

FUNDAÇÃO ESCOLA DE SOCIOLOGIA E POLÍTICA DE SÃO PAULO
MBA SANEAMENTO AMBIENTAL

FLAVIA BURMEISTER MARTINS

COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES EFEITO ESTUFA DE ATERRO
SANITÁRIO E DE INCINERAÇÃO – UMA ANÁLISE SENSITIVA

SÃO PAULO

2021

FLAVIA BURMEISTER MARTINS

**COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DE ATERROS SANITÁRIOS E DE
SISTEMAS DE INCINERAÇÃO – UMA ANÁLISE SENSITIVA**

Artigo científico apresentado à Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Saneamento Ambiental, sob a orientação da Professora Mestra Luciana Silveira.

São Paulo

2021

Catalogação-na-Publicação – Biblioteca FESPSP

628.4457

M386c Martins, Flavia Burmeister.

Comparação das emissões de gases efeito estufa de aterro sanitário e de incineração: uma análise sensitiva / Flavia Burmeister Martins. – 2021.

46 p.: il., tab.; 30 cm.

Orientadora: Professora Mestra Luciana Silveira.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização: MBA em Saneamento Ambiental) – Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo.

Bibliografia: p. 45-46.

1. Emissões de GHG. 2. Incineração x aterro sanitário. 3. Recuperação energética de RSU. 4. Sustentabilidade. I. Silveira, Luciana. II. Título.

CDD 23.: Incineração 628.4457

Elaborada por Éderson Ferreira Crispim CRB-8/9724

Flavia Burmeister Martins

Comparação das emissões de Gases Efeito Estufa de aterros sanitários e de incineração – uma análise sensitiva

Artigo científico apresentado à Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo, como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Saneamento Ambiental, sob a orientação da professora mestra Luciana Silveira.

Data de aprovação:

_____/_____/_____.

Banca examinadora:

Elcires Pimenta, especialista

FESPSP

Angela Rodrigues, mestre

FESPSP

AGRADECIMENTOS

Ao Tribunal de Contas do Estado do Rio Grande do Sul pelo suporte, através da Escola Superior de Gestão e Controle Francisco Juruena do TCE-RS, para a realização do curso MBA em Saneamento Ambiental da FESPSP.

À Andrea Mallmann e a Airton Rehbein, pelo incentivo e apoio. A Geraldo Reichert, pela disponibilidade para troca de ideias. A Élio Lopes dos Santos, pelos ensinamentos. Aos coordenadores e colegas de trabalho, pela tolerância com minhas demandas de tempo para a realização das atividades do curso.

À professora Luciana Silveira, pelas orientações.

À Companhia Rio-Grandense de Valorização de Resíduos, CRVR, pela disponibilidade dos dados de recuperação de metano do Aterro do Recreio.

Aos professores e coordenação do MBA Saneamento Ambiental da FESPSP, pelos ensinamentos, com o meu reconhecimento pela excelência do corpo docente e pela qualidade do curso.

A meus colegas de curso, com o desejo de que possamos em breve aprofundar os vínculos no módulo internacional.

A meu marido Felipe e a meu filho Vinícius, pela tolerância com as ausências neste momento de pandemia, pela compreensão, apoio e carinho sem os quais não seria possível o trabalho. A minha filha Paula pela inspiração que representa na minha vida.

A meus pais Basildes e Myriam, e ao universo, que conspiram a favor, imensa gratidão.

Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.

Antoine-Laurent de Lavoisier

RESUMO

Entre as opções de destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU), as tecnologias *Waste-to-Energy* ganham impulso no cenário nacional, sendo promovidas como alternativa hierarquicamente anterior à disposição final em aterro sanitário, para onde somente rejeitos são autorizados. Entre os argumentos pró incineração WtE, se destaca o de se tratar de uma tecnologia ambientalmente sustentável, com reduzidas emissões de gases de efeito estufa em relação ao aterro sanitário. Este trabalho apresenta uma análise simplificada e sensitiva das emissões de gases efeito estufa provenientes de aterros sanitários e de incineração de resíduos sólidos urbanos. As emissões são estimadas com base nas metodologias IPCC, na abordagem em nível 1 (Tier 1), quantificando-se, no entanto, não apenas as emissões de CO₂ equivalente da geração de metano e de CO₂ fóssil, mas as emissões totais de CO₂ em uma e em outra opção, considerando tanto as emissões de CO₂ de origem biogênica quanto de origem fóssil. Visando a uma análise sensitiva, são avaliados cenários alternativos nos quais as opções de compostagem e reciclagem são integradas, bem como a recuperação do metano. Não são consideradas as emissões decorrentes do processo de geração de energia, nem o abatimento que essas emissões podem promover aos cenários. Os resultados redimensionam a vantagem de aterros sanitários em relação a incineração de RSU.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Resíduos Sólidos Urbanos. Emissões de GHG. Incineração x aterro sanitário. Recuperação energética de RSU.

ABSTRACT

Into the options for final disposal of municipal solid waste (MSW), Waste-to-Energy technologies are being driven on the National scene and promoted as an alternative hierarchically superior to the final disposal in a landfill, where only non-recycled waste is authorized. Among the arguments for WtE incineration, it stands out that it is an environmentally sustainable technology, with reduced emissions of greenhouse gases in relation to the landfill. This work presents a simplified and sensitive analysis of greenhouse gas emissions from landfills and incineration of municipal solid waste. Emissions are estimated based on the IPCC methodologies, in the Tier 1 approach, quantifying, however, not only CO₂ equivalent methane emissions and fossil CO₂ emissions, but total CO₂ emissions in each case, considering, so, both CO₂ emissions from biogenic and fossil sources. Aiming at a sensitive analysis, alternative scenarios are evaluated in which composting and recycling options are integrated, as well as methane recovery. Emissions reductions arising from energy generation process are not considered. The results scale the advantage of landfills over incineration of MSW.

Keywords: Sustainability. Municipal Solid Waste. GHG emissions. Incineration x landfill. Waste-to-Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Destinação de RSU na Europa – série histórica.....	16
Figura 2 – Composição gravimétrica úmida dos resíduos de Porto alegre, base 2011: (a) resíduos da coleta domiciliar convencional; (b) resíduos da coleta seletiva.	31
Figura 3 – Emissões de CO ₂ em aterro e em incineração, na condição sem recuperação do biogás.....	35
Figura 4 – Cenário de emissões de CO ₂ para aterros e incineração, considerando a recuperação de biogás.....	36
Figura 5 – Cenário de emissões de CO ₂ para aterros e incineração considerando a compostagem.....	37
Figura 6 – Cenário de emissões de CO ₂ para aterros e incineração considerando a reciclagem de papel.....	39
Figura 7 – Cenário de emissões de CO ₂ para aterros e incineração considerando a reciclagem do plástico.....	39
Figura 8 – Cenário ideal, com redução progressiva dos resíduos orgânicos, papel e plásticos.	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU: ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL?	15
3	CENÁRIO DE LINHA DE BASE BRASILEIRO PARA A INCINERAÇÃO DE RSU	19
4	ESTIMATIVA DE EMISSÕES TOTAIS DE CO₂ EM ATERROS E INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS	21
4.1	Emissões de GHG em aterros sanitários	23
4.1.1	Cálculo das Emissões de CH ₄	23
4.1.2	Emissões de CO ₂ em aterros sanitários.....	26
4.2	Cálculo das emissões de CO₂ em processos de queima mássica	28
4.2.1	Emissões de CO ₂ fóssil.....	28
4.2.2	Emissões de CO ₂ biogênico.....	29
4.3	Estimativa de Emissões Potenciais Totais de CO₂ em aterros e em incineração	30
4.3.1	Coefficientes padrão IPCC	30
4.3.2	Dados sobre a composição dos RSU	31
4.3.3	Cálculo das emissões potenciais.....	31
4.4	Análise Sensitiva das emissões em aterros e em incineração de RSU....	33
4.4.1	Estimativa do fator de recuperação R.....	33
4.4.2	Cenário 1: linha de base.....	34
4.4.3	Cenário 2: Recuperação do biogás	36
4.4.4	Cenário 3: Compostagem	37
4.4.5	Cenário 4: Reciclagem do Papel.....	38
4.4.6	Cenário 5: Reciclagem do Plástico.....	38
4.4.7	Cenário 6: Ideal	40
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	41
6	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

No gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil, aterros sanitários se constituem na principal opção de destinação de rejeitos, dado a existência ainda acessível de espaços geográficos para sua instalação a custo atrativo em relação às demais alternativas. No entanto, muitos problemas se associam a essa técnica aparentemente simples, mas que requer sistemas e operação adequados visando à proteção ambiental. Em 2019, o Brasil registrava 1.114 lixões a céu aberto (48%), 580 aterros controlados (25%) e 621 aterros sanitários (27%), (SNIS, 2020).

A publicação da Lei 14.026/2020 determinou prazo para a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, escalonado em função do porte do município, entre agosto de 2021 (regiões metropolitanas) a agosto de 2024 (< 50mil hab). Em paralelo, foi publicada a Portaria n. 274/2019, disciplinando a Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos, qualificando-os como fonte alternativa de energia para todos os efeitos legais – conceito atrelado a energias renováveis. Ainda, o Decreto 10.117/2019 dispõe que projetos para a ampliação da capacidade de recuperação energética de RSU são qualificáveis para financiamento com recursos do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República – PPI, o que favorece a ampliação de investimentos nesse tipo de tecnologia. Nesse alinhamento, a Resolução Conama 499/2020 aprovou o coprocessamento de resíduos sólidos urbanos em fornos rotativos de produção de clínquer.

Outros movimentos nacionais buscam impulsionar Unidades de Recuperação Energéticas (URE), como a promoção Edital do Leilão de Geração nº 8/2021-ANEEL destinado a contratar energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração a partir de fontes hidrelétrica, eólica, solar fotovoltaica, termelétrica a biomassa, a carvão mineral nacional, a gás natural e de tratamento de resíduos sólidos urbanos. Esses movimentos se apoiam no argumento de que essa técnica se constitui em uma forma de reciclagem da matéria, caracterizada por sua transformação em energia. A proposta é sedutora, pois alavancam uma rota tecnológica que possibilita eliminar lixões, reduzir aterros sanitários e gerar energia sem as exigências relacionadas aos conceitos de economia circular, os quais impõem esforços e recursos empresariais, bem como uma mudança de hábito da sociedade (Tisi *et al.*, 2020). Em um conceito inverso, nessa rota, quanto mais lixo, mais energia se gera.

A comparação dessas alternativas de destinação final de RSU tem mobilizado estudos científicos desenvolvidos sob diferentes enfoques, na maior parte dos casos conduzidos

em uma abordagem de Análise de Ciclo de Vida, tendo em conta aspectos relacionados tanto a impactos econômicos, quanto sociais e ambientais.

No momento planetário em que vivemos, um importante aspecto dessas opções consiste na contribuição ao Efeito Estufa. Nesse ponto, na disposição em aterros sanitários, resíduos biodegradáveis sofrem uma decomposição anaeróbica com a conversão de parte do carbono orgânico em metano (CH₄), gás com potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do gás carbônico¹. Já no caso de incineradores, incluindo como incineração as formas de conversão de massa em energia (CDR, pirólise², URE, plasma, outros), o carbono presente nos resíduos é convertido em CO₂.

A vantagem aparentemente óbvia da incineração em relação a aterros, no entanto, deve ser contextualizada em relação às técnicas de gerenciamento aplicadas em cada local, considerando, por exemplo, a possibilidade de aproveitamento energético do biogás, a distância de transporte até as instalações, as condições de operação do aterro, entre outros aspectos que conduzem a resultados distintos para cada simulação. No Brasil, considerando a matriz energética com base predominantemente renovável, a incineração não apresenta o mesmo apelo ambiental que em outros países nos quais predominam fontes de origem fóssil para a geração de energia (Oliveira, A. R., 2019). Naqueles países com *mix* de eletricidade baseado em combustíveis fósseis, o aproveitamento energético dos resíduos substitui o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo os impactos ambientais, como indicado nos estudos de Di Maria e Micale (2015).

Na comparação entre a incineração e o aterro sanitário no cenário chinês, Xin *et al.* (2020) concluem sobre a vantagem a incineração com geração de energia (*Waste to Energy – WtE*) em relação ao aterramento sanitário. No cenário avaliado, não se considera o aproveitamento energético do biogás gerado em aterro, posto não ser prática usual no país. Por outro lado, é contabilizada a geração de energia em unidades de incineração. Os autores consideraram, na análise, critérios sugeridos pelas Diretrizes do IPCC³ para Inventários de Gases Efeito Estufa, os quais dependem essencialmente da forma de gerenciamento dos resíduos, e podem variar amplamente de cidade para cidade em razão da disposição final, se em aterro sanitário, controlado ou lixão, se com ou sem geração de energia.

¹ Considerando um horizonte de 100 anos

² No caso da pirólise, gera-se um carvão que será utilizado para gerar energia, momento em que a massa carbonífera será convertida em CO₂.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change

Numa abordagem de Ciclo de Vida, Mendes, *et al.* (2004) apresentam resultados favoráveis à adoção da incineração em relação a aterros sanitários, mesmo sem a geração de energia, nos contornos definidos para a cidade de São Paulo. Reichert (2013) compara o cenário de disposição final em aterros com o cenário em que predomina a queima mássica, contextualizando ampla abordagem de aspectos econômicos, sociais e ambientais e utilizando ferramentas de Análise de Ciclo de Vida, concluindo pela vantagem da incineração nos cenários elencados. Nesses casos, condições de contorno diferentes são estabelecidas para uma e outra opção, com a reciclagem e a compostagem sendo ampliadas no caso da incineração.

