

Comparação entre tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e balanço de emissões de gases de efeito estufa no município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Comparison between energy recovery technologies for municipal solid waste and greenhouse gas emissions balance in the city of Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Giuseppe Cernicchiaro Palermo^{1*} , David Alves Castelo Branco¹ , Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas¹ 

RESUMO

O presente estudo analisou o potencial de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e o balanço de emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultante no município do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, com base em três cenários tecnológicos alternativos. Os potenciais de geração foram calculados para a recuperação de gás de lixo (GDL) em 363,98 GWheano¹ e 0,181 MWhe.t¹, para a biodigestão anaeróbica em 367,27 GWheano¹ e 0,247 MWhe.t¹, e para a incineração em 1139,33 GWheano¹ e 0,459 MWhe.t¹. Os indicadores de intensidade de carbono mostram que, ao se considerar somente as emissões de GEE de combustão, a recuperação de GDL e a biodigestão anaeróbica apresentam os menores valores (7,488.10⁻⁴ tCO₂eq.MWhe⁻¹), enquanto a incineração apresenta o valor de 1,248 tCO₂eq.MWhe⁻¹. Por outro lado, ao se considerar também as emissões de aterro associadas, os indicadores dos dois primeiros cenários correspondem a 8,191 e 3,552 tCO₂eq.MWhe⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; recuperação energética; gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The present study analyzes the energy recovery potential of municipal solid waste (MSW) and the resulting greenhouse gas (GHG) emission balance in the city of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, based on three alternative technological scenarios. The generation potentials were calculated for waste gas recovery (WGR) to be 363.98 GWhe.year¹ and 0.181 MWhe.t¹, 367.27 GWhe.year¹ and 0.247 MWhe.t¹ for anaerobic biodigestion, and 1139.33 GWhe.year¹ and 0.459 MWhe.t¹ for incineration. Carbon intensity indicators show that, when only considering GHG emissions from the combustion process, WGR recovery and anaerobic biodigestion present the lowest values, of 7.488.10⁻⁴ tCO₂eq.MWhe⁻¹, while the value for incineration corresponds to 1.248 tCO₂eq.MWhe⁻¹. On the other hand, when considering associated landfill GHG emissions, the indicators in the first two scenarios correspond to 8.191 and 3.552 tCO₂eq.MWhe⁻¹, respectively.

Keywords: municipal solid waste; energy recovery; greenhouse gas.

INTRODUÇÃO

A temática da gestão sustentável dos resíduos sólidos urbanos (RSU) nunca foi tão evidente no panorama nacional, devendo-se, em grande parte, à identificação dos impactos ambientais derivados da ingerência desses resíduos e dos desafios encontrados ao longo de todas as etapas do processo de gestão adequada deles. O tema ficou ainda mais evidente após a aprovação da Lei nº 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que, entre outros, define e hierarquiza as destinações ambientalmente adequadas a serem aplicadas aos RSU, em seu artigo 9º (BRASIL, 2010). Destaca-se que tal priorização está alinhada com

aquela posta em prática pelos países europeus (Figura 1), por meio da Diretiva-Quadro sobre Resíduos da União Europeia (UE), conforme observado pelo Ministério do Meio Ambiente, Alimento e Assuntos Rurais do governo da Inglaterra (Department for Environmental Food & Rural Affairs – DEFRA) (DEFRA, 2014).

Apesar das inovações introduzidas pela PNRS, a disposição em aterros sanitários — a opção menos indicada pela hierarquia definida na referida política — é o principal destino dos resíduos sólidos no Brasil — 58,4% dos RSU coletados no país (ABRELPE, 2017). No entanto, a dificuldade de se encontrar locais apropriados para sua construção

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

*Autor correspondente: giuseppecp@gmail.com

Recebido: 07/03/2018 - Aceito: 12/04/2019 - Reg. ABES: 192384

nas grandes cidades do país já foi identificada como um obstáculo de grande importância (SOUZA *et al.*, 2014).

Esse contexto, associado a um cenário de crise econômica e energética recente, porém incipiente, no país, resultado da falta de capacidade de planejamento e gestão dos governos atuais e do passado recente, é um estímulo à busca por alternativas integradas. Estas precisam contemplar não apenas a solução de problemas, mas devem identificar e lançar mão das oportunidades de desenvolvimento tecnológico que se apresentam. Uma dessas opções corresponde ao aproveitamento energético dos RSU, que está incluído como alternativa de destinação final ambientalmente adequada de resíduos na PNRS, no 1º parágrafo do já mencionado artigo 9º (ECOLOGUS, 2013; SANTOS; OLIVEIRA; CORREA, 2013; BRASIL, 2010).

Destaca-se ainda que, além dos claros benefícios ambientais, sanitários e sociais derivados do aproveitamento energético dos resíduos sólidos, este está baseado em tecnologias maduras, sendo dos anos 1980 as primeiras termelétricas alimentadas por RSU, implantadas nos Estados Unidos, na Europa e no Japão (EPE, 2008). Santos, Oliveira e Correa (2013) destacam que, além da captura e recuperação energética do gás de lixo (GDL) gerado em aterros, são duas as tecnologias de aproveitamento energético de resíduos já consideradas comercialmente viáveis, também para o cenário nacional: a incineração e a biodigestão anaeróbica.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi analisar o potencial de recuperação energética a partir dos RSU e o balanço de emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultante no município do Rio de Janeiro, com base em três cenários tecnológicos alternativos (queima de GDL com recuperação energética, biodigestão anaeróbica e incineração), de forma a quantificar os potenciais não aproveitados de geração de energia a partir de dados referentes ao período de 2006 a 2014.

METODOLOGIA

Massa de resíduos

As massas de RSU (domésticos e públicos) coletados utilizadas no presente trabalho são aquelas apresentadas pelo Instituto Pereira Passos da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (IPP/PCRJ, 2015) para o período de 2006 a 2014 (Anexo 1).

Para a construção dos cenários, foi necessário desagregar os resíduos coletados em tipologias específicas. Para tal, foram utilizadas as composições gravimétricas dos resíduos coletados também apresentadas pelo IPP/PCRJ (2015), separadamente para cada área de planejamento e por ano, para o período 2006 a 2014. Parte das tipologias apresentadas não correspondia àquelas estabelecidas na literatura utilizada como referência (THEMELIS; ULLOA, 2007; EPE, 2008; LINO; ISMAIL, 2011; USEPA, 2017). Dessa forma, elas foram atribuídas a outras tipologias, de maneira a não serem desconsideradas: folhas, flores e coco foram considerados matéria orgânica e osso; vela/parafina e eletroeletrônico, inerte total. As demais tipologias foram consideradas em suas próprias categorias. Os valores estabelecidos para a composição gravimétrica ajustada são apresentados no Anexo 2.

As massas de RSU por tipologia para cada área de planejamento (AP) (Anexo 3) foram calculadas a partir da multiplicação da massa total de RSU (Anexo 1) pelos percentuais da composição gravimétrica ajustada (Anexo 2). A partir das massas de RSU por tipologia coletadas no município, foram aplicadas as metodologias para cálculo dos potenciais de geração de energia térmica e elétrica e do balanço de emissões de GEE de três cenários distintos.

