

Projeto IES – Brasil 2050

RESUMO

*Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de
Emissão de Gases de Efeito Estufa – GEE no Brasil
até 2050*

Cenário de Referência e Cenário 1,5°C

Centro de Estudos Integrados sobre Meio
Ambiente e Mudanças Climáticas
Centro Clima/COPPE/UFRJ

Apoio:

Instituto Clima e Sociedade (iCS) e WWF-Brasil

COORDENAÇÃO GERAL: Emilio Lèbre La Rovere

COORDENAÇÃO TÉCNICA: Carolina B.S. Dubeux e William Wills

MODELAGEM MACROECONÔMICA: William Wills

ESTUDOS SETORIAIS

Setor de Transporte: Márcio de Almeida D'Agosto, Daniel Neves Schmitz Gonçalves e George Vasconcelos Goes (Laboratório de Transporte de Carga –LTC/COPPE/UFRJ)

Setor Industrial: Otto Hebeda

Setor Energético: Amaro Olímpio Pereira Junior e Gabriel Castro

Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU): Michele Karina Cotta Walter, Carolina B.S. Dubeux e Isabella da Fonseca Zicarelli

Setor de Resíduos: Saulo Machado Loureiro e Tairini Joyce Pimenta de Oliveira

Avaliação microeconômica: Carolina Grottera

Cobenefícios: Daniel Oberling

Integração dos Modelos Energéticos de Demanda: Claudio Gesteira

APOIO: Carmen Brandão Reis

EDITORAÇÃO: Elza Maria da Silveira Ramos

Citação: Loureiro, S. M. e Oliveira, T. J. P. (2018). Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa até 2050 no Setor de Resíduos: Referência e 1,5°C, in Rovere, E. L.L.; Wills, W.; Dubeux, C. B. S; Pereira Jr, A. O.; D'Agosto, M. A; Walter, M. K. C; Grottera, C.; Castro, G.; Schmitz, D.; Hebeda, O.; Loureiro, S. M.; Oberling, D; Gesteira, C.; Goes, G.V.; Zicarelli, I.F.; e Oliveira, T.J.P (2018). Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário 1.5 ° C. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

PROJETO IES-Brasil – 2050

**Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e
Mudanças Climáticas**

(Centro Clima/COPPE/UFRJ)

**Cenários de Emissão de GEE – 2050
(Referência e 1,5°C)**

**Setor de Resíduos
Maio de 2018**

Relatório Técnico

Autores

Saulo Machado Loureiro e Tairini Joyce Pimenta de Oliveira

Sumário

1.	Introdução.....	8
2.	Objetivo.....	13
3.	Metodologia.....	14
3.1.	Resíduos Sólidos.....	15
3.1.1.	Aterramento.....	15
3.1.2.	Tratamento Biológico (Compostagem e Biodigestão)	21
3.1.3.	Tratamento Térmico (Incineração e Usina)	21
3.2.	Esgotos Domésticos e Efluentes Industriais.....	23
4.	Cenário de Referência.....	27
4.1.	Resíduos Sólidos.....	27
4.1.1	Hipóteses e evolução dos níveis de atividade.....	27
4.1.2.	Resultados.....	30
4.2.	Esgotos e Efluentes	31
4.2.1	Hipóteses e evolução dos níveis de atividade.....	31
4.2.2.	Resultados.....	32
5.	Cenário 1,5°C	34
5.1.	Resíduos Sólidos.....	35
5.1.1	Hipóteses e evolução dos níveis de atividade.....	35
5.1.2.	Resultados.....	36
5.2.	Esgotos e Efluentes	37
5.2.1	Hipóteses e evolução dos níveis de atividade.....	37
5.2.2.	Resultados.....	38
5.3	Custos de mitigação das medidas consideradas.....	39
6.	Comparação dos Resultados dos Cenários	40
7.	Prospecção Tecnológica para a Construção de um Cenário Disruptivo	44
8.	Referências.....	44

Tabelas

Tabela 1. Fração dos municípios (%) por tipo de destino de resíduos sólidos (1989-2008).....	9
Tabela 2. Evolução das emissões, por gás (103t), e em CO ₂ e (t) do tratamento de resíduos sólidos e efluentes no Brasil (1990-2010).....	11
Tabela 3 Fatores de Correção do Metano (FCM) e respectivos Fatores de Emissão (FE) para esgotos...	26
Tabela 4. Hipóteses sobre a destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Cenário de Referência (2015-2050).....	28
Tabela 5. Evolução do nível de atividade no Subsetor de Resíduos Sólidos Urbanos no Cenário de Referência (2015-2050).....	28
Tabela 6. Estimativas de emissões de Resíduos Sólidos, por gás (Gg), no Cenário de Referência (2010-2050)	30
Tabela 7. Evolução do nível de atividade do subsetor de esgotos no Cenário de Referência (2015-2050).....	32
Tabela 8. Hipótese sobre os níveis de recuperação de metano de efluentes industriais no Cenário de Referência (2010-2050).....	32
Tabela 9. Emissões de Esgotos Sanitários e Efluentes Industriais, por gás (Gg), no Cenário de Referência (2010-2015).....	32
Tabela 10. Medidas elencadas no Setor de Resíduos no Cenário 1,5°C – 2020-2050.....	34
Tabela 11. Evolução do nível de atividade do Subsetor de Resíduos Sólidos no Cenário 1,5°C.....	35
Tabela 12. Estimativas de emissões de resíduos sólidos, por gás (Gg), no cenário de 1,5°C (2010-2015).....	36
Tabela 13. Evolução do nível de atividade de esgotos do Cenário 1,5°C (2020-2050).....	38
Tabela 14. Emissões de esgotos domésticos e efluentes industriais, por gás (Gg), no Cenário 1,5°C (2010-2050).....	38
Tabela 15. Custos de Mitigação do Setor de Resíduos.....	39
Tabela 16. Comparação da evolução das emissões entre os dois cenários no Setor Resíduos (2010-2050).....	40

Figuras

Figura 1.	Destinação Final dos RSU no Brasil, em 2008 (%) (IBGE, 2010)	10
Figura 2.	Evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário de Referência (Mt)	29
Figura 3.	Evolução das emissões de resíduos sólidos 2010-2050 no Cenário de Referência (Gg CO ₂ e).....	30
Figura 4.	Tipos de Tratamento de Esgoto no Brasil (%)	31
Figura 5.	Evolução das emissões de esgotos sanitários e efluentes industriais no Cenário de Referência de 2010-2050 (Gg CO ₂ e).....	33
Figura 6.	Evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário 1,5° C (Mt)	36
Figura 7.	Evolução das emissões de resíduos sólidos 2010-2050 no Cenário 1,5°C (Gg CO ₂ e)	37
Figura 8.	Evolução das emissões de esgotos sanitários e efluentes industriais no Cenário 1,5°C (Gg CO ₂ e)	39
Figura 9.	Evolução das emissões do setor de resíduos no Cenário de Referência (Gg CO ₂ e)	41
Figura 10.	Evolução das emissões do setor de resíduos no cenário de 1,5°C (Gg CO ₂ e)	41
Figura 11.	Evolução dos volumes de geração de biometano do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C (Mm ³)	42
Figura 12.	Evolução do potencial de geração de eletricidade a partir do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C (TWh)	42
Figura 13.	Potencial total de emissões evitadas do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C relativamente ao Cenário de Referência (Mt CO ₂ e)	43

Setor Resíduos

1. Introdução

O Setor Resíduos se divide em dois subsetores principais: resíduos sólidos e efluentes líquidos. No subsetor de resíduos sólidos foram pesquisados os resíduos urbanos (RSU), industriais (RSI) e de serviços de saúde (RSS), todos classe II-A (não perigosos e não inertes). Não são contabilizados os resíduos perigosos, pois estes são armazenados conforme legislação e normas específicas, cujos tratamentos não são emissores de gases estufa, exceto quando encaminhados para tratamento térmico por incineração. No subsetor de efluentes líquidos foram pesquisados os esgotos domésticos e comerciais bem como efluentes industriais orgânicos. Foram calculadas também as possíveis opções de aproveitamento energético como forma de reduzir adicionalmente as emissões de GEE.

O conjunto do marco regulatório e das políticas e planos nacionais e estaduais, definidos a partir de 2007, aponta para metas, ações e programas que, se implementados e atingidos, repercutiriam expressivamente na redução dos GEE do setor de saneamento no país, pelo tratamento e disposição adequada de resíduos sólidos urbanos e industriais, e pela eficiência no tratamento dos esgotos sanitários e pelo incremento no aproveitamento energético em ambos os processos.

As leis federais da Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445/2007 (BRASIL, 2007) e da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) e seus respectivos decretos regulamentadores, consolidaram competências, modelos de gestão e instrumentos capazes de lastrear as transformações necessárias nesses campos.

Houve avanços importantes na coleta de resíduos sólidos urbanos, principalmente nas cidades médias, grandes e regiões metropolitanas, visto que a maior parte já destina para aterros sanitários licenciados. Entretanto, quando se tem em conta a totalidade dos municípios, mais da metade ainda deposita seus resíduos em lixões a céu aberto mantendo-se no país um grande passivo ambiental e de saúde pública.

De acordo com IBGE (2010), a disposição final dos RSU por unidade de destino nos 5.565 municípios brasileiros ocorre em 51% deles na forma de lixões (a céu aberto), 22% em aterros controlados e apenas 27% em aterros sanitários. A Tabela 1 abaixo apresenta a evolução do destino final dos resíduos no Brasil, referentes às últimas três pesquisas realizadas pelo IBGE, em 1989, 2000 e 2008.

Tabela 1. Fração dos municípios (%) por tipo de destino de resíduos sólidos (1989-2008)

Unidade de destino final dos resíduos	Ano		
	1989	2000	2008
Lixão	88,2	72,3	50,8
Aterro Controlado	9,6	22,3	22,5
Aterro Sanitário	1,1	17,3	27,7

Fonte: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010).

É importante frisar que não há uniformidade na avaliação e classificação de aterros de disposição de resíduos no Brasil, tendo em vista a inexistência de uma padronização nacional e a utilização de distintas classificações provenientes de universidades e agências ambientais, entre outras instituições (CETESB, 2016; FARIA, 2002; LOUREIRO, 2005; MONTEIRO, 2006). Pelo caráter empírico, dois avaliadores com semelhante formação técnica podem chegar a resultados distintos do mesmo aterro. Além do que muitas pesquisas são feitas com as informações fornecidas pelas próprias administrações municipais que tendem a superavaliar sua gestão de resíduos.

As metas definidas nos Planos Nacionais de Saneamento Básico e de Resíduos Sólidos, ainda que optando pelos cenários mais conservadores, estão longe de serem alcançadas. Exemplo extremo recai sobre o encerramento total dos lixões no território nacional, que deveria ocorrer até 2014 e que ainda está longe de ser logrado, especialmente nos pequenos municípios e nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

De acordo com a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2010), no Brasil a situação da destinação dos resíduos sólidos urbanos era preocupante, quando de cerca das 240 mil toneladas desses resíduos produzidos diariamente, mais da metade era lançado a céu aberto, em corpos d'água ou áreas de proteção ambiental. A Figura 1 apresenta as principais formas de tratamento e destino final dos RSU no Brasil, por unidade de massa dos resíduos sólidos coletados, com base nos resultados obtidos nessa pesquisa.

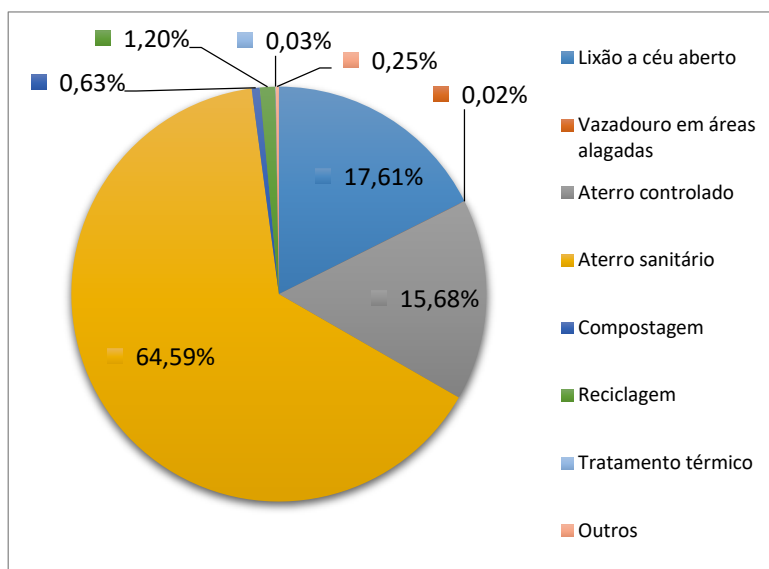


Figura 1. Destinação Final dos RSU no Brasil, em 2008 (%) (IBGE, 2010)

Com base no III Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal (MCTI, 2015), nos anos de 2005 e 2010, o setor de resíduos foi a segunda maior fonte das emissões totais de CH₄ no Brasil, correspondendo a 11,4% e 15,0% dos totais, respectivamente.

