

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS FRANCISCO BELTRÃO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO HENRIQUE ALVES CERQUEIRA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO A PARTIR DA QUEIMA
DE METANO PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO
BELTRÃO–PR**

FRANCISCO BELTRÃO – PR

2021

JOÃO HENRIQUE ALVES CERQUEIRA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO A PARTIR DA QUEIMA
DE METANO PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO
BELTRÃO-PR**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Naimara Vieira Prado

Coorientadora: Prof.^a MSc Izadora Consalter Pereira

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2021



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO A PARTIR
DA QUEIMA DE METANO PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO
DE FRANCISCO BELTRÃO-PR**

por

João Henrique Alves Cerqueira

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 18:30 horas, do dia 18 de maio de 2021, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. A candidata foi arguida pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Banca Avaliadora:

Naimara Vieira Prado

(Presidente da Banca)

Izadora Consalter Pereira

(Membro da Banca)

Jhenifer Bastos

(Membro da Banca)

Denise Andréia Szymczak

(Professora Responsável pelo TCC)

Wagner de Aguiar

(Coordenador do Curso de Engenharia Ambiental)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todas as pessoas que diariamente lutam por um Brasil mais justo e sustentável, que trabalham para que a educação superior não seja vista como um privilégio, para que os recursos naturais não sejam vistos apenas como matéria-prima e para que o lucro não continue sendo colocado acima da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, que foi a pessoa que mais acreditou em mim e que mais me apoiou durante a graduação.

À minha mãe, por todo o incentivo nesses anos.

Às professoras Priscila Conceição Ribeiro, Naimara Vieira Prado, Izadora Consalter Pereira, Mayara Yamanoe e Michelle Milanez, que me acompanharam desde o início do curso como grandes mentoras e amigas.

A todos os demais servidores da UTFPR Francisco Beltrão que se dedicam diariamente em garantir que a educação superior continue sendo pública e de qualidade.

À Beatriz Pagy e Gabri Baesse que apoiaram na criação do Clima de Eleição e me deram apoio na reta final da graduação.

À Janaína Piovezan, Thaís Sanches, Jessica Malucelli e Amanda Alberti pela amizade antiga e pela confiança e apoio que sempre tiveram por mim.

Ao grupo dos 3% que se posicionaram pela educação pública de qualidade e com coragem ocuparam o nosso campus em um dos momentos de maior retrocesso no nosso país.

Aos demais colegas de movimento estudantil e do ativismo socioambiental, por compartilharem o propósito de trabalhar por um país mais justo e sustentável.

Ao Fernando Haddad e ao Luiz Inácio Lula da Silva, líderes do nosso país responsáveis pela existência da Universidade que me formou tanto tecnicamente, quanto politicamente.

CERQUEIRA, João Henrique Alves. **Estimativa do potencial energético teórico a partir da queima de metano proveniente do aterro sanitário de Francisco Beltrão – PR**. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2021.

RESUMO: A crise climática gerada pela intensificação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) se apresenta como um dos maiores desafios do século XXI. O gás metano (CH₄) ocupa a segunda colocação dos GEEs mais emitidos globalmente, estando atrás apenas do Dióxido de Carbono (CO₂). Além do mais, o metano possui como fonte antrópica a queima de combustíveis fósseis, práticas agropecuárias, tratamento de resíduos líquidos e disposição de resíduos sólidos. Neste contexto, os aterros sanitários são considerados a técnica de disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos. No Brasil, a destinação final da maior parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados são os aterros sanitários. Portanto, o “biogás” - gás resultante da decomposição anaeróbia de componentes orgânicos - é produzido no interior dos aterros e sua composição é composta principalmente por metano. Por conseguinte, algumas adaptações são necessárias para que aterros sanitários tornem-se aptos a gerar energia elétrica a partir da queima do metano presente no biogás produzido. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo utilizar a metodologia *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories* (GPC) para estimar a quantidade de metano produzido nos anos de 2017, 2018 e 2019 no aterro sanitário de Francisco Beltrão, bem como calcular seu potencial de ser convertido em energia elétrica. As estimativas calculadas de metano emitido e a curta vida útil do aterro sanitário estudado indicam que não é economicamente viável para o município investir na conversão deste recurso em energia elétrica, orientando para a criação de políticas públicas que podem ser adotadas para mitigar as emissões de metano no próximo aterro sanitário, a ser construído.

Palavras-chave: Crise climática. Biogás. Emissões de Gases do Efeito Estufa. Resíduos sólidos. Geração de energia.

CERQUEIRA, João Henrique Alves. **Estimate of theoretical energy potential from burning of methane from the sanitary landfill of Francisco Beltrão – PR.** 46 p. Final Project (BA in Environmental Engineering), Technological Federal University of Paraná. Francisco Beltrão, 2021

ABSTRACT: The climate crisis generated by the intensification of greenhouse gas (GHG) emissions presents itself as one of the greatest challenges of the 21st century. Methane gas (CH₄) ranks second in the GHGs most emitted globally, behind only Carbon Dioxide (CO₂). In addition, methane has as its anthropic source the burning of fossil fuels, farming practices, liquid waste treatment and disposal of solid waste. In this context, landfills are considered to be the environmentally appropriate final disposal technique for tailings. In Brazil, the final destination of most urban solid waste (MSW) generated is landfills. Therefore, "biogas" - gas resulting from the anaerobic decomposition of organic compounds - is produced inside landfills and its composition is mainly methane. Therefore, some adaptations are necessary so that sanitary landfills become able to generate electrical energy from the burning of methane present in the biogas produced. Thus, the present work aimed to use the *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories* (GPC) methodology to estimate the amount of methane produced in the years 2017, 2018 and 2019 at the Francisco Beltrão landfill, as well as to calculate its potential to be converted into electrical energy. Calculated estimates of methane and biogas emitted and the short useful life of the studied landfill indicate that it is not economically viable for the municipality to invest in converting this resource into electricity, guiding the creation of public policies that can be adopted to mitigate emissions of methane at the next landfill to be built.

Key words: Climate crisis. Biogas. Greenhouse Gas Emissions. Solid waste. Energy generation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS GLOBAIS DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO PERÍODO DE 1850 ATÉ 2015.....	17
FIGURA 2 – REGISTROS DE TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM QUATRO INSTITUTOS DE PESQUISA METEOROLÓGICA DIFERENTES NO PERÍODO DE 1880 A 2010 (NASA GODDARD INSTITUTE FOR SPACE STUDIES, MET OFFICE HADLEY CENTRE/ CLIMATIC RESEARCH UNIT, NOAA NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER.....	18
FIGURA 3 – QUANTIDADE GLOBAL DE EMISSÕES DE GEE’S ENTRE 1990 E 2010, MEDIDAS EM MILHÃO DE TONELADAS MÉTRICAS DE DIÓXIDO DE CARBONO-EQUIVALENTE	20
FIGURA 4 – CONCENTRAÇÃO GLOBAL DO METANO NA ATMOSFERA ENTRE 1750 E 2018.....	21
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DAS REAÇÕES ANAERÓBIAS COM SEUS RESPECTIVOS PRODUTOS.....	23
FIGURA 6 – COMPOSIÇÃO GLOBAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS POR COMPONENTE.....	25
FIGURA 7 – DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL POR TIPO DE DESTINAÇÃO (T POR DIA).....	27
FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO NO ESTADO DO PARANÁ	333