Considerou-se, no presente trabalho, que os RSU gerados no município do Rio de Janeiro são enviados para aterro em que já há captura

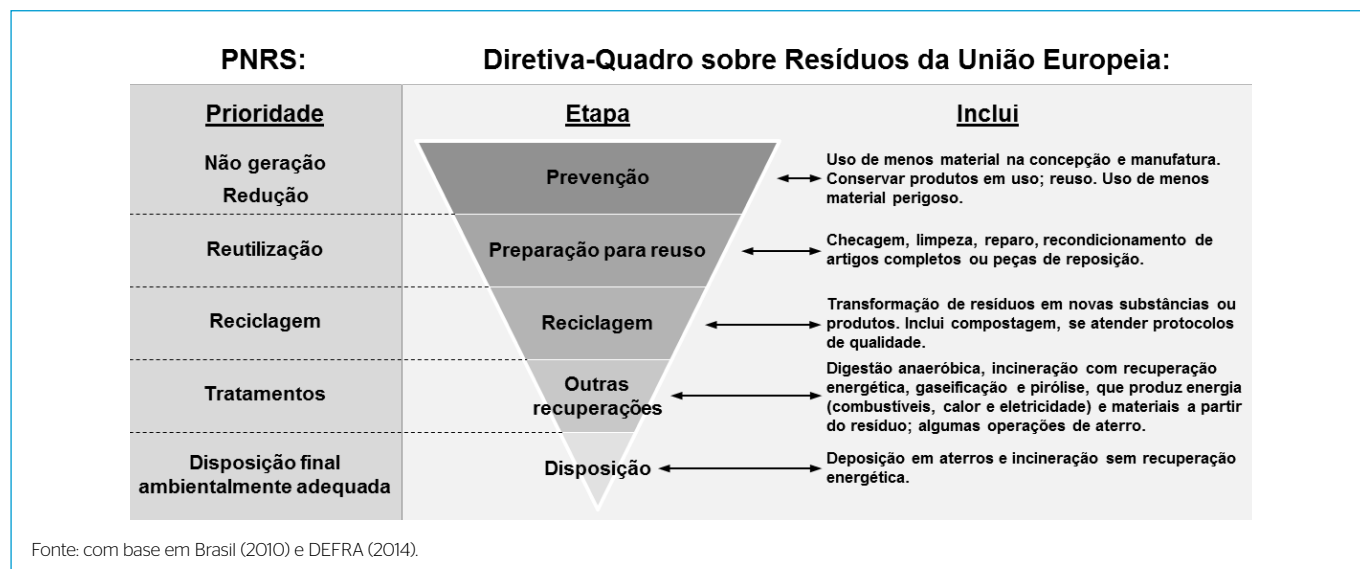


Figura 1 - Hierarquia de prioridade para o gerenciamento de resíduos sólidos, segundo a Diretiva-Quadro sobre Resíduos da União Europeia, comparada com a hierarquia estabelecida na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

e queima do GDL produzido em flares, sem recuperação energética (PCRJ, 2013; CICLUS, 2017). Todos os resultados encontrados no presente estudo são apresentados na forma de indicadores anuais ou por unidade de interesse (tonelada ou energia gerada), em razão da grande quantidade de dados utilizados e produzidos.

Potenciais de geração energética

Conforme já mencionado, considerou-se que a situação atual dos resíduos do município do Rio de Janeiro não inclui a geração de energia. Dessa forma, toda a energia gerada a partir dos cenários construídos pode ser considerada um potencial adicional para o município.

Queima de gás de lixo com recuperação energética

Para se determinar o potencial de geração de energia a partir da queima de GDL foram utilizados os procedimentos de cálculo do metano gerado apresentados por Pipatti *et al.* (2006b), conforme Equação 1.

$$\text{CH}_4 \text{ gerado (t)} = \sum(W_i * \text{DOC}_i) * \text{DOC}_f * \text{MCF} * F * 16/12 \quad (1)$$

Em que

W_i = massa de RSU, por tipologia de resíduo (t);

DOC_i = carbono passível de degradação orgânica (não fóssil), por tipologia de resíduo ($\text{t C} \cdot \text{t}^{-1}$ resíduo);

DOC_f = fração do DOC_i que realmente se degrada (fração);

MCF = fator de correção de metano (fração);

F = teor de metano (CH_4) no gás de aterro (fração);

16/12 = razão entre os pesos moleculares de CH_4 e de C.

Os valores de DOC_i utilizados foram aqueles sugeridos na referida metodologia para cada tipologia de resíduo. O fator de correção de CH_4 considerado foi aquele recomendado para vazadouros do tipo gerenciado e em que predominam condições de anaerobiose, e os valores de DOC_f e F considerados foram aqueles indicados como padrão (*default*).

A metodologia sugere, ainda, a aplicação de um ajuste da Equação 1 apresentada para simulação de modelo de decaimento de primeira ordem, o qual distribui as emissões das massas de resíduos ao longo do tempo (anos). Destaca-se, entretanto, que esse ajuste não foi realizado no presente trabalho para fins de simplificação e de viabilização de comparações de potenciais de geração energética (e de balanço de emissões de GEE, tratadas adiante), realizadas a partir do estabelecimento de indicadores anuais.

A eficiência de captura do CH_4 (gás de aterro) utilizada foi aquela considerada no Documento de Concepção de Projeto do Aterro Nova Gerar, de 40% (UNFCCC, 2014). A massa específica (ρ) considerada para o CH_4 foi de $0,714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e o poder calorífico inferior (PCI) considerado foi de $9,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$ (SOUZA *et al.*, 2014).

Com relação ao potencial de geração de energia elétrica a partir da queima do biogás gerado por esse processo, considerou-se a utilização de um conjunto motogerador, composto de um motor de combustão interna do Ciclo Otto acoplado a um gerador elétrico. Essa tecnologia corresponde àquela indicada por Tolmasquim (2016) para geração de eletricidade a partir de gás natural, que também pode gerar energia a partir do biogás, inclusive de resíduos urbanos. Foi considerada eficiência de geração de eletricidade em motogerador (η) de 25%, em consonância com outros trabalhos disponíveis na literatura (PALERMO; D'AVIGNON; FREITAS, 2014; SOUZA *et al.*, 2014).

Biodigestão anaeróbica

De acordo com a literatura disponível, o CH_4 está presente no biogás produzido por meio da biodigestão anaeróbica em proporção da ordem de 50% (EPE, 2008; USEPA, 2017), sendo gerado a uma taxa que varia de 80 a 120 m^3 de CH_4 por tonelada de resíduo orgânico, em biodigestores industriais (THEMELIS; ULLOA, 2007; LINO; ISMAIL, 2011). Dessa forma, considerou-se, no presente trabalho, uma taxa média de geração de CH_4 de 100 m^3 por tonelada de resíduo orgânico. O PCI considerado para o CH_4 foi de $9,9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$ (SOUZA *et al.*, 2014).

Com relação ao potencial de geração de energia elétrica a partir da queima do biogás gerado por esse processo, foram utilizadas as mesmas premissas do cenário anterior. A respeito da massa contabilizada para o cenário de biodigestão, considerou-se apenas a parcela de matéria orgânica nos resíduos, calculada a partir dos dados disponibilizados no Anexo 3. Assim, adotou-se a premissa de segregação da matéria orgânica pós-coleta indiferenciada dos resíduos sólidos para posterior aplicação do processo de biodigestão.

Sabe-se, no entanto, que nem sempre é possível separar efetivamente os resíduos orgânicos das demais tipologias de resíduos, seja pelas características da disposição para a coleta dos primeiros (misturados com materiais não digeríveis), seja pela carência de triagem adequada, acarretando pequena parcela de perda. Entretanto, não foi encontrado na literatura estudo que calculasse tal percentual de perda, o qual não foi, então, considerado no presente trabalho.

Incineração

Neste estudo, foram utilizados os poderes caloríficos inferiores (PCI) dos componentes normalmente encontrados nos RSU apresentados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008). Inglezakis *et al.* (2015) afirmam que as tecnologias atuais de incineração de resíduos apresentam eficiências energéticas entre 14 e 28%, quando utilizadas para geração elétrica exclusivamente, por meio do ciclo Rankine (turbina a vapor). Utilizou-se, de forma conservadora, o menor valor da faixa de eficiência elétrica apresentada pelos referidos autores, de 14%.

Balances de emissões de gases de efeito estufa

Conforme já mencionado, considerou-se que a situação atual dos resíduos do município do Rio de Janeiro não inclui a geração de energia. Dessa forma, foram identificadas duas fontes distintas de emissão de GEE: as derivadas do processo de combustão realizado em flares e as derivadas da parcela não capturada do gás de aterro produzido, considerando a também já mencionada eficiência de captura utilizada, de 40%.