Segundo esse documento, em 2010 o subsetor de tratamento de resíduos sólidos respondeu por 1.516 mil toneladas de CH₄, ou 31,8 milhões de toneladas de CO₂e, representando 7% do total das emissões de metano do País. De 1990 a 2010, as emissões de CH₄ do setor resíduos aumentaram 45,8%, passando de 5,5 para 13,9 kgCH₄/hab.ano, que corresponde a 0,29 tCO₂e/hab.ano.

Em países mais desenvolvidos, o aterramento não é a prática predominante, dando espaço às demais, como incineração, usinas térmicas, reciclagem e compostagem. No caso do Brasil, é possível afirmar que o aumento das emissões per capita se deve fundamentalmente a dois fatores: a ampliação dos serviços de saneamento básico nas cidades e a diminuição das taxas de crescimento populacional nas últimas décadas, tomando-se como premissa que o incremento da coleta tem como principal consequência o maior acúmulo de resíduos nos aterros sanitários, produzindo mais metano.

Os serviços de incineração e tratamento de efluentes geraram emissões de CO₂ e N₂O, devido aos resíduos contendo carbono não renovável e nitrogênio, sendo estimadas em 178,0 e 23,8 toneladas, respectivamente, em 2010 (MCTI, 2015).

O tratamento de efluentes industriais reflete aumentos das atividades mais produtoras de carga orgânica cujo tratamento gera metano, sendo que, em 2010, o setor de cerveja foi responsável por 62% das emissões, seguido do setor de leite cru, com 14% (MCTI, 2010). Embora a maior carga

orgânica gerada pela indústria seja o vinhoto do setor sucroalcooleiro, ele é aplicado diretamente no solo e não gera emissões de metano. A Tabela 2 apresenta a evolução das estimativas de emissões dos GEE relativos ao tratamento de resíduos no Brasil.

Tabela 2. Evolução das emissões, por gás (10^3t), e em CO_2e (t) do tratamento de resíduos sólidos e efluentes no Brasil (1990-2010)

GEE (10^3t)	1990	2000	2005	2010	Variação (%) 1990/2010
CH ₄	1.173,70	1.754,20	2.062,00	2.462,70	110%
CO ₂	19,00	95,00	128,00	175,00	821%
N ₂ O	4,32	5,68	6,61	7,21	67%
CO ₂ e	34.027,40	50.717,80	59.615,65	71.041,25	109%

Fonte: III Inventário Brasileiro de Emissões dos GEE (MCTI, 2015).

Atualmente, o aterramento responde por 98% da destinação final, seguido da reciclagem com pouco mais de 1% e dos tratamentos térmicos (incineração) e biológicos (compostagem) que juntos não respondem nem por 0,1% do total.

O aterramento, seja a céu aberto, controlado, sanitário ou mesmo não categorizado, provoca a geração de gases de efeito estufa, principalmente do metano (CH₄) pela da decomposição anaeróbica do lixo orgânico. Tal condição faz com que um aterro sanitário gere mais CH₄ que um depósito a céu aberto.

Os tratamentos térmico e biológico são fontes de emissão de CO₂, N₂O e CH₄, para resíduos de origem não biogênica. Em relação à reciclagem, a parcela que contribui para evitar emissões é muito pequena, pois se deve apenas à reutilização de papel e papelão, e madeira.

Em relação aos efluentes líquidos, tanto o tratamento dos esgotos quanto do lodo produzido, sob condições anaeróbicas, resulta na produção de CH₄, sendo que a quantidade de gás produzida dependerá das características do efluente, da temperatura e do tipo de tratamento empregado. O principal fator determinante da geração de metano é a quantidade de matéria orgânica degradável, medida através da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e da demanda química de oxigênio (DQO). Quanto maior a DBO ou DQO, maior a produção de metano. Em relação à temperatura, a produção do metano aumenta, principalmente em climas quentes e em sistemas sem o controle adequado deste parâmetro.

O óxido nitroso está associado à degradação dos componentes nitrogenados presentes no esgoto/efluente (ureia, nitrato e proteínas) e aos processos que envolvem o tratamento, principalmente nos sistemas terciários, que são capazes de remover estes compostos nitrogenados.

Emissões diretas de N_2O são geradas tanto nos processos de nitrificação (processo aeróbio que converte amônia e outros compostos nitrogenados em nitrato – NO_3) e desnitrificação (processo anaeróbio em que o nitrato é convertido em nitrogênio gasoso – N_2), pois são um produto intermediário de ambos os processos. As emissões de N_2O podem ocorrer tanto nas plantas de tratamento quanto no corpo d'água receptor do efluente.

Os sistemas de tratamento podem ser classificados como preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar tem objetivo de remover os sólidos grosseiros, enquanto o primário remove também sólidos sedimentares. Em ambos predominam mecanismos físicos de tratamento – grades e deposição – sendo que no primário há a remoção de parte da matéria orgânica em suspensão e materiais flutuantes (óleos e graxas). No tratamento secundário, os mecanismos são biológicos, pois o objetivo principal desse nível de tratamento é a remoção da matéria orgânica através da biodegradação por micro-organismos. Os sistemas de tratamento utilizados podem incluir lagoas de estabilização anaeróbias e aeróbias, reatores anaeróbios, filtros biológicos, lodos ativados, entre outros. O tratamento terciário é utilizado para tratar o efluente em relação aos agentes patogênicos e outros contaminantes, além de prover também a retirada de nutrientes, através de um ou mais processos combinados de lagoas de maturação, filtração, bioadsorção, troca de íons e desinfecção (ROVERE et al., 2007; VON SPERLING et al., 2005).

O lodo pode ser produzido tanto no tratamento primário quanto no secundário e terciário, sendo que no primário consiste dos sólidos removidos do esgoto e nos demais é resultado do crescimento biológico na biomassa e agregação de pequenas partículas. O lodo também deve ser tratado e o processo de tratamento inclui a digestão anaeróbia e aeróbia, adensamento, desaguamento, compostagem ou disposição final em aterros.

As emissões diretas de óxido nitroso são consideradas importantes em regiões predominantemente com sistemas de tratamento de nível terciário, que englobam processos de nitrificação e desnitrificação.

2. Objetivo

O presente estudo se propõe a construir dois cenários de emissões futuras de gases do efeito estufa no setor de resíduos no Brasil até o ano de 2050, sendo o primeiro com base nas atuais políticas de governo – Cenário de Referência (NDC) – e o segundo um cenário de mitigação com ações adicionais – Cenário 1,5°C – onde se introduziram novas políticas e medidas de redução de emissões de forma se atingir a meta de aquecimento de no máximo 1,5° C (considerando os valores per capita do Emissions Gap Report da UNEP).

Para tal, serão consideradas premissas de crescimento socioeconômico, com os seguintes parâmetros: produção de resíduos (sólidos e efluentes), composição dos resíduos e formas de tratamento dos resíduos. Tanto no caso de resíduos sólidos quanto de efluentes, as parcelas destinadas a cada opção de destinação, que são determinantes para a formação de GEE, foram definidas em conjunto com o CEC (Comitê de Elaboração de Cenários do projeto). As quantidades de RSI e RSS que são destinados a aterramento e à incineração serão estimadas juntamente com RSU.

As emissões estão calculadas para cada uma das fontes, considerando que no Cenário de Referência os planos governamentais para o setor são implementados com atraso, tendo em vista que os prazos originais não têm sido observados, e no cenário de mitigação as ações são plenamente viáveis, mas ainda não foram implementadas.

3. Metodologia

As emissões do setor de resíduos foram estimadas a partir de 2015 até 2050, em função das hipóteses de geração per capita de resíduos sólidos e efluentes líquidos, de sua composição gravimétrica e das formas de tratamento e destinação final. A evolução desses parâmetros nos diferentes cenários variou em função das medidas de mitigação adotadas considerando as seguintes premissas:

- A economia impacta diretamente na geração de resíduos, que varia conforme a evolução do PIB per capita. Por seu turno, políticas públicas e estratégias industriais reduzem esse impacto pela redução da geração e reciclagem de resíduos;
- A produção de lixo depende de hábitos culturais, de consumo, do poder aquisitivo, do clima, do nível educacional e das características de sexo e idade dos grupos populacionais;
- Os resíduos têm diferentes frações orgânicas ao longo do período dos cenários, que variam em consequência da evolução da economia e das características de consumo. Isto porque, com o aumento da renda, deve haver uma tendência de diminuição da componente orgânica nos resíduos sólidos em decorrência do aumento nas vendas dos alimentos industrializados, com um maior descarte de resíduos plásticos, papéis e vidros, ou seja, maior potencial reciclável;
- Na construção dos cenários, as emissões tendem a diminuir nos períodos de pouca evolução do PIB, ao passo que aumentam quando a economia volta a crescer, no entanto, considerando uma tendência média de crescimento, o resultado em longo prazo das emissões é praticamente inalterado (ROVERE et al., 2008).

Com base nas considerações acima, foram calculadas as emissões dos respectivos gases das diferentes fontes segundo as seguintes formas de tratamento de resíduos. Resíduos Sólidos: aterramento (CH_4), compostagem ou tratamento biológico (CH_4 e N_2O) e incineração ou tratamento térmico (CO_2 , CH_4 e N_2O). Efluentes líquidos: lançamento in natura (CH_4 e N_2O), fossas sépticas (CH_4), ETEs primário, aeróbio, anaeróbio, lodos (CH_4 e N_2O) e fossas sépticas e latrinas (CH_4).

As principais fontes pesquisadas foram:

- Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI, 2015);
- Pesquisas do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS);
- Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB, de 2008 (IBGE, 2010);

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE,2016);
- Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (BRASIL,2010a);
- O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES, 2012 (MINISTERIO DAS CIDADES, 2012);
- O Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB, 2012 (MMA,2013).

Sabe-se que o CH₄, emitido pela decomposição dos resíduos sólidos e efluentes, convertido em CO₂ por oxidação, quando de origem biogênica, não causa impacto no clima, considerando que o carbono é sequestrado para a produção da safra agrícola seguinte, portanto não sendo contabilizadas essas emissões.

3.1. Resíduos Sólidos

A produção de resíduos sólidos é função do crescimento populacional e da geração per capita. Esta por sua vez varia conforme o incremento do PIB, projetado a partir de sua tendência histórica.

$$WT(t) = PopT(hab) \times geração\ per\ capitaT(kg/hab) / 10^3 \quad (Equação\ 1)$$

$$Geração\ per\ capitaT(x,kg) = f[PIB\ per\ capitaT(R\$/hab), w(x,kg)] \quad (Equação\ 2)$$

Onde:

WT(t) é o total de resíduo gerado em toneladas no ano T;

PopT(hab) é a população em habitantes no ano T;

Geração per capitaT(kg/hab) é a taxa de resíduo por habitante no ano T;

PIB per capitaT(R\$/hab) é o Produto Interno Bruto por habitante no ano T;

w(x,kg) é a função tendência de geração per capita de resíduo.

3.1.1. Aterramento

Para se estimar as emissões de aterramento de resíduos sólidos, usou-se a seguinte equação básica (Equação 3) para o decaimento de primeira ordem:

$$DDOCm = DDOCm(0)e^{-kt} \quad (Equação\ 3)$$

Onde:

DDOC é o carbono orgânico degradável que se decompõe (em condições anaeróbias); DDOCm é a massa de DDOC a qualquer tempo;

DDOCm(0) é a massa de DDOC no início da reação, quando $t = 0$ e, portanto, $e^{-kt} = 1$; k é a constante de reação = $\ln(2) / t_{1/2} (y^{-1})$, sendo:

- $t_{1/2}$ = meia vida(y);
- y = years (em português, anos);
- t é o tempo em anos.

Da Equação 3 é possível perceber que ao final do ano 1 (indo do ponto 0 ao ponto 1 no eixo do tempo) a massa de DDOC deixada não decomposta nos aterros será:

$$\text{DDOCm}(1) = \text{DDOCm}(0)e^{-k} \quad \text{(Equação 4)}$$

A massa de DDOC decomposta entre CH_4 e CO_2 será:

$$\text{DDOCm}_{\text{decomp}}(1) = \text{DDOCm}(0) \times (1 - e^{-k}) \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

$\text{DDOCm}_{\text{decomp}}(1)$ é a massa total de DDOC decomposta no ano 1; k é a razão da constante de reação.

Em uma reação de primeira ordem, o total do produto (aqui o DDOCm decomposto) é sempre proporcional à quantidade de reagente (aqui o DDOCm). Isto significa que independe de quando o DDOCm foi depositado e que quando o total de DDOCm acumulado no aterro mais o depósito do último ano são conhecidos, a produção de CH_4 poderá ser calculada como se cada ano fosse o ano um na série de tempo. Desta forma, todos os cálculos poderão ser feitos pelas Equações 4 e 5.

A premissa básica parte do princípio que a geração de CH_4 de toda massa de resíduo depositado a cada ano começará em 1º de janeiro do ano seguinte. Isto é o mesmo que uma média de seis meses de defasagem até que a geração substancial de CH_4 comece (o tempo que leva para a condição

anaeróbia se tornar bem estabelecida), portanto, se usou a Equação 6 para o cálculo da massa de DOC degradável (DDOC_m) de uma quantidade de lixo (W):

$$\text{DDOC}_{m_d}(T) = W(T) \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

DDOC_m(T) é a massa de DDOC depositada no ano T;

W(T) é o total do lixo depositado no ano T;

DOC é o carbono orgânico degradável (sob condições anaeróbias);

DOC_f é a fração de DOC que se decompõe sob condições anaeróbias;

MCF é o fator de correção de metano.