No cenário de base considerado nas análises de ciclo de vida dos estudos referidos, é muitas vezes suposto que a nova tecnologia incorpora a promoção nos percentuais de reciclagem e compostagem. Nos moldes da Lei 12.305/2010, apenas resíduos que não apresentam potencial de aproveitamento devem ser encaminhados à destinação final, o que, de fato, não corresponde à nossa realidade. Não parece razoável, no entanto, assumir que os índices de reciclagem e compostagem sejam melhorados em razão da adoção de uma tecnologia WtE. Note-se que os esforços para a reciclagem e compostagem são incentivados em um cenário de destinação final em aterro sanitário devido aos altos custos de transporte e destinação final. Ao contrário, no caso de recuperação energética de resíduos, a possibilidade de geração de energia a partir de plásticos e da matéria orgânica desmobiliza ações de reciclagem e compostagem. Dessa forma, as hipóteses elencadas sobre cenários otimizados para a recuperação energética dificultam a conclusão sobre a vantagem dessa tecnologia, bem como identificar se, consideradas condições ótimas de operação e aproveitamento ou recuperação energética, bem como os mesmos *inputs* de materiais, a recuperação energética de resíduos representa uma vantagem ambiental na emissão de Gases Efeito Estufa (*Green House Gas* - GHG) em relação a aterros sanitários.

Resultados apresentados por Eriksson e Finnveden (2009) indicam que, para condições típicas suecas e europeias, a incineração de plásticos tem emissões líquidas de gases de efeito estufa maiores para incineração do que para descarte em aterro. A conclusão, segundo os autores, é revertida quando aplicada alta eficiência na geração de calor e a eletricidade em ciclo combinado, em substituição à geração em usinas de energia e calor em ciclo não combinado e a partir de combustíveis fósseis. Os resultados sugerem reconsiderar as políticas de evitar o descarte de plásticos em aterros sanitários.

Os estudos referidos demonstram a importância de que a análise seja conduzida de forma ampliada e específica, pois uma série de variáveis pode afetar o resultado da comparação

entre aterros e incineração. Nesta comparação, é importante incluir o esforço de transporte dos resíduos pós processamento, tais como cinzas, filtros e catalizadores, entre outros, derivados do processo de incineração, assim como o transporte de efluentes para o tratamento. Portanto, uma tomada de decisão amparada na comparação das emissões de GHG devem, para além do escopo de análise deste trabalho, incluir as demais condições de contorno do caso em análise.

No questionamento ambiental, a opção de recuperação energética de resíduos representa, sob muitos aspectos, um dilema, e há uma alta rejeição pela população. Entre os argumentos contrários, o principal se associa ao fato de o plástico ser um combustível de origem fóssil – principal causa ao efeito estufa. Já o metano biogênico gerado em aterros sanitários, a despeito de seu potencial de aquecimento global, não possui origem fóssil, visto o plástico não ser biodegradável. Nesta perspectiva, considera-se ser importante avaliar os resultados dessa comparação sob as mesmas condições de contorno, considerando cenários equivalentes tanto em relação aos fluxos de materiais.

Importa referir que condições anaeróbicas são favorecidas em aterros sanitários bem estruturados, sendo que em lixões ou queima de resíduos a céu aberto se estabelecem condições aeróbicas ou parcialmente aeróbicas de degradação, com uma importante redução da geração de metano. As metodologias IPCC de cálculo de emissões que levam em consideração a ocorrência de processos aeróbicos usuais em lixões onde a catação e focos de incêndio são usuais e prevalecem em muitos países em desenvolvimento.

Situam-se, portanto, posicionamentos diferentes sobre haver vantagem da incineração de RSU em relação a aterros sanitários no que se reporta às emissões de GHG. O objetivo deste trabalho se assenta em avaliar a hipótese de serem as tecnologias WtE associadas à queima mássica atividades ambientalmente sustentáveis em comparação a aterros sanitários. Nesse sentido, a abordagem se apoia nas metodologias do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para estimativa de emissões de CO₂. A análise se distingue, no entanto, quanto às emissões consideradas no escopo de inventários relacionados ao gerenciamento de resíduos, para os quais são contabilizadas apenas as emissões não neutras de CO₂. A abordagem também se dissocia de uma Avaliação de Ciclo de Vida. Trata-se de uma análise simplificada e sensitiva que possibilita projetar as emissões totais de CO₂ estimadas para uma dada quantidade de RSU, com o objetivo de evidenciar a vantagem dessas opções e seus limites exclusivamente no que se refere ao seu impacto sobre as mudanças climáticas.

2 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RSU: ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL?

A questão é norteadora desse trabalho. Como referido, vários estudos brasileiros e internacionais defendem a incineração com a recuperação energética de RSU como uma alternativa sustentável atraente e superior à destinação em aterros sanitários, sendo um argumento comumente utilizado na construção dessa lógica as restrições europeias impostas para a destinação de RSU em aterros sanitários. De fato, a Diretiva-Quadro de Resíduos da União Europeia impõe severas restrições à destinação de RSU em aterros sanitário, definindo que os países da UE devem reduzir progressivamente a quantidade de resíduos biodegradáveis depositados em aterros (Diretiva 1999/31/CE relativa à deposição de resíduos em aterros). A valorização energética de resíduos é entendida como uma forma de destinação final aceitável e recomendada prioritariamente em relação à destinação final em aterros.

Reconhece-se que na Europa a disponibilidade de áreas para disposição final em aterros representa um grave problema, sendo justificadas as restrições. No entanto, a intenção primeira da legislação europeia visa a promover a hierarquia dos resíduos, também estabelecida na nossa Política Nacional de Resíduos Sólidos, ou seja, reduzir a geração, reutilizar, reciclar, tratar e dispor. Efeito reverso, no entendimento de ser a valorização energética de resíduos uma forma de reciclagem, dados projetados a partir do relatório *Plastic & Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet* publicado em fevereiro de 2019 apontam um significativo aumento da incineração dos RSU na Europa, acompanhando um crescimento na produção e consumo de plásticos descartáveis. Como resultado, as emissões de GHG decorrentes do ciclo de vida dos plásticos passa a se constituir em uma séria ameaça à meta de manter o aumento da temperatura global em 1,5° C. No ritmo exponencial de crescimento que se observa, o relatório aponta que até 2050, as emissões decorrentes da produção e incineração de plásticos crescerão mais de 2,75 bilhões de toneladas de CO₂ eq.

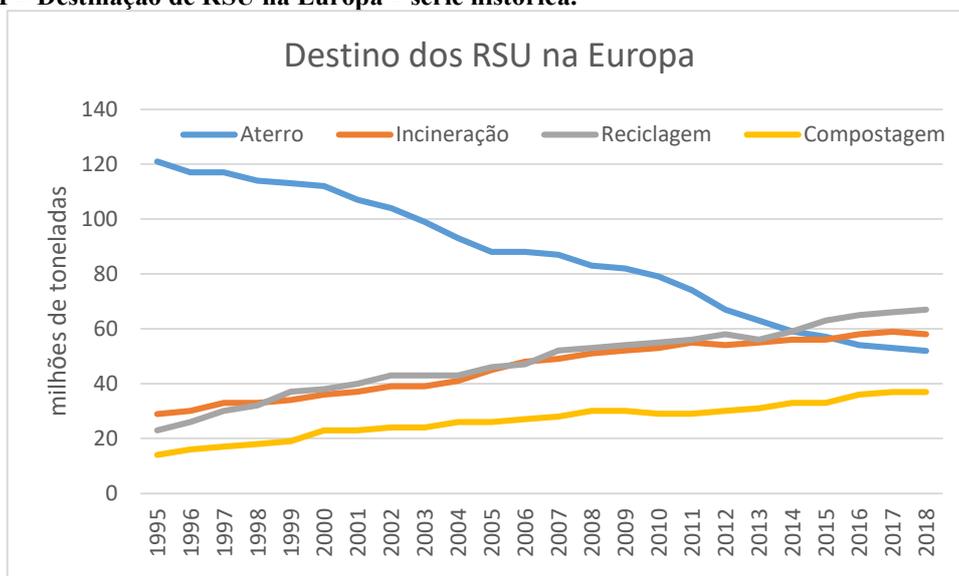
Em 2018, a Diretiva EU 2018/850 registrou a preocupação com esse entendimento, conceituando o que segue:

As metas estabelecidas na Diretiva 1999/31/CE do Conselho (4) que estabelecem restrições à deposição em aterros deverão ser reforçadas de modo a refletirem melhor a ambição da União de avançar rumo a uma economia circular e progredir na concretização da Comunicação da Comissão de 4 de novembro de 2008, intitulada «Iniciativa matérias-primas – Atender às necessidades críticas para assegurar o crescimento e o emprego na Europa», reduzindo gradualmente ao mínimo possível a deposição em aterro de resíduos destinados a aterros de resíduos não perigosos. A Comissão e os Estados-Membros deverão assegurar que essa redução se enquadre numa política integrada que assegure a correta aplicação da hierarquia dos resíduos,

reforce a transição para a prevenção, incluindo a reutilização, a preparação para a reutilização e a reciclagem, e evite a transição da deposição em aterro para a incineração. (Diretiva EU 2018/850)

Dados reportados pela *Eurostat – Statistics Explained* (2020) refletem a transição da destinação de resíduos em aterros para incineradores, compostagem e reciclagem, como traduz a Figura 1. A redução do encaminhamento de resíduos a aterros sanitários é acompanhada pelo aumento tanto da incineração, quanto da compostagem e da reciclagem. Como efeito das diretrizes europeias, promoveu-se também o prolongamento do ciclo de vida dos produtos pelo aumento da reciclagem e da compostagem. Também se observa um aumento proporcional na destinação à incineração que, no entanto, apresenta nos últimos anos uma certa estabilidade, chegando a uma redução no ano de 2018 em relação ao ano de 2017, de 59 para 58 milhões de toneladas.

Figura 1 – Destinação de RSU na Europa – série histórica.



Fonte: Eurostat, 2020

Por outro lado, em um grande esforço e graças ao aumento de fontes renováveis de energia, a Europa conseguiu nas últimas décadas reduzir a intensidade média de carbono da rede elétrica para 300g CO₂eq/KWh. Note-se que esse valor é significativamente inferior ao da energia produzida pela incineração de resíduos, de 580g CO₂eq/KWh. Esses dados são reportados no relatório *Zero Waste Europe – O Impacto da incineração Waste-to-Energy sobre o Clima* (Zero Waste, 2021).

Em junho de 2019, a incineração *Waste-to-Energy* foi excluída da lista de atividades econômicas consideradas como “finanças sustentáveis” do Relatório Técnico de Taxonomia da EU. A Taxonomia da EU estabelece uma definição comum e clara do que é “sustentável”, visando um sistema de classificação comum para atividades econômicas sustentáveis –

denominada “taxonomia da União Europeia”. A classificação subsidia o plano de ação para o financiamento do crescimento sustentável, direcionando os investimentos para atividades que efetivamente podem ser classificadas como sustentáveis. A classificação também possibilita reorientar políticas públicas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e aos relacionados à mitigação das mudanças climáticas de forma a encorajar o fluxo de capital de investidores em atividades alinhadas a esses objetivos. Se promove, assim, o financiamento de atividades que possam contribuir substancialmente para a mitigação de mudanças climáticas e que não causem significativo dano a outros objetivos ambientais tais como a transição para uma economia circular, com prevenção de resíduos e reciclagem.

O Relatório Técnico de Taxonomia da União Europeia 2019 (EU Taxonomy Technical Report, 2019) orienta que a manufatura de plásticos utilize polímeros derivados de biomassa - exceto a biomassa derivada de resíduos orgânicos não segregados na fonte. As restrições e orientações relacionadas à indústria do plástico tem a seguinte racionalidade expressa no relatório de 2019:

A produção de plásticos vem crescendo fortemente nos últimos anos e as emissões do setor de plásticos deverão aumentar, não apenas porque se espera que o consumo aumente - e também as emissões do processo de fabricação - mas também porque os plásticos liberam CO₂ quando incinerados.

(EU Taxonomy Technical Report, 2019, p. 228).

No setor de resíduos, o relatório refere que a mitigação das emissões se associa a uma abordagem de sistema integrado de atividades intimamente relacionadas e combinadas (hierarquia ações), sendo elencadas como atividades que substancialmente contribuem para a mitigação climática as seguintes que se associam a RSU:

- E38.1.1 Coleta de resíduos não perigosos: 4. Coleta e transporte separados de resíduos não perigosos em frações segregadas na origem
- E3821 Tratamento e eliminação de resíduos não perigosos: 5. Digestão anaeróbia de bio-resíduos; 6. Compostagem de bio-resíduos
- E38.3.2 Recuperação de materiais classificados: 7. Recuperação de materiais a partir de resíduos
- E39.0.0: Atividades de remediação 8. Captura de gás de aterro e utilização energética; 9 Captura de Carbono e armazenamento

No âmbito da União Europeia, as tecnologias *Waste-to-Energy* não são classificadas como atividades sustentáveis que contribuem para a mitigação climática, ao contrário da recuperação e aproveitamento do gás de aterros. O relatório traz o seguinte comentário sobre as tecnologias de incineração:

Sobre a incineração de resíduos com recuperação de energia (resíduos em energia, WtE), as opiniões dos especialistas divergem sobre se esta seria uma atividade ambientalmente sustentável que oferece uma contribuição substancial para mitigação do clima. Por um lado, havia argumentos contra a inclusão da WtE destacando a grande porção de resíduos atualmente incinerados que poderiam ser reciclados, a dependência de alguns Estados-Membros individuais sobre a incineração de resíduos urbanos e o risco de que o excesso possa resultar em efeitos de bloqueio. Isso, por sua vez, desencorajaria a reutilização e reciclagem, opções mais altas na hierarquia de resíduos.