As emissões da primeira fonte identificada (queima em flares) foram determinadas a partir da aplicação da Equação 1, da eficiência de captura (40%), da massa específica e do PCI do CH_4 ($0,714 \text{ kg.m}^{-3}$ e $9,9 \text{ kWh.m}^{-3}$, respectivamente), além dos fatores de emissão de CH_4 e de N_2O para a combustão estacionária utilizando a biomassa gasosa na forma de gás de aterro como combustível, sugeridos pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), de $1,0 \text{ kg CH}_4.\text{TJ}^{-1}$ e $0,1 \text{ kg N}_2\text{O.TJ}^{-1}$ (GÓMEZ *et al.*, 2006). As emissões de CO_2 desse processo de combustão não foram consideradas para o balanço, visto se tratar de emissões de origem biogênica.

Já as emissões oriundas da segunda fonte identificada (parcela não capturada do gás de aterro produzido) foram calculadas a partir da Equação 2, adaptada de Pipatti *et al.* (2006b).

$$\text{CH}_4 \text{ emitido}_{\text{GDL}} = \text{CH}_4 \text{ gerado} * (1 - \text{Eff}) * (1 - \text{OX}) \quad (2)$$

Em que

GDL = gás de lixo;

CH_4 gerado = quantidade de CH_4 gerado a partir da decomposição de RSU (t);

Eff = eficiência de captura do gás de aterro (%);

OX = fator de oxidação (fração).

A quantidade de CH_4 gerado a partir da decomposição de RSU é obtida a partir da Equação 1, enquanto a eficiência de captura considerada foi aquela já mencionada, de 40%. O fator de oxidação utilizado foi aquele sugerido pelo IPCC para vazadouros do tipo gerenciado e coberto com material que oxida CH_4 , equivalente a 0,1.

Para conversão das emissões de CH_4 e N_2O em CO_2 equivalentes (CO_2eq), foram considerados os Potenciais de Aquecimento Global (GWP) para um horizonte de cem anos, apresentados no segundo relatório de avaliação (SAR) do IPCC (1995), de 21 e 310, respectivamente. Apesar de haver um relatório de avaliação mais recente (AR5), com os valores atualizados para 28 e 265, respectivamente (IPCC, 2013), optou-se por utilizar os valores de GWP sugeridos para inventários de emissões de GEE de países não listados no Anexo 1 do Protocolo de Quioto (21 e 310), que é o caso do Brasil (BRASIL, 2016).

Queima de gás de lixo com recuperação energética

Foram identificadas duas fontes distintas de emissão de GEE e uma fonte de redução por deslocamento de demanda: emissões derivadas do processo de combustão do gás de aterro capturado (com recuperação energética), emissões derivadas da parcela não capturada do gás de aterro produzido e redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid, respectivamente. As emissões das fontes identificadas foram determinadas de forma semelhante ao descrito para a situação atual.

Já a redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid foi determinada a partir dos potenciais anuais de geração de energia elétrica, calculados para esse cenário conforme já apresentado, e da utilização dos fatores médios anuais de emissão de CO_2 de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil, apresentados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) (BRASIL, 2017).

Biodigestão anaeróbica

Neste estudo, foram identificadas duas fontes distintas de emissão de GEE e uma fonte de redução por deslocamento de demanda para esse cenário: emissões derivadas do processo de combustão com recuperação energética do biogás produzido, emissões derivadas do gás de aterro gerado e redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid, respectivamente.

As emissões da primeira fonte identificada foram determinadas a partir das quantidades potenciais de biogás e de CH_4 passíveis de serem geradas pela segregação e posterior biodigestão anaeróbica dos resíduos orgânicos (somente matéria orgânica), calculadas de acordo com as informações previamente apresentadas. O presente trabalho considera a segregação da matéria orgânica pós-coleta indiferenciada dos resíduos sólidos para posterior aplicação do processo de biodigestão. Não são, no entanto, contabilizadas as emissões de GEE associadas a esse processo de segregação.

Utilizaram-se também os fatores de emissão de CH_4 e de N_2O para a combustão estacionária utilizando a biomassa gasosa na forma de biogás como combustível, sugeridos pelo IPCC, de $1,0 \text{ kg CH}_4.\text{TJ}^{-1}$ e $0,1 \text{ kg N}_2\text{O.TJ}^{-1}$ (GÓMEZ *et al.*, 2006). As emissões de CO_2 desse processo de combustão não foram consideradas para o balanço, dadas as suas características (origem biogênica).

Já as emissões oriundas da segunda fonte identificada (derivadas do gás de aterro gerado) foram calculadas a partir das Equações 1 e 2, além dos fatores apresentados. Entretanto, duas alterações se fizeram necessárias para a adequada representação do cenário: excluiu-se a parcela correspondente à matéria orgânica dos resíduos considerados para a geração de gás de aterro e assumiu-se a não captura do gás de aterro (emissão integral para a atmosfera), visto que a maioria dos resíduos responsáveis pela produção de gás de aterro seria retirada antes

da disposição. Essa é uma alteração mais conservadora, considerada pelos autores do presente trabalho como forma de se evitar subestimar as emissões resultantes desse cenário.

A redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid foi determinada a partir dos potenciais anuais de geração de energia elétrica, calculados para esse cenário conforme já apresentado, e da utilização dos fatores médios anuais de emissão de CO₂ de energia elétrica do SIN do Brasil (BRASIL, 2017).

Incineração

Para o cenário de incineração dos resíduos coletados no município do Rio de Janeiro, foram identificadas uma fonte de emissão de GEE e uma fonte de redução: emissões derivadas do processo de incineração com recuperação energética da massa de resíduos coletada e redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid, respectivamente. As emissões da fonte identificada foram determinadas a partir das massas de todas as tipologias de RSU coletados e da Equação 3 (GUENDEHOU *et al.*, 2006).

$$\text{CO}_2 \text{ emitido} = \Sigma(W_i * dm_i * CF_i * FCF_i) * OF * 44/12 \quad (3)$$

Em que:

W_i = massa de RSU, por tipologia de resíduo (t);

dm_i = teor de matéria seca no resíduo (fração);

CF_i = fração de carbono total na matéria seca (fração);

FCF_i = fração de carbono fóssil no carbono total (fração);

OF = fator de oxidação (%);

44/12 = razão entre os pesos moleculares de CO₂ e de C.

Os valores de dm_i , CF_i e FCF_i utilizados foram aqueles sugeridos pela referida metodologia para cada tipologia de resíduo. O fator de oxidação considerado foi aquele recomendado para incineração.

A redução de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid, por sua vez, foi determinada a partir dos potenciais anuais de geração de energia elétrica, calculados para esse cenário conforme já apresentado, e da utilização dos fatores médios anuais de emissão de CO₂ de energia elétrica do SIN do Brasil (BRASIL, 2017).

A Figura 2 apresenta um fluxograma contendo, de forma resumida, todas as etapas de pesquisa desenvolvidas neste estudo.