O DOC (Carbono Organicamente Degradável) refere-se ao teor de carbono de cada componente do lixo que degrada, como papéis e papelões, folhas, madeiras e matéria orgânica total. Devido à falta de um padrão nacional para o fator correspondente à participação percentual do peso úmido de cada componente do resíduo, foram utilizados os valores padronizados pelo IPCC (2006), conforme a Equação 7 a seguir:

$$\text{DOC} = (0,40 \times \% \text{ papel/papelão}) + (0,24 \times \% \text{ têxteis}) + (0,15 \times \% \text{ restos alimentares}) + (0,43 \times \% \text{ madeiras}) + (0,20 \times \% \text{ folhas}) + (0,24 \times \% \text{ fraldas}) + (0,39 \times \% \text{ borracha/couro})$$

(Equação 7)

O DOC_f (fração do DOC que realmente degrada) depende de muitos fatores, como temperatura, umidade, pH, composição gravimétrica, dentre outros. Devido ao processo de degradação anaeróbia ser incompleto, só se degrada uma parte do carbono potencialmente degradável. O valor sugerido pelo IPCC (2006) e adotado pelo MCTI (2010) é de 50%, ou seja, considera-se que metade do carbono não seja emitida ou parte do carbono organicamente

O MCF (fator de correção do metano) varia em função das condições de anaerobiose de cada tipo de local de disposição. No caso de simples vazadouros, ou lixões, é adotado 0,4 para aqueles com células de até cinco metros e 0,8 para aqueles com células maiores que cinco metros, condição

aproximada de aterro controlado. No caso de aterros sanitários, situação em que há uma disposição planejada de resíduos, este fator é 1,0, ou seja, considera-se que 100% dos resíduos estarão dispostos em condições de anaerobiose. Quando não há informações sobre as condições de aterramento, o IPCC (2006) recomenda que se adote para este fator 0,6.

O total de DDOC_m depositada, remanescente, não decomposta, ao final da disposição no ano T foi calculada pela Equação 8:

$$\text{DDOC}_{m_{\text{rem}}}(T) = \text{DDOC}_{m_d}(T) \times e^{-k(13-M)/12} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

DDOC_{m_{rem}}(T) é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, permanecendo não decomposta ao final do ano T;

DDOC_{m_d}(T) é a massa de DDOC depositada no ano T; k é a razão da constante de reação;

M é o mês do início da reação (= tempo de atraso/defasagem + 7).

O total de DDOC depositado, decomposto durante a disposição no ano T foi calculado pela Equação 9:

$$\text{DDOC}_{m_{\text{dec}}}(T) = \text{DDOC}_{m_d}(T) \times (1 - e^{-k(13-M)/12}) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

DDOC_{m_{dec}}(T) é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, decomposta durante o ano;

DDOC_{m_d}(T) é a massa de DDOC depositada no ano T; k é a razão da constante de reação;

M é o mês do início da reação (= tempo de atraso/defasagem + 7).

A quantidade de DDOC_m acumulada no aterro ao final do ano T foi calculada pela Equação 10:

$$\text{DDOCm}_a(T) = \text{DDOCm}_{\text{rem}}(T) + \text{DDOCm}_a(T-1)xe^{-k} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

$\text{DDOCm}_a(T)$ é a massa total de DDOC deixada e não decomposta ao final do ano T; $\text{DDOCm}_{\text{rem}}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, permanecendo não decomposta ao final do ano T;

$\text{DDOCm}_a(T-1)$ é a massa total de DDOC deixada não decomposta ao final do ano T-1; k é a razão da constante de reação.

O total de DDOCm decomposta no ano T foi calculado pela Equação 11:

$$\text{DDOCm}_{\text{decomp}}(T) = \text{DDOCm}_{\text{dec}}(T) + \text{DDOCm}_a(T-1)xe^{-k} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

$\text{DDOCm}_{\text{decomp}}(T)$ é a massa total de DDOC decomposta no ano T;

$\text{DDOCm}_{\text{dec}}(T)$ é a massa de DDOC depositada no ano T do inventário, decomposta durante o ano;

$\text{DDOCm}_a(T-1)$ é a massa total de DDOC deixada não decomposta ao final do ano T-1; k é a razão da constante de reação.

Ressalta-se que somente a emissão de CH_4 é calculada a partir destas equações, tendo em vista que o CO_2 gerado pela oxidação do CH_4 , por ter origem biogênica, não é impactante no clima, conforme descrito no início desta seção. Dessa forma, o total de CH_4 gerado do DOC decomposto será calculado pela Equação 12, seguinte:

$$\text{CH}_{4\text{gerado}}(T) = \text{DDOCm}_{\text{decomp}}(T) \times F_{x16/12} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

CH₄gerado(T) é o CH₄ gerado no ano T;

DDOC_{mdecomp}(T) é a massa total de DDOC decomposta no ano T; F é a fração de CH₄ por volume no gás gerado no aterro;

16/12 é a razão de peso molecular do CH₄/C;

A fração de carbono emitida como metano (F) adotada pelo MCTI (2010) é de 50%, significando que os outros 50% da composição do biogás gerado não são metano. Portanto, o total de CH₄ emitido foi dado pela Equação 13 a seguir:

$$\text{CH}_{4\text{emitido}}(T) = \sum_x [\text{CH}_{4\text{gerado}}(x,T) - R(T)] \times [1 - \text{OX}(T)] \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

T é o ano do inventário;

CH₄emitido(T) é o CH₄ emitido no ano T;

x é a fração de material/categoria de lixo;

CH₄ gerado(x,T) é o CH₄ gerado pela fração de lixo x no ano T; R(T) é o CH₄ recuperado no ano T;

OX(T) é o fator de oxidação no ano T (fração).

O metano recuperado (R) refere-se à parcela recuperada do biogás para ser queimada em *flares* ou aproveitada para fins energéticos, o que reduz ainda mais as emissões líquidas. Ao ser queimado, o CH₄ se transforma em CO₂, que por ser de origem renovável, como é o caso do lixo, não aumentará a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

O fator de oxidação (OX) relaciona-se à fração dos resíduos e dos gases que sofre queima espontânea nos locais de disposição, portanto não gerando metano. Foi utilizado o valor padronizado pelo MCTI (2010) para esta variável conforme a condição anaeróbia da massa de resíduo aterrada, ou seja, 10% para lixões, 5% para aterros controlados e 0 (zero) em aterros sanitários.

3.1.2. Tratamento Biológico (Compostagem e Biodigestão)

Para se estimarem as emissões de CH₄ e de N₂O pelo tratamento biológico (compostagem e biodigestão), foram utilizadas as Equações 14 e 15 a seguir:

$$\text{Emissões de CH}_4 = \sum (M_i \times EF_i) \times 10^{-3} - R \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

Emissões de CH₄ são as emissões totais de CH₄ no ano do inventário (10³ tCH₄);

M_i é a massa de resíduos orgânicos tratados por tratamento biológico do tipo i (10³ t); EF_i é o fator de emissão para o tratamento i (= 4 gCH₄/kg de resíduo tratado);

i = compostagem ou digestão anaeróbia;

R é o total de CH₄ recuperado no ano do inventário (10³ tCH₄);

$$\text{Emissões de N}_2\text{O} = \sum (M_i \times EF_i) \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

Emissões de N₂O são as emissões totais de N₂O no ano do inventário (10³ tN₂O);

M_i é a massa de resíduos orgânicos tratados por tratamento biológico do tipo i (10³ t);

EF_i é o fator de emissão para o tratamento i (= 0,3 gN₂O/kg de resíduo tratado);

i = compostagem ou digestão anaeróbia

3.1.3. Tratamento Térmico (Incineração e Usina)

Tanto a incineração controlada (quando há uma usina para tal fim específico) quanto à incineração (ou queima) a céu aberto de resíduos emitem CO₂, CH₄ e N₂O, sendo que as emissões de CO₂ são as mais relevantes neste processo. Ressalte-se, entretanto, que somente as emissões de CO₂ de produtos não biogênicos devem ser contabilizadas, que é o caso das emissões de plásticos, borrachas convencionais, solventes, restos de petróleo e derivados. No caso de papéis, restos alimentares e resíduos de madeira de manejo florestal, estas emissões não resultam em aumento de CO₂ na atmosfera, pois são de origem biogênica.

As emissões de metano, por sua vez, são relevantes e ocorrem em incinerações a céu aberto, devido à queima incompleta pela ausência de sistemas de controle. As emissões de N₂O serão consideradas apenas nos casos onde a temperatura de queima for baixa (entre 500 e 950°C). Para se estimar as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O da incineração, foram utilizadas as Equações 16, 17 e 18.

$$\text{Emissões de CO}_2 = \sum (SW_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i \times OF_i) \times 44/12 \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

Emissões de CO₂ são as emissões de CO₂ no ano do inventário (10³ t/ano);

SW_i é o total de resíduos do tipo i (em peso seco) incinerado (10³ t/ano);

dm_i é a fração (conteúdo) de matéria seca no resíduo (em peso seco) incinerado;

CF_i é a fração de carbono na matéria seca (conteúdo total de carbono);

FCF_i é a fração de carbono fóssil no total de carbono;

OF_i é o fator de oxidação (fração);

44/12 é o fator de conversão de C para CO₂;

i = tipo de resíduo incinerado;

$$\text{Emissões de CH}_4 = \sum (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

Emissões de CH₄ são as emissões no ano do inventário (10³ t/ano);

IW_i é a quantidade de resíduo sólido incinerado do tipo i (10³ t/ano);

EF_i é o fator de emissão de CH₄ (kgCH₄/10³ t de resíduo);

10⁻⁶ é o fator de conversão de kg para 10³ t;

i = categoria ou tipo de resíduo; e

$$\text{Emissões de N}_2\text{O} = \sum (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

Emissões de N₂O são as emissões no ano do inventário (10³ t/ano);

IWi é a quantidade de resíduo incinerado do tipo i (10^3 t/ano);

EFi é o fator de emissão de N_2O ($kgN_2O/10^3$ t de resíduo) para resíduo do tipo i;

10^{-6} é o fator de conversão de kg para 10^3 t;

i = categoria ou tipo de resíduo incinerado.

3.2. Esgotos Domésticos e Efluentes Industriais

Os esgotos (ou efluentes líquidos ou ainda águas residuais) são fontes de emissão de CH_4 quando tratados ou dispostos anaerobiamente. Podem também ser fontes de emissão de N_2O , quando este gás é produzido pela decomposição de compostos nitrogenados presentes nos efluentes encaminhados aos corpos d'água. As emissões de CO_2 , embora existam, não são consideradas por serem de origem biogênica, analogamente às emissões de resíduos sólidos.

Os efluentes industriais podem ser tratados na própria planta ou descartados no sistema de esgotamento sanitário local. Neste último caso, as emissões dos efluentes industriais são calculadas juntamente com os esgotos domésticos e comerciais. A produção de metano associada ao tratamento de efluentes industriais é contabilizada somente levando em conta os efluentes com alto teor de carga orgânica, tratados sob condições anaeróbias (IPCC, 2006). As indústrias com maior potencial de geração de metano no tratamento anaeróbio de seus efluentes são as de fabricação de papel e celulose, abatedouros e estabelecimentos de processamento de carnes, indústrias de bebidas e alimentos, refinarias de açúcar, álcool e petróleo, indústrias que trabalham com compostos químicos orgânicos, lavanderias/tinturarias, fábricas de sabão e detergentes e fábricas de tintas e resinas.

Para calcular as emissões indiretas de N_2O dos efluentes descartados em ambientes aquáticos e do tratamento em fossas foram utilizados os dados de consumo de proteína da população adotados no inventário nacional de emissões. A produção da carga orgânica é estimada em função de coeficientes per capita multiplicados pela evolução da população atendida. Os passos para calcular as emissões de metano dos esgotos foram os seguintes:

- Obter o incremento da população no período;
- Estimar a carga orgânica total do efluente (Equação 19);
- Obter o fator de emissão para cada sistema ou caminho de tratamento/descarte do efluente;

- Utilizar a equação 20 para estimar as emissões, ajustando se há remoção do lodo ou recuperação do metano e somando os resultados para cada sistema/caminho.

A quantidade total de material orgânico degradável contido no esgoto/efluente (COT) foi função da população e da DBO gerada por pessoa e expresso em kg de DBO/ano, como evidencia a Equação 19.

$$\text{COT} = P \times \text{DBO} \times 0,001 \times I \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

COT é a carga orgânica total do efluente no ano do inventário (kg DBO/ano);

P é a população no ano do inventário;

DBO é a demanda bioquímica de oxigênio per capita no ano do inventário (g/pessoa/ano);

0,001 é a conversão de g DBO para kg DBO;

I é o fator de correção para descarte adicional de DBO industrial na rede coletora.