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DO BIOGÁS DE ATERROS RSU.....	22
TABELA 2 – ANO DE PUBLICAÇÃO E INVENTÁRIOS MUNICIPAIS E ESTADUAIS DE GEE NO BRASIL.....	299
TABELA 3 – METODOLOGIAS E EMISSÕES DOS INVENTÁRIOS URBANOS BRASILEIROS NO ANO DE 2015	30
TABELA 4 – PESAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DESTINADOS AO ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO BELTRÃO NOS ANOS DE 2017, 2018 E 2019	37
TABELA 5 – RESULTADOS DE METANO ESTIMADO, BIOGÁS ESTIMADO E ENERGIA POTENCIAL ESTIMADA PARA O ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO BELTRÃO NOS ANOS INVENTARIADOS DE 2017, 2018 E 2019	38
TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE BIOGÁS PARA OS ATERROS DE FRANCISCO BELTRÃO, FOZ DO IGUAÇU (SBALQUEIRO, 2014) E BELO HORIZONTE (SNIS, 2018 E PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020).....	39
TABELA 7 – ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA POR ANO, ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA POR MÊS, ESTIMATIVA DE ECONOMIA ANUAL, ESTIMATIVA DE ECONOMIA MENSAL E ESTIMATIVA DE FAMÍLIAS NO PARANÁ ATENDIDAS NOS ANOS DE 2017, 2018 E 2019	40

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AEN	Agência Estadual de Notícias do Paraná
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
C40 Cities	Climate Leadership Group
DOC	Carbono Orgânico Degradável
DOCf	Fração do Carbono Orgânico Degradável que de fato degrada
EEA	European Environment Agency
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
F rec	Fração do Metano Recuperada no Aterro Sanitário
GEE	Gases de efeito estufa
GHG	Greenhouse gas
GPC	Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	Local Governments for Sustainability
IEAP	International Local Government GHG Emissions Analysis
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-hora
L0	Potencial de Geração do Metano
MCF	Fator de Correção do Metano baseado nas condições do Aterro Sanitário
MSWX	Massa do Resíduo Sólido Depositado no Aterro Sanitário
MW	Megawatt

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira
NOOA	National Oceanic and Atmospheric Administration
N ₂ O	Óxido Nitroso
ONU	Organização das Nações Unidas
OX	Fator de Oxidação
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PR	Paraná
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
t	Tonelada
USEPA	United States Environmental Agency
WRI	World Resources Institute

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 CRISE CLIMÁTICA.....	17
3.2 GASES DO EFEITO ESTUFA (GEEs)	19
3.2.1 Biogás	22
3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS	24
3.3.1 Disposição final dos resíduos sólidos.....	26
3.4 CÁLCULOS DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE METANO E SEU POTENCIAL EM GERAR ENERGIA ELÉTRICA.....	28
3.4.1 Cálculo das estimativas de emissões de metano em resíduos sólidos urbanos	29
3.5 RELEVÂNCIA E HISTÓRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOGÁS NO BRASIL.....	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO	33
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA GERAÇÃO E GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS.....	33
4.3 QUANTIFICAÇÃO DO METANO GERADO NO ATERRO MUNICIPAL DE FRANCISCO BELTRÃO	34
Por fim, o resultado obtido foi dividido pela densidade do gás metano (0,657 kg/ m ³) para converter o resultado de toneladas para metros cúbicos.	36
4.4 ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE BIOGÁS E DE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO ESTIMADO	36

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS COM A SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE FRANCISCO BELTRÃO	37
6. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Entre as consequências resultantes do modelo econômico desenvolvimentista adotado pelo capitalismo globalizado, a crise climática se apresenta como um grande desafio para o século XXI. Desde a revolução industrial as emissões de gases que intensificam o efeito estufa, chamados de Gases de Efeito Estufa (GEEs), aumentaram consideravelmente e isso resultou no aumento da temperatura média global. Esta temperatura, por sua vez, aumentou aproximadamente 1°C em relação às médias pré-industriais (HANSEN, 2006). Esse aumento tem sido responsável por uma série de impactos nos sistemas naturais e sociais englobando desde a intensificação dos eventos climáticos extremos até migrações humanas forçadas em massa (IPCC, 2018).

Para lidar com esse cenário, uma das principais estratégias é a mitigação, ou seja, investir em ações que buscam a redução das emissões dos GEEs decorrentes das atividades humanas que, em geral, são classificadas por setores. O setor de resíduos é responsável por cerca de 3% das emissões globais através de disposição de resíduos no solo e do tratamento de efluentes. A disposição dos resíduos sólidos orgânicos emite um gás chamado de biogás, constituído entre outros, pelo gás metano (CH₄) decorrente da decomposição anaeróbia da matéria orgânica e principal GEE produzido no setor de resíduos (IPCC, 2006).

O metano é um gás incolor e inodoro que quando não coletado de maneira adequada é emitido diretamente para a atmosfera, contribuindo significativamente para o aquecimento global por possuir capacidade ao menos 21 vezes superior de reter calor na superfície terrestre do que o dióxido de carbono, principal GEE emitido globalmente (IPCC, 2006).

Nesse contexto, faz-se necessário o correto gerenciamento dos resíduos sólidos para garantir o máximo controle dos seus impactos negativos. A disposição dos resíduos em aterros sanitários operados de acordo com as normas técnicas, apresenta-se como a melhor maneira de garantir satisfatoriamente esse objetivo. No Brasil, a questão dos resíduos sólidos enfrenta grandes desafios para garantir sua correta gestão. Segundo a ABRELPE (2017), 40,9% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no país não possuem como destino final aterros sanitários, ou seja, são

depositados em lugares inadequados para seu acondicionamento e isso gera contaminação direta por meio dos seus efluentes, emissões e outros impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana. Deste modo, a estrutura proporcionada pelos aterros sanitários permite o aproveitamento dos passivos ambientais gerados.

Para estabelecer o potencial que cada aterro sanitário apresenta em relação à geração de GEE, faz-se necessário calcular a quantidade do metano contido no biogás, produzido pela decomposição anaeróbia do resíduo sólido urbano. Para isso, organizações que trabalham com a mitigação de emissões dos governos municipais produziram o *Greenhouse Gas Protocol* (WRI, 2014). O mesmo propõe metodologias validadas para auxiliar os gestores públicos a compreender melhor as emissões municipais, a fim de cobrir uma lacuna e produzir dados que, em geral, não são dimensionados, como é o caso do aterro sanitário de Francisco Beltrão - PR.

Francisco Beltrão é a maior cidade da região sudoeste do Paraná com população aproximada de 91.093 habitantes (IBGE, 2019). Com a perspectiva de aumento populacional nos próximos anos (IPARDES, 2018), conseqüentemente, espera-se aumento na geração per capita de resíduos sólidos urbanos (RSU), e o aumento potencial na produção do biogás no aterro sanitário municipal.

O biogás quando emitido diretamente para a atmosfera é um passivo ambiental por contribuir com o efeito estufa natural. Entretanto, sua queima para geração energética apresenta potencial de reduzir o impacto ambiental e de proporcionar retorno financeiro com a geração de energia elétrica.