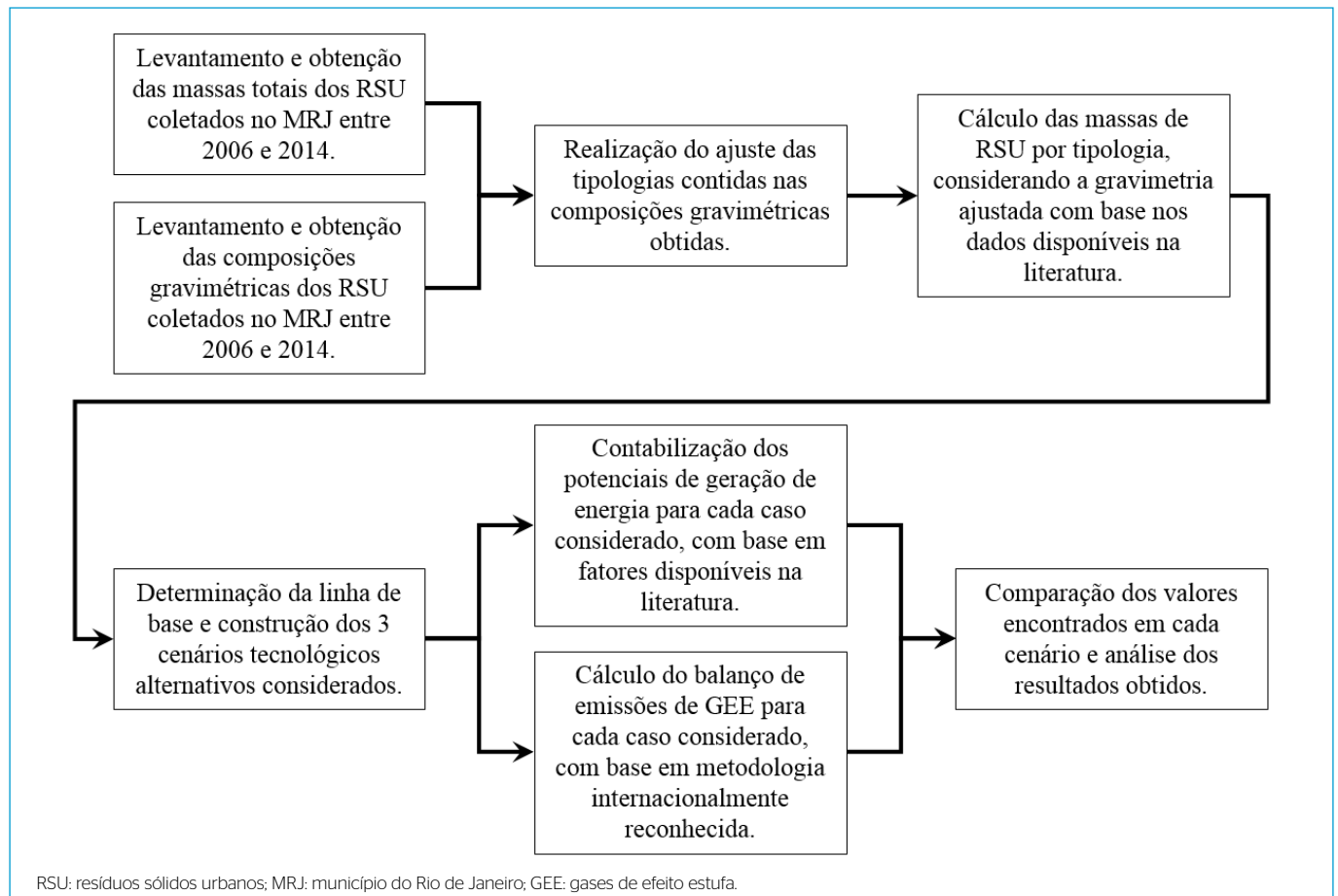


Figura 2 - Fluxograma com as principais etapas de pesquisa desenvolvidas no presente trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do balanço de emissões de GEE derivadas da queima em flares do gás de aterro (sem recuperação energética) no período considerado são apresentados na Tabela 1.

Queima de gás de lixo com recuperação energética

Os resultados para o período considerado são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 1 - Balanço de emissões de gases de efeito estufa da situação atual dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, derivadas da queima em flares de gás de lixo (GDL) (sem recuperação energética) no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Flaring de GDL (sem recuperação energética)		Aterro sanitário (GDL não capturado)	Balanço
	(t CH ₄ .ano ⁻¹)	(t N ₂ O.ano ⁻¹)		
AP I	0,42	0,04	11.323,55	0,238
AP II	0,83	0,08	22.386,82	0,470
AP III	2,16	0,22	58.428,81	1,227
AP IV	0,72	0,07	19.571,65	0,411
AP V	1,39	0,14	37.766,43	0,793
Total	5,52	0,55	149.477,26	3,139

AP: área de planejamento.

Tabela 2 - Potenciais calorífico (GWh.ano⁻¹) e de geração de energia elétrica (GWhe.ano⁻¹) do gás de lixo (GDL) com recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Potencial calorífico do GDL (GWh.ano ⁻¹)	Potencial de geração de energia elétrica a partir do GDL (GWhe.ano ⁻¹)
AP I	121,00	30,25
AP II	226,63	56,66
AP III	578,62	144,66
AP IV	180,94	45,24
AP V	348,71	87,18
Total	1.455,91	363,98

AP: área de planejamento.

Tabela 3 - Balanço de emissões de gases de efeito estufa derivadas da queima de gás de lixo (GDL) com recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Queima de GDL (com recuperação energética)		Aterro sanitário (GDL não capturado)	Deslocamento de demanda do grid	Balanço
	(t CH ₄ .ano ⁻¹)	(t N ₂ O.ano ⁻¹)			
AP I	0,42	0,04	11.323,55	-1.625,62	0,236
AP II	0,83	0,08	22.386,82	-3.218,60	0,467
AP III	2,16	0,22	58.428,81	-8.360,46	1,219
AP IV	0,72	0,07	19.571,65	-2.990,01	0,408
AP V	1,39	0,14	37.766,43	-5.598,62	0,788
Total	5,52	0,55	149.477,26	-21.793,30	3,118

AP: área de planejamento.

Biodigestão anaeróbica

Os resultados para o período considerado são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Incineração

O PCI médio dos resíduos coletados no município corresponde a 2.570 kcal.kg⁻¹, tornando a incineração tecnicamente viável sem a necessidade de etapa prévia de pré-tratamento (EPE, 2008; 2014). Os resultados para o período considerado são apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Análise dos resultados

Segundo dados do IPP/PCRJ (2015), o consumo elétrico no ano de 2014 foi de 18,1 TWh, dos quais 6,2 TWh são relativos ao setor residencial. Os indicadores anuais sugerem que a queima de GDL com recuperação energética ou a digestão anaeróbica seriam capazes de suprir 6% da demanda residencial, ou 2% da demanda total, do município. Por outro lado, sugerem que a incineração seria capaz de suprir 18,5% da demanda residencial, ou 6,3% da demanda total, do município, mostrando-se a opção mais vantajosa sob a ótica da geração elétrica.

Os potenciais de geração elétrica por tonelada de resíduo das três tecnologias consideradas neste trabalho sugerem que a incineração apresenta indicador mais elevado do que a digestão anaeróbica, que, por sua vez, é superior ao de queima de GDL com recuperação energética: 0,459; 0,247; e 0,181 MWhe.t⁻¹, respectivamente.

É importante observar ainda que, no caso do município do Rio de Janeiro, a reciclagem de parcela expressiva dos resíduos recicláveis com potencial energético não inviabiliza a incineração do material restante, visto que:

- Com a reciclagem de até 55% do total de recicláveis, o PCI da mistura permanece igual ou superior a 2.000 kcal.kg⁻¹. A incineração dos RSU coletados no município permanece, assim, tecnicamente viável, sem a necessidade de nenhum tipo de pré-tratamento, segundo a EPE (2008; 2014);
- Com a reciclagem de até 80% do total de recicláveis, o PCI da mistura permanece entre 2.000 e 1.675 kcal.kg⁻¹. A incineração dos RSU coletados no município ainda é tecnicamente viável, mas com

a necessidade de algum tipo de pré-tratamento capaz de elevar o poder calorífico da mistura de resíduos, segundo a EPE (2008; 2014).

Quando comparados com outros indicadores de potencial de geração de energia a partir de RSU disponíveis na literatura, pode-se afirmar que os valores encontrados no presente estudo estão de acordo com aqueles apresentados pelo Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG, 2009). Segundo ele, os valores associados à incineração convencional estão situados entre 0,4 e 0,6 MWh.e.t⁻¹ — intervalo que contém o valor calculado neste estudo de caso para a referida tecnologia (0,459 MWh.e.t⁻¹) —, enquanto os valores associados à recuperação do gás de aterro correspondem ao intervalo 0,1–0,2 MWh.e.t⁻¹ — que contém o valor encontrado no presente trabalho para a referida rota tecnológica (0,181 MWh.e.t⁻¹). Um perfil semelhante é observado para os valores associados à digestão anaeróbica, cuja faixa apresentada pelo referido trabalho corresponde a 0,1–0,3 MWh.e.t⁻¹ — intervalo que contém o valor calculado para o estudo de caso considerado (0,247 MWh.e.t⁻¹).