A equação geral para estimar as emissões de CH₄ de efluentes líquidos foi a seguinte:

$$\text{Emissões de CH}_4 = (\text{FE}_j \times (\text{COT} - S)) - R \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

Emissões de CH₄ são as emissões de metano no ano do inventário (kgCH₄/ano);

FE_j é o fator de emissão (kgCH₄/kgDBO);

j é o sistema ou caminho do tratamento/disposição;

COT é a carga orgânica total no esgoto no ano do inventário (kgDBO/ano);

S é o componente orgânico removido como lodo no ano do inventário (kgDBO/ano);

R é a quantidade de metano recuperada no ano do inventário (kgCH₄/ano);

Os dados necessários para se estimarem as emissões de N₂O foram: o conteúdo de nitrogênio no efluente, a população e a geração per capita média anual de proteína (kg/pessoa/ano). Esta geração de proteína per capita consistiu no consumo humano, multiplicado por fatores que

contabilizam a proteína não consumida e a proteína descartada por indústrias nos sistemas de esgotos. Para estes fatores foram utilizados os valores padrões do IPCC (2006) para os países em desenvolvimento da América do Sul, de 1,1, para proteína não consumida e descartada, e 1,25, para fontes industriais e comerciais. Estimou-se o nitrogênio total contido nos efluentes pela Equação 21.

$$N_{\text{efluente}} = (P \times \text{Proteína} \times F_{\text{NPR}} \times F_{\text{não-con}} \times F_{\text{ind-com}}) - N_{\text{lodo}} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

N_{efluente} é o total anual de nitrogênio no efluente (kgN/ano);

P é a população;

Proteína é o consumo de proteína per capita anual;

F_{NPR} é a fração de nitrogênio na proteína (padrão = 0,16 kg N / kg proteína);

$F_{\text{não-con}}$ é o fator para proteína não consumida adicionada ao efluente;

$F_{\text{ind-com}}$ é o fator para proteína descartada no efluente pela indústria e pelo comércio;

N_{lodo} é o nitrogênio removido com o lodo (padrão = 0 kg N / ano).

A equação geral simplificada para calcular as emissões de N_2O foi a seguinte:

$$\text{Emissões de } \text{N}_2\text{O} = N_{\text{efluente}} \times FE_{\text{efluente}} \times 44/28 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Emissões de N_2O são as emissões de óxido nitroso no ano do inventário (kg N_2O /ano);

N_{efluente} é o nitrogênio presente no efluente descartado no ambiente aquático (kgN/ano);

FE_{efluente} é o fator de emissão (kg N_2O -N / kg N);

44/28 é o fator equivalente à conversão da massa molecular de N_2O -N por N_2O .

O fator de emissão para um sistema ou caminho de tratamento e disposição de esgotos é função do potencial máximo de produção de metano (B_0) e do fator de correção do metano (FCM) para aquele sistema. O B_0 é a quantidade máxima de metano que pode ser produzido por uma dada quantidade de carga orgânica contida no efluente (kg CH_4 /kgDBO) e o FCM indica a capacidade de produção de metano em cada tipo de sistema ou caminho de tratamento e disposição.

$$FE = B_0 \times FCM$$

(Equação 23)

Não havendo valores específicos para o potencial máximo de produção de metano (B_0), foi adotado o valor padrão de 0,6 kgCH₄/kgDBO (IPCC, 2006). A partir dos valores fornecidos para o FCM, de acordo com os tipos de destinações identificados, foram utilizados como fatores de emissão (FE) os valores calculados, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Fatores de Correção do Metano (FCM) e respectivos Fatores de Emissão (FE) para esgotos

Tipo de tratamento ou descarte	FCM	FE
Descarte em rios, mar ou lagoas/lagos	0,10	0,06
Valões estagnados	0,50	0,30
Valões com fluxo ou rede de coleta	0,00	0,00
Planta de tratamento aeróbica, centralizada (bem operada)	0,00	0,00
Planta de tratamento aeróbica, centralizada (mal operada ou saturada)	0,20	0,12
Digestor anaeróbico para lodo	0,80	0,48
Reator anaeróbico	0,80	0,48
Lagoa rasa anaeróbica	0,00	0,00
Lagoa profunda anaeróbica	0,80	0,48
Fossas sépticas	0,50	0,30
Latrina (clima seco, lençol freático profunda, famílias pequenas)	0,05	0,03
Latrina (clima seco, lençol freático profundo, uso comum por várias pessoas)	0,40	0,24
Latrina (clima úmido, lençol freático raso)	0,70	0,42
Latrina (remoção periódica do sedimento para uso como fertilizante)	0,10	0,06

Fonte: IPCC (2006)

4. Cenário de Referência

Para construção dos cenários futuros, o Setor Resíduos pôde ser dividido em três substratos, por porte de cidades. Nas cidades maiores, com população acima de 500 mil habitantes, e regiões metropolitanas têm-se em geral uma taxa de coleta acima de 90% com os resíduos dispostos em aterros controlados e sanitários com maiores índices de coleta e tratamento de esgotos em estações de tratamento centralizadas, com média de coleta em torno de 50%, mas apenas 10% tratado em ETE. Nas cidades de porte médio, com mais de 100 mil habitantes, e pequenas cidades a eficiência de coleta não é tão alta e menos lixo é disposto em aterros sanitários e mais em lixões e o esgoto também menos coletado e mais tratado de forma descentralizada em fossas sépticas.

Esse panorama mostra que em 2015 mais de 60% do lixo coletado no país ainda eram dispostos em lixões e aterros controlados, cenário contrário ao estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos, que previa o encerramento de lixões e aterros controlados em 2014. Nesse cenário tão desfavorável, foram estabelecidas como metas de referência o cumprimento das PNRS e PNSB de modo reduzir a destinação inadequada dos resíduos, mantendo-se a capacidade relativa de destruição de biometano em aterros sanitários e aumentando-se em 20% os índices de coleta de esgotos e em 5% o potencial de tratamento anaeróbio com destruição de biometano nas ETE existentes. O subsetor industrial seguiu a tendência da geração de resíduos e esgotos em função da produção industrial e da demanda de energia, principalmente na tipologia de alimentos e bebidas, e incrementou a destruição do biometano produzido em suas ETE.

4.1. Resíduos Sólidos

4.1.1 Hipóteses e evolução dos níveis de atividade

Em 2010, a média brasileira de geração de resíduos, de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010 (ABRELPE, 2011) foi de 1,213 kg/hab.dia, com uma eficiência de coleta de 89%, portanto com uma taxa de coleta de 1,079 kg/hab.dia. Já em 2016, a média foi de 1,040 kg/hab.dia, com uma eficiência de coleta de 91%, portanto com uma taxa de coleta de 0,948 kg/hab.dia (ABRELPE, 2017). Porém, existe uma variação deste valor considerando as regiões, os Estados da Federação e os municípios, devido principalmente ao nível de renda da população. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, essa média de coleta é de 1,295 kg/hab.dia e, na cidade do Rio de Janeiro, sobe para 1,861 kg/hab.dia.

Segundo a ABRELPE (2017) foram geradas no Brasil cerca de 78,3 milhões de toneladas Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Para estimar a produção futura de resíduos urbanos foram utilizadas as estimativas de população urbana até 2050, apresentadas no capítulo macroeconômico, e a tendência de crescimento de produção de resíduos per capita que relaciona a produção de resíduos com o crescimento do PIB per capita, o que resultou num crescimento moderado de 68,9% no ano de 2050 relativamente a 2010 (aproximadamente um crescimento total de 1,5% a.a.).

A metodologia do IPCC (First Order Decay – FOD, IPCC 2006) e respectivos parâmetros foram adotados nos cálculos. Para a evolução da destinação dos RSU, neste Cenário de Referência, foi adotada a seguinte evolução:

Tabela 4. Hipóteses sobre a destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Cenário de Referência (2015-2050)

Destino Final	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Lixão	44%	42%	40%	35%	28%	19%	10%	5%
Aterro Controlado	19%	18%	10%	5%	2%	1%	0%	0%
Aterro Sanitário	37%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%

Fonte: Elaboração própria.

Para o cálculo do metano recuperado dos sistemas, por se tratar do Cenário de Referência onde estão previstas intervenções sanitárias, mas não um esforço adicional de mitigação de emissões no setor em face de custos extraordinários que seriam verificados, manteve-se constante o percentual de recuperação do III inventário nacional (MCTI, 2015). A Tabela 5 mostra o nível de atividade para o subsetor de resíduos sólidos no Cenário de Referência (NDC).

Tabela 5. Evolução do nível de atividade no Subsetor de Resíduos Sólidos Urbanos no Cenário de Referência (2015-2050)

Hipóteses		2015	2020	2030	2040	2050
Geração de Resíduos	kg/hab.dia	1,200	1,126	1,306	1,541	1,806
	t/ano	76.306.091	75.247.172	93.200.402	114.834.433	136.502.268
Coletado	%	87%	91%	100%	100%	100%
	t/ano	63.761.370	66.262.660	90.404.390	111.389.400	132.407.200
Reciclagem	%	3%	3%	3%	3%	3%
	t/ano	2.289.183	2.257.415	2.796.012	3.445.033	4.095.068

Hipóteses		2015	2020	2030	2040	2050
Lixão	%	44%	42%	35%	19%	5%
	t/ano	28.055.003	27.830.317	31.641.537	21.163.986	6.620.360
Aterro Controlado	%	19%	18%	5%	1%	0%
	t/ano	12.114.660	11.927.279	4.520.220	1.113.894	-
Aterro Sanitário	%	37%	40%	60%	80%	95%
	t/ano	23.591.707	26.505.064	54.242.634	89.111.520	125.786.840
Recuperação de Metano	%	15%	15%	15%	15%	15%
Queima de Metano	GgCH ₄	275,4	298,7	417,3	593,0	807,2

Fonte: Elaboração própria

A incineração é pouco utilizada para o tratamento dos resíduos tanto de saúde (RSS) quanto industriais (RSI). Na presente hipótese, a geração de resíduos de saúde cresce conforme a população e a de resíduos industriais conforme o consumo de energia da indústria de alimentos e bebidas. Os parâmetros considerados nas estimativas, como carbono contido nos resíduos, fração de carbono fóssil, recuperação de biogás, eficiência dos incineradores e fatores de emissão de metano e de óxido nitroso, são aqueles apresentados no III inventário nacional de (MCTI, 2015). A Figura 2 ilustra a evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário de Referência, em milhões de toneladas.

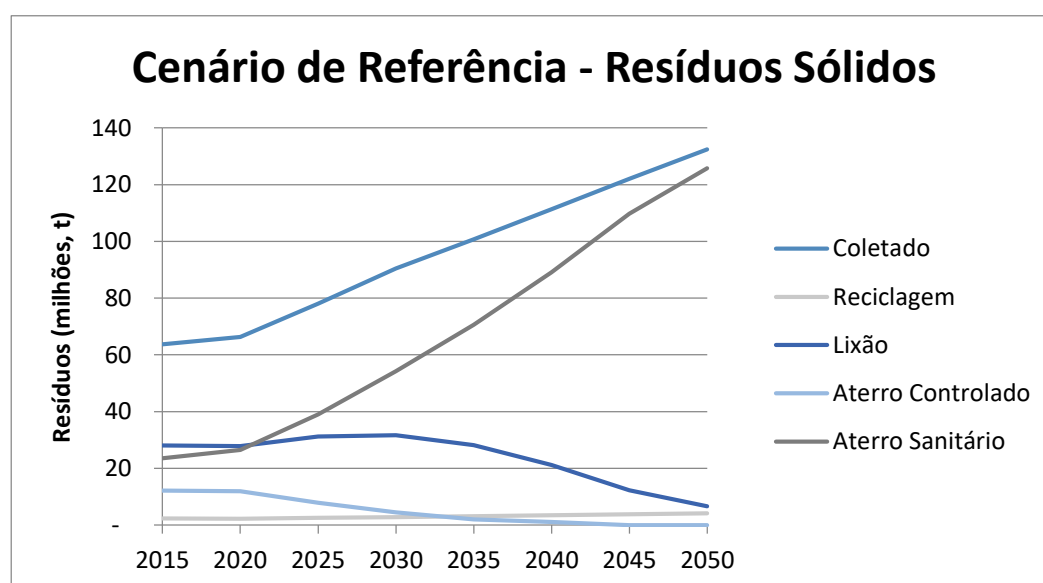


Figura 2. Evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário de Referência (Mt)

4.4.2. Resultados

A Tabela 6 apresenta os valores estimados para as emissões de Resíduos Sólidos ao longo dos anos de cenário, por gás. A Figura 3 apresenta a evolução das emissões já convertidas para dióxido de carbono equivalente. Os resultados indicam um crescimento de 269% em 2050 relativamente a 2010 nas emissões do tratamento dos resíduos sólidos urbanos e industriais por aterramento, de 44% nas de resíduos de serviços de saúde e de 102% nas de resíduos industriais, ambos por incineração.

