áreas para que o processamento seja feito (comparáveis com o aterro sanitário), baixa valorização do fertilizante produzido quando comparado aos fertilizantes obtidos por outras rotas. Talvez o principal aspecto negativo do método esteja relacionado à sua baixa velocidade para o tratamento dos resíduos orgânicos, pois o processo de tratamento é lento e necessita de um tempo considerável para ser realizado. Além disso, o volume do RSU após a compostagem apresenta uma redução de somente aproximadamente 40%. (Munir et al., 2021)

Além de fatores operacionais, há também aspectos econômicos que imprimem barreiras e desafios para a utilização desta estratégia. O investimento inicial desta tecnologia tomando como base é de USD \$20 por tonelada de RSU, por ano de

operação. Os custos operacionais giram em torno de USD \$3,00 por tonelada por ano de operação. (Kumar et al., 2017) Estes valores são relativamente mais baixos que os outros métodos estudados neste trabalho, como a pirólise e a gaseificação, porém, como visto no estudo de Titus et al., 1980, a compostagem gera pouco retorno financeiro quando comparado a outras práticas.

Apesar da compostagem ser uma tecnologia bem difundida, conhecida e estudada e possuir um baixo custo de implantação, existem algumas barreiras operacionais e financeiras visíveis, que quando trazidas para um contexto de alta produção de RSU, como é o caso do Rio de Janeiro, a torna uma opção com desafios técnicos e econômicos altos a serem superados.

III.3.2. Biometanização

Um dos principais produtos obtidos a partir da DA é o biogás. A biometanização é reconhecida como uma das alternativas mais adequadas para tratar os resíduos orgânicos devido à sua capacidade de recuperação, tanto em termos materiais (por exemplo, a parte sólida obtida ao final do processo pode ser usada como condicionador de solos ou adubo orgânico, e a parte líquida como água de fertirrigação ou adubo líquido) e em termos energéticos (por exemplo, o gás pode ser refinado para a qualidade do gás natural e usado como combustível para veículos ou convertido em eletricidade). Mesmo ainda enfrentando barreiras e desafios tecnológicos, relacionados à sua aplicação, essas diversas aplicações provenientes do mesmo processo que tornam a biometanização uma das estratégias mais priorizadas dentro da hierarquia de gestão de resíduos orgânicos. A biometanização se apresenta como uma um dos caminhos para a economia circular, através do melhor uso de recursos naturais, por meio de novos modelos de negócios e da otimização nos processos de fabricação com menor dependência de matéria-prima virgem, priorizando insumos mais duráveis, recicláveis e renováveis (European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 2017).

Como é possível ver na figura 23, uma usina de biogás para tratamento de resíduos orgânicos municipais consiste em uma área de recepção, onde o material orgânico, comumente relacionado ao desperdício de alimentos, é recebido. O resíduo permanecerá na área de recepção por algumas horas, enquanto é carregado para o

estágio de pré-processamento, que geralmente envolve a maceração da matéria-prima, triagem e prensagem. Embalagens, como sacos plásticos, são retirados, enquanto quaisquer itens metálicos, como talheres, podem ser removidos usando dispositivos magnéticos para evitar danos às peças móveis. Além disso, resíduos como vidro, cascas de ovos, cerâmica, ossos e areia, podem precisar ser removidos na fase de pré-tratamento, para evitar o seu acúmulo no fundo do tanque, levando à perda de volume e falhas no sistema (Jain et al., 2018). O ideal seria a coleta individualizada (separada) dos resíduos orgânicos, para facilitar toda a operação da planta de biometanização, porém, por desafios culturais e da própria logística dos caminhões, esse resíduo orgânico normalmente chega misturado a materiais inorgânicos, e até tóxicos para o processo de DA. Após a separação, a matéria orgânica passa por algum dos seguintes métodos de pré-tratamento presentes no quadro 5. Tais métodos contribuem para tornar o processo da DA mais rápido, eficiente e com maior geração de biogás (Carrere et al., 2016).



Figura 3 - Representação esquemática de uma planta de produção de biogás
Fonte: Thzorro77, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons.

Figura 23 - Representação esquemática de uma planta de produção de biogás (Wikimedia Commons 2010)

Quadro 5 - Técnicas de pré-tratamento de resíduos orgânicos para DA (adaptado de Grandó 2017)

Princípio	Técnica	Funcionamento
Físico	Mecânico	Este tratamento consiste na quebra ou remoção mecânica das partículas. Sua utilização visa, especialmente, reduzir o tamanho de partícula da biomassa e aumentar a área de superfície de contato da matéria-prima disponível para os micro-organismos e, portanto, melhorar o rendimento do biogás.
	Térmico	O princípio da técnica é o fato de que, na presença de calor, água e pressão, as ligações de hidrogênio que mantêm a celulose cristalina e os complexos de lignocelulose unidos se rompem
	Radiação	O pré-tratamento utilizando ultrassom é um tipo de tratamento de natureza física que pode aumentar a área de superfície específica, reduzindo o grau de polimerização.
Químico	Alcalino/Ácido	Usado para uma degradação parcial do substrato visando aumentar a área de contato e o acesso dos micro-organismos. Pode ser ácido ou básico de acordo com o pH do agente químico utilizado.
	Oxidativo	Utiliza compostos químicos para oxidar a matéria-prima orgânica e disponibilizar os açúcares.
Biológico	Enzimático	O uso de enzimas é um método efetivo e simples para a degradação de resíduos lignocelulósicos. Contudo, seu uso em grande escala pode ser muito custoso dependendo da origem das enzimas.
	Microbiológico	O uso de micro-organismos, como fungos, para ajudar a degradação, é mais barato e menos tóxico para as arqueas metanogênicas, quando comparado a outros métodos

Após o processo de pré-tratamento, os resíduos orgânicos são alimentados para o digestor, onde ocorre a decomposição em ausência de oxigênio, cujas reações estão descritas na figura 20. Os principais fatores que devem ser monitorados e avaliados durante a DA estão presentes na seção **VII.1**. Durante este processo, o biogás é liberado e coletado em tanques de armazenamento ou em uma cúpula inflável. Para reduzir o teor de enxofre no biogás, este é canalizado para uma unidade de dessulfuração (Jain et al., 2018). O biogás, rico em metano, pode ser processado dependendo do uso final desejado: eletricidade, calor, refrigeração ou combustível do veículo. Dentro do digestor, o material orgânico que sobra após a digestão, chamado de produto da digestão, é extraído e pode então sofrer pasteurização, processo importante para reduzir o risco de patógenos no produto de digestão, seguido do processo de compostagem ou separação de sólidos úmidos e secos para aplicação em terras agrícolas, dependendo das leis e regulamentações ambientais do local.

O gás produzido na DA apresenta diversas aplicações. Em aplicações residenciais simplificadas, pode ser usado como gás de cozinha para a população utilizar no preparo de alimentos. Em aplicações de maior escala, e de maior grau de

complexidade, o biogás, após passar por purificação e pressurização, pode ser utilizado em caldeiras para geração de calor, utilizando motores de cogeração do tipo CHP (Combined Heat and Power) para produção de calor e energia elétrica de maneira conjunta. Inclusive, o biogás pode ser refinado e elevado à biometano, podendo atuar como combustível de veículos, e até injetado na rede de distribuição de gás natural e utilizado como fonte de energia e calor em indústrias, estabelecimentos e casas. Esse biometano pode passar por transformações químicas para a obtenção de bioprodutos. Essas rotas de síntese apresentam um maior grau de complexidade e demandam maiores investimentos em capital. (Jain et al., 2018).

O produto líquido obtido ao final do processo pode ser usado como condicionador de solo e biofertilizante, ajudando na produção agrícola e colaborando para o fechamento do ciclo dos nutrientes no solo (Jain et al., 2018).

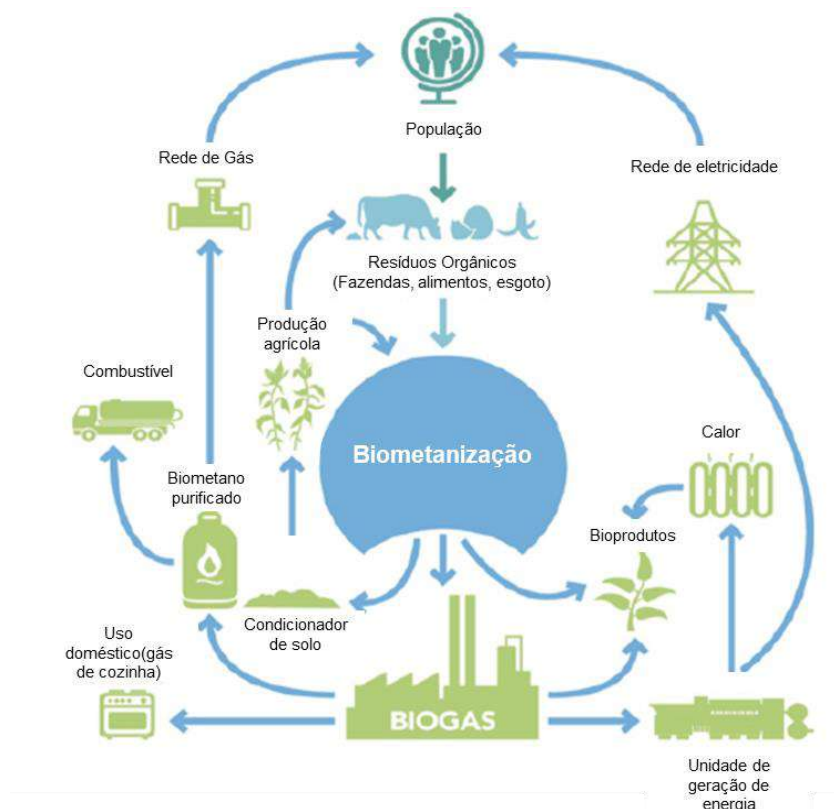


Figura 24 - Representação da potencial economia circular gerada pelo processo de biometanização (Jain et al., 2018)

O biogás produzido inicialmente na DA, é composto principalmente de metano e dióxido de carbono com traços de nitrogênio, hidrogênio, oxigênio, vapor de água, sulfeto de hidrogênio e gás amoníaco. O Quadro 6 mostra os principais contaminantes,

os problemas gerados por sua presença no produto final e os requisitos de remoção destes para o aproveitamento energético do biogás.

Quadro 6 - Principais impurezas do biogás, problemas gerados e requisitos de qualidade para fins energéticos. (Kuns et al., 2019)

Contaminantes	Problemas	Requisitos de aproveitamento energético
Água	Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores pela formação de ácidos com H ₂ S, NH ₃ e CO ₂	
	Acúmulo de água nos dutos	
Oxigênio	Condensação ou congelamento por pressão	Remoção para desempenho em motores de combustão interna, microturbinas, conversão à biometano
	Perigo de misturas explosivas pela elevada concentração de O ₂ no biogás	
Amônia	Corrosão pela dissolução em água	
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores	. < 250 ppm para aquecimento em caldeiras . 545 - 1742 ppm para motores de combustão interna
	Concentrações tóxicas no biogás (> 5cm ³ m ⁻³)	. 2800 ppm para geradores . 10.000ppm para turbinas e microturbinas
	Formação de SO ₂ pela combustão	. 2-15 ppb para injeção na rede de biogás . 5 ppb para combustível veicular
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Baixo valor energético	< 2% na conversão a biometano

O grau de refino que o biogás deve ser submetido é diretamente ligado à qual finalidade ele terá após sair da planta de DA. Para a sua distribuição em rede e utilização como combustível em veículos automotores, o padrão de qualidade do biometano precisa ser mais elevado, enquanto aplicações relacionadas à mera combustão do biogás, exigem uma menor pureza, como a sua queima para geração de energia e seu uso como gás de cozinha. Mais informações a respeito das técnicas de purificação do biogás são encontradas na seção **VII.2** deste trabalho.

Os principais desafios técnicos encontrados em relação ao processo de biometanização estão relacionados à qualidade e natureza dos resíduos sólidos orgânicos coletados nas residências urbanas. A qualidade do substrato utilizado na DA influencia diretamente na quantidade de biogás produzida no processo de

biometanização. A triagem, o pré-processamento e os métodos de pré-tratamento do RSU são fundamentais para a utilização de resíduos orgânicos mais puros no processo de DA e consequente aumento do rendimento da produção de biogás, além de garantir a retirada de possíveis substâncias tóxicas para o ambiente da biodigestão, isto é, que poderiam inibir a ação dos microorganismos presentes no processo da DA, que incluem amônia, sulfeto e metais pesados (Pandyaswargo et al., 2019).

A Tabela 5 torna mais claro o quanto uma boa fonte de resíduos orgânica mais pura e selecionada pode impactar na produção do biogás e, conseqüentemente, na geração de energia e eletricidade posteriormente. A diferença de rendimento está relacionada à composição de carboidratos, proteínas e lipídios, dos resíduos orgânicos e a proporção de sólidos digestíveis.

Tabela 5 - Potencial de produção de biogás e geração de energia alternativa a partir de tipos de substratos orgânicos (Anaerobic Digestion and Bioresources Association 2017)

Fonte de matéria-prima	Produção de Biogás(m³/ton úmida)	Carro (Km/ton de resíduos)	Ônibus de 2 andares (Km/ton de resíduos)	Veículos de Carga (Km/ton de resíduos)	Eletricidade Gerada (MWh/ton de resíduos)
Batata(18% a 20% dos Sólidos Totais)	100-120	872	82	186	0,27
Pão	400-500	3567	400	759	1,09
Queijo	>600	4756	533	1012	1,45
Vegetais	50-80	515	58	110	0,16
Mistura de alimentos	75-140	852	95	181	0,26
Resíduos de cervejaria	60-100	634	71	135	0,19
Resíduos de Abatedouro	120-160	1110	124	236	0,34

Com base nos dados disponíveis dos EUA, Dinamarca, Reino Unido e Itália (Agência Internacional de Energia 2017; Departamento de Energia e Mudanças Climáticas do Reino Unido 2014; Laboratório Nacional de Energia Renováveis dos EUA 2013; Associação Italiana de Compostagem e Biogás 2017), o custo de capital para uma planta com capacidade de 30.000 toneladas por ano pode ser de US \$400 a USD \$600/tonelada. Uma planta maior de 50.000 toneladas pode ter um custo de capital de USD \$300 a USD \$400/tonelada. Os custos operacionais da planta

consistem em custos com pessoal, manutenção e substituição de equipamentos, despesas gerais da empresa, custos de testes e experimentação, energia e consumo de água, combustível de máquinas e manutenção e reparos de máquinas. Excluindo qualquer custo relacionado à retirada de embalagens plásticas e material contaminado, o custo operacional pode ser de USD \$35 a USD \$55/tonelada para uma tonelada de 30.000 planta anual e USD \$30-US \$45/tonelada para uma planta de 50.000 toneladas por ano. O custo relativo da separação de embalagens e materiais contaminados (como metal, plástico, vidro) não está incluído nos custos operacionais mencionados acima, pois depende da capacidade da planta e do perfil dos resíduos que a planta recebe (Jain et al., 2018).

Na literatura foi possível encontrar uma grande variedade de escala, utilização final do biogás e custos de capital para instalação da planta de biometanização, como apresentado no quadro 7. Isso prova que é uma tecnologia versátil, que pode ser usada em pequenas escalas, recebendo resíduos de bairros e, também, em escalas maiores, recebendo resíduos municipais. No Brasil, já existem empresas, como a Biogrid, oferecendo opções de pequeno e médio porte, que podem atender desde residências e fazendas até condomínios e cidades de pequeno porte, além da HomeBioGas, que apresenta soluções de pequeno porte, para famílias de até 10 indivíduos.