Já a partir da análise dos balanços de emissões de GEE da situação atual dos RSU coletados no município do Rio de Janeiro e dos três cenários considerados, fica claro que a situação atual apresenta os indicadores mais elevados, seguida pela queima de GDL com recuperação

energética, pela incineração e pela biodigestão anaeróbica, com 3,14, 3,12, 1,38 e 1,44 Mt CO₂eq.ano⁻¹, respectivamente.

É importante observar que o cenário de incineração corresponde àquele com o segundo menor balanço de emissões, atrás apenas do cenário de biodigestão anaeróbica. Ao se analisar os balanços de emissões dos cenários considerados, pode-se concluir que a principal explicação para os resultados observados são os tipos de gases emitidos em cada cenário. O CH₄, GEE emitido em maior quantidade na situação atual e no cenário de queima de GDL com recuperação energética (os maiores balanços calculados), recebe, por meio da atribuição do GWP, um peso muito superior ao CO₂, GEE emitido em maior quantidade no cenário de incineração.

A utilização de métricas diferentes pode alterar os padrões observados: a ponderação considerando os GWP apresentados no AR5 (IPCC, 2013) aumentaria ainda mais as emissões de CH₄ em termos de CO₂ equivalente, enquanto a ponderação pelos Global Temperature Change Potential – GTP (quatro para o CH₄), também apresentados no AR5, reduziria-nas drasticamente.

A Tabela 8 apresenta os indicadores de carbono para os cenários avaliados, os quais consideram as fontes de emissões exclusivamente de combustão e para os totais. É importante destacar que as reduções de emissões por deslocamento da demanda de energia do grid nacional não foram consideradas para a elaboração dos referidos indicadores.

Tabela 4 – Potenciais calorífico (GWh.ano⁻¹) e de geração de energia elétrica (GWhe.ano⁻¹) derivados da biodigestão anaeróbica da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Potencial calorífico (GWh.ano ⁻¹)	Potencial de geração de energia elétrica (GWhe.ano ⁻¹)
AP I	119,05	29,76
AP II	214,79	53,70
AP III	587,22	146,81
AP IV	178,90	44,73
AP V	369,11	92,28
Total	1.469,08	367,27

AP: área de planejamento.

Tabela 6 – Potenciais calorífico (GWh.ano⁻¹) e de geração de energia elétrica (GWhe.ano⁻¹) derivados da incineração dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Potencial calorífico (GWh.ano ⁻¹)	Potencial de geração de energia elétrica (GWhe.ano ⁻¹)
AP I	691,78	96,85
AP II	1.320,76	184,91
AP III	3.221,25	450,98
AP IV	1.051,27	147,18
AP V	1.853,00	259,42
Total	8.138,07	1.139,33

AP: área de planejamento.

Tabela 5 – Balanço de emissões de gases de efeito estufa derivadas da biodigestão anaeróbica da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Biodigestão anaeróbica		Aterro sanitário (GDL não capturado)	Deslocamento de demanda do grid	Balanço
	(t CH ₄ .ano ⁻¹)	(t N ₂ O.ano ⁻¹)	(t CH ₄ .ano ⁻¹)	(t CO ₂ .ano ⁻¹)	(Mt CO ₂ eq.ano ⁻¹)
AP I	0,43	0,04	5.113,07	-1.657,18	0,106
AP II	0,81	0,08	11.211,13	-3.141,69	0,232
AP III	2,23	0,22	26.026,19	-8.626,09	0,538
AP IV	0,73	0,07	9.269,53	-2.972,29	0,192
AP V	1,49	0,15	15.215,10	-5.933,38	0,314
Total	5,69	0,57	66.835,02	-22.330,64	1,382

AP: área de planejamento; GDL: gás de lixo.

Com os valores da geração elétrica e das emissões de GEE dela derivada por combustível no Brasil, apresentados pela EPE (2016), é possível calcular os indicadores de intensidade de carbono para o caso nacional (Tabela 9). Ao compará-los com os valores calculados no presente trabalho, é possível observar que as intensidades dos cenários nos quais há queima de metano (biogás) são muito inferiores a de todos os combustíveis de origem fóssil, enquanto a incineração é superior.

Por outro lado, ao se considerar as emissões de aterro sanitário associadas aos dois primeiros cenários, observa-se que, mesmo a partir da utilização de um combustível de origem não fóssil, apresentam intensidades de carbono superiores às dos combustíveis fósseis tradicionalmente utilizados para geração elétrica. Vale destacar, ainda, que a literatura aponta que, sob a ótica da Avaliação de Ciclo de Vida, o uso dos combustíveis fósseis apresenta intensidades de carbono ainda maiores, em razão de etapas anteriores adicionais, as quais também utilizam recursos fósseis, como a perfuração, a mineração, o refino, entre outras (PSOMOPOULOS; BOURKA; THEMELIS, 2009; BURNHAM *et al.*, 2012; WHITAKER *et al.*, 2012; CARNEIRO *et al.*, 2017). Nesse sentido, a incineração dos RSU (1,248 t CO₂eq.MWhe⁻¹) pode ser uma alternativa interessante, especialmente em substituição à utilização de carvão mineral (1,055 t CO₂eq.MWhe⁻¹), caso a inclusão das emissões do seu ciclo de vida resulte em intensidades de carbono superiores àquelas calculadas para a incineração dos RSU.

Ao se analisar as limitações do presente estudo, destacam-se as simplificações realizadas para construção dos três cenários tecnológicos

alternativos, derivadas da desconsideração de algumas etapas necessárias para a implantação das tecnologias consideradas, bem como de suas emissões de GEE associadas. No cenário de queima de GDL com recuperação energética, assumiu-se a instalação imediata do conjunto motogerador e não foram contabilizadas as emissões derivadas de sua produção, transporte, instalação e manutenção. Já para o cenário de biodigestão anaeróbica, não foram consideradas as etapas referentes à segregação ou à coleta segregada da matéria orgânica, as quais podem ser essenciais para que o processo atinja eficiência adequada, bem como suas consequentes emissões de GEE. Também não foram incluídos no escopo deste trabalho a geração e os consequentes transporte, tratamento e destinação final dos subprodutos do processo de incineração, como escória, cinzas e lodo, bem como as emissões adicionais de GEE resultantes. Sugere-se que a avaliação dessas etapas seja contemplada em estudos futuros, de forma que seus escopos se aproximem daqueles usualmente considerados na aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida.

Tabela 9 - Indicadores de intensidade de carbono para a geração de energia elétrica (t CO₂eq.MWhe⁻¹) no Brasil, por tipo de combustível utilizado, para o ano de 2015.

Tipo de combustível	Emissões da geração elétrica (t CO ₂ .MWhe ⁻¹)
Gás natural	0,396
Derivados de petróleo*	0,846
Carvão mineral	1,055

*Óleo diesel e óleo combustível.
Fonte: com base em EPE (2016).

Tabela 7 - Balanço de emissões de gases de efeito estufa derivadas da incineração dos resíduos sólidos urbanos coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Incineração			Deslocamento de demanda do grid (t CO ₂ .ano ⁻¹)	Balanço (Mt CO ₂ eq.ano ⁻¹)
	(t CO ₂ .ano ⁻¹)	(t CH ₄ .ano ⁻¹)	(t N ₂ O.ano ⁻¹)		
AP I	112.369,42	71,35	9,51	-5.308,93	0,112
AP II	231.929,50	146,59	19,54	-10.840,06	0,230
AP III	565.820,33	363,58	48,48	-26.724,23	0,562
AP IV	207.316,04	128,13	17,08	-10.083,99	0,205
AP V	331.159,65	221,48	29,53	-16.595,58	0,328
Total	1.448.594,93	931,13	124,15	-69.552,79	1,437

AP: área de planejamento.