Tabela 6. Estimativas de emissões de Resíduos Sólidos, por gás (Gg), no Cenário de Referência (2010-2050)

Emissões		2010	2020	2030	2040	2050
CH ₄ (Gg)	RSU+RSI	1.327	1.692,4	2.364,7	3.360,1	4.573,9
CO ₂ (Gg)	RSS	39,38	46,59	54,45	58,02	56,74
	RSI	136,3	139,7	195,0	238,1	275,9
N ₂ O (Gg)	RSS	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004
	RSI	0,008	0,009	0,012	0,015	0,017

Fonte: Elaboração própria

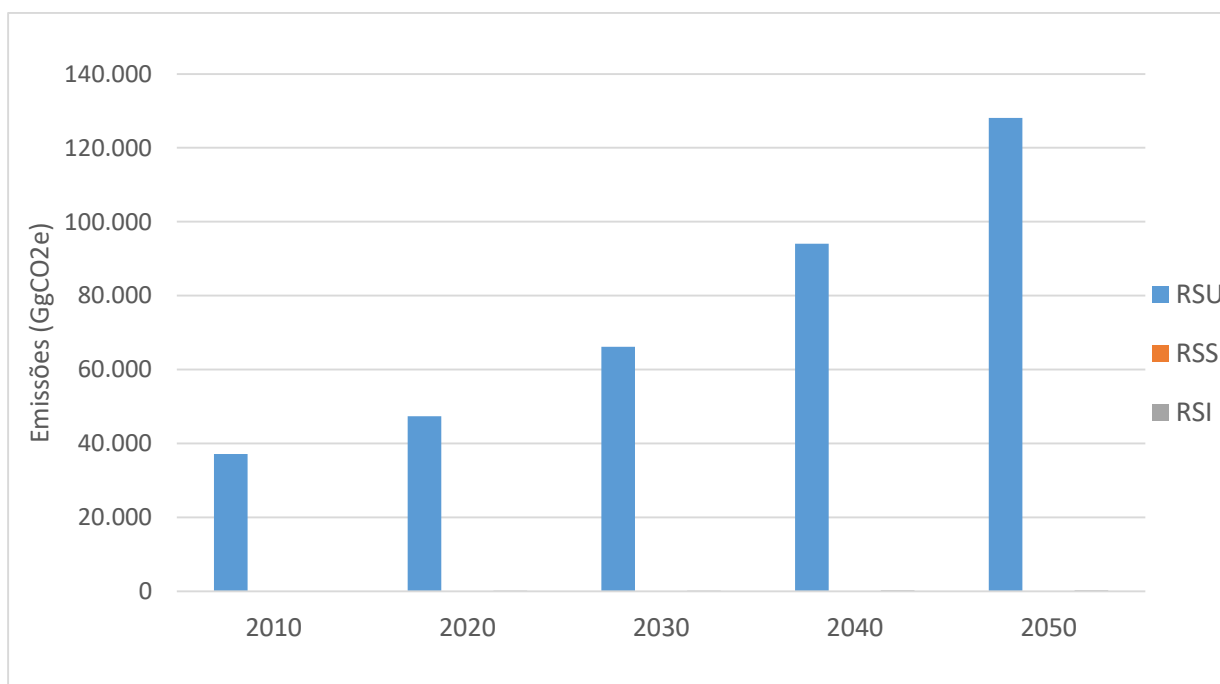


Figura 3. Evolução das emissões de resíduos sólidos 2010-2050 no Cenário de Referência (Gg CO₂e)

Nota: GWP do metano = 28

Fonte: Elaboração própria

4.2. Esgotos e Efluentes

4.2.1 Hipóteses e evolução dos níveis de atividade

As emissões de GEE provenientes do tratamento e da disposição dos esgotos urbanos foram estimadas considerando que até 2050, a totalidade da população urbana estaria atendida por serviços de coleta de esgotos, contra os atuais 57%. Os tipos de tratamento para 2050 foram mantidos proporcionalmente constantes (mesmo *share* atual das tecnologias). No caso da população sem coleta, 54% do esgoto são tratados por fossas sépticas e 37% por fossas rudimentares, 5% são despejados diretamente em corpos hídricos e 4% em valas (PNAD, 2008). No caso da população com coleta, o percentual de participação adotado por cada tecnologia é apresentado na Figura 4.

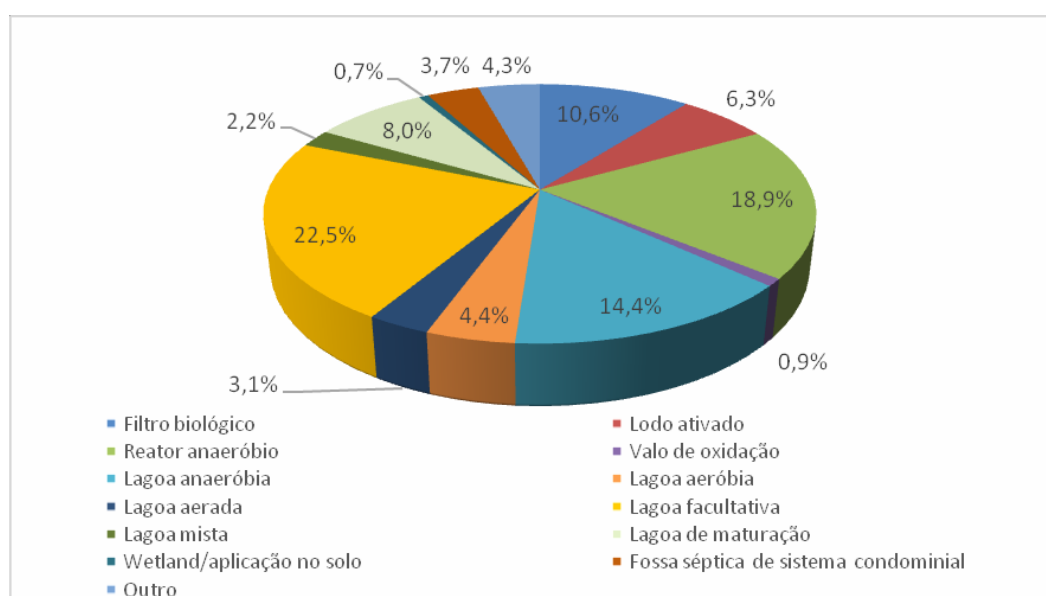


Figura 4. Tipos de Tratamento de Esgoto no Brasil (%)

Fonte: (MCTI, 2015)

Os processos anaeróbios de tratamento - reatores e digestores anaeróbios de sistemas de lodos ativados – já contam com queimadores onde o CH₄ emitido por esses sistemas é parcialmente destruído, com uma eficiência de aproximadamente 50% (MCTI, 2015). Os parâmetros de cálculo foram obtidos no estudo IES-Brasil 2030 (ROVERE et al., 2015) e do III Inventário Brasileiro (MCTI, 2015). A Tabela 7 mostra o nível de atividade para o subsetor de esgotos no Cenário de Referência.

Tabela 7. Evolução do nível de atividade do subsetor de esgotos no Cenário de Referência (2015-2050)

Hipóteses de Esgotos		2015	2020	2030	2040	2050
Coletado	tDBO/ano	2.043.196	2.176.906	3.038.682	3.485.305	3.748.993
	%	51%	53%	71%	78%	84%
ETE anaeróbio	tDBO/ano	127.509	181.535	472.314	727.555	952.965
	%	3%	4%	11%	16%	21%
ETE aeróbio	tDBO/ano	240.679	250.690	724.105	779.133	790.843
	%	6%	6%	17%	17%	18%
Fossa Séptica	tDBO/ano	843.718	823.092	781.641	604.724	384.604
	%	21%	20%	18%	13%	9%

Fonte: Elaboração Própria

As emissões de efluentes industriais foram estimadas com uma função que melhor ajusta a produção de carga orgânica ao PIB industrial, considerando a série história do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões de GEE (MCTI, 2015). A recuperação de metano cresce paulatinamente e obedece aos valores da Tabela 8.

Tabela 8. Hipótese sobre os níveis de recuperação de metano de efluentes industriais no Cenário de Referência (2010-2050)

Recuperação de Metano (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	35%	38%	40%	43%	45%	48%	50%	53%	55%

Fonte: 2010 (MCTI, 2015), demais anos elaboração própria.

4.2.2. Resultados

A Tabela 9 a seguir apresenta os valores estimados para as emissões de esgotos sanitários e efluentes industriais ao longo dos anos de cenário, por gás. A Figura 5 apresenta a evolução das emissões já convertidas para dióxido de carbono equivalente. Os resultados indicam um crescimento de 31% em 2050 relativamente a 2010 nas emissões do tratamento de esgotos sanitários e de 169% nas emissões do tratamento de efluentes industriais. Nota-se que o crescimento das emissões de esgotos é relativamente pequeno quando comparado ao da população e parte do esgoto coletado é encaminhado a ETes anaeróbias, as quais queimam também parte do metano gerado.

Tabela 9. Emissões de Esgotos Sanitários e Efluentes Industriais, por gás (Gg), no Cenário de Referência (2010-2015)

Emissões		2010	2020	2030	2040	2050
CH ₄ (Gg)	Esgotos Domésticos	461,24	494,03	584,80	612,72	606,46
	Efluente Industrial	500,91	570,80	834,85	1091,12	1347,40
N ₂ O (Gg)	Esgotos Domésticos	8,34	8,92	9,31	9,79	9,74

Fonte: Elaboração Própria

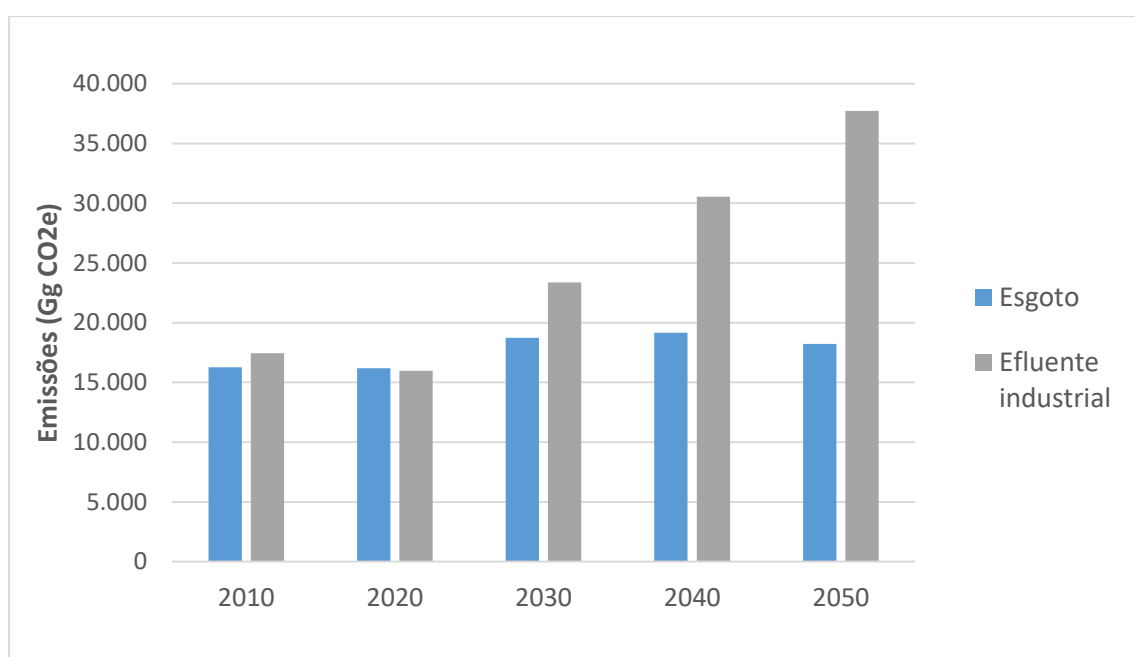


Figura 5. Evolução das emissões de esgotos sanitários e efluentes industriais no Cenário de Referência de 2010-2050 (Gg CO₂e)

Nota: GWP do metano = 28 e do N₂O = 265

Fonte: Elaboração própria

5. Cenário 1,5°C

No Cenário 1,5°C, além das medidas de adequação no tratamento, adotadas com base nas metas das políticas de saneamento, foram introduzidas em maior escala outras tecnologias de tratamento térmico e biológico de resíduos atualmente utilizadas em países mais desenvolvidos, considerando que o incremento futuro do PIB per capita do Brasil levaria ao mesmo nível atual desses países e, portanto, à utilização das mesmas tecnologias. Para viabilizar essa comparação foram consideradas as duas maiores regiões metropolitanas do país, São Paulo e Rio de Janeiro.

Dessa forma, foram pesquisadas as vidas úteis dos atuais aterros licenciados em operação nessas regiões metropolitanas (BOB AMBIENTAL, 2017; ESSENCIS, 2017; CICLUS AMBIENTAL, 2017; CETESB, 2017; ROVERE et al, 2017) e estimada a capacidade de aterramento futura para a crescente geração de resíduos. Foi considerado como início das demandas por novas tecnologias os momentos em que essas respectivas capacidades de aterramento fossem esgotadas, com o encerramento definitivo dos aterros sanitários nessas capitais.

Adicionalmente ao aumento da capacidade de coleta e queima, foram incorporadas outras formas de aproveitamento do biometano produzido nos aterros e ETE, para geração de eletricidade e substituição do gás natural como combustível em usinas térmicas e veículos. Os tratamentos em usinas térmicas e de biodigestão também produzem eletricidade e biometano, respectivamente, reduzindo as emissões do setor energético. A Tabela 10 mostra as medidas de mitigação consideradas neste cenário.