Quadro 7 - Plantas de biometanização de resíduos alimentares urbanos ao redor do mundo (Jain et al., 2018)

Localidade	Capacidade(ton/ano)	Destino final do Biogás	Custo de Capital (USD)	Ano de inauguração
Florida, EUA	130.000	Geração de Eletricidade e Calor	30.000.000	2014
Wisconsin, EUA	10.000	Geração de Eletricidade e Calor	4.700.000	2011
Cape Town, África do Sul	200.000	Produção de Biometano	30.000.000	2017
Western Cape, África do Sul	20.000	Geração de Eletricidade e Calor	1.600.000	2013
St. Martin, Áustria	10.000	Geração de Eletricidade e Calor	2.100.000	2003
Munique, Alemanha	30.500	Geração de Eletricidade	3.600.000	1997
Hartberg, Áustria	7.000	Geração de Eletricidade e Calor	2.400.000	2004

Com base na pesquisa realizada, a digestão anaeróbica, em especial a biometanização, se mostrou uma opção com grande potencial para tratamento de resíduos orgânicos nas cidades. É uma prática já consolidada no mercado, com diversos mecanismos de recuperação de capital após o começo de seu funcionamento, desde a distribuição de gás de cozinha, calor, energia elétrica, até o refino do biogás e sua utilização como biometano e combustível em automóveis de diversos portes. Entretanto, é válido ressaltar que essa prática só é capaz de gerar uma destinação adequada ao material orgânico do RSU, que é uma parcela importante do total, mas ainda resta uma grande quantidade de resíduos que precisam ser tratados. É uma técnica altamente dependente da qualidade dos resíduos que alimentam a planta de biometanização, fazendo com que seja necessária a existência de um programa de coleta seletiva bem estruturada na região em que se deseja introduzir uma usina de biometanização.

IV. Resultados e Discussão

IV.1. Definição da estratégia de tratamento e valorização de RSU na cidade do Rio de Janeiro

Ao longo do capítulo de revisão bibliográfica foram estudadas diversas tecnologias de gestão de RSU que são utilizadas em cidades ao redor do mundo com o objetivo de identificar quais se aplicariam na realidade da cidade do Rio de Janeiro. Como foi visto no capítulo anterior, cada uma dessas alternativas possui benefícios e

desafios técnicos associados a fatores como a escalabilidade, tipo do resíduo a ser tratado, necessidade de pré-tratamento, questões ambientais, etc. A partir disto foram propostos critérios de avaliação mostrados nos quadros 8, 9 e 10 a partir de aspectos operacionais, ambientais e econômicos. Dentro desses aspectos são explorados fatores críticos e determinantes para a avaliação das estratégias de tratamento e valorização do RSU. Cada fator crítico pode possuir um viés positivo ou negativo, dependendo das suas consequências geradas no processo. Ao final, cada tecnologia terá uma pontuação com base nas análises dos fatores críticos, tornando possível obter a técnica com maior viés positivo para ser aplicado na cidade do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que este é um exercício inicial para a discussão sobre alternativas de tratamento e valorização do RSU. Não estão sendo considerados pesos diferentes que estes fatores exercem sobre a decisão em torno das alternativas de tratamento e valorização do RSU na cidade do Rio de Janeiro.

Quadro 8 - Aspectos Operacionais das Tecnologias Estudadas na Revisão

Fator crítico	Descrição	Natureza
Demanda separação prévia do RSU	A tecnologia demanda uma etapa de separação do RSU recebido, seja a separação de materiais recicláveis e não recicláveis, orgânico e inorgânica, caso contrário a operação é comprometida	Negativa, pois gera maior complexidade à operação, além de custos adicionais ao processo como um todo
Demanda uma grande área de operação	A tecnologia demanda uma grande área para instalação e operação da planta de gerenciamento dos resíduos	Negativa, pois significa um alto custo para adquirir o espaço necessário para a planta
Não há prejuízo operacional ao lidar com alto teor de matéria orgânica	A tecnologia não tem seu rendimento ou operação comprometida ao lidar com grandes volumes de matéria orgânica	Positiva, uma vez que grande parte do perfil do RSU carioca é composto de resíduos orgânicos provenientes, principalmente, do desperdício dentro das residências

Existem plantas em escala comercial ao redor do mundo	A tecnologia possui diversas plantas em escala comercial em funcionamento no gerenciamento de RSU de grandes cidades ao redor do mundo	Positiva, pois ao existirem plantas em funcionamento, há fortes indícios que a aplicação é viável de maneira operacional e econômica, além de garantir a existência de boas práticas do setor
Gera resíduos que demandam pós-tratamento	A tecnologia demanda pós-tratamento de resíduos gerados ao longo do processo de tratamento do RSU	Negativa, pois gera maior complexidade à operação, além de custos adicionais ao processo como um todo
Necessita de pré-tratamento do RSU recebido	A tecnologia demanda procedimento de pré-tratamento do RSU recebido, como por exemplo secagem do RSU, caso contrário a dinâmica e viabilidade do processo pode ser comprometida	Negativa, pois gera maior complexidade à operação, além de custos adicionais ao processo como um todo

Quadro 9 - Aspectos Ambientais das Tecnologias Estudadas na Revisão

Característica	Explicação	Natureza
Libera gases tóxicos na atmosfera em sua operação	A tecnologia apresenta a formação e liberação de gases tóxicos na atmosfera, em sua operação	Negativa, pois representa um grave impacto ambiental ao local que a planta está inserida
Atende ao conceito de economia circular	A tecnologia é capaz de gerar um melhor aproveitamento do RSU gerado nas cidades através da valorização estes resíduos que seriam descartados	Positiva, pois a operação gera produtos de valor agregado a partir do RSU, sendo atrativo do ponto de vista ambiental e econômico
Possibilita a recuperação de nutrientes da matéria orgânica	A tecnologia é capaz de gerar, a partir dos resíduos orgânicos, biofertilizantes que podem ser usados na agricultura e que auxiliam a fechar o ciclo de nutrientes na natureza	Positiva, pois os biofertilizantes são excelentes substitutos para os fertilizantes sintéticos, muitas vezes importados, gerando com a sua venda uma nova fonte de receita para a planta

Quadro 10 - Aspectos Econômicos das Tecnologias Estudadas na Revisão

Característica	Explicação	Natureza
Possibilita a geração de energia elétrica ao final do processo	A tecnologia apresenta a possibilidade de conversão do produto gerado em energia elétrica e posterior distribuição	Positiva, pois representa uma forma de geração de recursos para a planta, aumentando a viabilidade econômica do projeto
Pode gerar produtos de maior valor agregado	A tecnologia apresenta a possibilidade de conversão do produto gerado em plataforma química/bioquímica e posterior transformação em bioprodutos de maior valor agregado	Positiva, pois representa uma forma de geração de recursos para a planta, aumentando a viabilidade econômica do projeto
Pode gerar biocombustíveis	A tecnologia apresenta a possibilidade de conversão do produto gerado em combustível veicular e posterior distribuição	Positiva, pois representa uma forma de geração de recursos para a planta, aumentando a viabilidade econômica do projeto

Possui alto custo operacional	A tecnologia apresenta um alto custo (tonelada/ano) para tratamento do RSU, normalmente associado a tecnologias incipientes	Negativa, pois representa um desafio à viabilidade econômica do projeto de implantação da tecnologia
-------------------------------	---	--

As características avaliadas foram pensadas levando-se em conta o contexto da cidade, o perfil do RSU local; composto em grande parte por matéria orgânica, experiências prévias em cidades análogas ao contexto carioca. Buscou-se ainda a comparação com a estratégia de gestão de RSU que é atualmente aplicada na cidade, no caso o aterro sanitário. Vale ressaltar que a avaliação das alternativas ao aterro sanitário devem levar em consideração o alto volume de RSU a ser tratado, tendo em vista a produção elevada de resíduos na cidade do Rio de Janeiro.

É importante ressaltar que o quadro 11 abaixo visa tornar mais objetiva a seleção da estratégia mais adequada para a gestão do RSU carioca, porém ainda possui natureza qualitativa e não tem a pretensão de exaurir todas as análises possíveis para a escolha da tecnologia e muito menos afirmar que uma tecnologia é melhor ou pior que o restante. Ao longo deste Projeto Final é deixado claro que deve haver uma sinergia entre diversas estratégias de gestão de RSU para que os mais diferentes tipos de resíduos recebam a melhor destinação final possível. As dimensões de análise escolhidas foram pensadas com base nas vantagens e desafios técnicos estudados na etapa de revisão.

Quadro 11 - Análise comparativa das tecnologias de gestão de RSU estudados no capítulo de revisão

Características	Aterro Sanitário*	Incineração	Pirólise	Gaseificação	Compostagem	Biometanização
Demanda separação prévia do RSU					(-)	(-)
Demanda uma grande área de operação	(-)				(-)	
Não há prejuízo operacional ao lidar com alto teor de matéria orgânica	(+)				(+)	(+)
Existem plantas em escala comercial ao redor do mundo	(+)	(+)			(+)	(+)
Gera resíduos que demandam pós-tratamento	(-)	(-)	(-)			

Necessita de pré-tratamento do RSU recebido		(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Libera gases poluentes na atmosfera em sua operação	(-)	(-)				
É integrável ao conceito de economia circular			(+)	(+)	(+)	(+)
Possibilita a recuperação de nutrientes da matéria orgânica					(+)	(+)
Pode gerar energia ao final do processo	(+)	(+)	(+)	(+)		(+)
Pode gerar produtos de maior valor agregado			(+)	(+)		(+)
Pode gerar biocombustíveis	(+)		(+)	(+)		(+)
Possui alto custo operacional			(-)	(-)		
Resultado Final	1	-1	1	2	1	5

*Com recuperação energética do biogás gerado

A partir do resultado final mostrado no Quadro 11, é possível observar que comparado ao aterro sanitário, a tecnologia utilizada atualmente, a incineração apresentou uma pontuação menor, em grande parte pelo impacto ambiental causado e pela complexidade operacional acarretada pelo pré-tratamento do RSU recebido, principalmente quando há alta carga orgânica e pelo pós-tratamento das cinzas geradas. Além disso, a incineração possui poucas vantagens econômicas, uma vez que até a sua conversão em energia elétrica é altamente custosa quando comparada a outras tecnologias. Ao analisar a gaseificação, é possível perceber que ela performou melhor que a prática do aterro sanitário, principalmente pela boa pontuação nos aspectos econômicos relacionados aos produtos gerados, porém ainda enfrenta desafios técnicos, principalmente relacionados aos fatores como a sua dificuldade em tratar RSU com alta fração orgânica, os altos custos operacionais muito por conta da baixa aplicação da tecnologia ao redor do mundo usando RSU como insumo, tornando os processos pouco flexíveis.

A compostagem, assim como a incineração, apresentou uma nota mais baixa quando comparada à estratégia de aterro sanitário, atualmente empregada no RJ. Isso

se explica pela baixa performance nos aspectos econômicos da análise, apesar dos aspectos ambientais altamente atrativos, quando comparado com o aterro sanitário e as outras tecnologias *waste to energy* estudadas. A pirólise, como a gaseificação, apresentaram uma nota parecida com a solução do aterro sanitário e, apesar de se mostrar como uma alternativa mais atrativa pela possibilidade de geração de um produto com alto valor agregado no final do processo nos estados gasoso, líquido e sólido, a menor flexibilidade em relação ao escalonamento do processo, geração de produtos que precisam de pós-tratamento para uso comercial e o alto capital inicial necessário aliado com o alto custo operacional conferem à pirólise uma nota parecida com a da solução do aterro sanitário.

Por fim, foi possível chegar à conclusão de que a técnica de biometanização possui a maior quantidade de características desejáveis, principalmente dentro aspecto econômico, por conta das possíveis aplicações do biogás gerado e ambiental da análise, quando comparado com as outras técnicas estudadas ao longo do capítulo da revisão. Além disso, como visto na descrição da biometanização, ao final do processo também é gerado fertilizante em estado líquido e condicionador de solo em estado sólido, desta forma tem os mesmos benefícios, principalmente ambientais, da compostagem.

Com a escolha desta estratégia, vale ressaltar que uma parte considerável do RSU produzido na cidade, no caso os resíduos inorgânicos, não poderão ser tratados usando a DA. Ao final do trabalho, serão apresentados exemplos reais de cidades que fazem a gestão destes resíduos e quais aprendizados e boas práticas podem ser obtidas a partir desses estudos de caso que podem ajudar a melhorar a gestão do RSU na cidade do Rio de Janeiro. Além disso, vale mencionar que esta estratégia é dependente da existência de uma coleta bem estruturada e amplamente difundida na região a ser atendida pela usina de biometanização.

Sendo a biometanização apontada com grande potencial de aplicação para o tratamento e valorização do RSU na cidade do Rio de Janeiro, nas próximas seções serão discutidos aspectos relacionados ao contexto da tecnologia do biogás no Brasil, e mais especificamente no RJ, à operacionalização de uma planta na cidade do Rio

de Janeiro, à viabilidade econômica da tecnologia na cidade e estudos de caso internacionais que demonstram aprendizados relacionados à adoção da tecnologia em uma grande cidade.

IV.2. Geração de Biogás no Brasil

Nesta seção, o objetivo é apresentar uma breve contextualização do cenário brasileiro de produção e utilização final do biogás. Focou-se em buscar exemplos reais da produção de biogás no território nacional, e mais especificamente dentro do estado do Rio de Janeiro, a fim de estimar o quão disseminada está a produção e quais são as principais fontes de resíduos usados como insumo.

O setor de biogás no Brasil vem crescendo de forma constante nos últimos anos, muito por conta dos avanços em sua regulação e por medidas que estabelecem uma definição padrão para o biometano produzido a partir de fontes biodegradáveis provenientes de agroflorestas e resíduos orgânicos provenientes de aterros e estações de tratamento de esgoto. Pode-se citar a "Regulamentação do Biometano como combustível veicular oriundos de fontes agrossilvopastoril" de janeiro de 2015 e a "Regulamentação do biometano como combustível veicular oriundo de aterros e ETE" de julho de 2017, que definem o uso nacional do biometano como combustível para veículos, transporte comercial e para uso residencial. Inclui obrigações de controle de qualidade a serem cumpridas pelos diversos agentes econômicos que comercializam biometano em todo o Brasil. Em 2016 foi aprovada a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), iniciativa do Ministério de Minas e Energia que estimula a produção de biocombustíveis no Brasil, incluindo o biometano. Uma maior contribuição do biocombustível na matriz energética facilitará a redução das emissões de carbono no setor de transportes, conforme objetivo do acordo assinado em Paris, na COP21, pelo qual o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 43% até 2030 (Agência Internacional de Energia – Bioenergia, 2022).

A ABiogás (Associação Brasileira de Biogás e Biometano) estima que o atual potencial brasileiro de produção de biogás, considerando os resíduos dos setores

sucroenergético, agropecuário e saneamento, seja da ordem de 82 bilhões de metros cúbicos por ano. Esse potencial teria como objetivo o seu uso para a geração de energia elétrica, térmica e abastecimento de frotas veiculares por meio de sua purificação para biometano. Em termos gerais, se todo o biogás fosse utilizado para geração de energia elétrica, o Brasil seria capaz de suprir 36% da atual demanda por energia elétrica, segundo os dados da EPE para o ano de 2017. De forma análoga, se o biogás fosse utilizado para produção de biometano, seria possível suprir 70% da demanda interna de diesel (ANP 2017).

De acordo com o CIBiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás), existiam 811 usinas em operação no Brasil em 2021, com uma produção total de biogás em torno de 2,82 bilhões de Nm³/ano (Tabela 6). A maioria das usinas de biogás atuam no tratamento de resíduos orgânicos provenientes da agricultura (77%), mas a maior parte do biogás (76%) foi produzida a partir de RSU e em ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto).

Tabela 6 - Perfil da produção de biogás no cenário brasileiro (CIBiogás 2021)

Tipo de Insumo	Número de Plantas	Produção (Mnm ³ /ano)	Participação na produção anual (%)
Esgoto sanitário / RSU	87	2.160	76,60%
Resíduos agrícolas	628	252,01	8,94%
Resíduos Industriais	96	407,7	14,46%

No que tange a sua utilização final, a maior parte do biogás produzido foi utilizado para produção de energia elétrica, 73%, seguido pela sua utilização como biometano para combustível, 20% e o restante se divide em produção de energia mecânica e térmica (CIBIOGÁS 2021). Os gastos energéticos no território nacional com as ETEs correspondem a 3,9% do total de geração de eletricidade do país (EPE

2017), logo essa grande geração de biogás por parte das ETEs pode indicar que o setor começa a entender o valor gerado pelo aproveitamento energético dos resíduos orgânicos presente no esgoto sanitário, que se 100% aproveitado, poderia gerar o equivalente a 1,32% da energia elétrica total consumida no Brasil (EPE 2017).