Por outro lado, foi enfatizado que WtE tem um papel a desempenhar, mesmo em uma economia cada vez mais circular, pois nem todos os resíduos podem ser reutilizados ou reciclados (conforme reconhecido pela CE na sua Comunicação COM (2017) 34 sobre "o papel da transformação de resíduos em energia na economia circular", Seção 5).

A Comissão interpreta a proposta de Taxonomia de tal forma que WtE está fora do seu escopo de mitigação das mudanças climáticas, pois causa danos aos objetivos ambientais de uma economia circular: prevenção e reciclagem de resíduos, de acordo com o Artigo 9 (1) (i) e o Artigo 12 (d) do projeto da EU Regulação da taxonomia. Assim, WtE não foi incluído na Taxonomia para mitigação das mudanças climáticas.

No entanto, vários especialistas desejaram trazer este assunto para uma discussão mais aprofundada e consideração para o Comissão.

(EU Taxonomy Technical Report, 2019, p. 292-293).

A lógica posta é racional, expressa na Tabela 7 do item 8-2, *Do Not Significant Harm Criteria for environmental objectives 3-6* – critérios de classificação para prevenção de dano significativo aos objetivos ambientais. A tabela apresenta como objetivo a transição para uma economia circular com prevenção de resíduos e reciclagem, e classifica como condição que pode causar dano significativo:

A atividade leva a ineficiências significativas no uso de materiais em uma ou mais fases do ciclo de vida de produtos, inclusive em termos de durabilidade, reparabilidade, capacidade de atualização, reutilização ou reciclabilidade de produtos; ou onde essa atividade leva a um aumento significativo na geração, incineração ou destinação final de resíduos.

(EU Taxonomy Technical Report, 2019, p. 292-293).

Ocorre que, do ponto de vista da lógica de produção, uma destinação final através de uma rota tecnológica que elimina o resíduo e ainda gera energia é confortável e ideal, pois elimina preocupação em se perseguir a estruturação da hierarquia de ações preconizada para resíduos, que tem se mostrado tão difícil de implementar.

Na concepção da geração de energia a partir de resíduos como uma reciclagem, gerar resíduos passa a ser uma atividade de “interesse público” alinhada ao entendimento de que quanto mais resíduos, melhor, posto que se gera mais energia, e precisamos de energia. Essa lógica desestimula os esforços que se relacionam ao conceito de economia circular.

Em qualquer cenário, a geração de energia gera impacto. No caso de RSU, a poluição e as consequências climáticas das opções de destinação final em aterros sanitários e/ou em incineração são também inevitáveis. No entanto, para esta autora, embora reconhecendo a vantagem ambiental que representa a recuperação energética de resíduos em um cenário em que a incineração se impõe como linha de base, no contexto planetário em que vivemos e em razão do expressivo aumento da produção de plásticos descartáveis, não é aceitável a classificação das tecnologias WtE com queima mássica como ambientalmente sustentáveis. A mesma classificação, por outro lado, se aplica ao aproveitamento do biogás de aterros sanitários, em especial em um cenário de linha de base no qual predominam aterros sanitários. De qualquer forma, se verifica uma necessária vinculação da avaliação das vantagens ambientais dessas alternativas com o contexto da realidade posta em cada caso.

3 CENÁRIO DE LINHA DE BASE BRASILEIRO PARA A INCINERAÇÃO DE RSU

Aprofundando a análise sobre as opções europeia e brasileira, observa-se que as tecnologias *Waste-to-Energy* foram incentivadas no cenário europeu e norte-americano onde processos de tratamento térmico de resíduos são usuais. Nesse *cenário de linha de base*, a energia gerada pela combustão dos resíduos pode ser aproveitada para gerar eletricidade e/ou calor, tão necessário ao continente frio, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. Ou seja, se trata de um aproveitamento de uma energia que, de outra forma, seria desperdiçada. Sobre essa lógica se assenta, por exemplo, a metodologia da UNFCCC *Waste-to-Energy Recover: ACM00012 – Metodologia de linha de base consolidada para redução de emissões de GHG a partir de projetos de recuperação da energia de resíduos*. Nessa metodologia, o cenário de linha de base deve demonstrar a *adicionalidade* no uso da energia derivada de resíduos em uma instalação que irá recepcionar o projeto para, a partir dos resíduos, produzir energia de forma a compensar o consumo de combustíveis fósseis na instalação, com possibilidade de exportar o excedente.

No âmbito do financiamento de créditos de carbono a partir de projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) credenciados junto à UNFCCC, o conceito de linha de base é, portanto, essencial na análise da adicionalidade das tecnologias. A adicionalidade avalia a redução de emissões de origem fóssil ou de gases efeito estufa de um projeto de MDL proposto em relação ao cenário existente sem o projeto (linha de base).

Nesse cômputo, é importante ter em conta que a conceituação de RSU como fonte renovável de energia perpassa, necessariamente, pela separação da fração orgânica e fóssil, sendo renovável apenas a energia de origem biogênica. Essa diferença é requerida no inventário de emissões de processos de incineração, sendo as emissões de efeito estufa relativas somente à parcela de resíduos de origem fóssil, e as emissões resultantes da combustão de resíduos orgânicos compreendidas como neutras.

Como exemplo da lógica de adicionalidade, em uma situação na qual a incineração sem aproveitamento do calor para geração de energia é estabelecida como linha de base, a implementação de uma tecnologia que viabilize a geração de calor ou energia e o seu aproveitamento representa uma adicionalidade. Nesse caso, mesmo em se tratando de um resíduo ou combustível de origem fóssil, há um abatimento das emissões em relação ao cenário original. Essa lógica, portanto, é necessária para avaliar a adicionalidade de uma tecnologia em relação à outra.

No Brasil, a aplicação da metodologia *Waste-to-Energy* compete com projetos de utilização do biogás produzido em biodigestores anaeróbicos para tratamento de resíduos da suinocultura ou em aterros sanitários. A queima do biogás representou, nesse cenário de linha de base, uma adicionalidade para a qual foram admitidos projetos de MDL, considerando a redução do potencial de aquecimento global decorrente da conversão do CH₄ em CO₂⁴. Nesses projetos, o aproveitamento do biogás para geração de energia possibilitou computar um segundo escopo de adicionalidade em razão da substituição de energia de origem fóssil por energia de origem biogênica, conferindo créditos de carbono adicionais aos da conversão do metano em CO₂. Um total de 72 projetos de MDL foram desenvolvidos no Brasil relativos a manejo de resíduos de origem urbana e do setor produtivo (UNFCCC, 2009).

A lógica de adicionalidade dos projetos de MDL é arquitetada pelo proponente com base nas Metodologias de Linha de Base Aprovadas (ACM – *Approved Consolidated Methodology*). É, portanto, relativa a uma determinada instalação, ou seja, constitui um melhoramento de um determinado processo industrial, e se relaciona com a redução de emissões originais do processo. Nesse enquadramento, as emissões neutras de CO₂ não são relevantes, posto não serem alvo de redução.

No entanto, quando se compara um processo industrial ou técnica com outra, visando a avaliar o impacto das emissões de GHG, o primeiro gás a se considerar é o CO₂, seja ele neutro

⁴ O CH₄ apresenta um Potencial de Aquecimento Global (GWP) 21 vezes superior ao do CO₂ para um período de 100 anos.

ou não, posto que processos intensivos em CO₂ não são sustentáveis, e, portanto, um processo menos intensivo em CO₂ é relativamente mais sustentável que outro.

No contexto nacional, instalações de sistemas de incineração não possibilitam, portanto, delinear uma adicionalidade em relação a aterros sanitários a partir das metodologias de linha de base do IPCC, mesmo quando se considera a geração de energia no processo de incineração, pois o biogás gerado pela degradação anaeróbica dos resíduos é disponibilizado naturalmente, sem que seja necessária qualquer conversão e para o qual se garante a origem biogênica do carbono, bem como a captura e o armazenamento do carbono fóssil presente nos plásticos não biodegradáveis e também a captura de parte do carbono de origem biogênica que se estabiliza na forma mineralizada de húmus.

Mais do que na Europa, portanto, no Brasil, a incineração de resíduos não se classifica como uma atividade sustentável sob o argumento de que se promove uma redução das emissões de gases efeito estufa, tendo em conta que seja possível a captação do biogás e sua conversão termoelétrica, aí, sim, conceituada como fonte renovável e limpa de energia. Nesse caso, o subsídio de créditos de carbono para a instalação de um processo novo de incineração não representa uma adicionalidade, mas a combustão e o aproveitamento energético do biogás, sim. Alguns dos principais aterros brasileiros foram beneficiados com projetos de MDL para a captura e queima do biogás, sendo alguns desses beneficiados também com créditos em razão do aproveitamento energético do metano (Nascimento *et al.*, 2019).

Nesse entendimento, são analisados os resultados das metodologias de cálculo de emissões do IPCC aplicáveis às técnicas WtE por queima mássica e de aterramento sanitário.

4 ESTIMATIVA DE EMISSÕES TOTAIS DE CO₂ EM ATERROS E INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS

É importante e necessário, em qualquer situação, segregar as emissões de CO₂ de origem biogênica (resíduos orgânicos tais como restos alimentares, de jardinagem e papéis) e as de origem fóssil (resíduos plásticos). Isso porque os resíduos de origem fóssil apresentam uma contribuição ao efeito estufa considerada permanente, já que não é possível reciclar o carbono de origem fóssil. Nesse escopo, as emissões de origem fóssil decorrentes da recuperação energética dos resíduos plásticos não são consideradas adicionais pelas metodologias IPCC, sendo a combustão de resíduos plásticos uma contribuição para o Efeito Estufa. Em um cenário otimizado para ambas as alternativas, com recuperação do biogás e geração de energia, aterros

sanitários apresentam uma importante vantagem em relação a incineradores na geração de energia renovável em razão de se produzir somente CO₂ neutro na conversão do metano. No entanto, mesmo com a combustão total do metano em um cenário hipotético, o volume de CO₂ neutro gerado representa um impacto climático, bem como o volume de CO₂ neutro de processos de incineração de resíduos orgânicos.

Em condições estequiométricas otimizadas, a combustão de uma matéria orgânica gera mais CO₂ do que sua decomposição biogênica, pois que nem todo o carbono presente na matéria orgânica é biologicamente convertido em gás. Em processos anaeróbicos, considerando a combustão total do metano presente no biogás, a totalização das emissões de CO₂ é inferior às de um processo de combustão da matéria, no qual todo o carbono é oxidado em CO₂.

No entanto, mesmo em condições operacionais satisfatórias, aterros sanitários apresentam emissões fugitivas de biogás, sendo esse ponto o único a ser explorado como uma possível vantagem ambiental da recuperação energética de resíduos que pode ser avaliada do ponto de vista teórico, já que o metano apresenta um potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao gás carbônico em um horizonte temporal de 100 anos.

Assim, mesmo tendo origem biogênica, as emissões fugitivas de metano em aterros sanitários apresentam elevado potencial de aquecimento global, o que pode representar uma vantagem das tecnologias WtE por queima mássica, a depender da totalização das emissões de CO₂ de origem biogênica e fóssil, o que se passa a avaliar.

Para a estimativa das emissões de Gases Efeito Estufa (*Green House Gases* - GHG) nos processos de disposição final em aterros sanitários e em incineração de resíduos foram consideradas as recomendações das publicações formuladas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, *Diretrizes Revisadas do IPCC de 1996 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa*; *Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 1997a; IPCC, 1997b), *Orientação de Boas Práticas e Gestão de Incertezas em Inventários Nacionais de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 2000); *Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 2006); e *2019 Refinamento para 2006 IPCC Diretrizes para Inventários Nacionais de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 2019), com base nas quais são projetadas também as emissões de CO₂ neutro.

4.1 Emissões de GHG em aterros sanitários

4.1.1 Cálculo das Emissões de CH₄

As diretrizes formuladas pelo IPCC para estimativa de emissões de CH₄ a partir da deposição de resíduos sólidos se apoiam em um método simples de cálculo de balanço de massa que estima o potencial de emissões de CH₄ para uma dada quantidade e composição de resíduos dispostos em aterros. Em um método mais acurado, o efeito de decaimento de primeira ordem é levado em conta, considerando que o processo de degradação se desenvolve ao longo de muitos anos. No escopo deste trabalho, visando a comparar as emissões de GHG da destinação em aterros com as decorrentes de processos de incineração, interessa contabilizar o potencial de geração de metano de uma dada quantidade e composição de resíduos. O método padrão é baseado na seguinte equação⁵:

Equação 1 – Geração de CH₄ estimada na disposição final de RSU

$$CH_4 = (MSW_F \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 - R) \times (1 - OX)$$

Onde:

CH₄ = geração de metano (t)

MSW_F = Quantitativo de RSU disposto em aterros (t)

MCF = Fator de correção do metano

DOC = Carbono Orgânico Degradável (%)

DOC_F = Fração de Carbono Orgânico que se decompõe (%)

F = Fração de metano no biogás, por volume (%)

16/12 = razão entre o peso molecular CH₄/C

R = Fator de recuperação de CH₄ (t/ano)

OX = Fator de Oxidação (%)

1. MSW_T e MSW_F - Resíduos Sólidos Municipais

Correspondem ao total de RSU gerados (MSW_T) e ao total de RSU destinados ao aterro sanitário (MSW_F).