Tabela 10. Medidas elencadas no Setor de Resíduos no Cenário 1,5°C – 2020-2050

Medida de mitigação		Cenário 1,5°C
1	Triagem (manual, automatizada ou Coleta Seletiva/Logística Reversa)	100% em 2050
2	Reciclagem	10% em 2050
3	Usinas de biodigestão com aproveitamento de metano	10% em 2050
4	Usinas térmicas com geração de eletricidade	8% em 2050
5	Aumento da captura de metano para aproveitamento energético em aterros sanitários	20% em 2050
6	Aumento da captura e destruição de metano em aterros sanitários	45% em 2050
7	Compostagem aeróbia nas pequenas cidades	15% em 2050
8	Aumento da capacidade de tratamento por reatores anaeróbios nas ETE	15% em 2050
9	Aumento da captura e destruição de metano nas ETE anaeróbias	80% em 2050
10	Aumento da capacidade de tratamento por reatores anaeróbios em ETE industriais	55% em 2050

Fonte: Elaboração própria

5.1. Resíduos Sólidos

5.1.1 Hipóteses e evolução dos níveis de atividade

A Tabela 11 mostra o nível de atividade para o subsetor de resíduos sólidos no Cenário 1,5° C.

Tabela 11. Evolução do nível de atividade do Subsetor de Resíduos Sólidos no Cenário 1,5°C

Resíduos Sólidos		2020	2030	2040	2050
Geração de Resíduos	kg/hab.dia	1,126	1,306	1,541	1,806
	t/ano	75.247.172	93.200.402	114.834.433	136.502.268
Coletado	%	91%	100%	100%	100%
	t/ano	66.262.660	90.404.390	111.389.400	132.407.200
Reciclagem	%	4,0%	6,0%	8,0%	10,0%
	t/ano	3.009.887	5.592.024	9.186.755	13.650.227
Lixão	%	42,0%	35,0%	19,0%	5,0%
	t/ano	27.830.317	31.641.537	21.163.986	6.620.360
Aterro Controlado	%	18,0%	5,0%	1,0%	0,0%
	t/ano	11.927.279	4.520.220	1.113.894	-
Aterro Sanitário	%	37,6%	47,9%	58,2%	69,6%
	t/ano	24.907.934	43.339.074	64.784.658	92.105.914
Recuperação de Metano	%	30,0%	41,7%	53,3%	65,0%
Queima de Metano	GgCH ₄	497,7	881,9	1.514,0	2.421,6
Geração de Eletricidade	GgCH ₄	99,5	278,2	592,9	1.076,3
Termoenergia	%		3,0%	7%	8%
	t/ano		2.796.012	8.038.410	10.920.181
Biodigestão	%		5,0%	9,0%	10,0%
	t/ano		4.660.020	10.335.099	13.650.227
Compostagem (cidades pequenas)	%	4,5%	8,0%	11,5%	15,0%
	t/ano	1.597.130	3.447.528	5.953.352	9.110.518

Fonte: Elaboração própria

A Figura 6 ilustra a evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário 1,5° C, em milhões de toneladas.

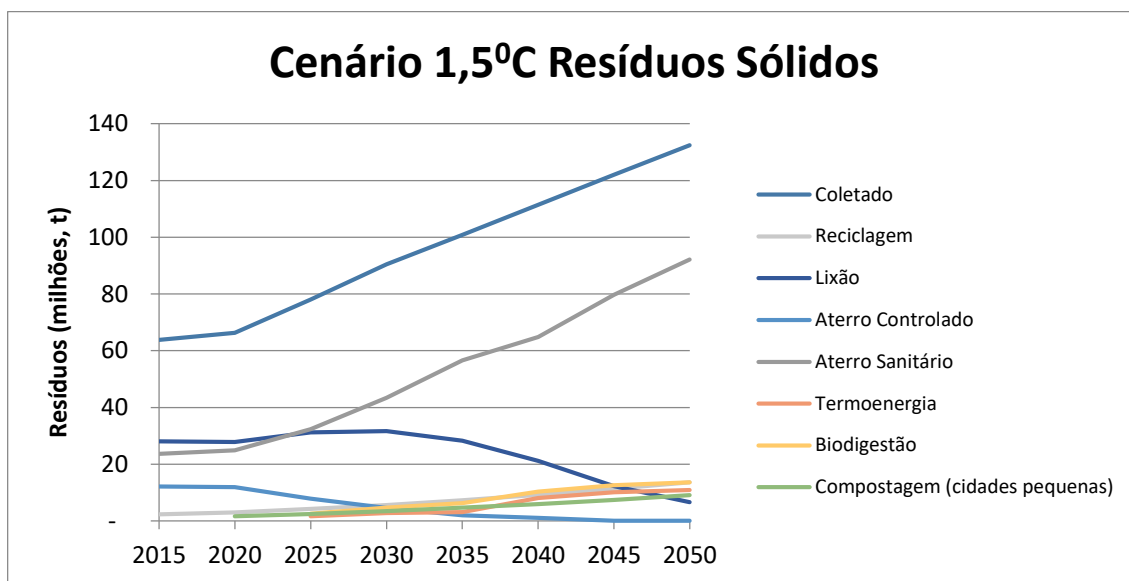


Figura 6. Evolução dos níveis de atividade no tratamento de resíduos sólidos no Cenário 1,5° C (Mt)

5.1.2. Resultados

A Tabela 12 a seguir apresenta os valores estimados para as emissões de Resíduos Sólidos ao longo dos anos de cenário, por gás. Na sequência, a Figura 7 apresenta a evolução das emissões já convertidas para dióxido de carbono equivalente. Os resultados indicam uma redução de 28% em 2050 relativamente a 2010 no aterramento de resíduos urbanos e industriais, crescimento de 44% na incineração de resíduos de serviços de saúde e 60,2% na incineração de resíduos industriais.

Tabela 12. Estimativas de emissões de resíduos sólidos, por gás (Gg), no cenário de 1,5°C (2010-2015)

Emissões		2010	2020	2030	2040	2050
CH ₄ (Gg)	RSU+RSI	1327,0	1.692,4	1.463,5	1.354,7	892,8
	Compostagem Aeróbia	-	-	17,2	29,8	45,5
	Biodigestão Anaeróbia	-	-	3,1	6,9	9,1
	Tratamento Térmico	-	-	0,2	0,5	0,7
	Subtotal CH ₄ (Gg)	1.327,0	1.692,4	1.484,0	1.391,9	948,1
CO ₂ (Gg)	RSS	39,4	46,6	54,5	58,0	56,7
	RSI	122,9	139,7	140,9	167,2	197,0
	Tratamento Térmico	-	-	1.634,6	4.699,3	6.384,0
Subtotal CO ₂ (Gg)		162,3	186,3	1830	4924,5	6637,7

N ₂ O (Gg)	RSS	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004
	RSI	0,007	0,009	0,009	0,010	0,012
	Compostagem Aeróbia	-	-	1,0	1,8	2,8
	Tratamento Térmico	-	-	0,2	0,7	0,9
Subtotal N ₂ O (Gg)		0,01	0,01	1,2	2,5	3,7

Fonte: Elaboração própria

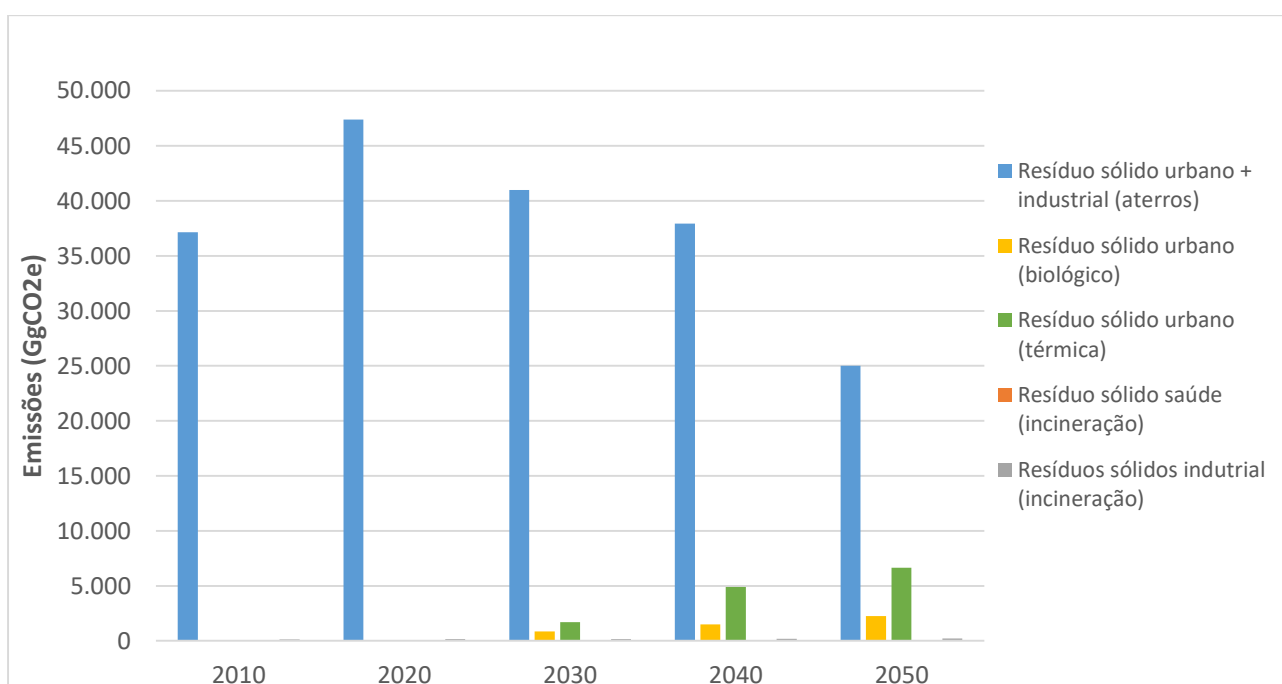


Figura 7. Evolução das emissões de resíduos sólidos 2010-2050 no Cenário 1,5°C (Gg CO₂e)

Nota: GWP do metano = 28

Fonte: Elaboração própria

5.2. Esgotos e Efluentes

5.2.1 Hipóteses e evolução dos níveis de atividade

Analogamente aos sólidos, considerou-se um esforço maior, em relação ao Cenário de Referência, para aumentar mais de 10% a capacidade do sistema de coleta de esgotos, com ampliação da capacidade de tratamento anaeróbico para 20%, agora com aproveitamento do biometano, com consequente redução do tratamento em fossas sépticas.

O subsetor industrial mantém a tendência, mas passa a utilizar o biometano capturado em suas ETE para uso energético. A Tabela 13 mostra o nível de atividade neste cenário de mitigação.

Tabela 13. Evolução do nível de atividade de esgotos do Cenário 1,5° C (2020-2050)

Tratamento de Esgotos		2020	2030	2040	2050
Coletado	tDBO/ano	2.176.906	3.038.682	3.485.305	3.748.993
	%	53%	71%	78%	84%
ETE anaeróbio	tDBO/ano	181.535	472.314	727.555	952.965
	%	4%	11%	16%	21%
ETE aeróbio	tDBO/ano	250.690	724.105	779.133	790.843
	%	6%	17%	17%	18%
Fossa Séptica	tDBO/ano	823.092	781.641	604.724	384.604
	%	20%	18%	13%	9%

Fonte: Elaboração própria

5.2.2. Resultados

A Tabela 14 a seguir apresenta os valores estimados para as emissões de Esgotos Sanitários e Efluentes Industriais ao longo dos anos de cenário, por gás. Na sequência, a Figura 8 apresenta a evolução das emissões já convertidas para dióxido de carbono equivalente. Os resultados indicam uma redução de 2,7% da emissão de metano e um crescimento de 16,9% da emissão de óxido nitroso em 2050 relativamente a 2010, no caso de esgotos sanitários, e de 17,2% no caso de efluentes industriais.