Deste modo, considerando que a disposição de resíduos sólidos em aterro sanitário é conceituada como ambientalmente correta apesar da geração de um passivo ambiental. Portanto, a utilização do gás metano para potencial de geração de energia elétrica tem capacidade de permitir o uso de um passivo ambiental reconhecidamente impactante.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar as emissões do gás metano (CH_4) produzido na decomposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) depositados no aterro sanitário de Francisco Beltrão-PR nos anos de 2017, 2018 e 2019, bem como estimar o seu potencial de conversão em energia elétrica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

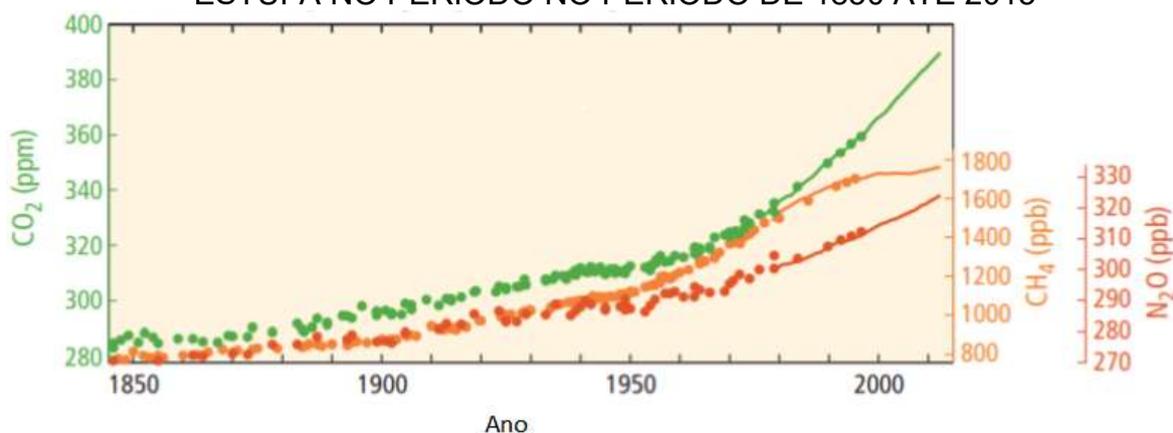
- Estimar as emissões de biogás e de gás metano no aterro sanitário de Francisco Beltrão-PR a partir da pesagem de resíduos e de valores propostos pelo IPCC de Carbono Orgânico Degradável por meio da metodologia proposta pelo World Resources Institute no *“Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories”*.
- Quantificar o potencial para conversão de energia elétrica a partir do biogás produzido pelos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro sanitário de Francisco Beltrão-PR para os anos de 2017, 2018 e 2019, com base na relação proposta por Farret (1999).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CRISE CLIMÁTICA

Como consequência do crescimento populacional e econômico, as emissões antropogênicas de gases que intensificam o efeito estufa natural têm aumentado desde os períodos pré-industriais. Atualmente essas emissões estão nos mais altos níveis, conforme registro histórico apresentado na Figura 1.

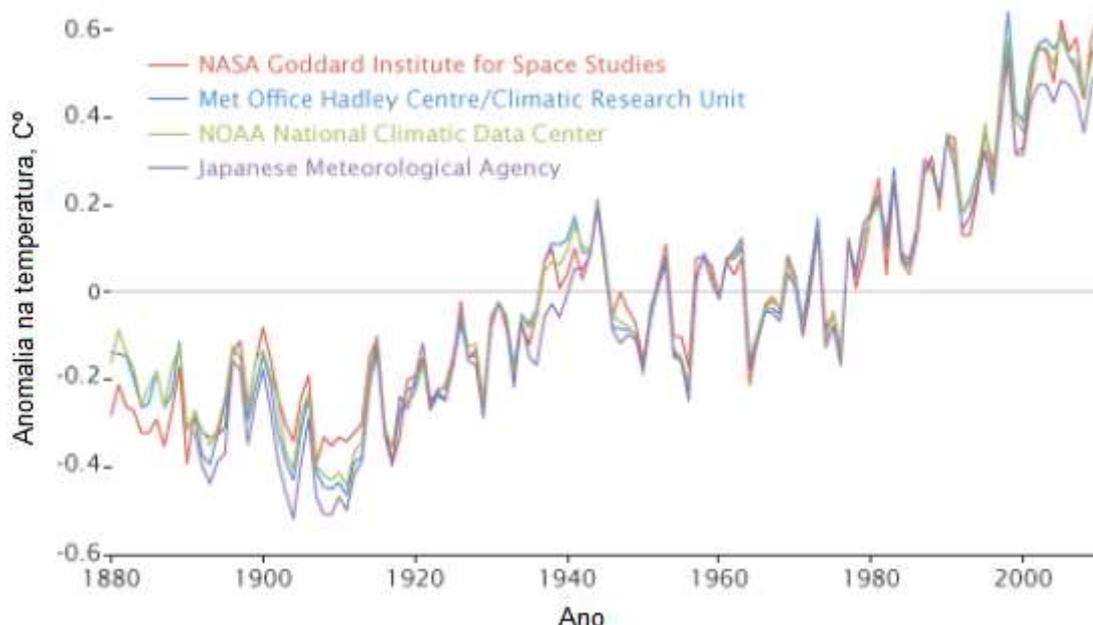
FIGURA 1 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS GLOBAIS DE GASES DO EFEITO ESTUFA NO PERÍODO DE 1850 ATÉ 2015



Fonte: IPCC (2014).

A composição química da atmosfera terrestre passou por diversas mudanças no passado, mas nos últimos 800.000 anos não houveram precedentes próximos às concentrações atuais de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (os principais GEEs emitidos nas atividades humanas). Esses gases possuem em comum a capacidade de reter na atmosfera a radiação solar e, ao longo do tempo, observa-se uma relação positiva entre o aumento de suas concentrações e a temperatura média global como demonstrado na Figura 2 (IPCC, 2014).

FIGURA 2 – REGISTROS DE TEMPERATURA MÉDIA GLOBAL EM QUATRO INSTITUTOS DE PESQUISA METEOROLÓGICA DIFERENTES NO PERÍODO DE 1880 A 2010 (NASA GODDARD INSTITUTE FOR SPACE STUDIES, MET OFFICE HADLEY CENTRE/ CLIMATIC RESEARCH UNIT, NOAA NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER



Fonte: NASA Climate 365 project - a collaboration of the NASA Earth Science News Team, NASA Goddard and Jet Propulsion Laboratory communications teams, and NASA websites Earth Observatory and Global Climate Change.

O aumento na temperatura média global traz como consequência uma série de impactos diretos e indiretos nos sistemas climáticos, como a intensificação dos eventos climáticos extremos (tempestades, estiagens e ciclones). Além disso, o derretimento das reservas de gelo nos pólos e cadeias montanhosas que escoam até o oceano e aumentam o nível do mar; aumento de temperatura do oceano e sua acidificação, entre outros impactos diversos. Essas alterações relacionadas ao clima geram consequências em todas as espécies do planeta. As relações ecológicas já ameaçadas pela influência humana tornam-se ainda mais vulneráveis (IPCC, 2014).

O cenário divulgado pelo IPCC em que não houveram medidas eficientes de mitigação de emissões de GEEs, gera a projeção de que até 2050 aproximadamente 143 milhões de pessoas em diferentes regiões do planeta tendem a migrar dos seus territórios para esquivar-se dos impactos da crise climática. Migrações forçadas têm maior tendência de ocorrer em regiões com menor disponibilidade de recursos hídricos, baixa produtividade agrícola, áreas suscetíveis ao aumento do nível do mar

e que possuem outras vulnerabilidades pré-existentes, como o baixo desenvolvimento econômico (WORLD BANK GROUP, 2018).