2. MCF - Fator de correção do metano

O fator de correção do metano (MCF) leva em conta o fato de que sítios de disposição final mal gerenciados, como lixões, produzem menos CH₄ em razão de condições de degradação aeróbica que se desenvolvem nas camadas superiores. Esse, portanto, é um fator

⁵ São preservadas as siglas originais da equação, onde os termos são referidos à língua inglesa.

específico de cada área e deve refletir as condições de disposição final, podendo variar de 0,4 (lixão a céu aberto) a 1,0 (para condições favoráveis ao processo anaeróbico, compatível com aterro com cobertura diária, compactação mecânica e cobertura final com impermeabilização). Para o caso em tela, no qual se deseja avaliar o potencial de geração de metano, adota-se **MCF = 1.0**.

3. DOC – Conteúdo de Carbono Orgânico Degradável

Carbono Orgânico Degradável (DOC) representa a % de carbono orgânico acessível para a decomposição bioquímica, e é baseado na composição dos resíduos. Valores de referência constam na Tabela 2.4 da publicação *Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 2006).

4. DOC_f = Fração do Carbono Orgânico que sofre decomposição

Esse fator reflete o fato de que alguns compostos orgânicos não se degradam ou degradam de forma muito lenta, e é altamente dependente do tipo de resíduos e do clima, já que a temperatura e a umidade são fatores que promovem a degradação. Valores de referência são sugeridos na Tabela 3 da publicação *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for NGH Inventories* (IPCC, 2019): papeis e têxteis: $DOC_f = 50\%$; alimentos e resíduos de jardim: $DOC_f = 70\%$; madeiras = $DOC_f = 10\%$.

5. F – Fração de metano no biogás, por volume

Aproximadamente 50% do biogás, em volume. Adota-se **F = 50%**.

6. R – Fator de recuperação de CH_4 (t/ano)

Fator que depende da instalação e da estrutura do aterro sanitário, e se traduz no percentual de metano que, capturado pelos dutos de drenagem de biogás e oxidado por queima em *flare* ou destinado à geração de energia, é convertido em CO_2 . Em condições operacionais satisfatórias, as taxas de recuperação variam de 35% a 70% (IPCC, 2019).

7. OX – Fator de Oxidação

Representa o percentual de metano que, liberado na forma de emissões fugitivas, sofre algum grau de oxidação em razão da presença de bactérias metanotróficas nas camadas de solo de cobertura. Esse fator deve ser diferenciado do fator de correção do metano (MCF), o qual indica as condições aeróbicas promovidas pela exposição dos resíduos. Como valor padrão, **OX = 10%**.

8. Expressão final:

A Equação 1 pode ser expressa de forma a segregar a geração potencial de metano por tipologia de resíduo, adequando, para cada tipologia, os coeficientes DOC e DOC_F correspondentes. Importante ressaltar que a expressão não relaciona o teor de umidade dos resíduos. A Tabela 2.4 da publicação *Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários de Gases Efeito Estufa* (IPCC, 2006), apresenta uma estimativa do conteúdo de matéria seca para cada tipo de resíduo, e sugere valores para o coeficiente DOC em relação ao peso úmido e em relação ao peso seco de resíduos. Tendo em conta que o teor de umidade é especialmente elevado para resíduos orgânicos, idealmente o cálculo deve ser feito sobre base seca de resíduos. Na mesma tabela, o conteúdo de matéria seca D_m possibilita esse ajuste pela seguinte expressão:

$$W_{sj} = W_j \times D_{mj}$$

Onde:

W_{sj} = quantidade seca de resíduo da tipologia j considerada (t)

D_{mj} = conteúdo de matéria seca do resíduo da tipologia j (%)⁶

Assim, o potencial de geração de metano da tipologia j de resíduos é representado por:

$$CH_{4j} = (W_{sj} \times MFC \times DOC_{sj} \times DOC_{Fj} \times F \times 16/12) \times (1 - OX)$$

$$CH_{4j} = (W_j \times D_{mj} \times MFC \times DOC_{sj} \times DOC_{Fj} \times F \times 16/12) \times (1 - OX)$$

Tomando-se:

MCF = 1, Fator de correção do metano, valor máximo;

F = 50%, Fração de metano no biogás;

OX = 10%, Fração de Fator de Oxidação $OX = 10\%$, admitindo-se que 10% das emissões fugitivas de metano são oxidadas e convertidas em CO_2 ;

Resulta:

$$CH_{4j} = (W_j \times D_{mj} \times 1 \times DOC_j \times DOC_{Fj} \times 0,5 \times 16/12) \times (1 - 0,1)$$

$$CH_{4j} = 0,6 \times (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj})$$

⁶ - Valores padrão são sugeridos nas diretrizes do 2006 IPCC Guidelines for National GHG Inventories (IPCC, 2006), os quais são reproduzidos na Tabela 1.

O potencial de geração de metano total é dado pelo somatório do potencial de geração de cada tipologia de resíduo:

$$CH_4 = 0,6 \times \sum_j (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj})$$

Na estimativa das emissões de metano, há que se descontar a fração recuperada representada pelo coeficiente R:

$$CH_{4\text{liberado}} = 0,6 \times \left[\sum_j (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj}) \right] \times (1 - R)$$

Para um potencial de aquecimento global GWP = 21, o potencial de emissão de $CO_{2\text{eq}CH_4}$ de um aterro sanitário pode ser representado pela expressão:

Equação 2: Potenciais emissões de $CO_{2\text{eq}}$ da degradação anaeróbica de resíduos orgânicos

$$CO_{2\text{eq}CH_4} = 12,6 \times \sum_j (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj}) \times (1 - R)$$

4.1.2 Emissões de CO_2 em aterros sanitários

As emissões de CO_2 representam aproximadamente 50% do volume de biogás do aterro, e podem ser calculadas com a mesma formulação aplicada ao cálculo do metano, que, na realidade, expressa a massa de metano resultante da decomposição da matéria orgânica estimada pela proporção volumétrica do metano no biogás (50%), considerando o peso molecular do metano para a conversão do volume em massa. Na metodologia IPCC, a parcela de CO_2 correspondente aos outros 50% do biogás não é considerada visto se tratar de um carbono neutro, renovável, na forma já reduzida do CO_2 .

A conversão de volume para massa se dá pela razão entre o peso molecular do metano ($CH_4 = C + 4H = 12 + 4 = 16\text{g/mol}$) e a massa atômica do carbono ($C = 12$), fator 16/12 na Equação 1. Da mesma forma, a conversão da massa de biogás em gás carbônico, correspondente a 50% do volume do biogás, é feita pela razão entre o peso molecular do CO_2 ($CO_2 = C + 2O = 12 + 2 \times 16 = 44\text{g/mol}$) e a massa atômica do carbono ($C = 12$):

$$CO_{2j} = (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj} \times F \times 44/12)$$

Onde:

CO_2 = potencial geração de CO_2 da tipologia de resíduos j (t)

W_j = quantidade de resíduo da tipologia j considerada (t)

D_{mj} = conteúdo de matéria seca da tipologia j (%)

DOC_j = Carbono Orgânico Degradável para a tipologia j (%)

DOC_{Fj} = Fração de Carbono Orgânico que se decompõe para a tipologia j (%)

F = Fração de CO_2 no biogás, adota-se $F = 50\%$

$44/12$ = razão entre o peso molecular $CO_2/C = 3,67$

Ainda é necessário adicionar no cômputo das emissões de CO_2 a quantidade de metano oxidada que, na Equação 2, assumiu-se ser $OX = 10\%$, bem como a quantidade de metano recuperada e queimada em *flare*, representada pelo fator R de recuperação, do que resulta, então:

$$CO_{2j} = (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj} \times 0,5 \times 44/12) \times (1 + 0,10 + R)$$

Resulta:

Equação 3: Parcela do biogás correspondente a potenciais emissões de CO_2

$$CO_2 = 2,01 \times \sum (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj}) \times (1,1 + R)$$

Decorre, portanto, que as emissões de $CO_{2eq\ total}$ e CO_{2eqCH_4} de processo de biodegradação anaeróbia de resíduos urbanos, em aterros sanitários, totalizam a seguinte relação com a quantidade de resíduos depositada:

$$CO_{2\ eq\ total} = CH_4 + CO_2 = CO_{2eqCH_4} + CO_2$$

$$CO_{2\ eq\ total} = 12,6 \times \sum (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj}) \times (1 - R) \\ + 2,01 \times \sum (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj}) \times (1 + R)$$

Equação 4: Potencial de emissões totais de $CO_{2eq\ total}$ do biogás gerado pela decomposição de resíduos orgânicos

$$CO_{2\ eq\ total} = (12,6 \times (1 - R) + 2,01 \times (1 + R)) \times \sum (W_j \times D_{mj} \times DOC_j \times DOC_{Fj})$$

4.2 Cálculo das emissões de CO₂ em processos de queima mássica

4.2.1 Emissões de CO₂fóssil

O método IPCC para estimar as emissões de CO₂ em processos de WtE por queima mássica (incineração) é baseado na estimativa do conteúdo de carbono fóssil dos resíduos, multiplicado por um fator de eficiência da planta na oxidação, convertido em CO₂. Os dados consideram a composição gravimétrica dos resíduos incinerados e o fator de emissão baseado em fontes de origem fóssil. O CO₂ biogênico é desconsiderado nessa estimativa tendo em vista que o propósito da análise IPCC se direciona a avaliar qual a redução do consumo de combustíveis fósseis alcançada pela substituição da geração de energia fóssil pela energia biogênica da tecnologia WtE, o que se dá através do compute da energia gerada. Idealmente, na ausência de materiais de origem fóssil nos resíduos, a avaliação das emissões de origem fóssil seria dispensada, ficando o balanço restrito ao cálculo da energia gerada pelos resíduos de origem biogênica e a correspondente redução de energia de origem fóssil que se possibilita.

Para o propósito deste trabalho, a análise considera o *Tier 1* proposto no Capítulo 5 do *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Incineration and Open Burning of Waste – Incineration and open burning of waste*. O nível 1 da abordagem (*Tier 1*) considera que as emissões de CO₂fóssil de processos de queima mássica são dadas por:

Equação 5: Emissões de CO₂ fóssil com base na quantidade de resíduos incinerados

$$CO_{2fóssil} = \sum (W_j \times Dm_j \times CC_j \times CF_j \times EF_j) \times 44/12$$

Onde:

CO₂fóssil = Emissões de CO₂ de origem fóssil (t)

W_j = Peso úmido de resíduos por tipo de material *j* (t)

Dm_j = % de matéria seca

CC_j = Conteúdo de carbono do componente *j* em relação ao peso seco (%)

CF_j = % de carbono fóssil do componente *j* (%)

EF_j = Eficiência da combustão para a tipologia *j* (%)

44/12 = Fator de conversão de C para CO₂

j = componente do MSW considerado: papel, plástico, alimentos, jardim, etc.

1. W_j – Peso úmido do resíduo tipo *j* (t)
2. Dm_j – Percentual de matéria seca (%)

O percentual de matéria seca relaciona o peso seco com o peso total de cada componente. Para tanto, faz-se necessário conhecer ou estimar o teor de umidade (base úmida) dos resíduos. Valores padrão são sugeridos nas diretrizes do *2006 IPCC Guidelines for National GHG Inventories* (IPCC, 2006), os quais são reproduzidos na Tabela 1.

3. CC_j – Conteúdo de Carbono (%)

Representa o % de carbono na matéria.

4. CF_j – Conteúdo de Carbono Fóssil (%)

Representa o % de carbono que tem origem fóssil.

5. EF_j – Fator de Eficiência na Oxidação (%)

Representa a eficiência da combustão da planta na conversão do carbono em CO_2 , evitando a formação de monóxido de carbono CO , que apresenta maior potencial de aquecimento global (GWP). Adota-se uma eficiência de $EF = 100\%$.

6. Expressão simplificada

O cálculo das emissões de $CO_{2fóssil}$ de RSU em processos de incineração, considerando $EF_j = 1$, resulta na expressão da Equação 6:

Equação 6 – Potenciais emissões de CO_2 fóssil estimadas na combustão de resíduos

$$CO_{2fóssil} = 3,6 \times \sum_j (W_j \times Dm_j \times CC_j \times CF_j)$$

4.2.2 Emissões de CO_2 biogênico

O conteúdo de CO_2 biogênico na composição do gás de exaustão dos processos de incineração é calculado da mesma forma que o $CO_{2fóssil}$, considerado que o conteúdo de carbono biogênico é a parcela do conteúdo de carbono total complementar ao conteúdo de carbono fóssil, ou seja:

$$CO_{2biogênico} = \sum (W_j \times Dm_j \times CC_j \times (1 - CF_j)) \times 44/12$$

Onde:

$CO_{2biogênico}$ = Emissões de CO_2 de origem biogênica (t)

W_j = Peso úmido de resíduos por tipo de material j (t)

Dm_j = % de matéria seca

CC_j = Conteúdo de carbono do componente j em relação ao peso seco (%)

$(1 - CF_j)$ = % de carbono biogênico do componente j (%)

Do que resulta:

Equação 7 – Potenciais emissões de CO₂ de origem biogênica na combustão de resíduos

$$CO_{2biogênico} = 3,6 \times \sum_j (W_j \times Dm_j \times CC_j \times (1 - CF_j))$$

A estimativa do total de emissões de CO₂ em processos de combustão é dada pela Equação 8, excluindo o fator relativo conteúdo de carbono de origem fóssil, o que equivale à soma das parcelas anteriores:

Equação 8 – Potenciais emissões totais de CO₂ na combustão de resíduos

$$CO_{2total} = 3,6 \times \sum_j W_j \times Dm_j \times CC_j$$

4.3 Estimativa de Emissões Potenciais Totais de CO₂ em aterros e em incineração

4.3.1 Coeficientes padrão IPCC

Na Tabela 1 são apresentados os valores padrão IPCC dos coeficientes de DOC = % Carbono Orgânico Degradável; DOC_f = % DOC decomposto; CC = % Carbono Total; CF = % de Carbono Fóssil para cada tipologia *j* de resíduos, de acordo com a Tabela 2.4 do *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Incineration and Open Burning of Waste* (IPCC, 2006). Para a tipologia de resíduos *rejeito*, adotou-se um valor médio dos coeficientes, assumindo-se a hipótese de que os rejeitos sejam compostos por uma distribuição equilibrada das demais tipologias de resíduos. O coeficiente DOC_f foi estimado em função de maior ou menor facilidade de decomposição, tendo por base valores indicados na Tabela 3 do *IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for NGH Inventories* (IPCC, 2019): papeis e têxteis: DOC_f = 50%; alimentos e resíduos de jardim: DOC_f = 70%.