Tabela 14. Emissões de esgotos domésticos e efluentes industriais, por gás (Gg), no Cenário 1,5°C (2010-2050)

Emissões		2010	2020	2030	2040	2050
CH ₄ (Gg)	Esgotos Domésticos	461,24	491,04	560,58	534,43	448,92
	Efluente Industrial	488,63	448,45	519,67	562,67	572,84
N ₂ O (Gg)	Esgotos Domésticos	8,34	8,92	9,31	9,79	9,74

Fonte: Elaboração própria

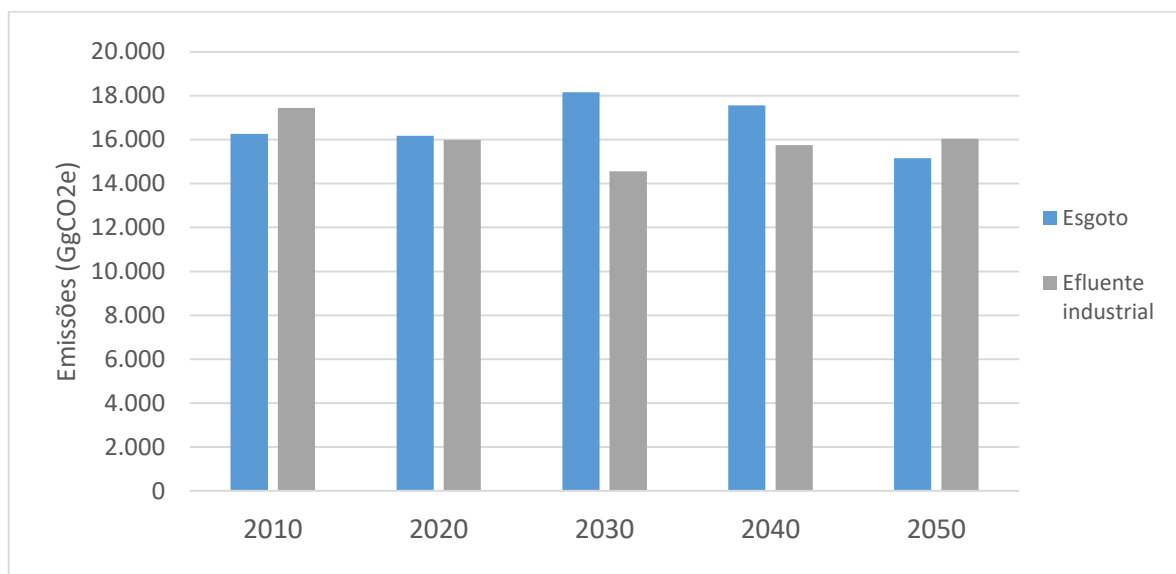


Figura 8. Evolução das emissões de esgotos sanitários e efluentes industriais no Cenário 1,5°C (Gg CO₂e)

Fonte: Estimativas própria

5.3 Custos de mitigação das medidas consideradas¹

A seguir, apresenta-se uma síntese dos custos de mitigação estimados. Foram considerados valores em dólares de 2015; barril de petróleo a 87 US\$ no período até 2050 (baseado no cenário '450 Scenario' do World Energy Outlook 2015 da Agência Internacional de Energia); e taxa de desconto: 8% a.a.. Os custos de mitigação de 2021 a 2030 estão expressos em valor presente de 2021 e os custos de mitigação de 2031 a 2050 estão expressos em valor presente de 2031.

Tabela 15. Custos de Mitigação do Setor de Resíduos

Medida de Mitigação	2021-2030		2031-2050	
	Redução de emissões (Mt CO ₂ e)	Custo unitário de abatimento (US\$/tCO ₂ e)	Redução de emissões (Mt CO ₂ e)	Custo unitário de abatimento (US\$/tCO ₂ e)
Resíduos				
Captura e destruição de metano em aterros sanitários	131,6	5,5	1107,3	-1,1
Captura e destruição de metano de sistemas de tratamento de esgotos urbanos	3,7	148,9	48,8	67,2
Captura e destruição de metano de sistemas de tratamento de efluentes industriais	56,0	72,1	306,3	28,4
Reciclagem	4,7	168,9	31,5	112,4

¹ Ver detalhes no relatório de microeconomia do projeto IES-Brasil 2050: Grottera, C. (2018). Custos de Mitigação até 2050 no Cenário de 1,5°C. Disponível em www.centroclima.coppe.ufrj.br

6. Comparação dos Resultados dos Cenários

Com a implementação das ações no cenário de mitigação, o setor resíduos terá uma redução significativa nas emissões chegando a 65% de redução no ano de 2050 em relação ao Cenário de Referência. O subsetor resíduos sólidos reduzirá suas emissões em 74% enquanto o subsetor efluentes 45%. A maior redução se deve ao incremento no aproveitamento do biometano produzido nos aterros sanitários, tanto para geração de eletricidade como por substituição do gás natural em usinas térmicas ou como combustível veicular. A redução na emissão de resíduos industriais se deve à melhoria de eficiência energética da produção. A indústria também contribui com a redução das emissões do tratamento de efluentes com o incremento da captura de biometano para geração e consumo próprio de eletricidade. E esgotos com o aumento do tratamento anaeróbio com destruição de biometano em *flares*. A Tabela 15 mostra os resultados dessas emissões nos dois cenários e as figuras 9 e 10 apresentam as evoluções das emissões no setor de resíduos para cada cenário.

Tabela 16. Comparação da evolução das emissões entre os dois cenários no Setor Resíduos (2010-2050)

Cenário de Referência (NDC)	2010	2020	2030	2040	2050
	71.045	79.736	108.580	144.107	184.362
Resíduos sólidos	37.335	47.575	66.465	94.383	128.406
Resíduo sólido urbano + industrial (aterros)	37.156	47.386	66.212	94.081	128.068
Resíduo sólido de saúde (incineração)	40	47	55	59	58
Resíduo sólido industrial (incineração)	138	142	198	242	280
Efluentes	33.710	32.161	42.114	49.725	55.956
Esgoto Doméstico	16.269	16.179	18.739	19.173	18.229
Efluente industrial	17.441	15.982	23.376	30.551	37.727
Cenário 1,5 °C	2010	2020	2030	2040	2050
	71.045	79.736	76.434	77.863	65.346
Resíduos sólidos	37.335	47.575	43.720	44.550	34.155
Resíduo sólido urbano + industrial (aterros)	37.156	47.386	40.977	37.930	24.998
Resíduo sólido urbano (biológico)			844	1.499	2.254
Resíduo sólido urbano (térmica)			1.701	4.891	6.645
Resíduo sólido de saúde (incineração)	40	47	55	59	58
Resíduo sólido industrial (incineração)	138	142	143	170	200
Efluentes	33.710	32.161	32.714	33.313	31.191
Esgoto Doméstico	16.269	16.179	18.163	17.559	15.152
Efluente industrial	17.441	15.982	14.551	15.755	16.039

Fonte: Elaboração própria.

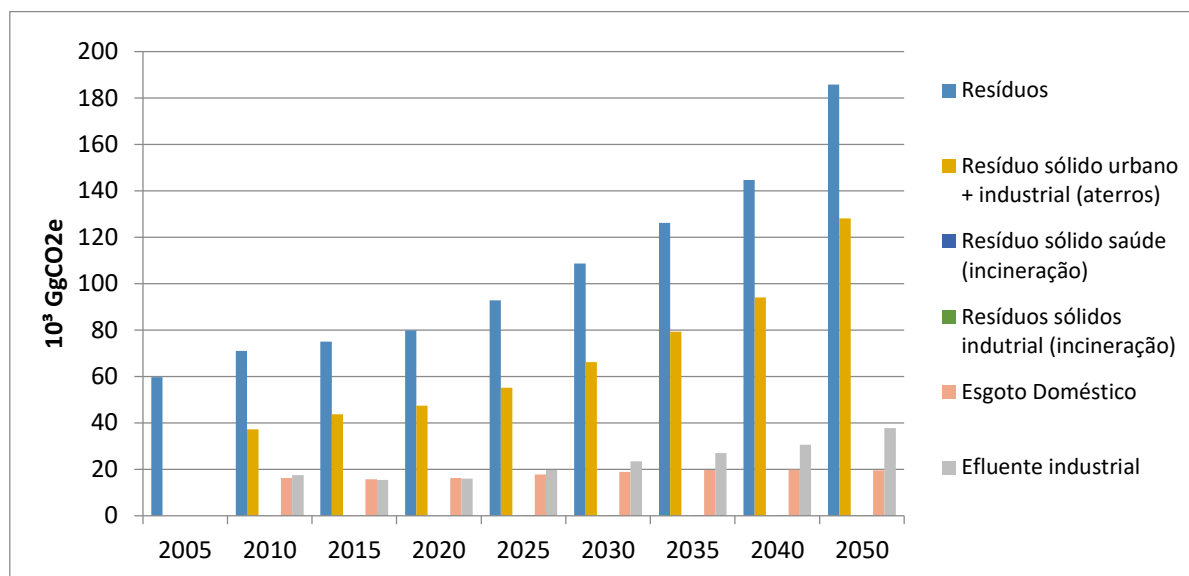


Figura 9. Evolução das emissões do setor de resíduos no Cenário de Referência (Gg CO₂e)

Fonte: Elaboração própria

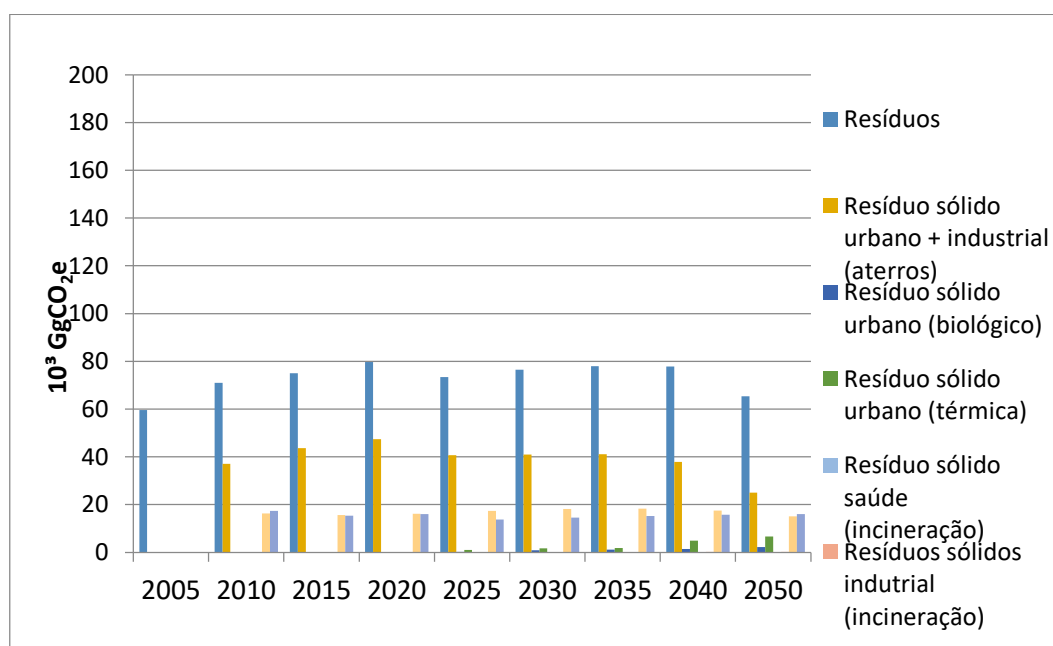


Figura 10. Evolução das emissões do setor de resíduos no cenário de 1,5°C (Gg CO₂e)

Fonte: Elaboração própria

As Figuras 11 e 12 a seguir apresentam os respectivos volumes de produção de biometano nos tratamentos por aterro, tratamento térmico e de biodigestão e respectivos potenciais de geração de

eletricidade a partir do aproveitamento desse biometano. Os fatores de geração e eficiência segundo Morgado e Ferreira (2006).

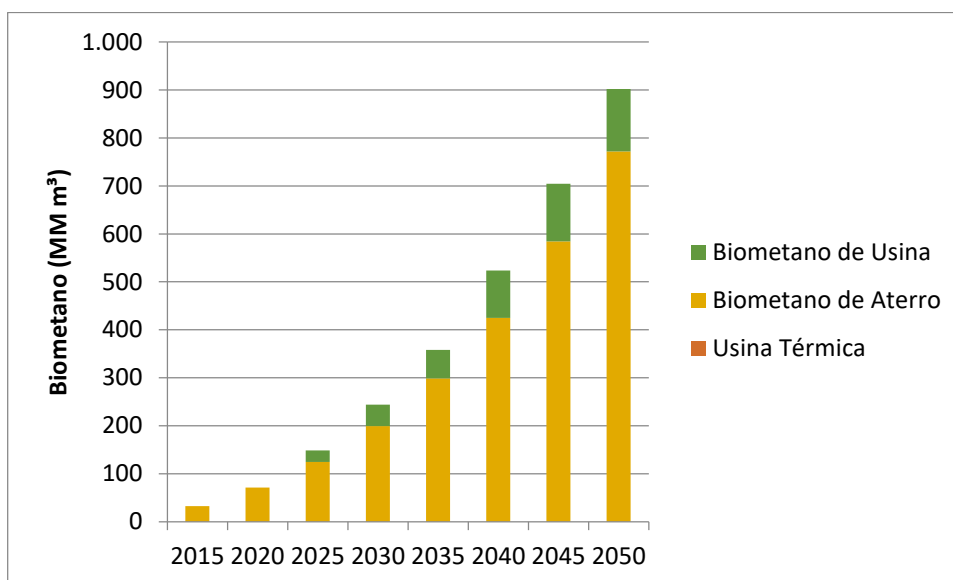


Figura 11. Evolução dos volumes de geração de biometano do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C (Mm³)

Fonte: Elaboração própria

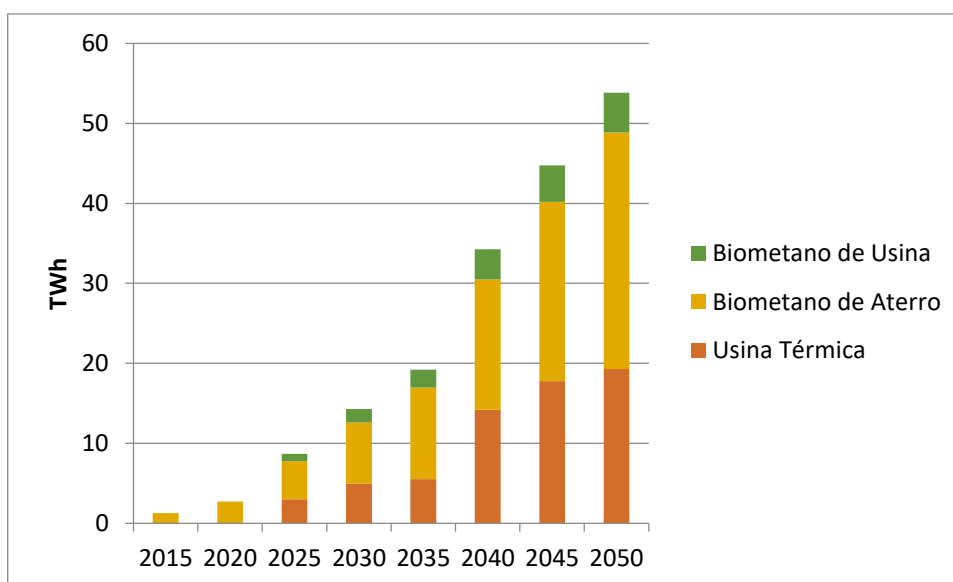


Figura 12. Evolução do potencial de geração de eletricidade a partir do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C (TWh)

Fonte: Elaboração própria

Na hipótese de se destruir todo o metano gerado nos sistemas de tratamento de resíduos (seja por queima, seja como substituto de gás natural) e ainda de se utilizar totalmente os resíduos remanescentes como combustíveis substitutos aos fósseis, as emissões totais que poderiam ser evitadas comparando-se os cenários REF e 1,5° C alcançaria cerca de 135 Mt CO₂e, 16 Mt CO₂e acima dos 119 Mt CO₂e contabilizados nos valores totais desse estudo. O potencial de cada uma das opções analisadas se encontra na Figura 13.