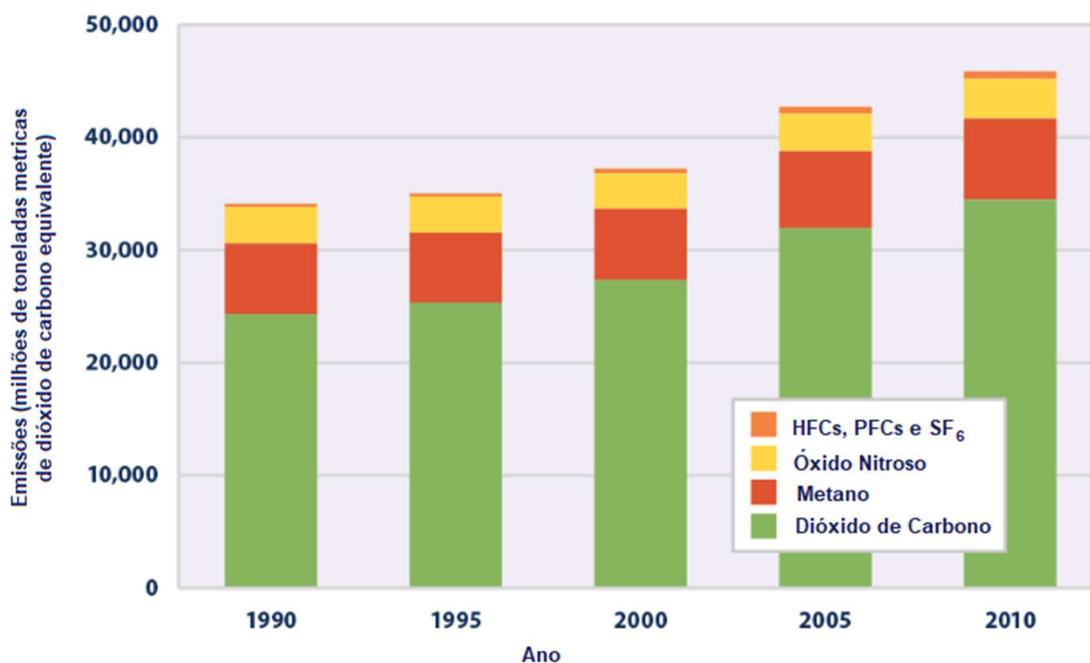
O relatório “1,5°” do IPCC publicado em 2018 alerta que, para evitar esses cenários extremos, a comunidade global tem um período de 12 anos para transitar os modelos de desenvolvimento para outros que sejam menos dependentes de atividades que emitem GEEs. Desta forma, faz-se necessário reduzir 45% das emissões até 2030 e chegar ao carbono “zero” até 2050. Isso requer dedicação política, engajamento social e ações de mitigação em todos os setores econômicos em curto espaço de tempo e, nesse contexto, todas as possibilidades de diminuir as emissões são relevantes para alcançar esse propósito (IPCC, 2018).

3.2 GASES DO EFEITO ESTUFA (GEEs)

Na composição química da atmosfera terrestre existem gases que possuem o potencial de sequestrar na superfície terrestre o calor da radiação solar, contribuindo para a manutenção do efeito estufa. Esses gases são especialmente o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). A presença desses gases é essencial para garantir a vida na Terra, caso os mesmos não estivessem presentes, a temperatura média global seria baixa e, desta maneira, não permitiria a ocorrência de água no estado líquido (IPCC, 2013).

Com a intensificação da industrialização no planeta desde o século XIX, as emissões geradas elevaram a concentração dos GEEs na atmosfera (Figura 1). Os referidos gases são capazes de intensificar o efeito estufa natural pois possuem a propriedade de reter o calor na atmosfera e, além disso, são emitidos em quantidades diferentes, como exemplificado pela Figura 3.

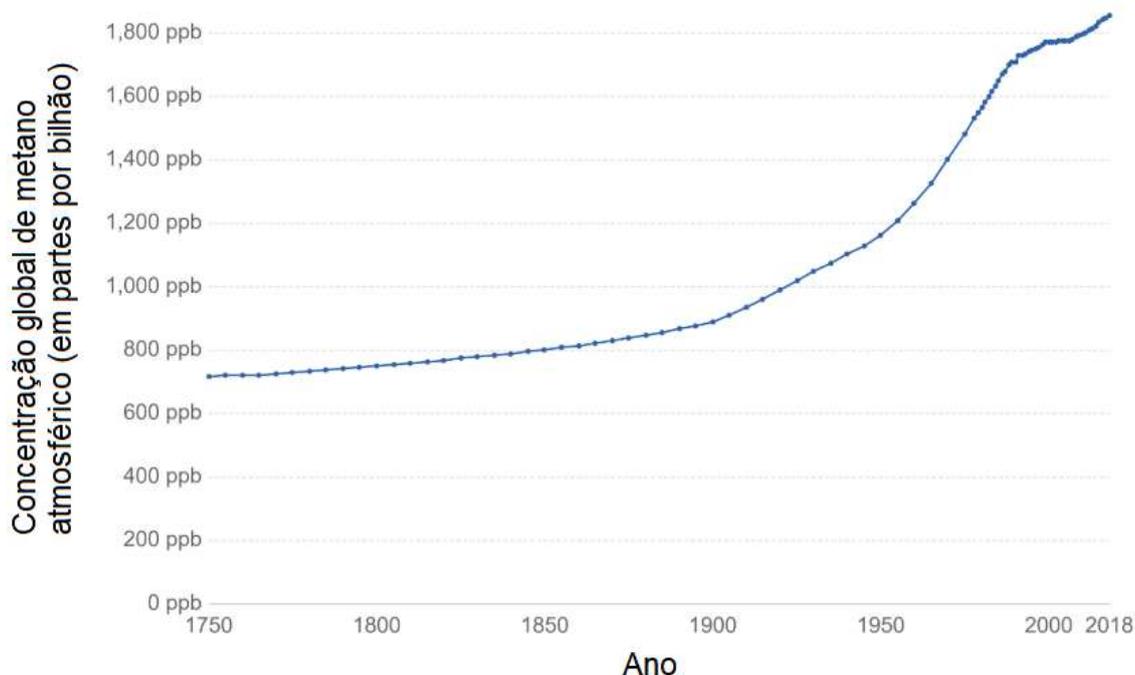
FIGURA 3 – QUANTIDADE GLOBAL DE EMISSÕES DE GEE'S ENTRE 1990 E 2010, MEDIDAS EM MILHÃO DE TONELADAS MÉTRICAS DE DIÓXIDO DE CARBONO-EQUIVALENTE



Fonte: Adaptado de USEPA (2014).

Por sua vez, o Metano (CH₄) é um gás incolor e inodoro de elevado poder calorífico emitido antropicamente e naturalmente correspondendo por até 20% do total das emissões globais. O gás tem o potencial de reter a radiação solar até 28 vezes maior que o gás o dióxido de carbono (CO₂) (FRANKENBERG, 2005). Seu tempo de vida na atmosfera é de 12,4 anos, período inferior ao dos outros principais GEEs. Isso demonstra que sua mitigação trás rápida resposta sobre os sistemas climáticos quando comparado com o CO₂, que permanece cerca de 100 anos na atmosfera (IPCC 2014). A concentração do metano na atmosfera teve aumento acentuado desde os períodos pré-industriais associada ao aumento populacional e a intensificação global da industrialização, como demonstrado na Figura 4.

FIGURA 4 – CONCENTRAÇÃO GLOBAL DO METANO NA ATMOSFERA ENTRE 1750 E 2018



Fonte: Agência Ambiental Européia (EEA) e National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

As atividades humanas correspondem atualmente por mais de 50% das emissões de metano, com contribuições provenientes da produção e utilização de combustíveis fósseis, criação de animais ruminantes, cultivos de arroz e da gestão de resíduos. As emissões naturais do metano são originadas em pântanos e áreas alagadas, em colônias de cupins e no fundo do oceano (FRANKENBERG et al., 2005).