Tabela 8 - Indicadores médios de intensidade de carbono para a geração potencial de energia elétrica (t CO₂eq.MWhe⁻¹) nos três cenários considerados para o município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Queima de GDL com recuperação energética		Biodigestão anaeróbica		Incineração
Combustão + aterro	Combustão	Combustão + aterro	Combustão	
(t CO ₂ eq.MWhe ⁻¹)				
8,191	7,488 × 10 ⁻⁴	3,552	7,488 × 10 ⁻⁴	1,248

GDL: gás de lixo.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo mostram que o potencial de aproveitamento dos RSU no município do Rio de Janeiro, à luz da recuperação energética, é de grande relevância, visto que a incineração é capaz de atender a mais de 18% da demanda elétrica residencial anual do município, com geração potencial de cerca de 1,14 TWh.ano⁻¹. Além disso, mostraram, também, que, mesmo considerando altas taxas de reciclagem (de até 80%), a incineração permanece tecnicamente viável, permitindo a instalação de coleta seletiva, cooperativa de catadores e/ou unidades de triagem de resíduos com essa finalidade.

Já o potencial de geração de energia a partir da combustão do biogás/biometano derivado da decomposição anaeróbica no aterro e da digestão anaeróbica de 0,36 e 0,37 TWh.ano⁻¹, respectivamente, apesar das menores capacidades de atendimento à demanda elétrica residencial do município, é também relevante, especialmente sob a ótica da complexidade tecnológica. O acoplamento de um conjunto motogerador no Centro de Tratamento de Resíduos Rio (CTR-Rio), onde a infraestrutura de captura do GDL já existe, é opção possível. Do mesmo modo, outra alternativa que poderia vir a ser explorada é a construção e a operação de biodigestores, mesmo considerando o funcionamento do conjunto motogerador para a combustão do produto gasoso derivado, podendo ter, inclusive, aplicações em escalas residenciais e/ou domiciliares.

Com relação ao balanço de emissões de GEE resultantes, os resultados encontrados no presente trabalho sugerem que a situação atual dos RSU do município do Rio de Janeiro corresponde àquela com as maiores emissões líquidas, de 3,14 Mt CO₂eq.ano⁻¹. O cenário mais vantajoso em termos de mitigação corresponde ao de biodigestão anaeróbica, seguido pela incineração e pela queima energética de GDL, com emissões de 1,38, 1,44 e 3,12 Mt CO₂eq.ano⁻¹, respectivamente. Apesar da alta intensidade de carbono da incineração dos RSU, essa tecnologia de geração elétrica pode ser uma alternativa importante, especialmente em um cenário de crise hídrica e energética no país, em que as usinas térmicas a combustíveis

fósseis (entre os quais, o carvão mineral) precisam ser constantemente ligadas para garantir a oferta de energia, diminuindo a participação das usinas hidrelétricas na matriz energética nacional.

Com relação às escalas de aplicação das tecnologias, a literatura sugere que as três avaliadas neste estudo de caso sejam viáveis. A queima de GDL com recuperação de energia corresponde a uma adaptação simples de um processo já existente, uma vez que tal queima é atualmente realizada em flares no CTR-Rio. Já a digestão anaeróbica é considerada globalmente viável, seja para biodigestores de pequena (< 7.500 t), média (7.500 a 30.000 t) ou grande escala (> 30.000 t) (GMI, 2016). Para grandes quantidades de resíduo orgânico gerado, acima das capacidades individuais dos biodigestores, a instalação de múltiplas unidades é uma opção. As usinas de incineração de resíduos, por sua vez, apresentam uma escala mínima viável, do ponto de vista econômico, da ordem de 40.000 t/ano, enquanto as maiores plantas possuem capacidades superiores a 1 milhão t/ano (ESWET, 2012). Essas capacidades são compatíveis com a média anual de resíduos urbanos gerados no município do Rio de Janeiro, de pouco mais de 2,5 milhões t/ano.

Apesar de os indicadores de geração de energia referentes à queima de GDL com recuperação energética (0,18 MWh.t⁻¹) e à digestão anaeróbica (0,25 MWh.t⁻¹) serem inferiores ao referente à incineração (0,46 MWh.t⁻¹), os primeiros são capazes de gerar um combustível passível de transporte (biogás), enquanto o último converte os resíduos diretamente em energia térmica, que deve ser aproveitada no local. Assim, deve-se avaliar a melhor forma de se atender a demanda energética: caso haja necessidade de produção de combustível gasoso, a produção de biogás é a melhor opção, mesmo produzindo menos energia por unidade de massa; caso haja maior necessidade de produção de energia térmica e/ou eletricidade, a incineração é a alternativa mais adequada. No atual contexto de crise energética, no qual as tarifas da energia elétrica para o consumo residencial estão em constante aumento, os resultados do presente trabalho sugerem que a incineração deva ser a preferida.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). (2017) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016*. São Paulo: ABRELPE. 64 p. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>. Acesso em: 3 set. 2018.

BRASIL. (2010) *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Subchefia para Assuntos Jurídicos, Presidência da República, Brasília.

BRASIL. (2016) Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. v. 3. 336 p.

BRASIL. (2017) Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Fator Médio - Inventários Corporativos*. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 25 set. 2017.

BURNHAM, A.; HAN, J.; CLARK, C.E.; WANG, M.; DUNN, J.B.; PALOU-RIVERA, I. (2012) Life-Cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum. *Environmental Science and Technology*, v. 46, n. 2, p. 619-627. <https://doi.org/10.1021/es201942m>

- CARNEIRO, M.L.N.M.; PRADELLE, F.; BRAGA, S.L.; GOMES, M.S.P.; MARTINS, A.R.F.A.; TURKOVICS, F.; PRADELLE, R.N.C. (2017) Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 73, p. 632-653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.152>
- CICLUS AMBIENTAL DO BRASIL S.A (CICLUS). (2017) *Centro de Tratamento de Resíduos (CTR Rio)*. Rio de Janeiro: CICLUS. Disponível em: <http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus_ctr.php>. Acesso em: 24 out. 2017.
- DEPARTMENT FOR ENVIRONMENTAL FOOD & RURAL AFFAIRS (DEFRA). (2014) *Energy from waste: A guide to the debate*. Londres: DEFRA. 70 p.
- ECOLOGUS. (2013) Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos e Aspectos Ambientais e Sociais: Avaliação de Oportunidades de Recuperação Energética. In: ECOLOGUS. *Consultoria e Assessoria Técnica de Engenharia à SEA para Elaboração do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS)*. Rio de Janeiro: Secretaria de Estado do Ambiente (SEA). 54 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2008) *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de Campo Grande, MS*. Rio de Janeiro: EPE. 73 p. (Série Recursos Energéticos)
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2014) *Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Rio de Janeiro: EPE. 49 p. (Série Recursos Energéticos)
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). (2016) *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016 - ano base 2015*. Rio de Janeiro: EPE. 230 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 13 nov. 2017.
- EUROPEAN SUPPLIERS OF WASTE TO ENERGY TECHNOLOGY (ESWET). (2012) *ESWET Handbook*. Bruxelas: ESWET. Disponível em: <http://www.eswet.eu/tl_files/eswet/5.%20Documents/5.1.%20Waste-to-Energy%20Handbook/ESWET_Handbook_Waste-to-Energy.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.
- GLOBAL METHANE INITIATIVE (GMI). (2016) *Overview of Anaerobic Digestion for Municipal Solid Waste*. Washington, D.C.: GMI. Disponível em: <https://www.globalmethane.org/documents/AD-Training-Presentation_Oct2016.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.
- GÓMEZ, D.R.; WATTERSON, J.D.; AMERICANO, B.B.; HA, C.; MARLAND, G.; MATSIKA, E.; NAMAYANGA, L.N.; OSMAN-ELASHA, B.; SAKA, J.D.K.; TREANTON, K. (2006) Stationary Combustion. In: EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (orgs.). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IGES. 47 p. v. 2. cap. 2.
- GUENDEHOU, G.H.S.; KOCH, M.; HOCKSTAD, L.; PIPATTI, R.; YAMADA, M. Incineration and Open Burning of Waste. In: EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (orgs.). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IGES. 26 p. v. 5. cap. 5.
- INGLEZAKIS, V.J.; ROJAS-SOLÓRZANO, L.; KIM, J.; AITBEKOVA, A.; ISMAILOVA, A. (2015) Comparison between landfill gas and waste incineration for power generation in Astana, Kazakhstan. *Waste Management & Research*, v. 33, n. 5, p. 486-494. <http://doi.org/10.1177/0734242X15576562>
- INSTITUTO PEREIRA PASSOS/PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (IPP/PCRJ). (2015) *Armazém de dados*. Rio de Janeiro: IPP. Disponível em: <<http://www.data.rio/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.
- INSTITUTO VIRTUAL INTERNACIONAL DE MUDANÇAS GLOBAIS (IVIG). (2009) *Potencial Energético dos RSU*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacacimatica/rsu%20%202009%20%283%29.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2017.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (1995) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 572 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge and Nova York: Cambridge University Press. 1522 p.
- LINO, F.A.M.; ISMAIL, K.A.R. (2011) Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 6, p. 3496-3502. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.048>
- PALERMO, G.C.; D'AVIGNON, A.L.A.; FREITAS, M.A.V. (2014) Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials. *Energy Policy*, v. 68, p. 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.041>
- PIPATTI, R.; SVARDAL, P.; ALVES, J.W.S.; GAO, Q.; CABRERA, C.L.; MARECKOVA, K.; OONK, H.; SCHEEHLE, E.; SHARMA, C.; SMITH, A.; YAMADA, M.; COBURN, J.B.; PINGOUD, K.; THORSEN, G.; WAGNER, F. (2006b) Solid Waste Disposal. In: EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (orgs.). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: IGES. v.5. cap.3. 40 p.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (PCRJ). (2013) *Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: PCRJ. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/residuos-solidos>>. Acesso em: 24 out. 2017.
- PSOMOPOULOS, C.S.; BOURKA, A.; THEMELIS, N.J. (2009) Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, v. 29, n. 5, p. 1718-1724. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>
- SANTOS, Y.; OLIVEIRA, S.; CORREA, R. (2013) *Waste to Energy: uma alternativa viável para o Brasil?* São Paulo: Promon Intelligens. 13 p.
- SOUZA, S.N.M.; HORTTANAINEN, M.; ANTONELLI, J.; KLAUS, O.; LINDINO, C.A.; NOGUEIRA, C.E. (2014) Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management & Research*, v. 32, n. 10, p. 1015-1023. <https://doi.org/10.1177/0734242X14552553>
- THEMELIS, N.J.; ULLOA, P.A. (2007) Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, v. 32, n. 7, p. 1243-1257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>