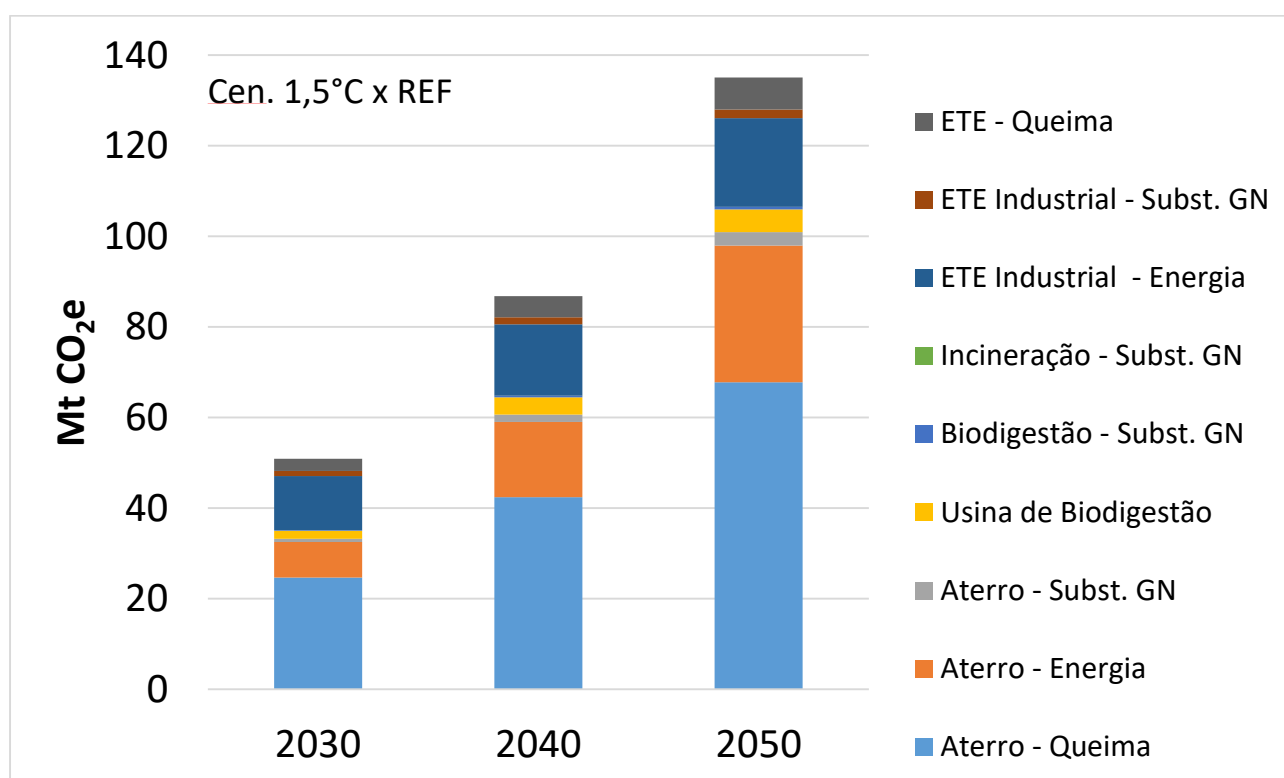


Figura 13. Potencial total de emissões evitadas do tratamento de resíduos no Cenário 1,5°C relativamente ao Cenário de Referência (Mt CO₂e)

Fonte: Elaboração própria

7. Prospecção Tecnológica para a Construção de um Cenário Disruptivo

No cenário disruptivo, as ações de mitigação do setor resíduos serão focadas principalmente na prevenção da geração do que no tratamento em si do resíduo gerado, pelo incremento de processos prévios como triagem automatizada, logística reversa, reciclagem e tratamento mecânico biológico, de modo encaminhar somente ao tratamento aquele resíduo sem valor comercial.

Processos como gaseificação e pirólise de resíduos ainda não se mostram viáveis economicamente para o Brasil nesse horizonte estudado, tendo em vista que os demais tratamentos ainda possuem potencial de crescimento no mercado de tratamento de resíduos sólidos com melhores resultados.

Outro processo viável seria do co-tratamento por biodigestão acelerada de resíduo e esgoto, que consiste na incorporação dos esgotos domésticos ao processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, aumentando o volume de decomposição do lixo e de produção de biometano.

8. Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. São Paulo, 2011.
- _____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2017.
- BAREA, Ralf. **Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia no tratamento de esgotos**. 2006.
- BOB AMBIENTAL. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA**. Central de Tratamento de Resíduos de Belford Roxo-RJ. Dez. 2012. Disponível em: <http://200.20.53.3:8081/cs/groups/public/documents/document/zwew/mde2/~edisp/inea0016745.pdf>. Acesso em: 08 ago 2017.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Institui a Política Nacional de Saneamento Básico**, 2007.
- _____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 2010a.
- _____. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. **Regulamenta a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**, 2010b.

- CETESB. **Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos no Estado de São Paulo – IQR**. Disponível em: <http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/mapa_ugrhis/mapa.php#> Acesso em: 11 out. 2017.
- CICLUS AMBIENTAL. **Ficha Técnica do Centro de Tratamento de Resíduos Rio – CTR-Rio**. Disponível em: <www.ciclusambiental.com.br/arquivos/Ficha_tecnica_CTR2.pdf>. Acesso em: 12 out. 2017.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 15/14 Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Rurais**. 2015a.
- _____. **NOTA TÉCNICA DEA 16/14 Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2015b.
- _____. **NOTA TÉCNICA DEA 17/14 Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Rurais**. 2015c.
- _____. **NOTA TÉCNICA DEA 18/14 Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2015d.
- ESSENCIS. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. **Ampliação da Central de Tratamento e Valorização Ambiental – CTVA Caieiras**. Aterro de Resíduos Domiciliares e Industriais. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/events//CBH-AT/4333/volivrimactvacaieiras.pdf>. Acesso em: 08 ago 2017.
- FARIA, Flávia dos Santos. 2002, **Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002. 355 p.
- FOSTER, P. et al. **Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing**. In: SOLOMON, S. et al. (Ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. Chap. 2, p. 129-234. (IPCC Fourth Assessment Report, AR 4). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007.
- GOUVELLO, Christophe de; SOARES FILHO, Britaldo S.; SCHAEFFER, Roberto; NASSAR, André; ALVES, Fuad Jorge; ALVES, João Wagner Silva. **Brazil Low-Carbon Country Case Study**. Washington, DC: The World Bank, Energy Sector Management Assistance Program, 2010. 280 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. ISBN 978-85-240-4135-8. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 ago. 2014.
- _____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 out. 2017.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Emissions Scenarios: Summary for Policymakers**. A Special Report of IPCC Working Group III. Geneva, 2000. 20 p. ISBN: 92-9169-113-5.
- _____. **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.; Tanabe K. (eds). Hayama, Japan: IGES, 2000. ISBN 4-88788-032-4.

- LOUREIRO, Saulo Machado. **Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- LOUREIRO, Saulo Machado; ROVERE, Emilio Lèbre La; MAHLER, Cláudio Fernando. **Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the State and City of Rio de Janeiro**. International Journal of Integrated Waste Management, Science & Technology. Oxford, UK, v. 33, n. 5, p. 1302-1312, mar. 2013. ISSN 0956-053X.
- LOUREIRO, Saulo Machado; ZVEIBL, V. Z.; DUBEUX, C. B. S. **Cenários de Emissão de GEE do Setor de Tratamento de Resíduos**. In LOUREIRO, S. M.; ZVEIBL, V. Z.; e DUBEUX, C. B. S. (2015). Cenários do Setor de Resíduos. In: LA ROVERE, E. L. et al. – Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil, Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- MAIER, S.; OLIVEIRA, L. B. **Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 35, n. C, p. 484-498. 2014.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, 2004.
- _____. **II Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal**. Ed. Alves, J. W. S.; Vieira, S. M. M. São Paulo: Cetesb, 2010.
- _____. **III Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal**. Brasília, DF: MCTI, Relatórios técnicos de referência, versão para consulta pública, 2015.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, DF, 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES**. Brasília, DF, 2012.
- MONTEIRO, Alessandra Elias. **Índice de Qualidade em Aterros de Resíduos Sólidos Industriais – IQRI**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- MORGADO, T. C; FERREIRA, O. M. **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Co-geração de Energia**. Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia. – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2006.
- OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**, v. 31, n. 14, p. 1481-1491. 2003.
- OLIVEIRA, L. B. et al. Analysis of the sustainability of using wastes in the Brazilian Power industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 3, p. 883-890. 2008.

- OLIVEIRA, L. B. **Potenciais e custos de abatimento de emissões de GEE para setores-chave da economia brasileira - Gestão de resíduos**. Projeto: Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-chave do Brasil. 2016.
- ROVERE, Emilio Lèbre La; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; COSTA, Ângela Oliveira; OLIVEIRA, Luciano Basto; BUZZATTI, Marcelo Golin; PORTO, Paulina; ROSA, Tereza da Silva; WILLS, Willian; COSTA, Claudia do Valle; AQUINO, Luiz Carlos Sérvulo; REAL, Márcia Valle. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/LIMA, 2007. 304 p.
- ROVERE, Emilio Lèbre La; D'AVIGNON, Alexandre Louis; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; COSTA, Claudia do Valle; BUZZATTI, Marcelo Golin; WILLS, Willian; PORTO, Paulina; MEDEIROS, Anamélia; RIBAS, Rodrigo; LOUREIRO, Saulo Machado; CARLONI, Flávia Beatriz. **Inventário de emissões de gases de efeito-estufa no Estado de Minas Gerais**. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2008. 252 p.
- ROVERE, E. L. L. et al. Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 422-429. 2010.
- ROVERE, Emilio Lèbre La; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; PEREIRA JÚNIOR, Amaro Olimpio; MEDEIROS, Anamélia; CARLONI, Flávia Beatriz; TURANO, Patrícia; SOLARI, Renzo; WILLS, Willian; HASHIMURA, Luís; BURGI, Adriano Salvi; FIORINI, Ana Carolina. **Cenários de Evolução das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, 2011. 102 p.
- ROVERE, Emilio Lèbre La; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt; WILLS, William; LOUREIRO, Saulo Machado; SANTOS, Mauro Meirelles de Oliveira; WALTER, Michele Karina Cotta; SILVA, Giovaninni Luigi da; ZICARELLI, Isabella da Fonseca; OLIVEIRA, Tairini Joyce Pimenta de; WESTIN, Thais Caroline Guimarães; SOARES, Isadora Mendes de Moraes; OBERLING, Daniel. **Atualização do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa – GEE do Estado do Rio de Janeiro para o ano de 2015**. Relatório o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa para o ano de 2015. Rio de Janeiro: Centro Clima/COPPE/UFRJ, jun. 2017.
- SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO – SEA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos, relatório-síntese**. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 138 p.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, abr. 2014a. 164 p.
- _____. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2012**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, maio 2014b. 143 p.
- SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO – SEA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos, relatório-síntese**. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 138 p.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, abr. 2014a. 164 p.
- _____. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2012**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, maio 2014b. 143 p.

VON SPERLING, M.; OLIVEIRA, S. M. Avaliação comparativa de seis tecnologias de tratamento de esgoto em termos de atendimento a padrões de lançamento. **In:** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 2005. Campo Grande. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005.