O dióxido de carbono (CO_2) é o GEE mais emitido antropicamente. As fontes antrópicas de emissões do CO_2 são em sua maior parte relacionadas à queima de combustíveis fósseis e mudança no uso do solo (queimadas e desmatamento) (IPCC, 2018). O óxido nítrico (N_2O) é um GEE de vida na atmosfera de cerca de 100 anos com capacidade de contribuir para o efeito estufa até 300 vezes mais que o dióxido de carbono. As emissões antrópicas deste GEE são geradas principalmente como consequência da agropecuária intensiva (IPCC, 2013).

3.2.1 Biogás

O biogás é gerado a partir da decomposição anaeróbica de matéria orgânica, geralmente produzido a partir da decomposição de resíduos sólidos, efluentes industriais e domésticos. A composição do biogás pode variar conforme temperatura, pH, umidade, composição gravimétrica, idade, tempo de deposição, estrutura do aterro e tamanho das partículas (BORBA, 2006). Dos gases que compõem o biogás, as maiores partes são de gás metano e dióxido de carbono, entre outros em frações menores, conforme concentrações na Tabela 1.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO TÍPICA DO BIOGÁS DE ATERROS RSU

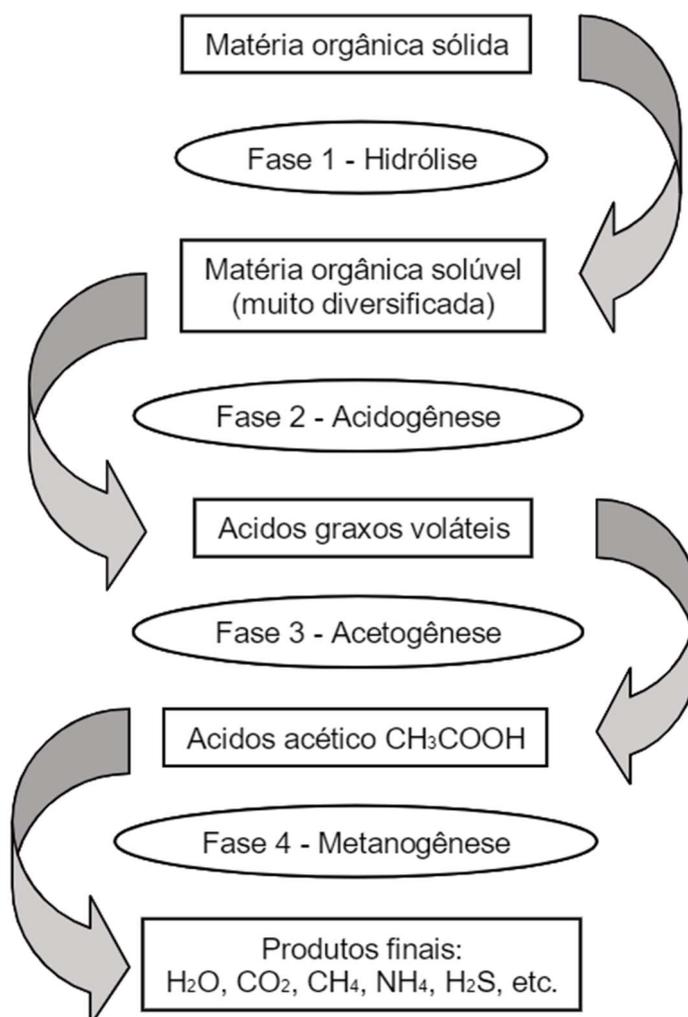
Composição	Porcentagem (%) (Base Seca)
Metano	45 - 60
Dióxido de Carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, Mercaptanos, Etc.	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de Carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Adaptado de TCHBANOGLOUS *et al.* (1994).

O processo de formação dos gases proveniente da decomposição e acumulação de resíduos sólidos urbanos (RSU) ocorre por meio de duas etapas, relacionadas à presença ou não do gás oxigênio. A primeira consiste no processo aeróbio, ou seja, com presença do gás oxigênio. Essa etapa ocorre quando o resíduo é depositado e ainda está em contato com a atmosfera e com o gás oxigênio, isso resulta no gás dióxido de carbono (CO₂). O processo anaeróbio define a segunda etapa, ou seja, após esgotar o gás oxigênio disponível (em geral, após os RSU serem recobertos com material inerte). A velocidade da degradação no processo anaeróbio ocorre mais lentamente em comparação ao processo aeróbio, cuja produção de gases pode permanecer por décadas. Deste modo, a fase anaeróbia é dividida em quatro

outras fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, apresentadas na Figura 5.

FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DAS REAÇÕES ANAERÓBIAS COM SEUS RESPECTIVOS PRODUTOS



Fonte: CASTILHOS JR. (2003).

Por ser constituído principalmente pelos dois principais GEEs, a emissão direta do biogás na atmosfera acarreta a geração de um passivo ambiental. A legislação brasileira, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos, orienta que o tratamento desse gás deve ser realizado através da queima em equipamentos denominados “flares” ou no processo de geração de energia elétrica proveniente da sua queima (BRASIL, 2010). Nesse contexto, os flares são dispositivos presentes em aterros

sanitários utilizados na ignição e queima do biogás produzido no interior do aterro. Sua principal função consiste em reduzir os impactos ambientais do biogás, pois, após sua queima o mesmo é convertido em dióxido de carbono - um gás com menor potencial explosivo e um GEE com menor potencial de intensificar o efeito estufa natural (FIGUEIREDO, 2011).

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Em todas as localizações mundiais, a geração de resíduos sólidos está em expansão, com quantidade projetada para saltar de 1,3 bilhões de toneladas no ano de 2012 para 2,2 bilhões de toneladas em 2025. A partir de um modelo econômico consumista e conseqüente aumento na geração, os impactos associados à gestão inadequada de resíduos testa a capacidade de adaptação por parte da sociedade, especialmente em países menos desenvolvidos (WORLD BANK GROUP, 2012).

No Brasil, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais causados a partir do gerenciamento incorreto destes materiais, no ano de 2010 foi sancionada a Lei Federal nº 12.305. A referida Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual dispõe sobre o correto gerenciamento dos resíduos, desde a geração, segregação, até a correta disposição final (BRASIL, 2010).

No inciso XVI, do art. 3º, da Lei Federal nº 12.305/2010, a definição de resíduos sólidos é dada por:

Art. 3º. Para os efeitos desta Lei, entende-se por: [...] XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos-d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (BRASIL, 2010).

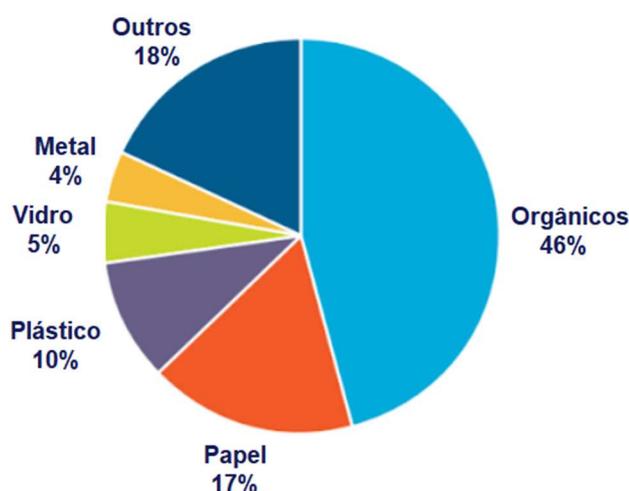
Os impactos de uma gestão incorreta dos RSUs envolvem problemas abrangentes, desde saúde pública, poluição do ar, alagamentos, saneamento ambiental inexistente, além da geração de gases de efeito estufa na sua decomposição (WORLD BANK GROUP, 2012).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2012), cerca de 51,4% dos resíduos produzidos no país são de natureza orgânica, ou seja, resultado de atividades domiciliares, comerciais, agrícolas, entre outras. Os demais resíduos recicláveis e rejeitos totalizam a composição global, conforme apresentado na Figura 6.