IV.3 Geração de Biogás no Rio de Janeiro

Em 2021, existiam 10 plantas de geração de biogás em operação no estado do Rio de Janeiro. Dessas 10 plantas, 9 usam como fonte de substrato RSU e esgoto e possuem uma capacidade de produção de 389,2 milhões de Nm³/ano de biogás (CIBiogás 2021). Entre as principais regiões produtoras estão: a Região Metropolitana, com destaque para os municípios Rio de Janeiro, São Gonçalo e Duque de Caxias, em grande parte com insumos provenientes da coleta de esgoto, e a região Norte Fluminense, com Campos dos Goytacazes, com insumos provenientes da agricultura (Lima 2022).

A produção de biogás proveniente da gestão de RSU no estado encontra-se atrelada à captação do gás gerado nos aterros sanitários da região. As unidades estão situadas nos aterros sanitários de Seropédica, na região metropolitana, e em Nova Iguaçu, Baixada Fluminense. Em Seropédica, o biogás é gerado no aterro sanitário local, considerado o maior da América Latina. O biogás produzido é purificado e levado à biometano em uma usina, da empresa Urca Energia, que tem capacidade de processar e produzir 200 mil metros cúbicos diários, volume capaz de encher o tanque de 13 mil veículos. A figura 25 mostra uma foto da planta de produção de biometano. A perspectiva é que, quando estiver em plena operação, a unidade produza 73 milhões de metros cúbicos de gás natural renovável (GNR) por ano. Já na usina de Nova Iguaçu, o biogás que é produzido no aterro sanitário é comprado pela empresa Gás Verde e usado para alimentar a sua térmica. A usina utiliza 9,5 mil metros cúbicos de biogás por hora para a produção de 150 mil megawatts-hora (MWh) de energia por ano, volume capaz de atender ao consumo de 70 mil residências (Gandra 2019).



Figura 25 - Visão da planta de produção de biometano a partir do biogás gerado no aterro de Seropédica, RJ (Urca Energia)

No final de 2020 duas plantas foram inauguradas no estado do RJ: as plantas CGB São Pedro e CGB Três Rios 2, localizadas nos municípios de São Pedro da Aldeia, na Região dos Lagos; e Três Rios, no Sul fluminense, sendo a última uma expansão da usina CGB Três Rios 1, em operação desde maio de 2020. Somadas, as três usinas chegam a uma potência instalada de 3,5 MW e uma estimativa de produção anual de 27,6 GWh, suficiente para abastecer aproximadamente 11.500 residências. O investimento nos três projetos, realizados pelo Grupo Gera, foi de R\$ 15 milhões. Localizadas em aterros sanitários, as usinas de biogás funcionam no modelo de geração distribuída remota, no qual a energia elétrica é gerada em local diferente do local de consumo. No quesito crédito de carbono, a operação de 1 MW instalado de usinas de biogás gera aproximadamente 33 mil créditos de carbono anuais (Ecomondo Brasil 2020).

Em 2018, a primeira planta de biometanização da América Latina foi inaugurada na cidade do Rio de Janeiro. A planta se encontra no Ecoparque do Caju da Companhia Municipal de Limpeza Urbana (Comlurb) e é pioneira na transformação da matéria orgânica do RSU em biogás, utilizado para a geração de energia e de biocombustíveis. O material também é transformado em composto orgânico para ser usado como condicionador de solos, em agricultura e reflorestamento. Grande parte

deste material produzido é doado para movimentos sociais que estimulam a agricultura urbana, como o movimento Hortas Cariocas. A planta piloto é fruto de parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a empresa Methanum Energia & Resíduos, sendo administrada pela Comlurb. A tecnologia foi financiada pelo BNDES. Dos R\$ 10 milhões aportados, R\$ 7 milhões foram usados na construção da planta, e o restante foi investido para dar suporte ao desenvolvimento de pesquisas na planta. A planta piloto tem capacidade de gerir de 35 a 50 toneladas de resíduos diariamente e é uma iniciativa da Comlurb visando reduzir a quantidade de resíduos orgânicos destinados ao Centro de Tratamento de Resíduos (CTR Rio), em Seropédica, diminuindo conseqüentemente a geração de chorume, as emissões de gases efeito estufa e aumentando a vida útil do local (Comlurb 2018).

A energia gerada a partir da combustão do biogás atende à demanda da própria usina, além de ser suficiente para abastecer a Unidade de Transferência de Resíduos do Caju (UTR). O excedente poderá abastecer mais de 1.000 residências, considerando consumo médio da família brasileira, de cerca de 160 kWh/mês, além da frota elétrica da Comlurb, atualmente composta de nove veículos. O excedente também tem potencial para abater as despesas com eletricidade da sede da Comlurb e das gerências com o mesmo CNPJ, em um conceito chamado de geração distribuída. O modelo pode ser replicado em cidades e trazer impactos positivos para todo o país. A unidade usa a tecnologia de túneis de metanização de batelada sequenciais (TMBS), considerada a mais adequada para tratar o RSU brasileiro, que apresenta grande teor de impureza. Além disso, a tecnologia se destaca por reduzir o tempo de tratamento dos resíduos e na otimização dos rendimentos de produção do gás (Comlurb 2018).

IV.4. Aspectos Operacionais da Produção de Biogás

Serão apresentados nesta seção os principais aspectos a serem considerados na implantação da biometanização como estratégia de gestão do RSU orgânico em uma cidade como o Rio de Janeiro. Entre esses principais aspectos estão: a escala de produção, produtos e aspectos econômicos que tangenciam um projeto desta natureza e magnitude.

Maiores detalhes sobre as etapas de pré-tratamento, tratamento e purificação que ocorrem em uma planta de biometanização podem ser encontradas no capítulo **VII. Anexos.**

Centralização x Descentralização

A prática da biometanização apresenta flexibilidade em relação à sua escala de operação. Essa flexibilidade gera a necessidade de uma discussão acerca da centralização ou descentralização da tecnologia para o tratamento do lixo orgânico da cidade.

A prática descentralizada permite maior autonomia e garante o protagonismo do cidadão para gestão do descarte de resíduos da sua residência (Orsi 2006). Existem opções no mercado de biodigestores portáteis de pequeno porte que atende residências. Essa opção é utilizada, principalmente, em regiões rurais, onde os moradores utilizam o esterco dos animais como insumo para a biodigestão e conseguem produzir seu próprio gás de cozinha. Nas regiões urbanas, além da opção do biodigestor residencial, existem alternativas de médio porte, como o da empresa **BioGrid**, que utilizam contêineres de 6 a 15 metros de comprimento para o tratamento de resíduos orgânicos de prédios, supermercados, escolas e condomínios residenciais, podendo gerar o gás de cozinha para o local e até ser convertido em energia elétrica. Essas opções de pequeno e médio porte são boas alternativas para um melhor aproveitamento dos resíduos orgânicos diretamente na fonte do desperdício, porém ainda são alternativas custosas, e que normalmente não configuram prioridade para prédios, supermercados, escolas, tornando sua implantação pouco difundida, principalmente nas cidades.

Ao olhar sob a ótica da centralização, é possível observar que a realidade do Rio de Janeiro é composta por uma grande e complexa infraestrutura pré-existente de coleta e separação dos resíduos, tais como as Estações de Transferência de Resíduos (ETR), centro de triagem e reciclagem do Caju, que tornam a logística centralizada do RSU mais otimizada e estratégica. Um ponto relevante para a discussão é o fato do Rio de Janeiro ser o segundo maior produtor de lixo por habitante

do país, aproximadamente 460 kg/ano (ISLU 2020). Por ser uma cidade que gera uma grande quantidade diária de resíduos, a opção centralizada passa a fazer mais sentido para a gestão do lixo urbano. Isso não significa que a existência dessa estrutura centralizada não permita a complementação dessa estratégia com propostas de operações descentralizadas. Além disso, ao trabalhar com um sistema centralizado, torna-se viável economicamente pensar em produtos de maior valor agregado provenientes da DA e que demandam maiores gastos de purificação, como o biometano para distribuição em rede ou para sua utilização como combustível.

Escala de Produção

Estima-se que diariamente sejam recolhidos aproximadamente 10.000 toneladas de RSU no Rio de Janeiro, incluindo nessa conta o lixo domiciliar, público, RCC (resíduos de construção civil) e grandes geradores (Rio Prefeitura 2019). Desta forma, a geração de RSU anual está próxima à 3.650.000 toneladas/ano. Com base nas análises gravimétricas realizadas pela Comlurb entre 2019 e 2021, a média da proporção de resíduos orgânicos presentes no lixo coletado é de 45,2%, o que equivale a 4.520 ton/dia ou 1.649.800 ton/ano.

Em termos comparativos, uma das maiores plantas de biometanização na Europa, localizada na Dinamarca, é capaz de tratar aproximadamente 710.000 ton/ano ou 1.945 ton/dia, e tem como principal fonte de insumos os resíduos provenientes da agropecuária da cidade de Korskro (BioEnergy International 2019). Vale ressaltar que na Dinamarca já existe um histórico de biometanização há muitos anos, fazendo com que o setor no país seja amplamente desenvolvido, tornando possível a implantação de uma operação de grande escala, como a da cidade de Korskro. Um outro exemplo para fins comparativos é a maior planta de biometanização da África, localizada na África do Sul, capaz de tratar 200.000 ton/ano de resíduos orgânicos da RSU coletado na cidade de Cape Town, cerca de 10% da produção total da cidade (Jain et al., 2018). A escolha da biometanização se deu pela crescente falta de espaço hábil para construção de novos aterros sanitários na região, algo muito análogo ao cenário de grandes metrópoles, como é o caso do Rio de Janeiro.

Com base nesses dois casos citados e pelo fato de não ter sido possível encontrar na literatura nenhuma planta que operasse com capacidade próxima à produção de resíduos orgânicos na cidade do Rio de Janeiro, é possível afirmar que uma única planta que possa receber e tratar todo o resíduo orgânico da cidade é inviável operacionalmente. Neste estudo será adotada como parâmetro uma planta com capacidade de operação média, entre 100.000 a 200.000 ton/ano, que se aproxima dos exemplos vistos em Cape Town e na Flórida. Com esta capacidade de tratamento e conversão do RSU, torna-se possível avançar na redução do envio de resíduos para o aterro sanitário de Seropédica e no aumento da vida útil do aterro.

IV.5. Produtos e Aplicações da Tecnologia

Um fator chave para definir os parâmetros de operação de uma planta de biometanização é o tipo de utilização que se deseja escolher para o biogás gerado. Por conta disso, neste tópico serão apresentados diferentes produtos e como estes atendem as demandas da cidade.

Utilização como gás de cozinha

A maneira mais simples e fácil de usar o biogás é queimá-lo diretamente, após o processo de remoção de H_2S para níveis mais seguros, e usar o calor e a luz gerados para cozinhar, aquecer e iluminar o ambiente, como pode ser visto no exemplo da figura 26. Esta solução simples pode ter alto impacto econômico na cidade do Rio, principalmente relacionado à alta do preço do gás de cozinha no Brasil, que fez com que este item se tornasse inacessível para muitos lares na cidade, aumentando o risco de acidentes causados pelo uso de outros produtos inflamáveis na cozinha.



Figura 26 - Imagem de uma boca de fogão alimentado por biogás (Jain et al., 2018)

Um dado que chama atenção é que em residências que usam o biometano a partir do biogás no lugar do uso de carvão ou madeira para o preparo de alimentos, nota-se uma redução em até 80% a presença de material particulado no ar da cozinha, contribuindo para uma melhor qualidade do ar e para a saúde dos moradores da casa (Berkeley Air Monitoring Group 2015). Todavia, o uso como gás de cozinha apresenta maior viabilidade para digestores de microescala que digerem alimentos de uma família ou uma comunidade e o biogás produzido pode substituir os combustíveis fósseis tradicionais, como o querosene e o gás liquefeito de petróleo (GLP), e outras fontes biomassa, como madeira e carvão.

- Geração de Energia Elétrica

A energia calorífica do biogás pode ser transformada em eletricidade através de sua conversão em motores. Há inúmeras tecnologias disponíveis e bem estabelecidas para realizar essa conversão. Essas tecnologias incluem motores a gás, células de combustível, turbinas de micro-gás, Ciclos Rankine, Kalina Cycles, Stirling Engines, turbinas a gás de escape ou motores de cogeração, chamados de CHP (WIP Renewable Energy 2015). De todas as opções disponíveis, o uso de motores CHP é o mais comum, pois apresenta uma eficiência energética global de até 85%, onde 35% é convertido à eletricidade e 50% à calor. A Figura 27 ilustra um motor de cogeração do tipo CHP usado para gerar energia a partir do biogás.



Figura 27 - Imagem de um motor de cogeração do tipo CHP usado para gerar energia a partir do biogás coletado em aterro (CHP Brasil)

O calor é capturado na forma de água quente da camisa de arrefecimento do motor e através dos gases de escape do processo. A água quente e o calor dos gases de escape podem ser usados em algum processo da planta, ou capturados para geração posterior de eletricidade (Anaerobic Digestion and Bioresources Association 2017). A eletricidade produzida pode ser usada para atender às necessidades operacionais de produção do biogás ou “carga parasitária” (como bombas, maceradores, agitadores), além de utilidades da planta (como iluminação de edifícios) e por fim injetado em uma rede elétrica local. Importante ressaltar que para esta aplicação, o biogás deve passar por um processo de purificação para adequação dos limites de concentração permitidos para sulfeto de hidrogênio, siloxanos e umidade (Jain et al., 2018).

Exemplos de operação bem-sucedidas de usinas de biogás que utilizam resíduos alimentares como insumo para a biometanização e que geram eletricidade estão disponíveis em todo o mundo e em diversas escalas de atuação. Alguns exemplos podem ser citados: praças de alimentação locais na Malásia que usam os resíduos orgânicos para gerar eletricidade necessária para abastecer a iluminação do local (Chen 2017); a empresa Harvest Energy Garden que através do processamento de resíduos alimentares do Walt Disney World Resort e outras indústrias e comércios em Orlando, EUA; gera 3,2 MW de eletricidade e 2,2 MW de calor recuperável (American Biogas Council 2014).

O custo de capital de um motor CHP pode ser estimado entre USD \$750 e USD \$1.800 por kW (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos 2017), dependendo de vários fatores, incluindo o tipo e o tamanho do motor, se a recuperação de calor é adicionada ou não, e se é um mecanismo personalizado ou de pacote pré-existente. O custo de conexão à rede, se aplicável, varia de acordo com a distância da usina, ativos de conexão necessários e nível de tensão.

A produção de eletricidade através do biogás é uma excelente alternativa para diversificação da origem da energia elétrica. Em épocas de menor incidência de chuvas, as cidades do país sofrem com o aumento de taxas extras nas contas de luz, o que gera um grande peso nas contas das famílias. Além desse fator, a geração de eletricidade partindo do biogás é uma alternativa para mitigação das mudanças climáticas, através da substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis em plantas termelétricas.

- Injeção de biometano na rede de gás

A transformação do biogás em biometano refere-se ao processo de aumentar o teor de metano de biogás para mais de 90%, enquanto remove dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e água. Os padrões de qualidade do biometano variam com o uso final pretendido, a legislação do país e a infraestrutura existente. O biogás produzido pela digestão de resíduos alimentares pode ser convertido em biometano para injeção na rede de distribuição de gás, ou para uso como combustível renovável de transporte. A tecnologia para transformar biogás em biometano amadureceu e tem sido amplamente implementada em todo o mundo. Cerca de 500 usinas estão em operação atualmente no mundo, com cerca de 187 na Alemanha, 90 no Reino Unido e 62 na Suécia. Muitos outros países como EUA, Coreia do Sul, Holanda e Suíça também operam usinas de biometano (Jain et al., 2018). No Quadro 12 são apresentadas algumas vantagens para a geração de biometano a partir do biogás.

Quadro 12 - Vantagens da geração de biometano a partir do biogás (Jain et al., 2018)

Vantagem do Método	
Alta conversão em energia	A porcentagem de energia capturada ao purificar o biogás pode chegar, teoricamente, em 100%
Armazenamento de Energia	Na forma de biometano, a energia pode ser armazenada e transferida quando for necessária
Equipamentos pré-existent	Uma vez que o biogás for purificado dentro do padrão necessário, ele pode ser usado pela infraestrutura e equipamentos que antes utilizavam combustível fóssil, como o GLP, sem a necessidade de novas modificações
Redução da dependência de combustíveis fósseis	O biometano produzido através de resíduos alimentares é uma fonte renovável e com potencial para substituir o GLP

A escolha da tecnologia de purificação depende do padrão de biometano necessário, fornecedores de tecnologia disponíveis e custo operacional. Esses fatores dependem das circunstâncias individuais da planta, como a sua localização em relação ao sistema de distribuição, a escala da operação, portanto, um estudo completo de viabilidade precisará ser realizado para escolher a tecnologia mais adequada. Um estudo da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) de 2017 compilou os principais custos de purificação com base na escala de produção de biometano, como é possível ver na tabela 7. Tomando como base o custo para a purificação de 2000 m³/h, em uma planta relativamente pequena, de 30.000 toneladas por ano, que produz no máximo 7,8 milhões de metros cúbicos de biometano por ano, o valor anual da purificação deste biogás gerado para ser injetado na rede, varia de USD \$700.000,00 a USD \$1.400.000,00 em custos anuais.