TOLMASQUIM, M.T. (coord.). (2016) *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: EPE. 452 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/livro-sobre-energia-renovavel-hidraulica-biomassa-eolica-solar-oceanica>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). (2014) *CDM PDD 0008 - Brazil NovaGerar Landfill Gas to Energy Project*. Rio de Janeiro: UNFCCC. 74 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2017) *LFG Energy Project Development Handbook*. Washington: Landfill Methane Outreach Program. 96 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf>. Acesso em: 25 out. 2017.

WHITAKER, M.; HEATH, G.A.; O'DONOUGHUE, P.; VORUM, M. (2012) Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Coal-Fired Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, v. 16, n. s1, p. S53-S72. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00465.x>



Anexo 1 - Massas totais (kt) de resíduos sólidos urbanos (domiliares + públicos) coletados no município do Rio de Janeiro, no período de 2006 a 2014.

Área de planejamento	Massa total (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
AP I	225,87	195,24	212,33	186,58	205,62	262,02	214,11	211,53	209,56	213,65
AP II	416,43	411,98	416,61	415,31	423,21	475,72	450,86	440,12	405,18	428,38
AP III	1.116,32	1.103,17	1.062,84	1.025,66	1.050,36	1.226,42	1.085,63	1.118,25	1.029,28	1.090,88
AP IV	364,55	382,09	382,81	388,51	406,72	185,44	438,30	428,23	423,91	377,84
AP V	666,87	731,15	763,86	675,22	708,64	542,55	746,18	766,43	738,27	704,35
Total	2.790,03	2.823,62	2.838,45	2.691,28	2.794,56	2.692,16	2.935,07	2.964,56	2.806,19	2.815,10

AP: área de planejamento.

Anexo 2 - Valores calculados para a composição gravimétrica ajustada (%) para os resíduos sólidos urbanos (domiliares + públicos) coletados no município do Rio de Janeiro, por área de planejamento, no período de 2006 a 2014.

Tipologia	Gravimetria AP I (%)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	13,53	14,90	17,18	15,95	17,65	14,72	16,57	19,11	14,07	15,97
Plástico	14,94	18,61	18,93	18,86	17,30	18,96	19,69	19,43	21,89	18,73
Vidro	2,10	2,81	3,58	2,58	2,61	3,19	2,95	3,42	3,84	3,01
Metal	1,83	1,70	1,62	1,56	1,26	1,64	1,49	1,82	1,61	1,61
Matéria orgânica	62,32	58,66	55,45	56,40	58,15	55,89	54,80	52,02	54,72	56,49
Inerte total	1,34	0,65	0,98	1,74	1,15	2,91	2,09	1,19	0,96	1,45
Madeira	0,30	0,30	0,23	0,41	0,23	0,45	0,36	0,63	0,48	0,38
Borracha	0,38	0,16	0,17	0,11	0,09	0,19	0,12	0,25	0,08	0,17
Pano - trapo	2,87	1,88	1,69	1,98	1,48	1,93	1,81	2,08	1,85	1,95
Couro	0,40	0,34	0,17	0,41	0,09	0,12	0,12	0,05	0,50	0,24

Tipologia	Gravimetria AP II (%)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	16,88	15,81	17,17	19,11	18,86	18,74	18,67	20,66	17,71	18,18
Plástico	14,59	16,92	20,61	21,28	20,29	19,96	19,78	19,64	20,79	19,32
Vidro	3,78	4,03	3,10	4,12	3,64	3,15	3,89	4,18	4,65	3,84
Metal	1,74	1,59	1,54	1,86	1,46	1,62	1,56	1,74	1,97	1,67
Matéria orgânica	59,98	59,25	54,33	50,11	52,22	52,69	51,33	50,47	51,08	53,50
Inerte total	1,07	0,92	1,14	1,82	1,78	1,36	2,49	1,12	1,75	1,49
Madeira	0,32	0,30	0,21	0,17	0,19	0,21	0,42	0,45	0,15	0,27
Borracha	0,17	0,11	0,11	0,08	0,13	0,29	0,10	0,09	0,12	0,13
Pano - trapo	1,34	0,97	1,54	1,36	1,30	1,75	1,63	1,48	1,52	1,43
Couro	0,14	0,10	0,25	0,09	0,12	0,23	0,14	0,21	0,27	0,17

Tipologia	Gravimetria AP III (%)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	14,84	15,73	15,96	16,57	15,95	17,49	15,24	15,76	15,13	15,85
Plástico	14,57	16,57	19,22	20,18	18,20	19,25	18,81	18,77	20,79	18,49
Vidro	2,72	2,76	2,46	2,52	2,79	3,25	2,83	2,59	2,63	2,73
Metal	1,63	1,56	1,62	1,76	1,46	1,79	1,49	1,48	1,51	1,59
Matéria orgânica	63,59	60,34	57,09	54,98	57,66	53,65	57,51	56,64	54,97	57,38
Inerte total	0,65	0,48	1,13	1,23	1,43	1,48	1,67	1,80	1,70	1,29
Madeira	0,28	0,53	0,32	0,39	0,36	0,40	0,22	0,43	0,39	0,37
Borracha	0,36	0,19	0,30	0,24	0,35	0,28	0,30	0,25	0,23	0,28
Pano - trapo	1,33	1,67	1,63	1,92	1,62	2,21	1,66	1,88	2,11	1,78
Couro	0,04	0,20	0,27	0,21	0,17	0,21	0,27	0,39	0,54	0,25

Continua..

Anexo 2 - Continuação.