Assim, a compostagem apresenta-se como uma técnica economicamente viável e ambientalmente correta de tratamento para os resíduos orgânicos. O processo de compostagem apresenta facilidade operacional, reduz o volume final de rejeitos e proporciona a produção de um composto final estável rico em nutrientes (BARREIRA et al., 2006).

Entretanto, quando não há tratamento adequado a decomposição anaeróbia do resíduo produz o biogás (WORLD BANK GROUP, 2012).

FIGURA 6 – COMPOSIÇÃO GLOBAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS POR COMPONENTE



Fonte: WORLD BANK GROUP (2012).

A composição dos resíduos sólidos urbanos de uma determinada localidade pode ser realizada através da técnica conhecida como análise gravimétrica. Esta técnica quantifica individualmente cada constituinte do resíduo em peso e volume, apresenta como resultados os teores percentuais de matéria orgânica, plásticos, metais, vidros, papel/papelão, entre outros (SOARES, 2011).

Cada tipo de resíduo possui potencial de emitir metano específico conforme sua composição química. A análise gravimétrica do RSU possibilita determinar a fração de cada parcela de resíduo e estimar as suas respectivas emissões (WRI, 2014).

3.3.1 Disposição final dos resíduos sólidos

Apesar do objetivo mencionado a partir da Lei Federal nº 12.305/2010 em extinguir os lixões até 2014 e a implantação de aterros sanitários, esta meta não foi cumprida adequadamente, sendo necessária prorrogação neste prazo. Deste modo, tendo em vista a quantidade significativa de resíduos sólidos gerados diariamente, ainda há meios inadequados de disposição final, como lixões e aterros controlados.

Os lixões representam a maneira totalmente inapropriada de disposição dos resíduos sólidos sobre o solo. Nessas localidades não se realiza a cobertura diária do resíduo, não há qualquer estrutura para impermeabilização e tampouco controle da drenagem de lixiviados e gases. Essa forma causa impactos à saúde pública e ao meio ambiente e frequentemente estão associados à presença de pessoas socioeconomicamente vulneráveis com o trabalho insalubre de manejo dos resíduos sólidos no entorno (VAN ELK, 2006).

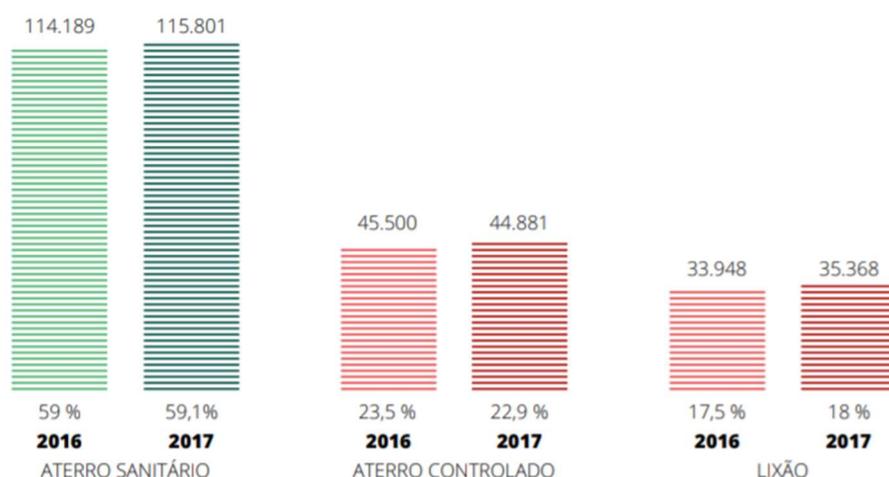
Nos aterros controlados, por sua vez, a disposição dos RSU é realizada diretamente no solo de uma área, após o depósito de resíduos há cobertura dos mesmos com material inerte. Apesar de ser uma alternativa menos impactante que os lixões, não existe um sistema de controle dos para os lixiviados e gases gerados pelos resíduos depositados (FEAM, 2006).

Por fim, os aterros sanitários são conceituados como uma técnica de disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos por não causar danos à saúde pública e ao meio ambiente, e impactos ambientais minimizados. No gerenciamento de aterros sanitários são utilizadas técnicas de engenharia orientadas pela NBR 8419/1992 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Nessa localidade, os resíduos sólidos são depositados em área de restrito acesso e impermeabilizada, além disso, os resíduos depositados são cobertos com material

inerte a cada jornada de trabalho. Deste modo, uma série de elementos de proteção ambiental deve ser incluso no projeto, como: sistema de impermeabilização de base e laterais; sistema de recobrimento diário e cobertura final; sistema de coleta e drenagem de líquidos percolados; sistema de coleta e tratamentos dos gases; sistema de drenagem superficial; sistema de tratamento de líquidos percolados e sistema de monitoramento constante (FEAM 2006). É recomendado que os aterros sanitários sejam projetados para uma vida útil máxima de 10 anos e seu monitoramento deve seguir por, no mínimo, mais 10 anos após o encerramento das atividades de deposição de RSU segundo a norma NBR 13896/1997 da ABNT.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2017, 40,9% de todos os resíduos gerados no país tem como destinação final aterros controlados ou lixões, ou seja, não são depositados em aterros sanitários como pode ser observado na Figura 7 (ABRELPE, 2017). Além disso, em contrapartida ao difundido pela legislação, houve um aumento no número de lixões à céu aberto entre 2016 e 2017 (ABRELPE, 2017).

FIGURA 7 – DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL POR TIPO DE DESTINAÇÃO (T POR DIA)



Fonte: ABRELPE (2017).

As informações sobre os resíduos depositados nos aterros podem ser utilizadas para estimar a quantidade do metano incluso no biogás produzido durante a sua decomposição (WRI, 2014).

3.4 CÁLCULOS DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE METANO E SEU POTENCIAL EM GERAR ENERGIA ELÉTRICA

As cidades são cruciais para mitigar a crise climática, tanto por serem grandes fontes de emissões de GEEs, quanto por possibilitarem uma escala mais próxima de controle sobre as suas atividades. Estima-se que até o ano de 2050, 65% das 9,6 bilhões de pessoas no planeta estejam domiciliadas na área urbana (ONU, 2012). Além disso, espera-se que as cidades sejam protagonistas da transição para modelos de desenvolvimento orientados ao carbono “zero”, como afirmam Hoornweg, Sugar e Gomez (2011):

Por natureza, enquanto governos nacionais lidam com questões geopolíticas mais insociáveis, as cidades muitas vezes se mostram mais capazes de cooperar umas com as outras do que seus países-nação. As cidades frequentemente expressam as aspirações dos seus cidadãos de forma mais sucinta e rápida do que os níveis governamentais mais altos e, quando estas vozes em ascensão são bem articuladas, seu impacto global é considerável (HOORNWEG, SUGAR; GOMEZ, 2011).

Realizar as estimativas de como são distribuídas as emissões de GEEs pelos setores dentro do contexto urbano é a ferramenta inicial para facilitar aos gestores municipais a escolha de ações eficientes de controle das emissões nas cidades. Essas estimativas possibilitam identificar fraquezas e oportunidades para a redução, bem como comparar resultados depois da implementação de políticas para diminuir as emissões (WRI, 2014).