Tabela 7 - Custo médio de purificação do biogás por escala (IRENA 2017)

Capacidade de Purificação do Biogás (m³/h)	Custo (USD/m³ de biogás)
20	1,07
50	0,5
100	0,35
500	0,17 - 0,25
1000	0,14 - 0,18

Uma vez que o biogás tenha sido transformado em biometano, para os países que possuem uma rede de distribuição de gás, este pode ser injetado na rede de gás. Para injetar o gás na rede, dois custos adicionais são necessários: o custo de purificação, já comentado anteriormente e o custo de injetar na rede de gás. O custo de injeção do biometano na rede, com base na análise de custos na Alemanha, variam entre US \$0,06 e US \$0,12 por m³ de metano produzido, que em reais ficaria em torno de R\$0,80 por m³. Isso significa que para uma planta de 30.000 ton/ano, que produz um máximo de 7,8 milhões de m³ do biometano por ano, a injeção de grade adicional seria cerca de R\$ 6.240.000,00 em custos anuais para a planta.

Esta aplicação é condizente com a realidade do Rio de Janeiro, por conta da infraestrutura já existente de distribuição de gás na cidade, pela empresa Naturgy, que controla a operação da CEG e CEG-Rio. Essa injeção de biogás na rede já é estimulada pela Lei nº 6.361/2012, que trata da Política Estadual de Gás Natural Renovável, em que é estipulado que as distribuidoras (CEG e CEG Rio) são obrigadas a adquirir todo o biometano produzido no estado, até o limite de 10% do volume de gás natural distribuído por cada uma das concessionárias, isso desconsiderando a demanda das termelétricas. Isso significa que, pelo tamanho atual do mercado fluminense de gás, haveria espaço para injeção compulsória de cerca de 650.000 m³/dia na rede da Naturgy, controladora da CEG e CEG Rio. Atualmente, o preço máximo para venda do biogás para distribuidoras de gás natural no Rio de Janeiro é de R\$1,20/m³, porém este valor está muito distante da realidade atual do mercado, hoje demandado por indústrias que buscam soluções para descarbonização. Este valor é o mesmo desde 2018, proveniente do decreto 46.476/2018 (EPBR 2022). Está previsto para ser lançado ainda em 2022 o decreto com o novo preço máximo do biometano, para injeção do produto na rede de gás canalizado do estado, atualizando este valor e o tornando o biogás mais competitivo frente ao gás natural (Manso 2022)

- Uso do biometano como combustível

O biogás, uma vez purificado, pode ser usado como combustível em qualquer veículo de passageiros ou de mercadorias pesadas que funcionam a gás. O biometano, como combustível veicular, usa a mesma configuração do motor e do veículo movido à gás natural, portanto, veículos que anteriormente funcionavam a gás natural, podem ser abastecidos com biometano. Além disso, veículos que utilizam o biometano como combustível apresentam vantagens ecológicas consideráveis, como baixos níveis de emissão de poluentes, principalmente de material particulado e óxidos de nitrogênio, além de apresentar uma redução de até 70% da emissão de gases de efeito estufa, em carros de passeio, quando comparado com veículos movidos a gasolina (Agência Internacional de Energia Renováveis 2017).

Existem exemplos de cidades ao redor do mundo, que utilizam o biometano produzido para abastecer frotas de ônibus e até de caminhões de lixo. Em Berlim, na Alemanha, 150 caminhões de coleta de lixo utilizam o biometano produzido na DA de resíduos alimentícios da cidade. Na cidade de Lille, França; são 430 ônibus, em Madrid, Espanha; são 945 ônibus que utilizam a mesma tecnologia e tornam a frota municipal mais ambientalmente sustentável (Jain et al., 2018). Na figura 28 é possível observar um exemplo de ônibus movido à biometano na cidade de Oslo, na Noruega.



Figura 28 - Imagem de um ônibus movido a biometano em Oslo, Noruega

A exigência de qualidade para que o biometano seja utilizado como combustível veicular é diferente daquela necessária para injeção na rede. Embora as especificações exatas variem, os parâmetros de qualidade incluem: Índice de Wobbe inferior, número de octanas do motor, água ponto de orvalho e níveis de enxofre e amônia.

Uma vez que o biogás tenha sido atualizado para biometano, este pode ser transportado para os postos de abastecimento através de gasodutos públicos e neste caso, o biometano precisa ser comprimido até a pressão em que o gasoduto é operado, e atender aos requisitos de qualidade do gás. Outra opção é que o biometano pode ser engarrafado e transportado por caminhões em botijões de gás de alta pressão (200-250 bar). Neste caso, o biometano também deve atingir certos requisitos de qualidade para teor de metano e vapor d'água. Esta opção envolve custos adicionais de transporte e equipamentos de capital e provavelmente custos extras para compressão no posto de abastecimento. Por fim, ele pode ser usado diretamente em um posto de abastecimento no local de produção de biometano. Para qualquer uma das opções acima, para usar o biometano como combustível, ele deve ser comprimido ou liquefeito, facilitando o armazenamento e distribuição (Jain et al., 2018).

A atual realidade dos preços de combustíveis no Brasil e, em especial, na cidade do Rio de Janeiro, tornam esta aplicação muito interessante do ponto de vista econômico, podendo ser uma alternativa mais em conta para a população e para o abastecimento de frotas de ônibus e caminhões; e do ponto de vista estratégico para a cidade, uma vez que há uma redução da dependência energética do GNV proveniente de combustíveis fósseis. A possibilidade de geração de biogás que pode ser elevado à biometano e em seguida ser usado como combustível veicular, é uma estratégia de valorização dos resíduos orgânicos gerados na cidade do Rio de Janeiro. Conforme citado anteriormente, esses resíduos são atualmente destinados para aterro sanitário.

Um outro fator favorável a essa estratégia de valorização é a ampla frota de veículos que já utilizam o GNV como combustível principal, muito por conta do seu preço mais acessível, que já configura uma alta demanda por este tipo de combustível. Atualmente, já existem iniciativas de transformação do biogás em biometano para sua

distribuição como combustível no estado do RJ, com destaque à Urca Energia, empresa responsável pela operação da maior usina de biometano do país, que fica no aterro sanitário de Seropédica com capacidade de produção de 120 mil m³/dia. Isso mostra que há um interesse de empresas privadas de atuarem no setor, o que pode ser uma grande oportunidade de parcerias público-privadas para o crescimento do setor.

- Digestato

Após a digestão anaeróbica dos resíduos alimentares e a liberação do biogás, o material residual que permanece é chamado de digestato ou biofertilizante. O digestato é rico em microrganismos, carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Quando devolvido à terra como corretivo ou condicionador do solo, melhora a capacidade de retenção de água do solo, enquanto os nutrientes que foram absorvidos durante a produção do alimento retornam ao solo. Em muitos países, após o tratamento adequado, o digestato pode ser aplicado em terrenos agrícolas ou usados como material de cama para projetos de paisagismo, hortas caseiras, em horticultura ou na silvicultura (Jain et al., 2018). O preço da tonelada deste material pode variar de USD \$6 no Reino Unido, a até USD \$20 na Itália, dentro dos parâmetros legais para sua utilização (WRAP 2011). Os nutrientes e o valor de mercado do digestato variam de acordo com o tipo de matéria-prima e o processo de digestão utilizado

O uso do digestato como condicionador de solo tem diversos benefícios, tanto para o agricultor quanto para o meio ambiente, (Jain et al., 2018):

- Uso reduzido de fertilizantes manufaturados reduz a necessidade de comprar desses insumos;
- Aumento do rendimento das culturas – Ao substituir o uso de fertilizantes manufaturados, o uso do mesmo nível de digestato pode aumentar ainda mais os rendimentos. Isto é devido aos impactos na biologia do solo,

fornecimento de micronutrientes e elementos e a existência de hormônios vegetais;

- Redução da degradação da terra – o digestato acrescenta teor de carbono ao solo, o que melhora sua capacidade de retenção de água e também devolve nutrientes ao solo, mitigando a degradação da terra;
- Melhor custo-benefício – Fertilizantes biológicos ricos em nutrientes à base de resíduos são altamente valorizados em países onde os agricultores são fortemente dependentes de fertilizantes minerais caros e importados. Além disso, ao usar o digestato, o produtor agrícola pode comercializar seu produto como ‘orgânico’, agregando maior valor ao alimento;
- Mitigação dos gases de efeito estufa – O carbono do biogás é devolvido à atmosfera, mas o carbono presente no digestato é capturado e armazenado no solo, retirando-o da atmosfera, auxiliando na mitigação do CO₂;
- Consumo de energia reduzido – A fabricação de fertilizantes inorgânicos é um processo que consome muita energia. Substituindo-os com digestato reduz a demanda energética da agricultura e as correspondentes emissões de gases de efeito estufa.

Apesar dos benefícios, o processo de adequação do digestato para sua comercialização é um desafio técnico que deve ser levado em consideração, na figura 29 é possível visualizar a área de compostagem de uma usina de biometanização na Itália. Enquanto a digestão termofílica ou pasteurização remove a contaminação biológica, materiais inertes podem ser tratados em estágios de pré ou pós-tratamento de digestão anaeróbia. Para minimizar a propagação de patógenos, o digestato obtido a partir de resíduos alimentares é fortemente regulamentado em muitos países. Os padrões de qualidade e estabilidade variam em países diferentes. Enquanto alguns países requerem pasteurização do digestato, outros requerem que o material passe pela compostagem e posterior armazenamento (Jain et al., 2018).



Figura 29 - Seção de compostagem do digestato em uma planta de DA de Bassano del Grappa (VI), Italia

A melhor prática determina que o digestato deve ser armazenado em tanques com tampas vedadas para garantir que nenhum gás (metano, amônia, sulfeto de hidrogênio) seja liberado para a atmosfera. Enquanto armazenado, o digestato precisará ser mexido ou agitado para garantir homogeneidade antes de ser aplicado ou transportado. Ao planejar uma usina de biogás, é importante levar em consideração os possíveis mercados para o digestato produzido, mas sempre tendo em mente os desafios operacionais intrínsecos a este produto, como o espaço viável dentro da planta para o tratamento, o tratamento em si e a logística necessária para sua comercialização (Kuns et al., 2019).

Na planta de DA do Caju, o digestato produzido é disponibilizado para iniciativas de agricultura urbana, como o **Programa Hortas Cariocas** da Prefeitura do Rio de Janeiro, que atua em regiões mais humildes da cidade, através da construção e manutenção de hortas comunitárias que propiciam a criação de postos de trabalho, capacitação e a oferta, a custo acessível, de gêneros alimentícios de qualidade, estruturando iniciativas de agricultura na cidade.

A manutenção desta parceria e a criação de uma possível rota de comercialização com o norte do estado do RJ, que de acordo com pesquisa da Embrapa realizada na cidade de Macaé, possui forte vocação para o plantio de grãos, principalmente da soja; pode ser um ponto chave para uma maior independência tecnológica brasileira, quando o assunto é fertilizante. Atualmente, grande parte dos fertilizantes utilizados em território nacional são importados e impactam diretamente

no preço dos alimentos. No Quadro 13 são sumarizados os pontos favoráveis e as barreiras observadas para as diferentes aplicações do biogás.

Quadro 13 - Pontos favoráveis e barreiras das possíveis utilizações do biogás

Utilização Final	Pontos favoráveis	Barreiras
Gás de Cozinha	<ul style="list-style-type: none"> ● Baixo custo e simplicidade no processo de purificação ● Gera economia para residência 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aplicação on-site ● Restrito para biodigestores de pequeno porte
Geração de Energia Elétrica	<ul style="list-style-type: none"> ● Gera recursos para a planta de DA ● Torna a matriz energética mais sustentável e diversa ● Barateia o custo de energia elétrica em tempos de crise hídrica 	<ul style="list-style-type: none"> ● Apresenta custo extra para purificação do biogás e retirada de contaminantes ● Apresenta custo extra inicial para instalação do motor de cogeração para gerar eletricidade e injetar na rede de distribuição
Biometano - Rede de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> ● Torna a matriz energética mais sustentável e diversa ● Já existe uma infraestrutura de distribuição e políticas públicas de incentivo no RJ 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alto custo para purificação do biogás e sua transformação em biometano ● Custos adicionais para injeção na rede de distribuição ● Valor de venda ainda pouco competitivo com a opção fóssil
Biometano - Combustível	<ul style="list-style-type: none"> ● Garante maior independência energética perante as importações de combustível fóssil ● Torna a matriz energética mais sustentável e diversa ● Existe uma alta demanda configurada pela frota de veículos movidos à GNV no estado/município do RJ 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alto custo para purificação do biogás e sua transformação em biometano ● Custos extras relacionados à logística de distribuição do gás aos postos
Digestato	<ul style="list-style-type: none"> ● É obtido como subproduto da DA ● Pode ser comercializado para agricultores e/ou distribuído para programas de combate à fome ● Garante maior independência de produtos rurais frente à importação de fertilizantes químicos ● Reduz a degradação do solo 	<ul style="list-style-type: none"> ● Demanda um pós-tratamento para adequação aos padrões legais ● Necessita de um amplo espaço nas plantas de DA para tratamento

A escolha da melhor aplicação para o biogás é altamente estratégica e deve levar em conta que o grau de valor agregado que se deseja adicionar ao biogás é proporcional aos custos de refino e purificação deste, que dado o grau de maturidade da tecnologia no Brasil, ainda são elevados. Além disso, dependendo da escolha, há também os gastos de injeção tanto na rede elétrica quanto na rede de distribuição de

gás da CEG, e os gastos com a logística para distribuição do biometano como combustível.

É esperado que com o investimento e os avanços tecnológicos do setor, os custos de purificação sejam reduzidos e os custos de injeção nas redes elétrica e de gás se tornem mais competitivos. Vale ressaltar que com o volume de geração de RSU orgânico da cidade do Rio de Janeiro, o ideal não é limitar a apenas uma utilização final e sim diversificar a gama de aplicações para o biogás gerado. Algo semelhante foi visto no estudo de caso de Milão, que será abordado mais à frente neste trabalho, em que uma planta de biometanização utiliza parte do biogás produzido para geração de energia elétrica e outra parte é elevada a biometano e distribuída na rede da cidade.

IV.6. Aspectos Econômicos

O aspecto econômico mais importante relacionado à aplicação da biometanização está ligado à garantia de recursos financeiros que viabilizem o investimento inicial da planta. Projetos de usinas de biogás de diversas escalas contam com apoio externo na forma de subsídios governamentais e empréstimos em condições e taxas mais favoráveis. (Kuns et al., 2019) Auxílios financeiros provenientes de investimentos privados com mecanismos de parceria público-privada também podem ser opções viáveis para o alcance dos recursos necessários, algo que já ocorre no setor de gerenciamento de RSU no Rio de Janeiro, como é o caso das empresas que fazem a operação de extração, purificação e distribuição do biogás gerado nos aterros do estado.

Foi possível encontrar na literatura a seguinte distribuição dos principais custos de capital relacionados ao projeto de implementação de uma usina de biometanização (Departamento de Energia e Mudanças Climáticas do Reino Unido 2014):

- Até 10% serão destinados aos custos de desenvolvimento, por exemplo, planejamento, projeto, processo de licitação;
- 10-20% irão para obras civis, incluindo compra de terreno para o local;
- 50-60% irão para a construção do digestor e equipamentos mecânicos e elétricos, por exemplo, a biodigestor, misturador, estação de pré-tratamento dos resíduos, área de tratamento de resíduos do digestor; e
- 20-30% irão para os componentes de geração de energia. Para gás à rede, este inclui o equipamento de atualização, custos de conexão à rede, injeção, caldeira, etc.