Tabela 1 – Coeficientes IPCC para estimativa de emissões de CO₂ de aterros e incineração em função da tipologia de resíduo

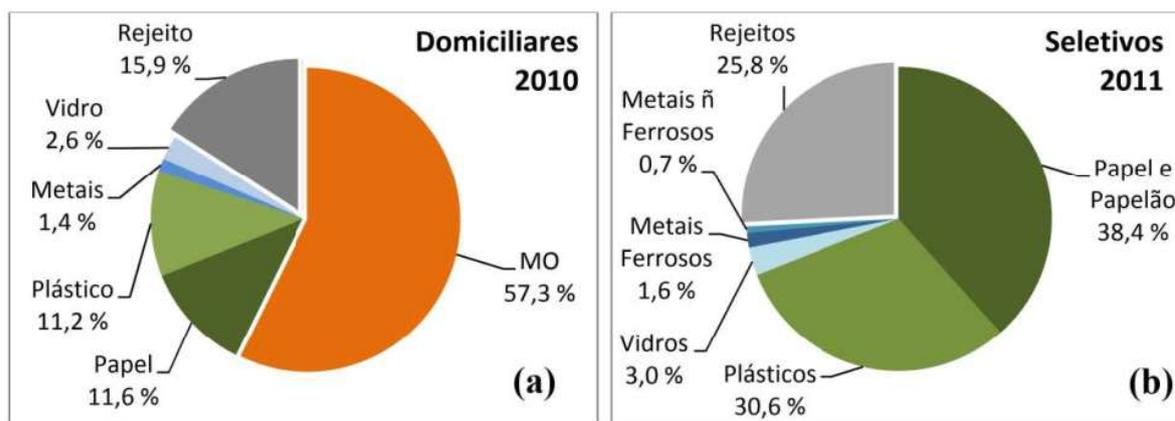
	D _m (%)	DOC (% seca)	DOC _f (% seca)	CC (%)	CF (%)
papel	90	44	50	46	1
têxteis	80	30	50	50	20
alimentos	40	38	70	38	0
jardim	40	49	70	49	0
fraldas	40	60	40	70	10
borracha e couro	84	39	5	67	20
plásticos	100	0	0	75	100
Média (rejeito)	68	23	41	56	22

DOC = Carbono Orgânico Degradável; DOC_f = DOC decomposto; D_m = Matéria seca; CC = % Carbono Total; CF = % de Carbono Fóssil

4.3.2 Dados sobre a composição dos RSU

O potencial de geração de metano depende da composição gravimétrica dos resíduos. Para este trabalho, serão considerados os dados relativos à cidade de Porto Alegre. Porto Alegre é uma cidade com aproximadamente 1,5 milhão de habitantes, capital do Estado do Rio Grande do Sul. A Figura 2 apresenta os resultados gravimétricos reportados por Reichert (2017) para os resíduos domiciliares da cidade de Porto Alegre, relativos ao ano de 2011.

Figura 2 – Composição gravimétrica úmida dos resíduos de Porto Alegre, base 2011: (a) resíduos da coleta domiciliar convencional; (b) resíduos da coleta seletiva.



4.3.3 Cálculo das emissões potenciais

No propósito deste trabalho, não são considerados os abatimentos decorrentes da geração de energia, também não são estimadas as emissões de outros gases efeito estufa. São desprezadas também, as emissões de CO₂ decorrentes do uso de combustíveis fósseis para operação da planta de incineração e para a secagem prévia de resíduos.

A) Aterro Sanitário

A Tabela 2 reporta as informações gravimétricas da composição dos resíduos de Porto Alegre, cujos percentuais são aplicados sobre o quantitativo mensal recepcionado pelo Aterro do Recreio, onde são destinados os resíduos da região metropolitana de Porto Alegre. O Aterro do Recreio recepciona 97.000t/mês de RSU.

São relacionados na tabela os coeficientes de geração e a quantidade potencial de metano estimada para as quantidades dadas, considerando que não há recuperação de metano (R=0%). São totalizadas as emissões de CO_{2eq CH4} pela Equação 2 e CO_{2eq total} pela Equação 4.

Da análise, estima-se que o potencial impacto das emissões de CO₂ para o quantitativo de 97.000t/mês e composição gravimétrica dada é de **123.081,08 t/mês de CO₂**, dos quais **106.769,13 t/mês** se associam à geração de 5.084,24 t/mês de metano.

Tabela 2 – Composição gravimétrica dos RSU e coeficientes para a estimativa da emissão de CO_{2eq total} em aterro sanitário sem recuperação de metano

Componente	%	W _j (t)	Dm (%)	DOC (%)	DOC _f (%)	CH ₄ gerado (t)	CO _{2eq} CH ₄ (t)	CO _{2 eq total} (t)
Alimentos	57,30%	55.581	40%	38%	70%	3.548,29	74.514,11	85.898,21
Rejeito	15,90%	15.423	46%	18%	26%	199,22	4.183,53	4.822,68
Papel	11,60%	11.252	90%	44%	50%	1.336,74	28.071,49	32.360,19
Plástico	11,20%	10.864	100%	0%	0%	0,00	0,00	0,00
Vidro	2,60%	2.522	100%	0%	0%	0,00	0,00	0,00
Metais	1,40%	1.358	0%	0%	0%	0,00	0,00	0,00
Total		97.000				5.084,24	106.769,13	123.081,08

B) INCINERAÇÃO

Na Tabela 3 são relacionados os coeficientes de matéria seca (Dm), conteúdo de carbono (CC) e fração de carbono fóssil (CF) estimados para cada componente dos resíduos analisada, e as correspondentes quantidades de CO_{2fóssil} e CO_{2total} lançadas pela incineração desses resíduos, estimadas pela aplicação da Equação 6 e da Equação 8.

Da análise, estima-se que o potencial impacto das emissões de CO₂ para o quantitativo de 97.000t/mês e composição gravimétrica dada é de **86.037,36 t/mês de CO_{2total}**. Desse total, **31.523,31 t/mês representam CO_{2fóssil}**.

Tabela 3 – Composição gravimétrica dos RSU e coeficientes para a estimativa da emissão de CO₂

Componente	%	W _j (t)	Dm (%)	CC (%)	CF (%)	CO _{2 fóssil} (t)	CO _{2 total} (t)
Alimentos	57,30%	55.581	40%	38%	0%	0	30.413,92
Rejeito	15,90%	15.423	46%	56%	22%	2.022,81	9.194,58
Papel	11,60%	11.252	90%	46%	1%	167,70	17.096,06
Plástico	11,20%	10.864	100%	75%	100%	29.332,80	29.332,80
Vidro	2,60%	2.522	100%	0%	0%	0	-
Metais	1,40%	1.358	0%	0%	0	0	-
Total		97.000				31.523,31	86.037,36

C) EMISSÕES CO₂ TOTALIZADAS EM ATERRO E INCINERAÇÃO

A Tabela 4 compara as emissões totalizadas de CO₂ estimadas em aterros (CO_{2eqtotal}) e em incineração (CO_{2total}). Os resultados reportados não consideram a possível captura e queima do biogás, e são projetados para um período de 100 anos na adoção de CH₄ GWP = 21 e um fator de oxidação de 10% do metano gerado. Além disso, considera-se, na comparação, que a geração do metano ocorre no período de um mês.

Relativizadas essas condições, verifica-se que a aparente vantagem da combustão dos resíduos estimada em de 75,2 mil t de CO₂ na diferença entre a quantidade de CO_{2eqtotal} em aterros em relação à de CO_{2fóssil} gerada na combustão, é reduzida para 37 mil t de CO₂ quando se incluem as emissões de CO_{2neutro}.

Tabela 4 – Emissões de CO₂ totalizadas em Aterro e Incineração

Processo	Aterro Sanitário	Incineração	Diferença
CO_{2eq} e CO_{2fóssil} (t)	106.769,13	34.151,98	75.245,82
CO _{2neutro} (t)	16.311,95	54.514,05	- 38.202,10
CO_{2total} (t)	123.081,08	86.037,36	37.043,72

4.4 Análise Sensitiva das emissões em aterros e em incineração de RSU

Uma série de fatores pode modificar os resultados apresentados sobre as emissões de CO₂ estimadas para aterros e incineradores, como por exemplo, o abatimento de emissões com a queima e geração de energia a partir do biogás, a geração de energia a partir da incineração, a alteração da composição gravimétrica dos resíduos em razão da compostagem ou da reciclagem, ou, de forma negativa, os gastos energéticos com a desidratação dos resíduos úmidos na incineração, a perda da eficiência da combustão dos resíduos/gases com geração de monóxido de carbono, a produção de NO_x (GWP = 10), N₂O (GPW = 310), entre outros. Também condições de contorno diferentes podem alterar os resultados, como distância de transporte, transporte e tratamento de resíduos e efluentes da incineração e do aterro, entre outras possibilidades cuja consideração requer uma Análise de Ciclo de Vida mais aprofundada.

Objetivando uma análise sensitiva simplificada, se consideram como variáveis neste estudo os percentuais de reciclagem e compostagem, o fator de recuperação do biogás, e o potencial de aquecimento global do metano, que é variável em uma janela temporal.

Na avaliação do fator de recuperação do biogás, buscando reproduzir um cenário realista e factível, foram avaliados os resultados obtidos pelo Aterro do Recreio na recuperação e combustão do biogás, a seguir referidos.

4.4.1 Estimativa do fator de recuperação R

Para estimar o fator de recuperação do metano em aterros sanitários, R, foram considerados os resultados de medições realizadas no Aterro Sanitário do Recreio, em Minas

do Leão, cidade localizada a 100km da capital, para a qual são encaminhados os resíduos de Porto Alegre e de outras 230 cidades gaúchas.

O Aterro Sanitário do Recreio possui um sistema de captação de metano por pressão negativa e uma instalação termoeétrica para geração de energia a partir do biogás. A instalação recebe 97 mil toneladas de RSU mensalmente. O Aterro do Recreio é contemplado com um projeto de MDL registrado em dezembro de 2006, vinculado à metodologia de linha de base para a queima ou uso de gás de aterro, e que se encontra ativo, sendo registrado sob o título **Projeto: 0648 Central de Resíduos do Recreio Projeto de Gás de Aterro Sanitário (CRRLGP)**. O registro confere confiabilidade aos dados reportados já que sujeitos a monitoramento segundo os critérios do IPCC para validação dos créditos de carbono.

Os seguintes dados são reportados para o Aterro do Recreio em valores médios para o ano de 2021:

Resíduos recepcionados:	97.000 t/mês
Vazão potencial de biogás:	6.699.600 m ³ /mês
Vazão de biogás capturado:	4.320.000 m ³ /mês
- Oxidação em <i>flare</i> :	1.296.000 m ³ /mês
- Geração de Energia:	3.024.000m ³ /mês
Créditos de carbono:	
- Queima em <i>flare</i> :	8.640 tCO _{2eq} CH ₄ /mês
- Geração de energia:	20.160 tCO _{2eq} CH ₄ /mês

Da relação entre a vazão de biogás gerado (6.699.600 m³/mês) e vazão de biogás capturado (4.320.000 m³/mês), tem-se uma taxa de recuperação do biogás $R = 64\%$, ou seja, 64% da geração potencial de metano do Aterro do Recreio é recuperada e convertida em créditos de carbono, representativos de emissões evitadas 28.800 t/mês de CO_{2eq}CH₄.

A conversão do volume de metano (m³) para massa (t) é realizada considerando a densidade do CH₄, que, em CNTP é de 0,715665 kg/m³, correspondente ao peso molecular de 16,04 g/mol e volume molar de 22,4 l/mol. A razão é alterada com a temperatura.