As estimativas de emissões, também chamadas de inventários, são calculadas por metodologias robustas, transparentes e aceitas globalmente para identificar e publicar os GEEs da cidade como o *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emissions Inventory* (GPC) ou Protocolo Global para Inventários de emissões de gases do efeito estufa em escala de comunidade. O GPC foi construído através da colaboração entre três organizações: ICLEI – *Local Governments for Sustainability*, C40 Cities – *Climate Leadership Group* e o WRI e tem sido utilizado desde seu

lançamento em 2014 por diversas cidades para o cálculo de seus inventários municipais de emissões de GEEs (WRI, 2014).

Portanto, as emissões municipais, segundo o GPC, são calculadas a partir de vários setores e, por sua vez, são divididas em energia, transporte, resíduos, processos industriais, agricultura, florestas e outros usos do solo (WRI, 2014).

3.4.1 Cálculo das estimativas de emissões de metano em resíduos sólidos urbanos

O GPC indica que o cálculo das estimativas de emissões pode ser realizado por meio de duas metodologias distintas:

- a) *First order of decay* - Ao utilizar este método, assume-se que a quantidade de metano emitido acompanha o tempo da lenta degradação da matéria orgânica na decomposição anaeróbica.
- b) *Methane commitment* – Neste método, assume-se que todas as emissões dos resíduos depositados no aterro vão ocorrer durante o período analisado, sem considerar o lento tempo de degradação da matéria orgânica.

Neste estudo foi abordado principalmente a metodologia *Methane commitment* pois, ao contexto do município, essa metodologia foi a mais adequada para dimensionar a quantidade de metano produzida pelo resíduo depositado por ano.

A produção de inventários com as estimativas de emissões de GEEs municipais pelos gestores urbanos tem crescido com o decorrer dos anos. O primeiro estudo desse tipo no Brasil foi realizado pela cidade do Rio de Janeiro em 2003 (ALVES e MARINHO, 2015). Desde então, outras cidades e estados têm investido na realização de seus inventários, como pode ser observado na Tabela 2.

TABELA 2 – ANO DE PUBLICAÇÃO E INVENTÁRIOS MUNICIPAIS E ESTADUAIS DE GEE NO BRASIL

Estado	Publicação 1º Inventário de GEE	Cidade	Publicação 1º Inventário de GEE
Acre	2012	-	-
Bahia	2010	Salvador	-

Ceará	-	Fortaleza	2014
Minas Gerais	2008	Belo Horizonte	2009
Paraná	2014	Curitiba	2011
Pernambuco	-	Recife	2014
Rio de Janeiro	2007	Rio de Janeiro	2003
Rio Grande do Sul	2010	-	-
São Paulo	2011	Sorocaba	2013

Fonte: Adaptado de ALVES; MARINHO (2015).

As cidades de Sorocaba, São Paulo, Salvador, Fortaleza, Recife e Rio de Janeiro utilizaram a metodologia GPC para quantificar essas estimativas, conforme apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 – METODOLOGIAS E EMISSÕES DOS INVENTÁRIOS URBANOS BRASILEIROS NO ANO DE 2015

Cidade	Metodologia
Fortaleza	GPC
Recife	GPC E IEAP
Salvador	GPC
Belo Horizonte	IPCC e GHG
Rio de Janeiro (1º inventário)	IPCC adaptada
Rio de Janeiro (2º inventário)	IPCC adaptada
Rio de Janeiro (3º inventário)	IPCC e GPG adaptadas
São Paulo (1º inventário)	IPCC
São Paulo (2º inventário)	GPC
Sorocaba	GPC
Curitiba	IPCC

Fonte: ALVES; MARINHO (2015).

É importante salientar que, apesar de estudos recentes apresentarem os inventários das emissões de GEE a partir dos resíduos sólidos urbanos, isso

representa uma pequena porcentagem, ou seja, apenas 8 dos 5.570 municípios brasileiros possuem inventários. Porém, existe a perspectiva de que esses casos representem o início da preocupação com as emissões urbanas dentro das políticas públicas municipais (ALVES e MARINHO, 2015).

3.5 RELEVÂNCIA E HISTÓRICO DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOGÁS NO BRASIL

O biogás quando aproveitado para geração de energia elétrica é considerado uma fonte de energia renovável. Essa fonte de energia começou a ser utilizada no Brasil nos anos 70, motivada pela crise mundial do petróleo (PECORA, 2006). A produção do biogás a partir de RSU no Brasil é significativa devido aos mais de 115.000 aterros sanitários em operação no país (ABRELPE, 2017). Esses aterros possuem a estimativa de produção diária de metano de 15,8 milhões de m³ (ZANETTE, 2009). Segundo resultados apresentados na Nota Técnica VII (CENBIO, 2001), a quantidade de metano anual no país é de 1.350.000 toneladas por ano.

Entretanto, para que a conversão energética ocorra eficientemente, é realizada combustão controlada transformando a energia química das moléculas do biogás em energia mecânica. A energia mecânica é convertida então em energia elétrica (PECORA 2006). Três adaptações são necessárias para acrescentar um sistema energia a partir do biogás em um aterro sanitário: sistema de captação, sistema de processamento e conversão do gás em energia elétrica e o sistema de interconexão que disponibiliza a eletricidade até o consumidor final (COSTA, FERLING, NOGUEIRA, 2001). Além disso, a descentralização da geração de energia elétrica a partir dos aterros sanitários reduz custos relacionados à perdas e transmissão, e reduz a necessidade da queima de combustíveis fósseis para o mesmo fim (FIGUEIREDO, 2011).

Por fim, em países como a Alemanha onde a conversão do biogás em energia elétrica é bastante difundida, existem mais de 4.000 usinas com potência instalada de 1.400 MW, isso deve-se aos incentivos fiscais do Governo Alemão (FIGUEIREDO, 2011). No Brasil, o cenário apresenta-se discrepante, pois grande parcela dos

resíduos sólidos urbanos não tem ao menos a destinação final adequada. Apenas 22 usinas brasileiras operam com a queima do biogás de aterros sanitários representando apenas 0,0941% da matriz de energia elétrica nacional (ANEEL, s/d).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

Esta pesquisa foi conduzida no município de Francisco Beltrão com latitude $26^{\circ}03'35''\text{S}$ e longitude $53^{\circ}03'09''\text{W}$, na região sudoeste do Paraná, conforme indicado na Figura 8. O clima da região de estudo é classificado, de acordo com Köppen, como subtropical do tipo Cfa, com precipitação média anual entre 2.000 e 2.200 mm, temperaturas com médias anuais entre 18,1 e 19 °C (NITSCHKE et al., 2019).

De acordo com o último censo demográfico, a população estimada para o ano de 2019 é de aproximadamente 91.093 habitantes (IBGE, 2019).

FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO NO ESTADO DO PARANÁ



Fonte: FRANCISCO BELTRÃO (s/d).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA GERAÇÃO E GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS MUNICIPAIS

No ano de 2017, o município de Francisco Beltrão apresentou taxa de 97,11% de cobertura na coleta de RSU com geração diária per capita de 0,66 kg (SNIS, 2017),

somando diariamente entre 60 e 65 ton/dia de resíduos coletados. A coleta é realizada de uma a seis vezes por semana e é dividida em duas categorias: resíduos recicláveis e rejeitos. Os rejeitos são destinados ao aterro sanitário municipal, localizado na zona rural a cerca de 12 km do centro da cidade (Prefeitura de Francisco Beltrão, 2017).