Conforme discutido anteriormente em relação à escala de operação da planta no Rio de Janeiro, é esperado que uma planta na cidade tenha uma capacidade próxima aos exemplos da Flórida, de 130.000 toneladas por ano e com o objetivo final de geração de eletricidade e calor, e de Cape Town, de 200.000 toneladas por ano com o objetivo final da geração de biometano, presentes no Quadro 7 com um investimento inicial de cerca de USD \$30.000.000 (Jain et al., 2018).

Em relação aos custos operacionais da planta, em plantas de 50.000 toneladas/ano o custo de tratamento por tonelada varia entre USD \$30 a \$45 (Jain et al., 2018). É esperado que uma planta de maior capacidade, por questões de escalabilidade, o custo operacional por tonelada venha a diminuir, porém, para tornar a análise mais conservadora possível, pode-se dizer que em uma planta no RJ, com uma capacidade próxima aos exemplos citados anteriormente de Cape Town, gastaria anualmente, no tratamento de 200.000 toneladas, algo em torno de R\$ 47.400.000,00, com base na cotação do dólar de R\$ 5,35 no dia 11/07/2022, de acordo com o site UOL – Economia.

Durante a operação da planta, as formas mais sustentáveis de garantir o suporte financeiro para a planta podem ser relacionadas a impostos sobre a venda do produto final gerado na biometanização. Em relação aos impostos, há a taxa chamada de “*gate fee*” que pode ser cobrada por operadores de biodigestores de resíduos orgânicos, plantas *waste to energy* ou de operadores de aterros sanitários para descarte responsável de os resíduos orgânicos gerados. A taxa pode ser cobrada pelo

peso ou volume de resíduos recebidos e esta pode variar de acordo com a pureza, qualidade, e o potencial de produção de biogás gerado. No Brasil, a taxa cobrada pelos aterros sanitários é próxima à USD \$20 por tonelada de resíduo orgânico (Jain et al., 2018). É necessário que a taxa a ser cobrada por uma planta de AD no RJ deva ser maior, além de haver uma maior regulação para desestimular o descarte de resíduos alimentares e orgânicos em aterros sanitários, garantindo que esses resíduos sejam entregues a usinas de recuperação. Impostos sobre o descarte de material orgânico em aterros e até a proibição de resíduos alimentares e orgânicos em aterros são exemplos de políticas que podem ser usadas.

Em relação aos produtos finais, há a receita gerada pela venda e distribuição dos produtos. A receita da venda e distribuição do biogás em forma de biometano, ou como energia elétrica, e do digestato como biofertilizantes, são essenciais para a sustentabilidade financeira de uma planta de biometanização (Pandyaswargo et al., 2019).

Por fim, a DA de resíduos alimentares resulta na mitigação de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Quantificar e monetizar esse potencial de mitigação dependerá do cenário usual de negócios no contexto local e pode criar fluxos de receita adicionais e estimular o aumento da capacidade de operação. A tabela 8 fornece valores indicativos dos gases de efeito estufa mitigados se a energia gerada de resíduos alimentares for utilizada no transporte e na produção de eletricidade. Vale ressaltar que esses valores são comparativos em relação ao envio dos resíduos para aterros sanitários sem recuperação energética, em relação ao uso do diesel nos veículos combustível e em relação às fontes de energia elétrica que mais são utilizadas globalmente (Jain et al., 2018).

Tabela 8 - Mitigação dos GEE's ao utilizar-se o biogás como combustível e como fonte de energia elétrica (Jain et al., 2018)

Fonte de matéria-prima de resíduos alimentares	Produção de Biogás(m ³ /ton úmida)	Redução de GEE ao usar o biometano como combustível (Kg CO ₂ eq)	Redução de GEE ao usar o biometano na geração de eletricidade (Kg CO ₂ eq)
Batata(18% a 20% dos Sólidos Totais)	100-120	1946	1.899
Pão	400-500	2506	2.315
Queijo	>600	2753	2.499
Vegetais	50-80	1872	1.844
Mistura de alimentos	75-140	1942	1896
Resíduos de cervejaria	60-100	1896	1862
Resíduos de Abatedouro	120-160	1995	1936

IV.7 Lições aprendidas a partir de Casos Internacionais

A seguir serão abordados brevemente dois exemplos de cidades que apostaram em projetos de valorização de resíduos orgânicos para a produção de biogás. São abordadas questões relacionadas à coleta dos resíduos, ao processo de tratamento, informações financeiras disponíveis, engajamento da população, políticas públicas adotadas e as barreiras encontradas. O objetivo desta seção é, ao final, identificar boas práticas e lições aprendidas nos casos de uso relatados que podem fazer sentido para o Rio de Janeiro.

Para isso, será utilizado o *report* da **World Biogas Association** de 2018, **“Global Food Waste Management: An Implementation Guide for Cities”** como principal referência para os seguintes exemplos internacionais de aplicação da biometanização.

Copenhague, Dinamarca

Coleta de Resíduos Orgânicos

A cidade de Copenhague começou a implementar a coleta seletiva de resíduos de todas as famílias em setembro de 2017 e a partir de 2018, operando em regime obrigatório. Cerca de 300.000 famílias (600.000 habitantes) são atendidas pelo programa. As empresas privadas de coleta de lixo são contratadas pelo município por meio de um processo licitatório para os diferentes bairros da cidade. Essas empresas coletam resíduos de residências e empresas que produzem RSU em quantidades semelhantes à geração de um domicílio.



Figura 30 - Visão da planta de DA na cidade de Copenhague (ENC Energy, 2014)

Aproximadamente 10.000 toneladas de resíduos alimentares foram recolhidos em 2018, incluindo alimentos crus e cozidos, arroz, massas, carne, peixe, ossos, pão e bolos, fruta e legumes, molhos e gorduras, ovos e cascas de ovos, nozes e cascas de nozes, borra de café e filtros de café, folhas de chá e filtros de chá, toalhas de papel usadas e flores cortadas. Os resíduos biológicos são recolhidos uma vez por semana em casas multifamiliares. Nas vilas é coletado a cada duas semanas, mas durante o verão é coletado uma vez por semana para evitar cheiro e insetos.

Fontes de Resíduos e Processo de Tratamento

Os resíduos orgânicos passam por um pré-tratamento para homogeneização do material e criação de uma polpa biológica que pode ser bombeada para um tanque do reator da biodigestão. A planta de AD usada pela cidade também trata resíduos orgânicos de outras cidades, bem como resíduos industriais provenientes de indústrias produtoras de alimentos. A planta também recebe resíduos da indústria pesqueira, matadouros, cervejarias, bem como esterco de fazendas da região.

Produtos e Aplicações

O biogás produzido, cerca de 7.500.000 m³/ano, é utilizado para produção de eletricidade enviada à rede e aquecimento urbano para uma comunidade local de 450 casas. No futuro, quando uma nova fábrica de DA for construída perto de Copenhague, o gás será usado para veículos pesados de mercadorias. O digestato é usado por agricultores locais como fertilizante para suas plantações.

Aspectos Financeiros

A coleta e tratamento dos resíduos são financiados através dos impostos pagos pela população para gestão de resíduos. Houve aumento de custos devido ao investimento em lixeiras de coleta de resíduos de alimentos e a revisão do programa de coleta da cidade que foi revertida em forma de taxa para a população. É esperado que essa taxa seja reduzida com o passar dos anos, até não ser mais cobrada e o imposto original para gestão do RSU se tornar mais barato. Isso se dá porque o custo da coleta e tratamento de resíduos orgânicos com a biometanização é menor do que o custo da incineração.

Engajamento da População

A maioria dos habitantes reagiu positivamente sobre a triagem de resíduos orgânicos, mas algumas preocupações foram levantadas pelos cidadãos, principalmente em relação à distância percorrida pelos transportes que realizam o

transporte dos resíduos. Essa mudança de logística dos resíduos estava preocupando as pessoas e as fazendo pensar se era melhor permanecer utilizando a incineração ou migrar para a DA. No entanto, os nutrientes podem ser reciclados ao utilizar o processo de DA, o que não é possível se os resíduos forem incinerados.

Aspectos políticos e barreiras à implementação

A iniciativa de coleta e reciclagem de resíduos orgânicos faz parte do 'Plano de Gestão de Recursos e Resíduos 2018' para a cidade de Copenhague. A meta de reciclagem da cidade de Copenhague era de 45% até 2018 e a introdução da separação na fonte de resíduos orgânicos é um importante passo para atingir esta meta. Não é permitido enviar resíduos biológicos para aterros sanitários, desde que foi proibido em 1997. As únicas barreiras experimentadas foram operacionais, como falta de espaço nos quintais e cozinhas nos apartamentos para recipientes separados para resíduos biológicos (uma lixeira de 15L).

Copenhague é um exemplo de um projeto de coleta de resíduos de alimentos implementado. Começou por integrar o seu tratamento de resíduos alimentares em uma estação de tratamento que já existia e estava digerindo esterco e restos de comida de outras cidades e indústrias. A cidade planeja construir uma nova instalação DA mais próxima e utilizar o biogás como biometano para veículos pesados. A seguir, tem-se um quadro resumo das principais boas práticas obtidas a partir deste exemplo.

Quadro 14 - Boas práticas observadas no estudo de caso de Copenhague. Fonte : Autoria Própria

Boas práticas	Importância
Coleta seletiva de restos alimentares	Garante um insumo para as plantas de biometanização de maior qualidade, com menos necessidade de pré-tratamento
Criação de taxa extra para implantação da estratégia de biometanização	Tornou possível investir na distribuição de lixeiras específicas para a coleta de alimentos e na revisão do programa de gerenciamento de RSU da cidade
Proibição do despejo de resíduos biológicos em aterros sanitários desde 1997	Garantiu o envio de uma menor parcela do RSU gerado para aterros, demandando uma menor área para operação e garantindo um melhor aproveitamento deste resíduo biológico
Escuta ativa das dúvidas da população acerca da nova logística de gerenciamento dos resíduos alimentares	Garantiu maior transparência ao processo e ajudou a conscientizar positivamente a população a respeito dos efeitos esperados com a implementação da tecnologia

Milão, Itália

Coleta de Resíduos Orgânicos

A cidade de Milão foi uma das pioneiras na coleta seletiva de resíduos alimentares das residências. A cidade ampliou a coleta seletiva de resíduos alimentares residenciais em 2012, que antes estava disponível apenas para empresas e organizações como restaurantes, hotéis, escolas e supermercados. Após um período inicial de 1,5 ano, o serviço foi estendido a todos os domicílios da cidade. As coletas são feitas por uma Empresa Pública– AMSA (Grupo A2A).

São recolhidos resíduos alimentares de 100% dos lares e atividades comerciais, o que equivale a cerca de 1,4 milhão de habitantes. Cerca de 140.000 toneladas de resíduos alimentares são recolhidas anualmente de residentes, empresas, indústrias e mercados. Os resíduos alimentares são recolhidos separadamente de outros resíduos orgânicos. A coleta é feita na calçada para todos os resíduos (ou seja, domésticos e comerciais). As residências estão equipadas com um cesto de cozinha de 10L. Prédios e edifícios estão equipados com um ou mais recipientes de 240L, dependendo do número de residências por prédio. Os resíduos alimentares são recolhidos duas vezes por semana. Os outros resíduos orgânicos são recolhidos duas vezes por semana em sacos transparentes. Os resíduos são coletados por caminhões movidos a metano ou biodiesel. As instalações comerciais estão equipadas com recipientes que variam de 120L a 240L e as frequências de coleta variam de duas por semana para seis por semana, dependendo da demanda. Desde a implantação, houve um crescimento da taxa de reciclagem de resíduos biológicos de 5,3% em 2011 para 18,1% em 2014.

Produtos e Aplicações

Os resíduos alimentares são descarregados em uma estação de transferência e transportados para uma instalação integrada de DA e compostagem por caminhões de grande capacidade de 30 toneladas. A instalação está localizada em Montello,

perto de Bérgamo, e foi construída em 1997 para ser usada como planta de compostagem aeróbia e mais recentemente foi adaptada para biometanização. Os resíduos não recicláveis são enviados para incineração com recuperação de energia. Todos os anos, a usina processa e transforma 285.000 toneladas de resíduos orgânicos, em condições termofílicas, em biogás para geração de eletricidade, e outras 300.000 toneladas por ano são transformados em biogás que é convertido em biometano e que alimenta a rede nacional de gás. Durante o processo de pré-tratamento, os sacos são triturados, os contaminantes metálicos são removidos e reciclados, enquanto os contaminantes plásticos são enviados para recuperação de energia.

Aspecto Financeiros

O projeto foi financiado pelo município de Milão que gastou cerca de 4,5 milhões de euros para a compra de 45 veículos e outros equipamentos necessários ao processo de coleta. Foram fornecidos aos cidadãos, caixas e cestas de entrega, 25 sacos de lixo compostáveis e folheto de instruções sobre como reciclar. O retorno foi planejado através de uma taxa de gestão de resíduos, que compreende uma parte fixa (~70%) com base no tamanho da habitação e uma parte variável (~30%) com base no número de habitantes. Com base no tamanho e localização, o preço da coleta pode variar entre € 150-300 por tonelada de resíduos coletados. A taxa cobrada pela usina de biogás varia entre € 50 e € 80 por tonelada de resíduo, dependendo do potencial de biogás do resíduo. O digestato produzido é vendido aos agricultores a 20-50 euros por tonelada, dependendo da sua qualidade. Vale ressaltar que devido a uma redução considerável de resíduos encaminhados para incineração, que possui um preço superior na operação da gestão de RSU quando comparado à DA, foi possível reduzir os custos de gestão do RSU e isso ajudou a cobrir grande parte do custo extra de investimento em nova infraestrutura de coleta.

Engajamento dos Habitantes

Um dos pilares da coleta seletiva de resíduos alimentares em Milão foi a ampla comunicação com os moradores, que começou com a conscientização dos síndicos dos prédios da cidade. Uma carta foi enviada aos habitantes compartilhando detalhes

sobre o serviço, além de calendários, folhetos em vários idiomas, um aplicativo para smartphone, anúncios em jornais, rádio e televisão e uma linha telefônica gratuita que foram usados para engajamento. As orientações educacionais foram repassadas presencialmente durante a entrega gratuita de recipientes de cozinha, revestimentos compostáveis e materiais de comunicação. Além disso, vários eventos de distribuição de materiais de compostagem foram realizados para demonstrar a natureza circular da coleta e reciclagem de resíduos de alimentos. Embora os cidadãos que participam da coleta de resíduos alimentares em Milão tenham adotado o sistema rapidamente e com aprovação esmagadora, alguns expressaram preocupação com o desenvolvimento da instalação de biogás em Montello. Estes grupos estão preocupados com as emissões e o aumento da frequência de tráfego para a usina. A usina de biogás trabalha continuamente com grupos de cidadãos locais e organiza visitas frequentes à planta para aumentar a transparência e mostrar o seu funcionamento.

Aspectos políticos e barreiras

Na Itália, entrou em vigor em 2013 o primeiro decreto de incentivo à produção de biometano, que concede incentivos financeiros para geração e utilização de biogás. A coleta separada de resíduos alimentares é obrigatória na cidade de Milão. Para maximizar a eficiência da coleta seletiva de resíduos alimentares, um mecanismo de multas foi implementado para ajudar a reduzir a contaminação e maximizar a reciclagem. Uma equipe dedicada de inspetores realiza uma verificação amostral nos edifícios uma hora antes da coleta, penalizando as residências que colocam impurezas nas coletas de resíduos alimentares, como plásticos. Em áreas com qualidade inferior à média, são implementadas atividades adicionais de conscientização.

Um dos principais desafios enfrentados durante a implementação da coleta separada de resíduos alimentares domésticos em Milão foi a preparação, coordenação e entrega de lixeiras de cozinha, sacos compostáveis e informações, bem como lixeiras com rodas para mais de meio milhão de residências em uma área altamente densamente povoada. Esse desafio foi superado por meio do mapeamento da aquisição e o planejamento da entrega nas habitações.

O estudo de caso da cidade de Milão mostra que é possível implementar a coleta e digestão separada de resíduos alimentares em uma cidade grande e densamente povoada. A proporção de resíduos não compostáveis que contaminam os resíduos alimentares é consistentemente inferior a 5%, com uma tendência de redução positiva. Uma das principais razões de seu sucesso tem sido o engajamento da comunidade e o repasse de informações educacionais. A seguir, tem-se um quadro resumo dos principais aprendizados obtidos a partir deste exemplo.