Tipologia	Gravimetria AP IV (%)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	18,17	14,85	16,13	14,50	17,38	17,95	16,27	17,60	17,73	16,73
Plástico	16,65	18,12	19,19	20,55	20,86	19,69	20,41	19,62	20,87	19,55
Vidro	3,41	3,49	4,10	3,61	3,50	5,60	4,44	5,05	5,17	4,26
Metal	1,65	1,68	1,66	1,70	1,56	2,11	1,78	1,90	1,86	1,77
Matéria orgânica	57,25	58,94	56,17	55,86	53,91	50,02	52,70	51,58	50,37	54,09
Inerte total	0,80	0,81	0,82	1,37	0,57	2,61	2,27	1,61	1,04	1,32
Madeira	0,43	0,40	0,28	0,36	0,64	0,28	0,34	0,67	0,49	0,43
Borracha	0,27%	0,25%	0,15%	0,33%	0,11%	0,17%	0,15%	0,27%	0,23%	0,21%
Pano - trapo	1,34%	1,37%	1,31%	1,54%	1,28%	1,49%	1,50%	1,55%	1,95%	1,48%
Couro	0,02%	0,11%	0,19%	0,18%	0,19%	0,07%	0,15%	0,15%	0,31%	0,15%

Tipologia	Gravimetria AP V (%)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	11,42	12,12	14,57	14,11	14,77	15,07	14,90	14,58	12,93	13,83
Plástico	14,08	17,04	17,75	20,09	19,58	18,64	18,57	2,57	22,73	16,78
Vidro	1,88	2,03	2,28	2,05	2,48	2,48	2,81	18,16	2,46	4,07
Metal	1,48	1,48	1,52	1,69	1,24	1,60	1,58	1,56	1,45	1,51
Matéria orgânica	67,73	62,71	60,37	58,83	58,17	57,16	56,77	57,88	55,54	59,46
Inerte total	0,62	1,07	0,97	0,62	1,26	1,58	2,28	1,28	1,15	1,20
Madeira	0,38	0,29	0,29	0,37	0,23	0,43	0,38	0,47	0,35	0,35
Borracha	0,43	0,33	0,27	0,30	0,25	0,35	0,26	0,67	0,44	0,37
Pano - trapo	1,98	2,67	1,74	1,79	1,87	2,38	2,20	2,47	2,51	2,18
Couro	0,00	0,27	0,24	0,14	0,15	0,30	0,27	0,37	0,45	0,24

AP: área de planejamento.

Anexo 3 - Massas totais (kt) de resíduos sólidos urbanos (domiciliares + públicos) coletados no município do Rio de Janeiro, por tipologia e por área de planejamento, no período de 2006 a 2014.

Tipologia	Massa AP I (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	30,56	29,09	36,48	29,77	36,30	38,56	35,48	40,42	29,48	34,02
Plástico	33,74	36,33	40,19	35,18	35,57	49,68	42,15	41,10	45,87	39,98
Vidro	4,75	5,48	7,60	4,81	5,37	8,37	6,32	7,23	8,05	6,44
Metal	4,13	3,33	3,44	2,91	2,58	4,29	3,19	3,85	3,37	3,45
Matéria orgânica	140,75	114,52	117,74	105,23	119,56	146,43	117,34	110,04	114,67	120,70
Inerte total	3,02	1,28	2,08	3,25	2,37	7,63	4,47	2,52	2,01	3,18
Madeira	0,67	0,59	0,49	0,76	0,48	1,19	0,77	1,33	1,01	0,81
Borracha	0,86	0,31	0,36	0,21	0,18	0,50	0,26	0,53	0,17	0,37
Pano - trapo	6,48	3,66	3,59	3,69	3,04	5,05	3,87	4,40	3,88	4,18
Couro	0,91	0,66	0,36	0,77	0,18	0,32	0,26	0,11	1,05	0,51

Continua..

Anexo 3 - Continuação.

Tipologia	Massa AP II (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	70,30	65,13	71,53	79,35	79,81	89,16	84,17	90,93	71,74	78,01
Plástico	60,75	69,72	85,85	88,37	85,87	94,98	89,17	86,44	84,24	82,82
Vidro	15,74	16,59	12,93	17,11	15,40	14,99	17,54	18,37	18,82	16,39
Metal	7,26	6,54	6,41	7,74	6,18	7,70	7,01	7,64	7,96	7,16
Matéria orgânica	249,76	244,11	226,35	208,11	221,02	250,66	231,44	222,13	206,96	228,95
Inerte total	4,46	3,78	4,74	7,55	7,54	6,47	11,21	4,91	7,09	6,42
Madeira	1,31	1,25	0,86	0,70	0,79	0,98	1,88	1,98	0,61	1,15
Borracha	0,70	0,43	0,47	0,32	0,56	1,37	0,45	0,37	0,49	0,58
Pano - trapo	5,57	4,01	6,43	5,66	5,51	8,33	7,33	6,51	6,16	6,17
Couro	0,57	0,42	1,04	0,39	0,52	1,08	0,65	0,90	1,09	0,74

Tipologia	Massa AP III (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	165,69	173,49	169,61	169,99	167,58	214,47	165,49	176,20	155,75	173,14
Plástico	162,61	182,78	204,32	206,94	191,19	236,12	204,23	209,93	214,02	201,35
Vidro	30,34	30,41	26,14	25,80	29,30	39,85	30,67	29,00	27,06	29,84
Metal	18,23	17,20	17,18	18,10	15,30	21,91	16,19	16,51	15,56	17,35
Matéria orgânica	709,81	665,67	606,78	563,89	605,64	657,94	624,39	633,34	565,84	625,92
Inerte total	7,22	5,29	12,03	12,62	14,98	18,21	18,16	20,17	17,45	14,01
Madeira	3,14	5,80	3,42	3,98	3,83	4,85	2,39	4,85	4,00	4,03
Borracha	4,05	2,08	3,21	2,45	3,69	3,45	3,20	2,80	2,40	3,04
Pano - trapo	14,83	18,37	17,28	19,73	17,02	27,08	18,02	21,06	21,75	19,46
Couro	0,40	2,16	2,88	2,15	1,83	2,54	2,88	4,36	5,56	2,75

Tipologia	Massa AP IV (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	66,26	56,74	61,75	56,32	70,68	33,29	71,33	75,37	75,14	62,99
Plástico	60,70	69,24	73,46	79,82	84,84	36,51	89,45	84,02	88,47	74,06
Vidro	12,43	13,32	15,70	14,02	14,22	10,39	19,44	21,63	21,89	15,89
Metal	6,03	6,40	6,35	6,62	6,35	3,92	7,79	8,14	7,88	6,61
Matéria orgânica	208,72	225,22	215,03	217,03	219,28	92,77	230,97	220,88	213,52	204,82
Inerte total	2,91	3,09	3,14	5,34	2,34	4,85	9,96	6,89	4,41	4,77
Madeira	1,56	1,52	1,07	1,39	2,61	0,52	1,47	2,87	2,06	1,67
Borracha	0,97	0,94	0,57	1,26	0,43	0,31	0,64	1,16	0,95	0,80
Pano - trapo	4,89	5,24	5,01	5,99	5,21	2,75	6,59	6,64	8,27	5,62
Couro	0,09	0,40	0,73	0,72	0,79	0,12	0,65	0,64	1,29	0,60

Tipologia	Massa AP V (kt)									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média anual
Papel - papelão	76,15	88,62	111,27	95,30	104,67	81,77	111,16	111,72	95,44	97,35
Plástico	93,89	124,61	135,56	135,63	138,75	101,15	138,57	19,67	167,79	117,29
Vidro	12,53	14,81	17,42	13,86	17,60	13,46	20,96	139,16	18,14	29,77
Metal	9,84	10,82	11,64	11,38	8,76	8,68	11,76	11,93	10,69	10,61
Matéria orgânica	451,69	458,54	461,14	397,21	412,18	310,14	423,57	443,58	410,02	418,67
Inerte total	4,11	7,81	7,44	4,20	8,96	8,57	17,03	9,84	8,51	8,50
Madeira	2,53	2,12	2,25	2,52	1,61	2,32	2,82	3,60	2,60	2,49
Borracha	2,90	2,41	2,06	2,06	1,80	1,89	1,90	5,14	3,23	2,60
Pano - trapo	13,21	19,51	13,26	12,12	13,26	12,91	16,38	18,93	18,51	15,34
Couro	0,03	1,96	1,80	0,94	1,06	1,65	2,03	2,86	3,32	1,74

AP: área de planejamento.