4.4.2 Cenário 1: linha de base

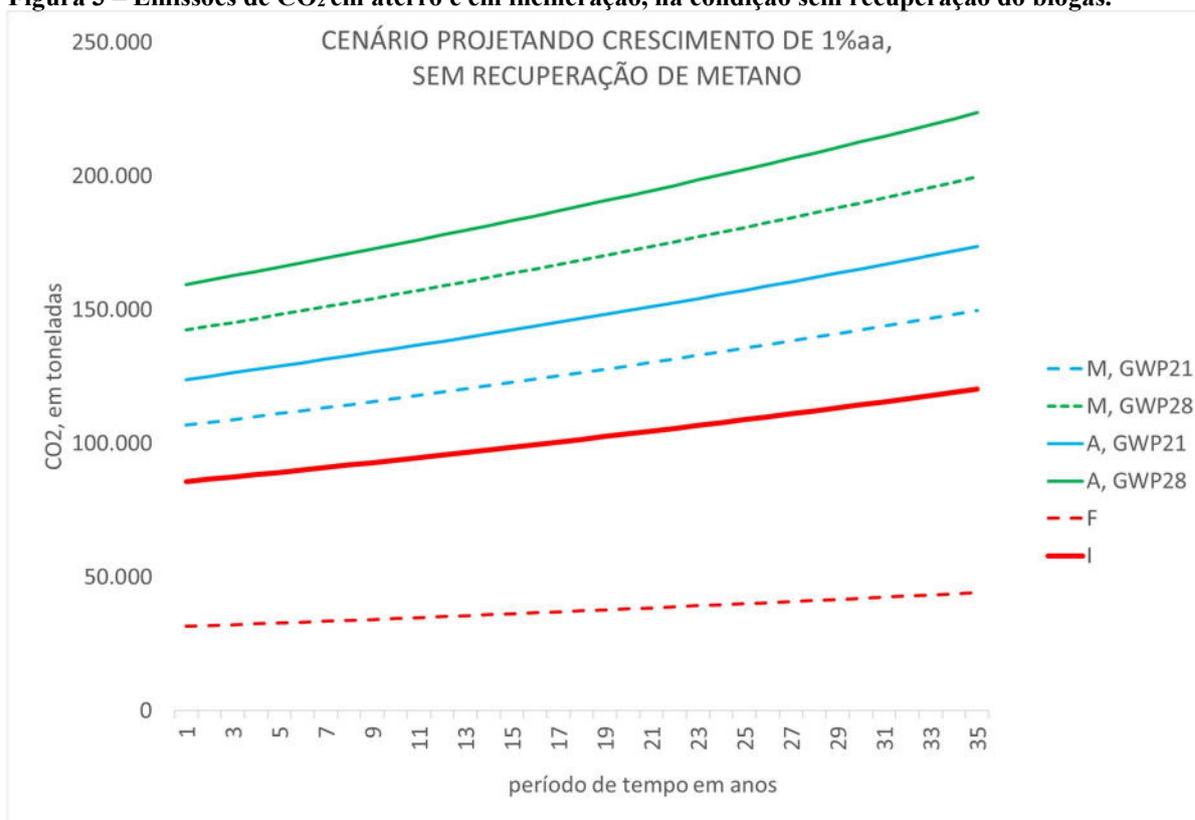
A Figura 3 projeta as emissões de CO₂ para um crescimento anual de 1% de resíduos, em todas as tipologias. São projetadas as emissões potenciais de CO_{2eq}CH₄ e de

$CO_{2eq\ total}$ calculadas para aterros, e as emissões de $CO_{2f\ fossil}$ e de $CO_{2\ total}$ para incineração. Este cenário será utilizado para as projeções que são apresentadas na sequência.

Nos dados da Figura 3, as cores verde e azul se referem às emissões de aterro sanitário, e a cor vermelha, às emissões de incineração. A cor azul representa as emissões considerando um potencial de aquecimento global do CH_4 $GWP = 21$, e a cor verde, um $GWP = 28$. Essa variação é importante porque está relacionada ao horizonte temporal da análise, sendo 21 o GPW do metano para um horizonte de 100 anos, de acordo com a UNFCCC.

Ainda, na figura, há sempre duas linhas para cada escopo, sendo uma tracejada e uma contínua, na mesma cor. No caso de aterro sanitário, a linha tracejada representa as emissões de $CO_{2eq\ CH_4}$ (**M**), e a linha contínua considera a soma dessas com as relacionadas ao restante do CO_2 presente no biogás (**A**), correspondente a 50% em volume. No caso de incineração, a linha tracejada reporta somente o $CO_{2f\ fossil}$ (**F**) e a contínua totaliza a soma desse com as demais emissões de CO_2 relativas a resíduos orgânicos. (**I**)

Figura 3 – Emissões de CO_2 em aterro e em incineração, na condição sem recuperação do biogás.



Essencialmente, importa referir, já nesse primeiro cenário, que as emissões de origem fóssil de um incinerador são muito inferiores às de CO_{2eq} de um aterro, considerando a mesma tipologia de resíduos. Essa conclusão é a que subsidia o entendimento de aterros

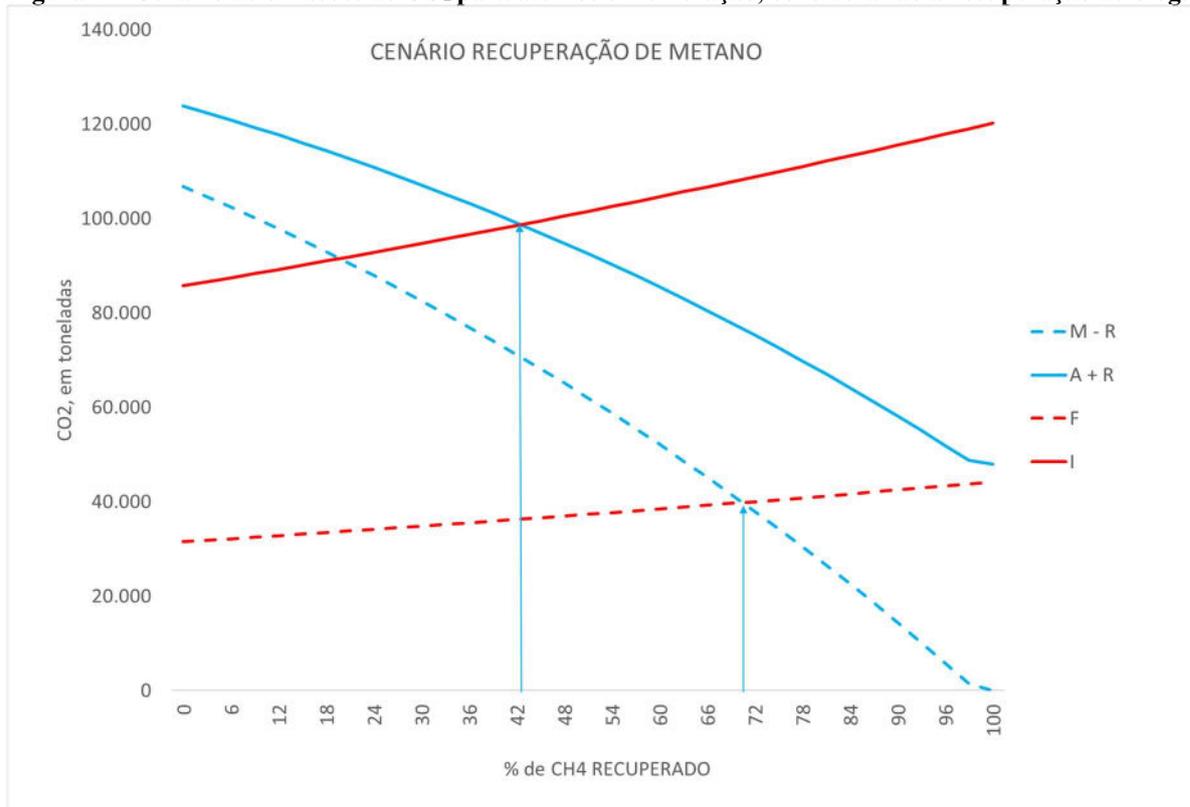
sanitários serem menos sustentáveis ambientalmente em relação a incineração de RSU. No entanto, quando são incluídas as emissões de CO₂ relacionadas a resíduos orgânicos, a projeção das emissões de incineração de RSU aumentam em aproximadamente 270%. Já no caso de aterros sanitários, a inclusão do CO₂ presente no biogás conduz a um aumento de aproximadamente 20%. Com isso, as emissões totais da combustão e da degradação biológica se aproximam, mas ainda assim, as emissões totais da incineração são significativamente inferiores às do aterro sanitário. As emissões totais para um GPW = 28, representada pela linha contínua verde, aumentam a vantagem da incineração.

Sobre esse cenário inicial, são consideradas variações a seguir apresentadas.

4.4.3 Cenário 2: Recuperação do biogás

Nesse cenário, os dados projetam a recuperação das emissões de CO_{2eq}CH₄ pela oxidação do metano, em razão de que sobre essa parcela de metano oxidada não se aplica o fator GWP = 21, sendo a emissão computada, então, como CO₂.

Figura 4 – Cenário de emissões de CO₂ para aterros e incineração, considerando a recuperação de biogás



No gráfico, as setas azuis indicam o percentual de recuperação do biogás para o qual as emissões de CO_{2eq}CH₄ e CO_{2eq}total equivalem ou compensam às de CO_{2fóssil} e CO_{2total} da incineração. Para aproximadamente 70% de recuperação do metano, as emissões de CO_{2eq}CH₄ se equiparam às de CO_{2fóssil}. Nesse percentual, a eventual vantagem da incineração em relação

à emissão de gases efeito estufa é perdida, e a partir desse ponto, se inverte. Para o percentual de 64% de recuperação do biogás, percentual alcançado no Aterro do Recreio, as emissões de CO_2eqCH_4 superam em 8.520 t às de $\text{CO}_2\text{fóssil}$.

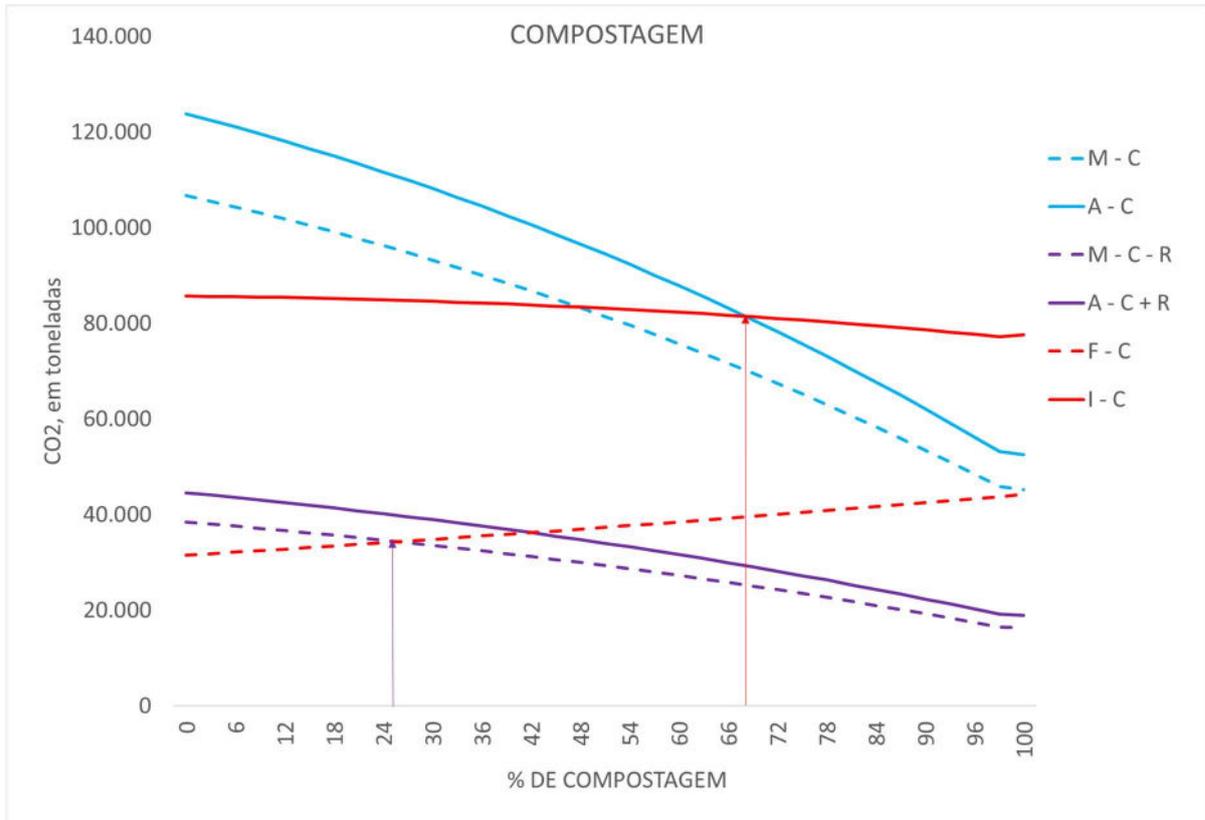
Note-se, na legenda, que a linha tracejada azul é legendada como (M – R), indicando que a quantidade de metano recuperada está sendo subtraída do cálculo das emissões de CO_2eqCH_4 . Já a linha azul contínua é legendada como (A + R), indicando que a quantidade recuperada de metano foi adicionada, como CO_2 , à totalização das emissões do aterro $\text{CO}_2\text{eqtotal}$, tendo em vista que foi convertida em CO_2 . Em termos de emissões totais, para 43% de recuperação, as emissões de $\text{CO}_2\text{eqtotal}$ de aterros sanitários se equiparam às emissões de CO_2total da incineração.

Nas projeções seguintes, foram projetados os resultados para um percentual de recuperação do metano foi fixado em $R = 64\%$, percentual praticado no Aterro do Recreio e para um cenário em que não há qualquer recuperação ou queima de biogás, $R = 0$. Assim, resultados para um intervalo de 0 a 64% de recuperação do metano podem ser inferidos.