Quadro 15 - Boas práticas observadas no estudo de caso de Milão. Fonte: Autoria própria

Boas práticas	Importância
Coleta seletiva de restos alimentares de 2 a 6 vezes na semana, dependendo da demanda	Garante insumo para as plantas de biometanização de maior qualidade, com menor necessidade de pré-tratamento
Distribuição kits específicos para separação dos restos alimentares, como lixeiras e plásticos biodegradáveis para o descarte de restos de alimentos	Facilitou o processo de separação dos materiais dentro das residências e em prédios/condomínios. Além disso, foram utilizados plásticos biodegradáveis dentro das lixeiras que poderiam ser usados na biodigestão, tornando mais simples o processo de pré-tratamento dos resíduos
Combinação de técnicas de gestão do RSU	Resíduos alimentares são usados na biodigestão, enquanto os resíduos com potencial de reciclagem são separados e resíduos não recicláveis são levados para uma planta de incineração. Mostrando a sinergia necessária para uma gestão eficiente de RSU de uma grande cidade.
O biogás tem mais de um tipo de destinação final	Uma parte do biogás é usado na geração de eletricidade e a outra parte é purificada e elevada a condição de biometano e injetada na rede de distribuição local
Criação de um novo modelo de taxa de gestão do RSU	Modelo baseado no tamanho, quantidade de habitantes e localização da residência. Isso torna os valores da arrecadação mais transparente e o processo fica menos exposto à possíveis mudanças no volume de coleta
Ampla comunicação com moradores	Através de uma campanha educacional, onde detalhes a respeito do serviço, calendários de coleta, distribuição de materiais didáticos em diversas plataformas foram distribuídos para a população, houve um aumento da aprovação da medida por parte dos moradores. Além disso, a planta recebe visitas frequentes, tornando ainda mais transparente o processo
Mecanismo de multa pela falta de separação correta dos resíduos	Equipes de inspetores realizam verificações visuais nas lixeiras destinadas aos resíduos alimentares em busca de possíveis contaminações e a presença de materiais que não sejam restos de alimentos. Caso alguma irregularidade seja apontada, a residência/prédio recebe uma multa.

Ao explorar os dois exemplos, é possível notar um ponto relevante que está diretamente ligado ao sucesso da implantação da biometanização nestas cidades:

políticas públicas de incentivo a uma melhor gestão de RSU. Estas medidas de incentivo se apresentam como fatores-chave para o sucesso do projeto, entre eles: incentivo à coleta seletiva, conscientização da população, investimento em infraestrutura de coleta e a busca de sinergia entre diversas estratégias de gestão de RSU para o desenvolvimento sustentável das cidades.

Um dos pilares que surgem nestes estudos foi a pré-existência de coleta seletiva de restos de alimentos amplamente distribuída nas cidades que atende a 100% das residências de Copenhague desde 2017, e em Milão atende, desde 2012, tanto residências quanto estabelecimentos comerciais, como hotéis, restaurantes, escolas e supermercados. Além disso, o estudo mostrou que estas cidades já contavam com coleta seletiva dos seus resíduos antes da implantação da planta de biometanização. A coleta seletiva foi adaptada para a coleta separada dos resíduos alimentares. A partir disso, fica clara a importância da expansão do serviço de coleta seletiva na cidade do Rio de Janeiro, que segundo dados da Comlurb de 2019, apresenta um bom perfil de cobertura da, atendendo a 122 bairros e recolhendo mensalmente, aproximadamente, 17.700 toneladas de RSU. Apesar do volume ser baixo em relação ao total de RSU gerado na cidade do Rio de Janeiro, cerca de 10.000 toneladas, de acordo com informações da Prefeitura do Rio de 2019, já é um indicativo de que há na cidade uma estrutura de coleta seletiva.

O ponto principal deste programa em vigência na cidade, é a forma com que as autoridades estão buscando dar uma destinação correta para o RSU gerado, enviando-o para cooperativas, onde os resíduos são separados e classificados. A coleta seletiva além de ser essencial para uma melhor gestão do resíduo, ainda é capaz de gerar emprego e renda para centenas de trabalhadores. Com isso, é de suma importância a ampliação de tal programa da Comlurb e o ideal seria a definição de metas para que este programa seja capaz de atender a todo carioca e se torne obrigatório por lei. Sem um maior investimento neste serviço, qualquer estratégia de gerenciamento de RSU aplicado na cidade será afetado por conta da grande mistura de resíduos.

Um fator importante que foi observado nos casos internacionais, é como o governo local buscou ouvir e aproximar os cidadãos na discussão acerca do gerenciamento do RSU de sua cidade. Ambas cidades distribuíram kits gratuitos para auxiliar o processo de coleta dos restos alimentares dentro das residências e neste processo de distribuição materiais educativos foram distribuídos e dúvidas foram sanadas. Desta forma, com uma medida relativamente simples, o governo conseguiu ao mesmo tempo conscientizar positivamente a população e dar mecanismos para facilitar este novo processo de separação do lixo, que conseqüentemente tornou o pilar da coleta seletiva mais forte e difundido entre os cidadãos.

Como a cidade do Rio apresenta a mesma estrutura de gestão de RSU há muitas décadas, é esperado que a expansão de um serviço de coleta seletiva, que demanda maior atenção e dedicação por parte dos cidadãos, gere dúvidas e reclamações, principalmente por não haver a cultura de separação de nosso lixo bem enraizada. Serão necessárias ações focadas na conscientização da população, principalmente de maneira mais granular, bairro a bairro, para criar esse senso de comunidade e importância para a questão, onde as principais vantagens acerca da introdução do processo de biometanização, com a possível distribuição de energia elétrica ou de biometano, sejam destacadas. Isso deixará claro que o esforço adicional necessário para a separação adequada dos resíduos será compensado ao final.

Outro ponto que surgiu nos casos explorados, foi o alto investimento inicial que os municípios precisam fazer para adequar a sua logística e infraestrutura de gestão de RSU para viabilizar a operacionalização de uma planta de biodigestão e tornar a coleta seletiva ainda mais robusta na cidade. Este investimento deve ser feito, de preferência, antes do início das operações da planta de biometanização, para reduzir ao máximo os possíveis problemas operacionais que possam acontecer por falha no pré-tratamento dos resíduos. Os principais custos estão relacionados à compra de uma nova frota de caminhões para coleta, principalmente os movidos a biocombustíveis e a eletricidade, reduzindo ainda mais a emissão de gases de efeito estufa na gestão do lixo. Além da compra de caminhões, foi possível observar um custo relativamente elevado relacionado à compra e distribuição de lixeiras específicas para a coleta de resíduos alimentares, visando a redução da

contaminação deste material. Na cidade de Copenhague foram distribuídas lixeiras de 15L para serem usadas dentro das residências, enquanto que em Milão, o governo ofereceu tanto lixeiras menores para os moradores usarem dentro de sua residência, quanto lixeiras maiores de 120 a 240 litros com o objetivo de serem usadas por prédios e condomínios. Esses investimentos iniciais que foram feitos na cidade de Milão e Copenhague se mostraram altamente eficientes para o melhor desempenho da coleta seletiva nas cidades e o posterior funcionamento da planta de biometanização.

Para custear esses investimentos mencionados acima, as cidades viram a necessidade de mudanças a respeito das taxas cobradas para a gestão de RSU. Ao avaliar essas taxas, percebeu-se que uma adaptação do método utilizado pela cidade de Milão pode ser uma excelente alternativa para custear os investimentos realizados na implantação da biometanização na cidade do Rio de Janeiro. Estipular uma parte fixa pautada no tamanho da residência e uma parte variável que contemple fatores relacionados ao número de moradores e localização do imóvel parece ser uma boa alternativa a ser aplicada em uma cidade como o Rio de Janeiro, pois torna mais simples entender o valor final da tarifa e menos exposto a possíveis variações de demanda de coleta. Porém, a cobrança de taxas para esse tipo de serviço na cidade do Rio de Janeiro não existe atualmente e é importante que a sua implantação seja bem discutida além de pensar em uma definição das proporções das taxas fixas e variáveis devem levar em conta as singularidades presentes na cidade do Rio de Janeiro, principalmente a desigualdade de renda presente no município. Com isso, a parcela variável que diz respeito à quantidade de moradores da residência, deve ser bem ponderada com o tamanho e localização da residência, para que regiões carentes, onde é comum um maior núcleo familiar dividir a mesma residência, não tenha um acréscimo tão elevado em sua taxa final de gestão de resíduos.

Uma lição que ficou clara ao estudar a gestão de RSU das duas cidades é a importância da sinergia entre tecnologias na gestão dos resíduos. Na cidade de Milão, o RSU passa por uma triagem em uma estação de separação e desta forma, os materiais recicláveis são enviados para usinas especializadas, os restos alimentares são enviados para a planta de biometanização e os resíduos não recicláveis são

enviados para uma planta *Waste To Energy*, neste caso incineração para a recuperação energética.

Ao estudar os exemplos de Copenhague e Milão, além dos fatores-chave mencionados anteriormente, pode-se notar que há um histórico antigo de preocupação dos órgãos responsáveis em tornar mais sustentável a gestão de resíduos das cidades. Como por exemplo, em Copenhague é proibido o envio de restos de alimentos para aterros sanitários desde 1997 e desde 2018 opera em regime obrigatório a coleta seletiva nas residências, enquanto que em Milão, desde 1993 há um processo de coleta seletiva que começou a atender primeiramente estabelecimentos comerciais, que em 2012 expandiu suas operações e passou a atender 100% das moradias da cidade. Isto mostra que o desenvolvimento de um modelo eficiente de gestão dos resíduos em uma cidade não é um processo simples, e muito menos um processo rápido. Estas cidades levaram anos para otimizar sua infraestrutura de coleta e tratamento de RSU, para enfim chegar em um contexto favorável para a aplicação da tecnologia de biometanização e a geração de recursos que beneficiam diretamente a população, como a distribuição de energia elétrica e injeção de biometano na rede de distribuição de gás encanado para as residências e estabelecimentos comerciais.

Quando se estuda o histórico de gestão de RSU no Brasil, um grande marco da política pública foi a definição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, quando a logística reversa, a reciclagem e a coleta seletiva de resíduos passaram a ser discutidos e vistos como um tópico importante dentro da gestão de resíduos dentro do território nacional. Porém, o assunto da coleta seletiva ficou de lado nos anos que seguiram a PNRS e apenas em 2015 houve um segundo marco de política pública muito importante para a cidade do Rio de Janeiro, com a divulgação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro, em que um dos principais objetivos é incentivar a reutilização, a reciclagem e a recuperação dos resíduos sólidos urbanos, reduzindo a quantidade de rejeitos encaminhada a aterros sanitários, trazendo como um forte pilar para alcançar este objetivo, a coleta seletiva (PMGIRS 2015).

A partir do PMGIRS, observou-se uma crescente de projetos da prefeitura do Rio de Janeiro, em parceria com a Comlurb para a melhoria da gestão do RSU na cidade, entre eles a criação das estações de transferência de resíduos próximas aos grandes centros geradores de resíduos na cidade, que tornam a logística de coleta mais dinâmica e menos custosa. Houve investimento na aquisição de frota elétrica que faz a coleta de materiais biológicos nos hospitais municipais, para redução da pegada de carbono na gestão de resíduos; a fração orgânica passou a receber maior atenção a partir de um programa de aproveitamento dos materiais provenientes da poda separados na Usina de Reciclagem do Caju e sua transformação em biofertilizante que é usado nos programas de reflorestamento da cidade e em ações sociais, como a anteriormente mencionada **Hortas Carioca**, e parte é comercializada para agricultores da região.

Entretanto, mesmo com o surgimento destas iniciativas, a cidade ainda é altamente dependente da utilização de aterros sanitários como destinação final dos resíduos gerados. Dados presentes no PMGIRS de 2015 apontavam que cerca de 93,2% do lixo gerado no município é encaminhado para o aterro sanitário de Seropédica, que mesmo sendo um dos mais modernos da América Latina, ainda é alvo de críticas por órgãos ambientais ao redor o mundo e tem seus desafios técnicos característicos, como mencionado na revisão desta técnica, no **Capítulo 3** deste trabalho.

Este cenário de dependência começou a dar indícios que iria melhorar a partir de 2018, quando foi introduzida a planta de biometanização no Ecoparque do Caju, fruto de uma parceria entre pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a empresa METHANUM. Porém, a planta, que é de pequeno porte, ainda funciona com capacidade bem inferior à sua instalação, muito por conta da dificuldade de separar insumos orgânicos de qualidade para abastecer a operação. Todavia, a presença desta planta já é um grande marco para entender qual a direção em que as políticas públicas estão apontando para o futuro da gestão de RSU no Rio de Janeiro, principalmente a fração orgânica. Ter esta planta no município promove o estudo empírico desta tecnologia por pesquisadores da cidade, e torna possível investigar os principais gargalos da técnica, tirar aprendizados e lições valiosas que podem ser usadas em uma planta de maior escala, como a que foi discutida anteriormente neste

trabalho e formar uma mão de obra capaz de operar uma planta de tal escala no futuro.

Ao olhar de maneira macro para todo esse histórico brasileiro, e mais de perto para o histórico carioca da última década, é possível perceber que a cidade do Rio possui uma boa gestão do seu resíduo, apresentando resultados positivos na avaliação da ISLU, ficando em 4º lugar na avaliação em 2019 e em 3º na avaliação de 2020. Vale ressaltar que a cidade de 7 milhões de habitantes tem a segunda maior geração de RSU per capita do país, perdendo apenas para Santos (ISLU 2020). Em resumo, para que a cidade possa dar o tratamento adequado para o RSU, em específico, a fração orgânica, é fundamental maior investimento na coleta seletiva.

V. Conclusão

O projeto teve como objetivo estudar e analisar os principais métodos de gestão e reaproveitamento da fração orgânica do RSU e avaliar qual seria a tecnologia com maior potencial de aplicabilidade no Rio de Janeiro, tendo como base o perfil de descarte da população carioca a partir das análises gravimétricas realizadas pela Comlurb, foi possível concluir que para o caso do município do Rio, em que praticamente metade do RSU gerado é orgânico, a estratégia da biometanização centralizada, com uma escala de 100.000 a 200.000 ton/ano, apresenta características operacionais, econômicas e tecnológicas interessantes para lidar com o alto volume de resíduos orgânicos, principalmente proveniente do desperdício de alimentos. Além disso, ao contrário do aterro sanitário, a biometanização se apresenta como uma estratégia para a valorização do resíduo.

É de suma importância ressaltar que uma proposta de biometanização em grande escala não será suficiente para tratar todos os resíduos gerados na cidade,

nem mesmo será capaz de tratar todos os resíduos orgânicos. Nos estudos de caso, ficou clara a utilização de resíduos alimentares como insumo das plantas de DA para um maior rendimento do biogás. Ainda precisa-se lidar com resíduos orgânicos de natureza mais complexa, principalmente os de origem lignocelulósica que necessitam de um tratamento diferenciado dos provenientes do desperdício alimentar. Outros resíduos inorgânicos, como plásticos, vidros e metais que precisam de estratégias de tratamento e valorização específicos.

Com base nas melhores práticas estudadas neste trabalho, para uma cidade do porte do Rio de Janeiro, o mais aconselhável é investir na sinergia entre diversas práticas de gestão do RSU. O ponto de partida para se alcançar esta sinergia está em um investimento na expansão da coleta seletiva, não só da infraestrutura, mas na mudança de comportamento da população. A partir desse ponto, é possível coletar insumos mais adequados para uma planta de DA. Enquanto há uma manutenção do envio de itens não recicláveis para o aterro sanitário, porém em volumes menores, aumentando o seu tempo de vida e tornando possível a investigação e estudos de novas formas de aproveitamento destes materiais, inclusive na adoção de tecnologias capazes de lidar com estes tipos de resíduos e gerar produtos de maior valor agregado a partir destes, como a gaseificação e a pirólise.

É importante ter em mente que a gestão de resíduos na cidade do Rio de Janeiro é altamente complexa e demanda uma atuação dos órgãos políticos locais com medidas baseadas em estudos aprofundados sobre o tema na cidade, que levem em conta a gestão de resíduos, mas também investiguem medidas para a prevenção de geração de resíduos, uma vez que o Rio de Janeiro é a segunda cidade que mais produz lixo por habitante do Brasil, com uma produção média de 460 kg/ano por habitante, perdendo apenas para Santos (ISLU 2020). Uma atenção especial deve ser dada à prevenção do desperdício de alimentos na cidade.

Para futuros estudos, alguns temas são sugeridos:

- a) Realizar estudos comparativos de viabilidade econômica das diferentes propostas de tratamento e valorização de RSU

- b) explorar a viabilidade operacional e econômica do uso de tecnologias integradas que combinam técnicas *Waste To Energy*, com métodos de DA para uma gestão robusta de RSU da cidade do Rio de Janeiro;
- c) formular um plano de disseminação da coleta seletiva no Rio de Janeiro tendo como base estudos de casos reais, como os apresentados neste trabalho;
- d) explorar boas práticas e estratégias nacionais e internacionais para a prevenção da geração de RSU;
- e) explorar medidas para a redução do desperdício de alimentos na cidade do Rio de Janeiro.

VI. Referências Bibliográficas

ABATZOGLOU, N. BOIVIN, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais(ABRELPE). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, 2020.

ABDEL-SHAFY, H. I.; MANSOUR, M. S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 27, n. 4, p. 1275–1290, dez. 2018.

Abdulhussain, A.A;Guo, J; Liu Zhi, P; Ying, Y; Wisaam, S.A.R. Review on landfill leachate treatments. *Am. J. Appl. Sci.* 6, 672–684. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.672.684>, 2009.

Amaral, M.C.S; Moravia, W.G;, Lange, L.C; Zico, M.R; Magalhaes, N.C; Ricci, B.C; Reis, B.G. Pilot aerobic membrane bioreactor and nanofiltration for municipal landfill leachate treatment. *J. Environ. Sci. Health, Part A* 51, 640–649, 2016.

ANÁLISE GRAVIMÉTRICA DO LIXO DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO 2001, Comlurb, Rio de Janeiro, 2001.

Arena, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste management* 32, 625–639, 2012.

Atkins, R; Deranek, K; Nonet, G. Supply chain food waste reduction and the triple bottom line, *Social Business*, Vol. 8 No. 2, pp. 121-144, 2018.

Bailón Allegue, L; Hinge, J. Biogas upgrading Evaluation of methods for H₂S removal, pp. 1–31. Danish Technological Center, Copenhagen, 2014.

Baptista, A., Perovich, A. U.S. Solid Waste Incinerators: An Industry in Decline. The New School Tishman Environment and Design Center, 2019.

Bauer, F; Hulteberg, C; Persson, T; Tamm, D. Biogas upgrading-review of commercial technologies. SGC Rapport 2013:270. SGC Rapp. 83, 2013.

Beenackers, A; Biomass gasification in moving beds, a review of European technologies. Renew. Energy 16, 1180–1186, 1999.

BEIL, M; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, p. 342–377, 2013.

Boilerinfo, Fluidized Bed Combustion FBC Boiler. Boilerinfo, 2018.

Bridgwater, A. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. Fuel 74, 631–653, 1995.

Brown, Mike. Is waste a source of renewable energy?. Zero Waste Europe, 2015. Disponível em <https://zerowasteurope.eu/2015/08/is-waste-a-source-of-renewable-energy/>. Acesso em 10/02/2022.

C40 Cities Climate Leadership Group. Why solid waste incineration is not the answer to your city's waste problem, 2019. Disponível em : https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Why-solid-waste-incineration-is-not-the-answer-to-your-city-s-waste-problem?language=en_US . Acesso em: 10/02/2022

CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES COLETADOS PELA COMLURB NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO NO PERÍODO DE JANEIRO A AGOSTO DE 2021, Comlurb, 2021.

CARRÈRE, H. et al., . Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. Journal of Hazardous Materials, [s.l.], v. 183, n. 1-3, p.1-15, nov. 2010.

CASTILHOS Jr, A.B. Sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterro sanitário. PROSAB-LIXO 1-125. Santa Catarina, 2006.

Cecen, F; Erdinçler, A; Kilic, E. Effect of powdered activated carbon addition on sludge dewaterability and substrate removal in landfill leachate treatment. Adv. Environ. Res. 7, 707–713, 2003.

Chanthakett, A; Arif, M.T; Khan, M.M.K; Oo, A.M.T. Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste., Journal of Environmental Management 291, 112661, 2021.

Chen, J.L; Ortiz, R; Steele, T.W.J; Stuckey, D.C. Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review. *Biotechnol. Adv.* 32, 1523–1534, 2014.

CHEN, D. et al., . Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, v. 34, n. 12, p. 2466–2486, dez. 2014.

Comlurb sai na frente e lança a primeira unidade de biometanização da América Latina. Rio Prefeitura, 2018. Disponível em : encurtador.com.br/awCMS. Acesso em 10/05/2022.

CONDE, J. L; MORO, L. E; TRAVIESO, L; SANCHEZ, E. P; LEIVA, A; DUPEIRÓN, R; ESCOBEDO, R. Biogas purification process using intensive microalgae cultures. *Biotechnology Letters*, v. 15, p. 317–320, 1993.

Costa, A.M; Alfaia, R.G.S.M; Campos, J.C. Landfill leachate treatment in Brazil – an overview. *J. Environ. Manag.* 232, 110–116, 2019.

Dejtrakulwong, C; Patumsawad, S. Four zones modeling of the downdraft biomass gasification process: effects of moisture content and air to fuel ratio. *Energy Procedia* 52, 142–149, 2014.

Deng, N; Li, D; Zhang, Q; Zhang, A; Cai, R; Zhang, B. Simulation analysis of municipal solid waste pyrolysis and gasification based on Aspen plus. *Front. Energy* 1–7, 2017.

DE ALMEIDA, R. Aplicação de Cal e Nanofiltração no Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário: Avaliação Tecnológica e Estimativa de Custos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, p.162, 2018.

DEVAI, I; DELAUNE, R. D. Effectiveness of selected chemicals for controlling emission of malodorous sulfur gases in sewage sludge. *Environmental Technology*, v.23, p. 319–329, 2002.

Dogaris, I; Ammar, E; Philippidis, G. Prospects of integrating algae technologies into landfill leachate treatment. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (2020) 36:39. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-2810-y>, 2020.

Edu, B. Five Types of Gasifier, 2013.

Eklund, B; Anderson, E.P; Walker, B.L; Burrows, D.B. Characterization of landfill gas composition at the fresh kills municipal solid-waste landfill. *Environ. Sci. Technol.* 32, 2233–2237, 1998.

Environmental Protection Agency - US., Catalog of CHP Technologies, 2017.

European Union. The EU in the World - Environment,. European Union. Eurostat. 2020.

European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The Role of Waste-to-Energy in the Circular Economy., Communication from the Commission to the European Parliament., European Commission: Brussels, Belgium, 2017.

Gandra, A. Rio ganha duas usinas que transformam lixo em energia limpa. Agência Brasil, 2019. Disponível em : encurtador.com.br/ozBOQ. Acesso em 10/05/2022.

GARCIA-ARRIAGA, V; ALVAREZ-RAMIREZ, J; AMAYA, M; SOSA, E. H₂S and O₂ influence on the corrosion of carbon steel immersed in a solution containing 3M diethanolamine. *Corrosion Science*, v. 52, p. 2268–2279, 2010.

Giaconia, A. Thermochemical production of hydrogen. In *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*. Pp. 263-280, 2014.

Grando, R. MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DA CADEIA PRODUTIVA DO BIOGÁS. Dissertação(Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, 2017.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO., *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all*. Rome, FAO., 2021.

Forbes, H; Quested, T; O'Connor, C. *Food Waste Index Report.*, United Nations Environment Programme, 2021.

Ghodake, G.S et al., . Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State- of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. *J. Clean. Prod* 297, 126645, 2021.

Gotvajn, A; Tišler, T; Zagorc-Končan, J. Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate. *J. Hazard. Mater.* 162, 1446–1456, 2009.

He, M; Hu, Z; Xiao, B; Li, J; Guo, X; Luo, S; Yang, F; Feng, Y; Yang, G; Liu, S. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition. *Int. J. Hydrogen Energy* 34, 195–203, 2009.

HENDRICKSON, R. G; CHANG, A; HAMILTON, R. J. Co-Worker fatalities from hydrogen sulfide. *American Journal of Industrial Medicine*, v. 45, p. 346–350, 2004.
HOANG, A. T. et al., . Perspective review on Municipal Solid Waste-to-energy route: Characteristics, management strategy, and role in circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 359, p. 131897, jul. 2022.

Hoorweg, D; Bhada-Tata, P. *What a waste: a global review of solid waste management*, vol. 15. Washington, DC: World Bank; p. 116, 2012.

Hosseini, S.E; Wahid, M.A. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40, 868–875, 2014.

Hung Tsui, T; Wong, J. A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management. *Waste Disposal & Sustainable Energy* 1:151–167. <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00013-z>, 2019.

Jain, S; Newman, D; Márquez, R; Zeller, K. *Global Food Waste Management: An implementation guide for cities.* World Biogas Association, 2018.

Karthikeyan, OP; Trably, E, Mehariya, S; Bernet, N; Wong, JW; Carrere, H. Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: a review., *Bioresour Technol.*, 249:1025–39, 2018.

Kersten, S.R; Wang, X; Prins, W; van Swaaij, W.P. Biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. Part 1: literature review and model simulations. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 8773–8785, 2005.

Kirnbauer, F; Wilk, V; Kitzler, H; Kern, S; Hofbauer, H. The positive effects of bed material coating on tar reduction in a dual fluidized bed gasifier. *Fuel* 95, 553–562, 2012.

Krook, J; Baas, L. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research. *J Clean Prod*;55:1–9, 2013.

KUMAR, S. Composting of municipal solid waste. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 31, n. 2, p. 112–136, 20 set. 2010.

KUMAR, S. et al., . Rapid composting techniques in Indian context and utilization of black soldier fly for enhanced decomposition of biodegradable wastes - A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, v. 227, p. 189–199, dez. 2018.

Kummu, M; de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O. and Ward, P.J., Lost food, wasted resources: global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertilizer use, *Science of The Total Environment*, Vol. 438, pp. 477-489, 2012.

Kunii, D; Levenspiel, O. *Fluidization Engineering.* Elsevier, 2013.

Kuns, A., Steinmetz, R; Amaral, A. *Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato.* EMBRAPA, 2019.

Lars, W; Waldheim, C. *Gasification of Waste for Energy Carriers: A Review.*, 2018.

LATHA, K. M; BADARINATH, K. V. S. Correlation between black carbon aerosols, carbon monoxide and tropospheric ozone over a tropical urban site. *Atmospheric Research*, v. 71, 265–274, 2004.

Lavaee, M.S. Waste to Energy (WTE): Conventional and Plasma-Assisted Gasification-Experimental and Modeling Studies. University of Waterloo, 2013

Lee, D.J. Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review. *Bioresource Technology* 344, 126217. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021>, 2021.

LEE, D.-J.; LU, J.-S.; CHANG, J.-S. Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*, v. 318, p. 123912, dez. 2020.

LEE, D.-J.; LU, J.-S.; CHANG, J.-S. Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*, v. 318, p. 123912, dez. 2020.

Li, J. Municipal Solid Waste Incineration Ash-Incorporated Concrete: One Step towards Environmental Justice. *Buildings* 11, 495. <https://doi.org/10.3390/buildings11110495>, 2021

LI, H. et al., . Food waste pyrolysis by traditional heating and microwave heating: A review. *Fuel*, v. 324, p. 124574, 15 set. 2022.

Lima, H. Governo do Rio de Janeiro apresenta Mapa da Produção de Biogás. *Energia e Biogás*, 2022. Disponível em : encurtador.com.br/fxDMO. Acesso em 10/05/2022

LU, J.-S. et al., . Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresource Technology*, v. 312, p. 123615, set. 2020.

LUCAS JUNIOR, J. et al., . Avaliação do uso de inóculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993.

Majidi, S.S; Kamalan, H. Economic and environmental evaluation of waste to energy through gasification; case study: Tehran. *Environmental Energy and Economic Research* 1, 113–124, 2017.

Makarichi, L; Jutidamrongphan, W; Techato, K.A. The evolution of waste-to-energy incineration: a review. *Renew Sustain Energy Rev*;91:812–821, 2018.

Manso, L. Rio de Janeiro espera publicar, em junho, regulamentação para biometano, 2022. Disponível em : <https://epbr.com.br/rio-espera-definir-em-junho-os-novos-precos-maximos-para-biometano/>. Acesso em 15/06/2022

MANN, G; SCHLEGEL, M; SAKALOUSKAS, R. S. Biogas-conditioning with microalgae. *Agronomy Research*, v. 7, p. 33–38, 2009.

Materazzi, M; Lettieri, P; Mazzei, L; Taylor, R; Chapman, C. Thermodynamic modelling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gasification. *Fuel* 108, 356–369, 2013.

Miao, L; Yang, G; Tao, T; Peng, Y. Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments: A review. *J. Environ. Manage.* 235, 178–185, 2019.

MIYAWAKI, Bruno. Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais. 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Molino, A; Chianese, S; Musmarra, D. Biomass gasification technology: the state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry* 25, 10–25, 2016.

MONTEIRO, Sílvio Daniel da Silva Carvalho. Produção de Biometano: Análise de Mercado e Estudo da Separação por PSA. 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial, Departamento de Engenharia Química, Universidade do Porto, Portugal, 2011.

Moon, Doun. The High Cost of Waste Incineration. *Zero Waste World*, 2020. Disponível em: <https://zerowasteworld.org/wp-content/uploads/The-High-Cost-of-Waste-Incineration-March-30.pdf>. Acesso em 10/02/2022.

Moriarty, K. Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St. Bernard, Louisiana. National Renewable Energy Laboratory, 2014.

MSDS. Material Safety Data Sheet for Hydrogen Sulfide. New Jersey, 1996.

Moya, D; Aldás, C; Jaramillo, D; Játiva, E; Kaparaju, P. Waste-to-energy technologies: an opportunity of energy recovery from municipal solid waste, using Quito-Ecuador as case study. *Energy Proc* 134:327–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.537>, 2017.

MUNIR, M. T. et al., . Municipal solid waste-to-energy processing for a circular economy in New Zealand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 145, p. 111080, jul. 2021.

MUNIR, M. T. et al., . Resource recovery from organic solid waste using hydrothermal processing: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 96, p. 64–75, nov. 2018.

Nanda, S; Berruti, F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters* (2021) 19:1433–1456, 2020.

Narayana, T. Municipal Solid Waste Management in India: from waste disposal to recovery of resources. *Waste Manag* 29:1163-1166. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.038>, 2009.

New Markets for Digestate from Anaerobic Digestion. WRAP, 2011. Disponível em encurtador.com.br/blrxG

NI, J.-Q; HEBER, A. J; DIEHL, C. A; LIM, T. T; DUGGIRALA, R. K; HAYMORE, B. L. Burst releases of hydrogen sulfide in mechanically ventilated swine buildings. Proceedings of the Water Environment Federation, v. 2000, n. 3, p. 564–574, 2000.

Nilsson, S; Gomez-Barea, A; Fuentes-Cano, D; Campoy, M. Gasification kinetics of char from olive tree pruning in fluidized bed. Fuel 125, 192–199, 2014.

NOVAK, A. C; SCHNEIDER, A. H; SIMÃO, C. A. F; FRÖHLICH, C. E; SYDNEY, E. B; BOSCH, E; LOFHAGEN, J. C. P; BAZZO, J; WILDAUER, L. D. B. S; MAKISHI, L. M. M; SOUZA, M; STUMM, M. G. Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o Estado do Paraná, Curitiba: SENAI/PR, 2016.

Nuamah, A; Malmgren, A; Riley, G; Lester, E. Biomass Co-firing, 2012.

Nwokolo, N; Mukumba, P; Obileke, K; Enebe, M. Waste to Energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production, Processes, 8, 1224, 2020.

Olivares, A; Aznar, M.P; Caballero, M.A; Gil, J; Francés, E; Corella, J. Biomass gasification: produced gas upgrading by in-bed use of dolomite. Ind. Eng. Chem. Res. 36, 5220–5226, 1997.

ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050. Organização das Nações Unidas, 19 de fev. 2019. Disponível em : <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701> . Acesso em 18/07/2022.

Orsi, Rafael Alves. Gestão participativa dos resíduos sólidos urbanos / Rafael Alves Orsi. – Rio Claro : [s.n.], 2006

Pandyaswargo, H; A., Gamaralalage, P. J. D; Liu, C; Knaus, M; Onoda, H; Mahichi, F; Guo, Y. Challenges and an Implementation Framework for Sustainable Municipal Organic Waste Management Using Biogas Technology in Emerging Asian Countries. Sustainability, 11, 6331, doi:10.3390/su11226331, 2019.