4.4.4 Cenário 3: Compostagem

A Figura 5 apresenta as curvas projetadas para percentuais crescentes de compostagem. Nesse cenário, não havendo recuperação do biogás (linhas azuis) as emissões de CO_2eqCH_4 (M-C) são superiores às de $\text{CO}_2\text{fóssil}$ da incineração (F-C), mas as curvas convergem. Na linha lilás são projetadas as emissões considerando a recuperação do metano em 64%. Nesse percentual de recuperação, as emissões de $\text{CO}_2\text{fóssil}$ da incineração (F-C) superam as emissões de CO_2eqCH_4 (M-C-R) para um % de compostagem igual ou maior que 24%. A linha lilás contínua representa as emissões totais de $\text{CO}_2\text{eqtotal}$ do aterro sanitário para 64% de recuperação do biogás (A-C+R). Quando não há recuperação de metano, as emissões de CO_2total da incineração (I-C) superam as emissões totais de $\text{CO}_2\text{eqtotal}$ do aterro sanitário sem recuperação de metano (A-C) para um percentual de 69% de compostagem.

Figura 5 – Cenário de emissões de CO_2 para aterros e incineração considerando a compostagem



4.4.5 Cenário 4: Reciclagem do Papel

Considerando apenas a reciclagem do papel, verifica-se um menor efeito sobre a redução das emissões de CO_{2eq} , o que é consistente com o fato de o papel corresponder a um percentual de apenas 11% do peso total de resíduos na composição gravimétrica da amostra. Nesse cenário, não havendo recuperação do biogás (linhas azuis) as emissões de CO_{2eqCH_4} (M-P) são superiores às de CO_{2total} da incineração (I-P). Com $R = 64\%$, as emissões totais da incineração são muito superiores às do aterro, que se aproximam das emissões de $CO_{2fóssil}$ da incineração (F-C). Resultados apresentados na Figura 6.

4.4.6 Cenário 5: Reciclagem do Plástico

Na Figura 7 são plotados os resultados para o cenário da reciclagem do plástico. Nesse cenário, as emissões fósseis da incineração (F-PL) são reduzidas na proporção da reciclagem, conduzindo que as emissões totais da incineração (I-PL) se mantêm em aproximadamente 80 mil tCO_2 mesmo com o aumento do volume de resíduos. Não se observam efeitos dessa variável sobre as emissões de biogás, já que a hipótese é de que não há degradação dos plásticos.

Figura 6 – Cenário de emissões de CO₂ para aterros e incineração considerando a reciclagem de papel

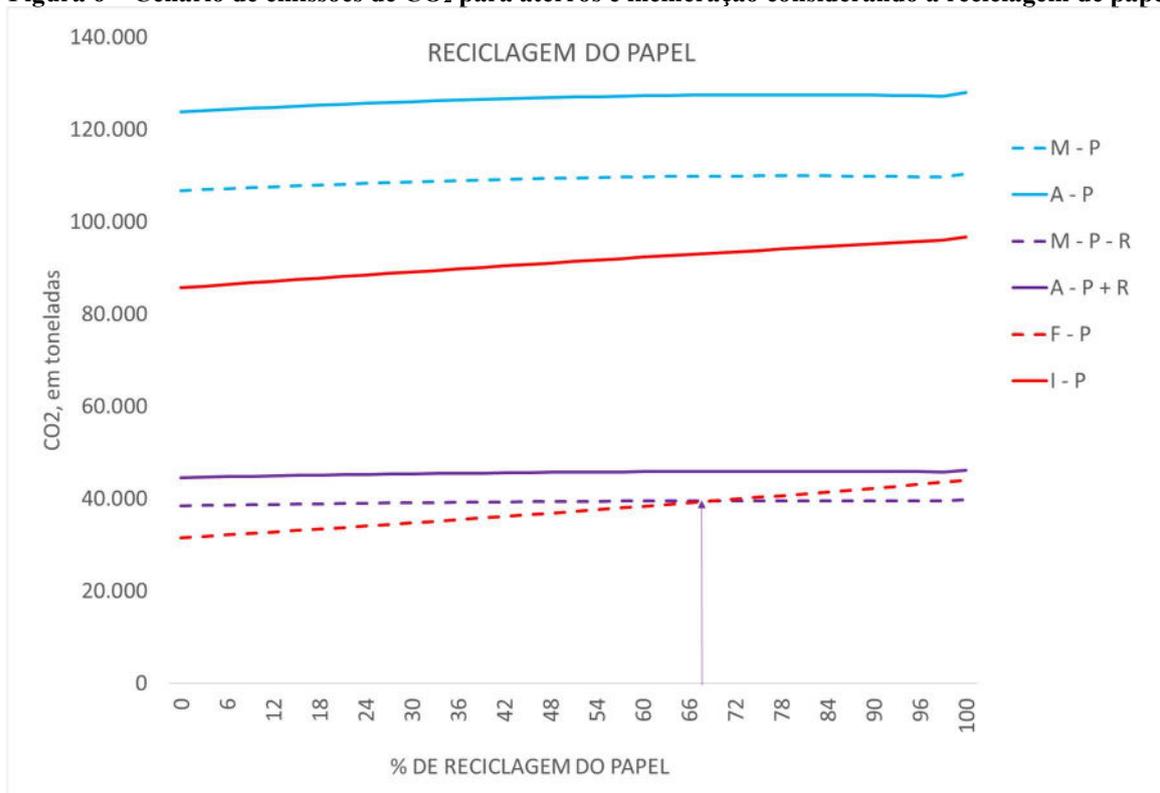
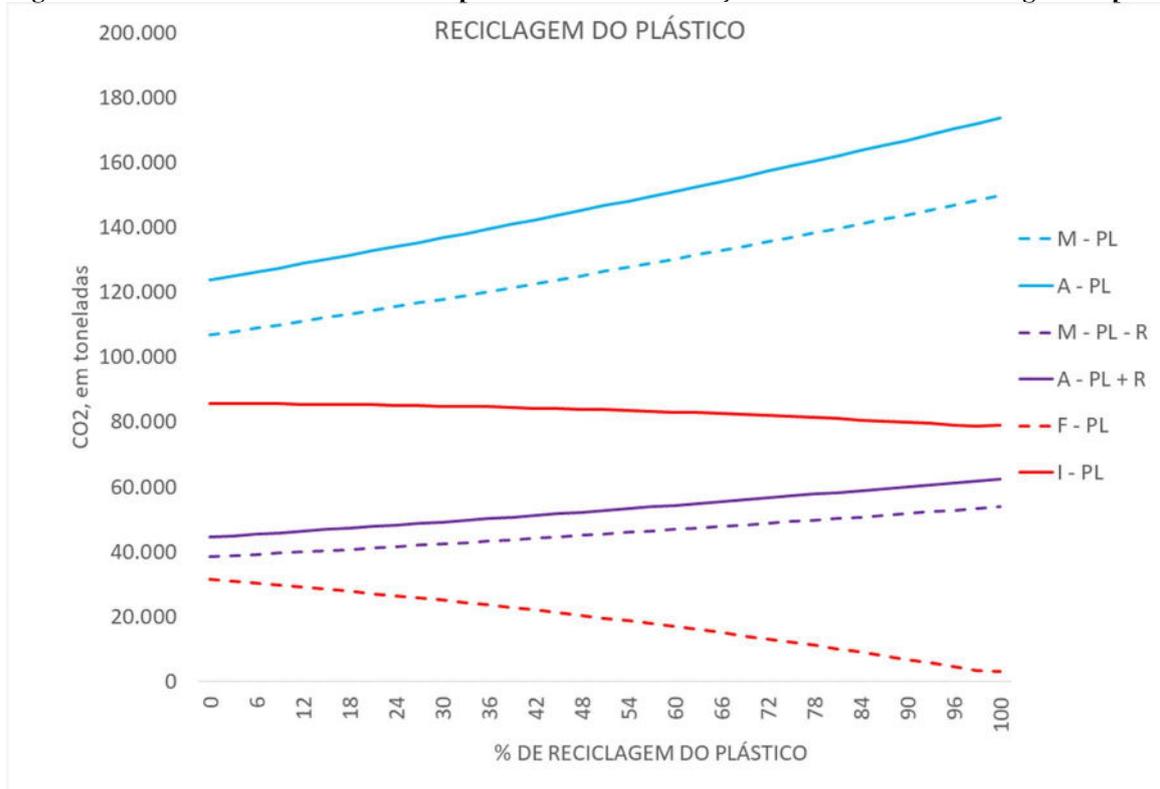


Figura 7 – Cenário de emissões de CO₂ para aterros e incineração considerando a reciclagem do plástico



A vantagem da incineração, nesse cenário, aumenta com o aumento da reciclagem do plástico. Quando há recuperação do metano (A-PL+R), as emissões totais da incineração

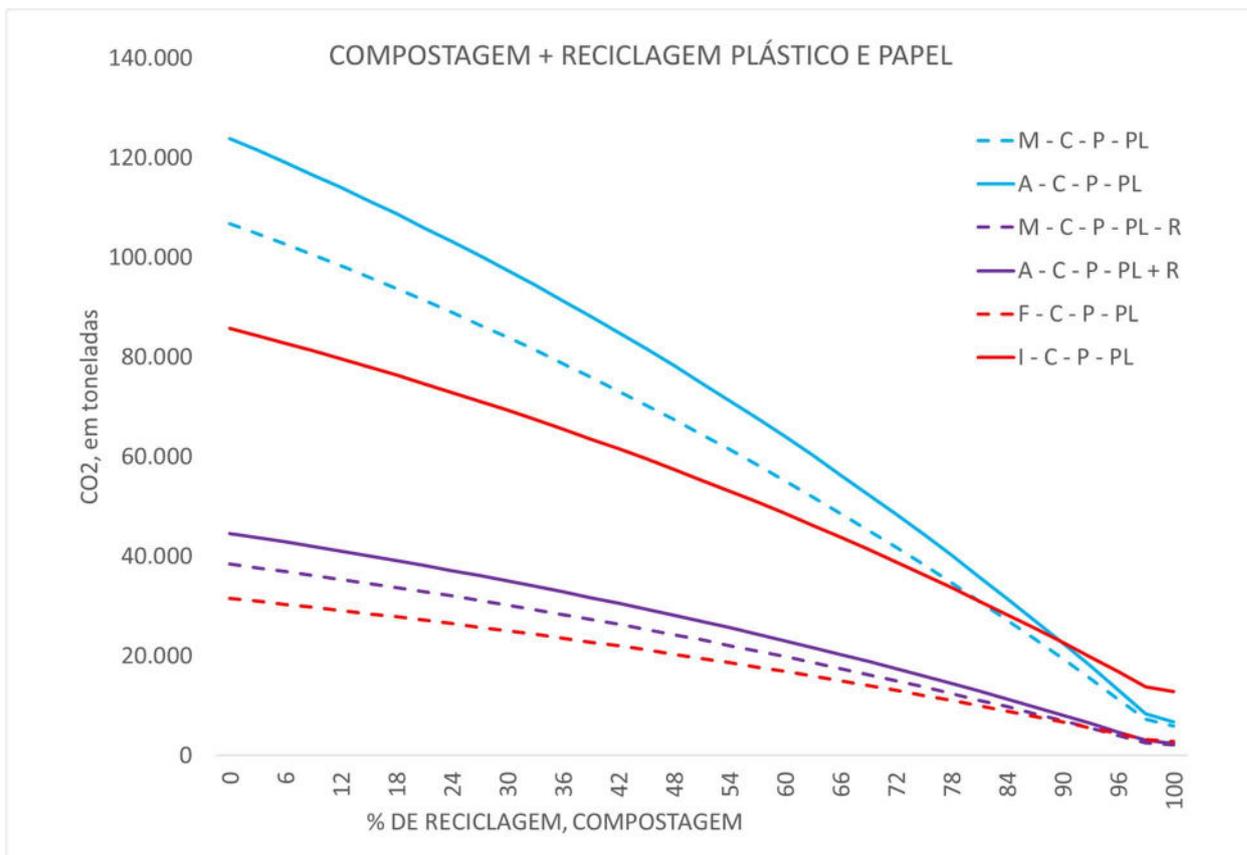
são maiores que as totalizadas para aterros sanitários, mas as emissões de $\text{CO}_2^{\text{fóssil}}$ são significativamente menores que as do aterro sanitário em qualquer cenário.

4.4.7 Cenário 6: Ideal

No cenário ideal, são considerados aumentos progressivos da compostagem (C) e da reciclagem de plástico (PL) e papel (P), nas mesmas proporções, mantido o percentual dos resíduos considerados rejeito, correspondentes a 15% do total de resíduos. Nesse cenário, mostrado na Quando se considera a recuperação $R = 64\%$, os quantitativos de $\text{CO}_2^{\text{eqCH}_4}$ (M-C-P-PL-R) se mantêm superiores às emissões fósseis (F-C-P-PL) até percentuais elevados de reciclagem e compostagem. No entanto, as emissões totais do aterro (A-C-P-PL+R) são significativamente inferiores às totalizadas na incineração (I-C-P-PL) em todo o intervalo.

Figura 8, para as curvas azuis, sem recuperação de metano, se preserva a situação inicial, na qual as emissões fósseis (F-C-P-PL) e totais da incineração (I-C-P-PL) são significativamente inferiores às do biogás, seja para as emissões de metano, $\text{CO}_2^{\text{eqCH}_4}$ (M-C-P-PL), seja para as emissões totais, $\text{CO}_2^{\text{eqtotal}}$ do aterro (A-C-P-PL). No entanto, para percentuais crescentes de compostagem e reciclagem, as emissões totais da incineração superam as emissões de aterros. Quando se considera a recuperação $R = 64\%$, os quantitativos de $\text{CO}_2^{\text{eqCH}_4}$ (M-C-P-PL-R) se mantêm superiores às emissões fósseis (F-C-P-PL) até percentuais elevados de reciclagem e compostagem. No entanto, as emissões totais do aterro (A-C-P-PL+R) são significativamente inferiores às totalizadas na incineração (I-C-P-PL) em todo o intervalo.

Figura 8 – Cenário ideal, com redução progressiva dos resíduos orgânicos, papel e plásticos.



5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Visando a possibilitar uma análise sensitiva do efeito isolado de cada variável sobre as emissões de CO_2 fóssil, $\text{CO}_{2\text{total}}$, da incineração, e de $\text{CO}_{2\text{eqCH}_4}$ e $\text{CO}_{2\text{eqtotal}}$, do aterro sanitário, seis cenários foram avaliados. No cenário inicial, Cenário 1 – linha de base, emissões de $\text{CO}_{2\text{eqCH}_4}$ e $\text{CO}_{2\text{eqtotal}}$ do aterro sanitário foram comparadas às de $\text{CO}_{2\text{fóssil}}$ e $\text{CO}_{2\text{total}}$ da queima mássica (incineração), na condição $R = 0\%$, ou seja, sem recuperação do metano. As emissões foram projetadas para um intervalo de 30 anos, projetados para um aumento de 1% ao ano nos quantitativos de resíduos. Nesse primeiro cenário, no cálculo de $\text{CO}_{2\text{eqtotal}}$ do aterro sanitário, foram projetados resultados para o Potencial de Aquecimento Global do metano de $\text{GWP} = 21$ e $\text{GWP} = 28$. Os resultados indicam que, para as condições estabelecidas e sem oxidação do biogás por queima em *flare*, as emissões de $\text{CO}_{2\text{fóssil}}$ e $\text{CO}_{2\text{total}}$ da incineração são inferiores às de $\text{CO}_{2\text{eqCH}_4}$ e de $\text{CO}_{2\text{eqtotal}}$ de aterro sanitário tanto para $\text{GWP}_{\text{CH}_4} = 21$ quanto para $\text{GWP}_{\text{CH}_4} = 28$.

Sobre esse cenário inicial, foram projetados os seguintes cenários alternativos: Cenário 2 – recuperação de metano; Cenário 3 – Compostagem; Cenário 4 – Reciclagem do Papel; Cenário 5 – Reciclagem do Plástico; Cenário 6 – Compostagem, Reciclagem de Plástico e Papel.

No cenário 2 – recuperação de metano, identificou-se que para percentuais de recuperação do metano (queima em *flare*) superiores a 42% e $GWP_{CH_4} = 21$, a incineração deixa de apresentar vantagem climática em relação a aterros sanitários, passando as emissões totais da incineração CO_{2total} (I) a serem maiores que as totalizadas em aterro sanitário, $CO_{2eqtotal}$ (A+R).

Nos cenários 3, 4, 5 e 6, foram projetadas as emissões sem recuperação do metano, $R = 0\%$, e com recuperação de metano $R = 64\%$. O fator de recuperação $R = 64\%$, foi adotado em razão de ser alcançado no Aterro do Recreio, local onde são encaminhados os resíduos da região metropolitana de Porto Alegre, sendo, portanto, um percentual factível dentro de condições otimizadas de captura e tratamento do biogás.

No cenário 3 – Compostagem e $R = 0\%$, somente para percentuais superiores a 68% de compostagem as emissões de aterros se tornam inferiores às totalizadas na incineração. Para $R = 64\%$, as emissões totais da incineração (I-C) são muito superiores às totalizadas em aterros (A-C+R), $CO_{2eqtotal}$ projetadas para $GWP = 21$. Em 42% de compostagem e $R = 64\%$, as emissões totais de aterros são inferiores às emissões fósseis da incineração, $CO_{2fossil}$ (F-C).

No Cenário 5 – Reciclagem do Plástico, a tendência é revertida, posto que a reciclagem do plástico tem como efeito a redução apenas das emissões fósseis e totais da incineração, sendo irrelevante para o aterro sanitário. As curvas de emissão total $CO_{2eqtotal}$ (A-PL) e de CO_{2eqCH_4} (M-PL) de aterros preservam a configuração inicial para $R = 0\%$, e indicam emissões muito superiores às correspondentes da incineração (F-PL, I-PL). As emissões fósseis da incineração praticamente zeram com a reciclagem total do plástico. Para $R = 64\%$, as emissões $CO_{2eqtotal}$ (A-PL+R) e de CO_{2eqCH_4} (M-PL-R) são inferiores às emissões totais CO_{2total} (I-PL) da incineração, mas superam as emissões fósseis $CO_{2fossil}$ (F-PL).

Em todos os cenários avaliados sem recuperação do metano, as emissões de CO_{2eqCH_4} superam as emissões de $CO_{2fossil}$ da incineração.

No Cenário 6 – Ideal, o aumento dos percentuais de reciclagem de papel e plástico sobrepostos ao aumento do percentual de compostagem, com e sem recuperação de metano, traduzem que tanto as emissões totais e fósseis da incineração (I-C-P-PL e F-C-P-PL), quanto as emissões totais e de CO_{2eqCH_4} de aterros (A-C-P-PL+R, M-C-P-PL-R) são reduzidas, sendo as emissões de aterros sanitários quando $R = 0\%$ superiores às totalizadas na incineração, e para $R = 64\%$, as emissões totais da incineração superam em grande escala às de aterros sanitários.

6 CONCLUSÕES

Na comparação das tecnologias de WtE por queima mássica e aterro sanitário, por se tratar de duas tecnologias intensivas em carbono – o aterro pela emissão de metano, gás com potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do CO₂ em um horizonte de 100 anos, e o incinerador por promover a combustão dos resíduos e sua conversão em CO₂ –, o impacto ao efeito estufa é uma variável a ser considerada. A análise comparativa, nesse caso, deve incluir tanto quantitativos de emissões fósseis quanto de emissões biogênicas provenientes da incineração, totalizando as emissões de CO₂ dessa tecnologia. Para aterros, a comparação exige não apenas a contabilização das emissões de CO₂ equivalente decorrentes do impacto do metano, mas também do CO₂ presente no biogás. Esses quantitativos não são considerados nas metodologias de inventário de emissões do IPCC aplicadas a resíduos, posto serem consideradas como emissões neutras naquele contexto, a despeito de seu inequívoco efeito sobre o aquecimento global, tendo em vista não se objetivo daquelas metodologias a comparação direta entre duas tecnologias.

No intuito de restringir a comparação exclusivamente aos processos de conversão da matéria e seus subprodutos, a análise apresentada se centra nas emissões desses processos, desprezando outras variáveis consideradas em uma ampliada análise de ciclo de vida.

Na estimativa das emissões de gases efeito estufa, foram aplicadas as metodologias de cálculo do IPCC para aterro sanitário e para incineração de resíduos sólidos urbanos correspondentes à abordagem em nível 1 (Tier 1), para a qual são desconsiderados os efeitos de decaimento das emissões com o tempo que ocorre em aterros sanitários, reproduzindo uma condição de total conversão dos resíduos em biogás.

A partir de uma composição gravimétrica pré-estabelecida (57,3% de orgânicos; 15,9% de rejeitos, 11,6% de papel, 11,2% de plástico, 2,6% de vidro e 1,4% de metais), e de quantitativos hipotéticos de geração (97.000 t/mês), foram estimadas as emissões de CO₂ equivalente e fóssil para diferentes cenários. Com base nas mesmas metodologias, e com o ajuste dos fatores das formulações, foram estimadas também as emissões totais de CO₂.

Nos cenários avaliados, como regra geral, as emissões de aterros superam as emissões totais da incineração quando não há recuperação e tratamento de biogás. Com 42% de recuperação do metano, mesmo sem nenhuma remoção de material, as emissões totais de aterros e equiparam às emissões totais da incineração, e para percentuais de recuperação maiores, as emissões totais da incineração superam às totalizadas em aterros sanitários.

Portanto, para a configuração gravimétrica analisada e similares, a vantagem da incineração em relação a aterros sanitários, do ponto de vista climático, se perde quando a recuperação e queima em *flare* do biogás é superior a 42% da geração.

Com a implementação da compostagem e da reciclagem de papel, as emissões totais de aterros sanitários são gradualmente reduzidas, mas as da incineração não reduzem na mesma proporção. Isso decorre do fato de o metano gerado em aterros sanitários apresentar um potencial de aquecimento global 21 vezes o do CO₂, conduzindo a que a retirada dos materiais biodegradáveis apresenta um impacto muito superior nas emissões de aterros sanitários do que a observada em incineradores. Mas o principal fator de redução das emissões de aterros sanitários é a recuperação do metano. A reciclagem do plástico importa uma redução significativa nas emissões da incineração, mas não modifica as emissões de aterros.

As emissões totais da incineração são muito superiores às emissões fósseis. Daí, quando se contabiliza apenas emissões fósseis, há uma grande vantagem em relação a aterros sanitários sem recuperação de biogás. No caso das emissões de aterros sanitários, as emissões equivalentes do metano são a principal parcela das emissões totais de CO_{2eq}, com pequena diferença entre estes valores. Na recuperação do metano, portanto, há um grande impacto na redução das emissões totais.

REFERÊNCIAS

- Belchior Tisi, Y. S., Matos, F., e Pinheiro Pedro, A. F. – *Por um plano abrangente de gestão de lixo urbano para o Brasil*. In: O Estadão, 22 de outubro de 2020.
- Ciel – *Center for International Environmental Law*. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/Plastic-and-Health-The-Hidden-Costs-of-a-Plastic-Planet-February-2019.pdf>. Acesso em março de 2021.
- Di Maria, F. e Micale, C. – *Life cycle analysis of management options for organic waste collected in an urban area*. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, p. 248-263, 2015.
- Eriksson, O. e Finnveden, G. *Plastic waste as a fuel – CO₂-neutral or not?* *Energy Environmental Science*, 2009, v. 2, p. 907-914. DOI: 10.1039/b908135f.
- Eurostat Statistics Explained 2020 https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_landfilled,_incinerated,_recycled_and_composted,_EU-27,_1995-2018.png. Acesso em abril de 2021.
- Kim, S.; Kang, S.; Lee, J.; Lee, S.; Kim, K-H; & Jeon, E-C. *The comparison of fossil carbon fraction and greenhouse gas emissions through an analysis of exhaust gases from urban solid waste incineration facilities*, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, 66:10, 978-987, DOI: 10.1080/10962247.2016.1192070. Acesso em 22/05/2021 pelo site: <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1192070>
- Kurtulus, H. O.; Guvenc, S.Y.; Guvenc, L.; Demir, G. *Municipal Solid Waste Characterization according to Different Income Levels: A Case Study*. *Sustainability* 2016, 8, 1044; doi:10.3390/su8101044.
- IPCC (1997a) *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories, Volume 3 Reference Manual*. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callander, B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>, acesso em novembro 2020.
- IPCC (1997b). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories, Volume 2 Workbook*. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callander, B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>, acesso em novembro 2020.
- IPCC (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzi, B., Emmanuel, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K. and Tanabe, K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>, acesso em janeiro 2021.
- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Volume 5. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, acesso em março de 2021.
- IPCC (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 5. Disponível em <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>, acesso em abril 2021.
- Mendes, M. R., Aramaki, T., e Hanaki, K. – *Comparação do impacto ambiental da incineração e aterro na cidade de São Paulo conforme determinado pela LCA*. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 41, Issue 1, p. 47-63, April, 2004.

Menezes, R. A., Gerlach, J. L. e Menezes, M. A. – Estágio atual da incineração no Brasil. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública, VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 3 a 7 de abril de 2000, Parque Barigui – Curitiba. Disponível em <http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm> . Acesso em maio de 2021.

Nascimento, M. C.; Freire, E. P.; Dantas, F. A. S; Giansante, M. B. – Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24 n. 1, jan/fev 2019, p. 143-155. DOI: 10.1590/S1413-41522019171125.

OLIVEIRA, A. R. - *Avaliação do Ciclo de Vida aplicada na gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de caso do Distrito Federal*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p., 2019.

Reichert, G. A. – *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. UFRGS, IPH. Tese de Doutorado, 276f., 2013.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2019*. Brasília: SNS/MDR, 2020. 244p.

Teixeira, M. C., e Pinheiro, R. J. B. *Avaliação e previsão de recalques nos aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 21, mar/abr 2019, p. 345-354. DOI: 10.1590/S1413-41522018148318

União Europeia. Regulamento (EU) 2020/852 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de junho de 2020 relativo ao estabelecimento de um regime para a promoção do investimento sustentável, e que altera o Regulamento (EU) 2019/2088.

UNFCCC (2006). Projeto: Central de Resíduos do Recreio – Projeto de gás de aterro sanitário. Disponível em <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1158844635.31/view> . Acesso em março, 2021.

UNFCCC (2009) *Project Activities, 2009*. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/Projects/index.html> , acesso em dezembro de 2020.

UNFCCC (2021) – United Nations Framework Convention on Climate Changes: Disponível em <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>. Acesso em maio de 2021.

Xin, C.; Zhang, T.; Tsai, S-B; Zhai, Y-M; Wang, J. – *An empirical study on Greenhouse Gas Emission Calculations Under Different Municipal Solid Waste Management Strategies*. Applied Science, v. 10, 1673, 2020. Doi: 10.3390/app10051673.

Zero Waste: https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/edd/2019/09/ZWE_Policy-briefing_The-impact-of-Waste-to-Energy-incineration-on-Climate.pdf. Acesso em março de 2021.