Pasalari, H; Farzadkia, M; Gholami, M; Emamjomeh, M. Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches. Environ Chem Lett 17:335–348. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0804-x>, 2018.

PERGOLA, M. et al., . Composting: The way for a sustainable agriculture. Applied Soil Ecology, v. 123, p. 744–750, fev. 2018.

Persson, M; Jonsson, O; Wellinger, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid. IEA Bioenerg. 1–32, 2007.

Petersson, A; Wellinger, A. Biogas upgrading technologies—developments and innovations. Task 37-Energy from biogas and landfill gas, EA Bioenergy, vol 20, 2009.

PETERSSON, A. Biogas cleaning. In: WELLINGER, A., MURPHY, J., BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing. p. 329–341, 2013.

Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro. Prefeitura do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, dez. 2015.

PIROLI, M; DA SILVA, M. L. B; MEZZARI, M. P; MICHELON, W; PRANDINI, J. M; MOREIRA SOARES, H. Methane production from a field-scale biofilter designed for desulfurization of biogas stream. *Journal of Environmental Management*, v. 177, p. 161–168, 2016.

Porpino, G; Lourenço, C. E; Araújo, C.M; Bastos, A. Intercâmbio Brasil – União Europeia sobre desperdício de alimentos. Relatório final de pesquisa. Brasília: Diálogos Setoriais União Europeia – Brasil, 2018.

PRANDINI, J. M; DA SILVA, M. L. B; MEZZARI, M. P; PIROLI, M; MICHELON, W; SOARES, H. M. Enhancement of nutrient removal from swine wastewater digestate coupled to biogas purification by microalgae *Scenedesmus* spp. *Bioresource Technology*, v. 202, p. 67–75, 2016.

Queiroz, H; Marafon, G. Os caminhos do lixo na cidade do Rio de Janeiro. *Cadernos do Desenvolvimento Fluminense*, Rio de Janeiro, pp. 37–53, 2015.

Ram, C; Kumar, A; Rani, P. Municipal solid waste management: A review of waste to energy (WtE) approaches. *Bioresources* 16, 4275–4320, 2021.

Ramaswami, S; Behrendt, J; Otterpohl, R. Comparison of NF-RO and RO-NF for the treatment of mature landfill leachates: a guide for landfill operators. *Membranes* 8: 17, 2018.

Renou, S; Givaudan, J.G; Poulain, S; Dirassouyan, F; Moulin, P. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *J. Hazard. Mater.* 150, 468–493, 2008.

RIO DE JANEIRO GANHA NOVAS USINAS DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS NA REGIÃO DOS LAGOS E NO SUL DO ESTADO. *Petro Notícias*, Disponível em : <https://petronoticias.com.br/rio-de-janeiro-ganha-novas-usinas-de-biogas-em-aterros-sanitarios-na-regiao-dos-lagos-e-no-sul-do-estado/>. Acesso em 10/05/2022.

Rio de Janeiro se destaca na gestão do lixo e é melhor capital brasileira em Índice de Sustentabilidade Urbana. Rio Prefeitura, 2019. Disponível em <https://prefeitura.rio/comlurb/rio-de-janeiro-se-destaca-na-gestao-do-lixo-e-e-melhor-capital-brasileira-no-indice-de-sustentabilidade-urbana-2019/>. Acesso em 02/08/2022

RIZZONI, Leandro Becalet et al., . BIODIGESTÃO ANAERÓBIA NO TRATAMENTO DE DEJETOS DE SUÍNOS. *Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária*, São Paulo, v. 1, n. 18, p.1-20, jan. 2012.

RYCKEBOSCH, E; DROUILLON, M; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1633–1645, 2011.

Sarker, S; Lamb, J.J; Hjelme, D.R; Lien, K.M. A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants. *Appl. Sci.* 9, 1915, 2019.

Sawyer, N; Trois, C; Workneh, T; Okudoh, V.I. An overview of biogas production: Fundamentals, applications and future research. *Int. J. Energy Econ. Policy* 9, 105–116, 2019.

Seo, Y.-C; Alam, M.T; Yang, W.-S. Gasification of municipal solid waste. *Gasification for Low-grade Feedstock* 115, 2018.

Setiadi, T; Fairus, S; Hazardous waste landfill leachate treatment using an activated sludge-membrane system. *Water Sci. Technol.* 48, 111–117, 2003.

Scholz, M., Melin, T., Wessling, M. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 17, 199–212, 2013.

Schulze, M; Nehler, H; Ottosson, M; Thollander, P. Energy management in industry: a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 3692-3708, 2016.

SIPRA, A. T.; GAO, N.; SARWAR, H. Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. *Fuel Processing Technology*, v. 175, p. 131–147, jun. 2018.

STAINIER, R. Y; INGRAHAM, J. L; PAINTER, P. R. *The microbial world*. 5th ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986.

Suwatthikul, A; Limprachaya, S; Kittisupakorn, P; Mujtaba, I. Simulation of steam gasification in a fluidized bed reactor with energy self-sufficient condition. *Energies* 10, 314, 2017.

SYED, M; SOREANU, G; FALLETTA, P; BELAND, M. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes: a review. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 48, p. 2.1-2.14, 2006.

Teng, C. Zhou, K. Peng, C. Chen, W. Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research.*, v:203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>

Tian, Y; Bourtsalas, A; Kawashima, S; Ma, S; Themelis, N.J. Performance of structural concrete using Waste-to-Energy (WTE) combined ash. *Waste Manag.* 118, 180–189, 2020

Timmer, K. *Carbon Conversion during Bubbling Fluidized Bed Gasification of Biomass*, 2008

Tsui, T.H; Wong, J.W.C. A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management., *Waste Disposal & Sustainable Energy* 1:151–167 <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00013-z>, 2019.

Veses, A; Sanahuja-Parejo, O; Martinez, I; Callen, M.S; Manuel, Lopez J; Garcia, T; Murillo, R. A pyrolysis process coupled to a catalytic cracking stage: A potential waste-to-energy solution for mattress foam waste. Waste Manag. 120, 415–423, 2021

VYAS, S. et al., . Municipal solid waste management: Dynamics, risk assessment, ecological influence, advancements, constraints and perspectives. Science of The Total Environment, v. 814, p. 152802, mar. 2022.

Waste Atlas (2018) What a waste: an updated look into the future of solid waste management. Disponível em : <https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>.

WELLINGER, A; MURPHY, J; BAXTER, D. (Ed.) The biogas handbook: science, production and applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

Wiszniewski, J; Robert, D; Surmacz-Gorska, J; Miksch, K; Weber, J. Landfill leachate treatment methods: a review. Environ Chem Lett 4:51–61, 2006.

Relatório Sem Desperdício, WWF Brasil, 2016. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/agricultura/agracoas_resultados/semdesperdicio/. Acesso em 01/08/2022.

ZHAO, Q; LEONHARDT, E; MACCONNEL, C; FREAR, C; CHEN, S. Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion. Pullman, Wa: Washington State University/CSANR,. 24 p, 2010.

Zhao, R; Wang, X; Chen, X; Liu, Y. Impacts of different aged landfill leachate on PVC corrosion. Environ. Sci. Pollut. Res. 26, 18256–18266, 2019

VII. Anexo

VII.1 Operação do Biodigestor

No quadro 16, estão especificados os principais fatores que devem ser avaliados e monitorados em uma biodigestão.

Quadro 16 - Principais fatores envolvidos no processo de biometanização

Fator	Importância para o processo	Referências
Composição do RSU	Materiais ricos em carboidratos, proteínas e lipídeos, como resíduos alimentares, proporcionam uma maior produção de metano, ao passo que as substâncias com estruturas mais rígidas, como celulose e lignina, necessitam de um pré-tratamento para liberar os açúcares	Grando 2017
Tipo do Biodigestor	Os biodigestores podem ser do tipo de operação em batelada ou de operação contínua, quando se estuda a digestão anaeróbia úmida, o biodigestor mais utilizado na atualidade é o CSTR (Reator com Tanque Agitado Continuamente). Esse modelo de biodigestor suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas sendo caracterizado por ter seu conteúdo em homogeneização devido à presença de sistema de agitação, além de ser um modelo de biodigestor de operação contínua, garantindo um menor tempo de retenção hidráulico e maior produção de biogás	Kuns et al., .., 2019

Temperatura do Sistema	A manutenção da temperatura adequada dentro do reator garante uma maior capacidade de produção de biogás, uma vez que colabora com a estabilização do reator e manutenção da população de microrganismos. Em função da maioria dos micro-organismos metanogênicos possuírem um pico de crescimento na temperatura 37 a 42°C (mesófila), as usinas de biogás operando nessa faixa são o tipo mais comum	Kuns et al., .., 2019, PROBIOGAS 2010
Agitação do Sistema	A presença de um sistema de agitação auxilia na transferência de calor do sistema e mantém os sólidos em suspensão, melhorando o contato entre a matéria orgânica e os microrganismos. A utilização de sistema de agitação implica em um ganho de 15 a 30% na produtividade de biogás	Karim et al., .., 2005
pH	Variações bruscas ou alterações no potencial hidrogeniônico do meio podem afetar e perturbar fortemente os micro-organismos presentes no processo, especialmente as bactérias metanogênicas que são muito sensíveis. Com mudanças no equilíbrio ácido-básico, estes organismos podem perder suas características originais, o que fatalmente inibe a reação de uma maneira global	Tiez et al., .., 2013
Relação C:N	Com concentrações excessivas de carbono, este não é completamente degradado e o rendimento de metano não atinge seu auge. Por outro lado, a excessiva concentração de nitrogênio pode causar a abundante geração de amônia (NH ₃) que mesmo em baixa concentração pode inibir o crescimento das bactérias. Sendo assim, o equilíbrio deve ser sempre mantido e usualmente a relação ideal para uma digestão ótima está na faixa de 10 a 30:1	PROBIOGAS 2010
Presença de Materiais Tóxicos	Usualmente compostos como cloreto de sódio (NaCl), cobre (Cu), cromo (Cr), amônia (NH ₃) são danosos para as bactérias atuantes na biodigestão. Além disso, compostos usados como desinfetantes, bactericidas, resíduos de antibióticos, cloro ativo (Cl), ocasionam a morte de micro-organismos	RIZZONI 2012

VII.2 Processo de Purificação dos Produtos da DA

Dependendo da aplicação dada ao biogás ao final do processo de biodigestão, a sua composição deve estar livre, ou dentro de um limite definido por lei, para certos contaminantes. Por isso, o processo de purificação do biogás deve ser levado em consideração na escolha da função final do biogás produzido na DA (Abatzoglou e Boivin 2009). No Quadro 17 são listados os principais contaminantes presentes no biogás e os problemas gerados.

O biogás que sai dos digestores está sempre saturado de água e o teor absoluto de água depende da temperatura (a 35°C, o teor de água do biogás é

geralmente 5%). Geralmente, quanto menor a temperatura, menor o teor de água no biogás bruto. Se o biogás for usado para injeção de rede ou combustível para veículos, e até turbinas a gás e calor e energia combinados (CHP), toda água deve ser retirada. O método mais conhecido e usado atualmente é o da secagem química. No quadro 17, têm-se os dois tipos de secagem química mais utilizadas na retirada de umidade do biogás gerado no processo de biometanização, além de suas principais vantagens e desvantagens.

Quadro 17 - Técnicas de remoção de água do biogás (Ryckebosch et al., 2011).

Processos	Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Adsorção	<ul style="list-style-type: none"> . Sílica Gel . Peneira Molecular . Alumina 	<ul style="list-style-type: none"> . Os materiais adsorventes podem ser regenerados . Estes podem ser destinados a qualquer uso do biogás e possuem baixo custo operacional 	<ul style="list-style-type: none"> . As colunas de adsorção devem ser operadas em pressão de 6-10 bar . Partículas e óleo devem ser removidas previamente
Absorção	<ul style="list-style-type: none"> . Etileno glicol . Selexol . Sais higroscópicos 	<ul style="list-style-type: none"> . Os materiais podem ser regenerados . Remoção simultânea de partículas e hidrocarbonetos . Alta eficiência de remoção 	<ul style="list-style-type: none"> . Necessidade de temperatura e pressões altas para regeneração da solução absorvedora . Precisa tratar volumes elevados de gás, acima de 500m³ por hora para ser econômico

No quadro a seguir, têm-se os principais métodos relacionados à purificação do biogás para retirada do dióxido de carbono e do sulfeto de hidrogênio. A dosagem de oxigênio e a de cloreto de ferro acontecem ainda enquanto o biogás está dentro do biodigestor, enquanto que as demais acontecem em uma etapa e ambiente separado do biodigestor. Por se passarem dentro do biodigestor, há um limite operacional para a remoção dos contaminantes para que a reação de DA não seja prejudicada pelo oxigênio e pelo cloreto de ferro adicionado, por conta disso esses métodos não são recomendados quando se deseja elevar o biogás à biometano, com alto grau de pureza. Já os demais métodos, são passíveis de otimização, tanto de processo quanto de instrumentação, para se alcançar os mais elevados graus de pureza do biogás, e aumentar a versatilidade da sua aplicação final, seja na injeção em rede, seja na sua utilização como combustível.

Quadro 18 - Métodos para remoção de CO₂ e H₂S do biogás

Método	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens	Referências
Dosagem de Oxigênio	Esta técnica é baseada na conversão de H ₂ S em enxofre elementar por um grupo de microrganismos especializados através do processo de oxidação microbológica, ao adicionar oxigênio no ambiente do biodigestor	Uma pequena injeção de ar diretamente no digestor, com quantidade de oxigênio em torno de 2-6% do ar já é suficiente para que a conversão ocorra.	Em casos de injeção posterior em rede, esta abordagem não é adequada por conta da presença de oxigênio e gás inertes no biogás final.	Kuns et al., . 2019
Dosagem de Cloreto de Ferro	H ₂ S é reduzido pela adição de Fe ⁺² na forma de FeCl ₂ , no digestor ou no afluente tanque de mistura, levando a formação de sulfeto de ferro insolúvel (FeS)	O FeS resultante pode ser removido do sistema e ser usado como fertilizante, uma vez que em contato com o ar ele é oxidado, formando sal solúvel que atua como nutrientes para as plantas.	A falta de seletividade dos reagentes com o enxofre possibilita a ocorrência de reações paralelas, resultando na redução da eficiência de remoção do H ₂ S.	Persson et al., ., 2007; Devai e Delaune, 2002

Processos de Adsorção	As moléculas adsorventes estão retidas em poros do material adsorvente e a separação acontece devido ao tamanho dos poros e tempo de retenção das diferentes moléculas.	Alta remoção de impurezas do biogás, processo simples e fácil operação	Uma das grandes desvantagens desta prática de filtragem está no acúmulo de sulfeto férrico. Outras desvantagens incluem o custo elevado de regeneração dos materiais adsorventes	Beil e Beyrich, 2013; Ryckebosch et al., 2011
Water Scrubbing	O processo é conduzido em temperaturas mais baixas, em torno de 0 a 10°C, onde o CO ₂ se dissolve na água e a concentração em CH ₄ da fase gasosa que sai da coluna aumenta.	Processo que exige pouca infraestrutura, sendo assim mais simples e econômico, com alta remoção de impurezas do biogás	Gera efluentes líquidos que demandam pós tratamento.	MIYAWAKI, 2014
Processos Biológicos	O processo biológico é mediado por bactérias capazes de oxidar o H ₂ S à sulfato (SO ₄ ²⁻) e/ou enxofre elementar (S) na presença de oxigênio ou nitrato como aceptores de elétron e utilizam o CO ₂ presente no biodigestor como fonte de carbono.	Alta remoção de impurezas do biogás, o enxofre removido pela filtração, juntamente com alguns nutrientes ainda presentes no efluente líquido, pode ser usado fertilizante líquido	Preparação da solução de nutrientes para o biofiltro que precisa ser trocada regularmente. Além disso, é uma técnica mais recente que demanda maiores estudos	Prescott et al., 2002; Syed et al., 2006; Pirolli et al., 2016
Separação por membrana	A separação de poluentes usando membranas é baseada na propriedade de permeabilidade seletiva das membranas, que pode ser a separação gás-gás ou separação gás-líquido.	Alta remoção de impurezas do biogás, segurança e simplicidade de operação	Altos custos relacionados à manutenção das membranas, além da necessidade de purificação em múltiplos estágios para obtenção do biometano com maior pureza.	Persson et al., 2007; Scholz et al., 2013