Para aferir informações sobre as características do aterro sanitário municipal, foi realizada consulta com a Secretaria de Meio Ambiente do município de Francisco Beltrão. Além disso, os dados de pesagens dos resíduos sólidos urbanos destinados diariamente ao aterro sanitário do município foram obtidos com representantes da Secretaria responsáveis pelo registro das pesagens. Não foram incluídos nesta pesquisa dados de pesagem dos resíduos a partir de 2020 pois o equipamento de pesagem utilizado foi danificado e esses dados deixaram de ser aferidos pela gestão municipal.

4.3 QUANTIFICAÇÃO DO METANO GERADO NO ATERRO MUNICIPAL DE FRANCISCO BELTRÃO

Segundo a metodologia “Methane Commitment” do guia “*Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*” 2014 (World Resources Institute), para calcular a quantidade do metano produzido no biogás do aterro sanitário, obtém-se inicialmente com a Equação 1, o Carbono Orgânico Degradável (DOC) presente no resíduo.

$$DOC = (0,15 \times A) + (0,2 \times B) + (0,4 \times C) + (0,43 \times D) + (0,24 \times E) + (0,15 \times F)$$

Equação 1

Em que:

DOC = Carbono Orgânico degradável;

A = Percentual do resíduo sólido composto por rejeito de alimentos;

B = Percentual do resíduo sólido composto por resíduos de jardinagem e outros detritos vegetais;

C = Percentual do resíduo sólido composto por papel;

D = Percentual do resíduo sólido composto por madeira;

E = Percentual do resíduo sólido composto por produtos têxteis;

F = Percentual do resíduo sólido composto por resíduo industrial.

Como as restrições sanitárias decorrentes da pandemia de COVID 19 no período em que a pesquisa foi realizada impediram a realização de análise gravimétrica do resíduo destinado ao aterro sanitário. Portanto, foi utilizado o valor padrão sugerido pelo IPCC para cidades brasileiras de 0,12 (IPCC, 2006).

Com isso, por meio da Equação 2, foi determinado o potencial de geração do metano ($L0$).

$$L0 = MFC \times DOC \times DOCf \times F \times \frac{16}{12} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

$L0$ = potencial de geração do metano;

MFC = Fator de correção do metano baseado nas condições do local onde o resíduo foi depositado. Para aterros sanitários foi considerada a constante 1;

DOC = Carbono degradável no ano de deposição (toneladas de C/toneladas de resíduo), valor padrão para cidades brasileiras sugerido pelo IPCC de 0,12;

$DOCf$ = Fração do DOC que é de fato degradada (reflete o fato de que uma parcela do carbono orgânico não se degrada), foi considerada a constante 0,6;

F = Fração de metano no biogás, foi considerada como 0,5;

$\frac{16}{12}$ = Razão estequiométrica entre o metano e o carbono.

Em seguida, foi utilizada a Equação 3 para a quantificação do metano para os períodos analisados, conforme a metodologia Methane Commitment, adaptada da revisão do IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996 (WRI, 2014).

$$\text{Emissões de Metano} = MSWX \times L0 \times (1 - Frec) \times (1 - OX) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$MSWX$ = Massa do resíduo sólido depositado no aterro sanitário nos períodos inventariados, medido em toneladas métricas;

$L0$ = Potencial de geração do metano, obtido pela Equação 2;

$-Frec$ = Fração do metano recuperada no aterro sanitário (por queima in loco ou aproveitamento energético), para o aterro sanitário de Francisco Beltrão onde não é feita recuperação do metano foi considerada a constante 0;

OX = Fator de oxidação, foi considerada a constante 0,1.

Por fim, o resultado obtido foi dividido pela densidade do gás metano (0,657 kg/ m³) para converter o resultado de toneladas para metros cúbicos.

4.4 ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE BIOGÁS E DE SEU POTENCIAL ENERGÉTICO ESTIMADO

Para verificar a quantidade de biogás emitido no aterro sanitário nos períodos inventariados, foi multiplicada a quantidade de metano produzida por 2 (na Equação 2 foi utilizado o fator de multiplicação 0,5 para aferir a fração do metano presente do biogás) como sugerido no *Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários* (ICLEI, 2009). Para esse resultado, foi realizada a conversão entre toneladas e metros cúbicos dividindo o valor obtido pela densidade do biogás (0,72 kg/m³). As estimativas obtidas foram então comparadas com resultados de estudos nos aterros sanitários de Foz do Iguaçu e Belo Horizonte que utilizaram a mesma metodologia.

Com os resultados da estimativa de emissão de biogás, foram pesquisadas referências de conversão do biogás em eletricidade, sendo utilizado o valor de equivalência de 2,21 kWh por metro cúbico de biogás (FERRET, 1999).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS COM A SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE FRANCISCO BELTRÃO

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa houve o apoio dos funcionários da Secretaria de Meio Ambiente de Francisco Beltrão na obtenção dos dados necessários para calcular as estimativas de metano, biogás e energia elétrica. Através dessa colaboração foi informado sobre o defeito na balança do aterro sanitário, o que impossibilitou dados de pesagem dos resíduos sólidos destinados ao aterro a partir de 2020. Foram obtidos os seguintes dados para realizar as estimativas:

- 1) Quantidade (em toneladas) de resíduos sólidos depositados no aterro por ano inventariado (Tabela 4);
- 2) Caracterização do aterro: foi categorizado pelos critérios técnicos como um aterro sanitário e, de acordo com a metodologia, na Equação 2, foi adotada a constante 1 para o fator de correção do metano baseado nas condições do local onde o resíduo foi depositado (MCF);
- 3) Fração do metano recuperada no aterro sanitário (por queima *in loco* ou aproveitamento energético), foi utilizado o valor 0 por não haver, segundo a Secretaria de Meio Ambiente, qualquer ação de recuperação do metano no aterro sanitário de Francisco Beltrão.

TABELA 4 – PESAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DESTINADOS AO ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO BELTRÃO NOS ANOS DE 2017, 2018 E 2019

Ano	Resíduos destinados ao aterro sanitário (t/ ano)
2017	12.467,55
2018	16.037,70
2019	16.407,90

Fonte: O autor (2021).

5.2 CÁLCULOS DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE METANO, BIOGÁS E SEU RESPECTIVO POTENCIAL DE CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

A partir dos dados obtidos no referencial teórico e das informações compartilhadas pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente, foi possível calcular o Potencial de Geração de Metano dos resíduos sólidos depositados no aterro por ano inventariado, resultando em 819,78 m³/ano (2017), 1.054,53 m³/ano (2018) e 1.078,88 m³/ano (2019).

Para estimar a quantidade de biogás emitido no mesmo período inventariado, os valores estimados de metano foram multiplicados por 2, considerando que na metodologia utilizada, a Equação 2 orienta que a quantidade de metano produzido representa 50% da parcela total do biogás. Essa conversão resultou nas estimativas de emissão de biogás de 1.498,11 m³/ano (2017), 1.924,52 m³/ano (2018) e 1.968,95 m³/ano (2019). Para verificar o potencial que o biogás possui de gerar energia elétrica potencial quando convertido, foi utilizado a relação de 1 metro cúbico do biogás equivalente a 2,21 kWh em energia elétrica resultando nas estimativas de 3.306,39 kWh/ano (2017), 4.253,20 kWh/ano (2018) e 4.351,37 kWh/ano (2019).

Por fim, todos os resultados foram agrupados na Tabela 5 para facilitar a visualização.

TABELA 5 – RESULTADOS DE METANO ESTIMADO, BIOGÁS ESTIMADO E ENERGIA POTENCIAL ESTIMADA PARA O ATERRO SANITÁRIO DE FRANCISCO BELTRÃO NOS ANOS INVENTARIADOS DE 2017, 2018 E 2019

Ano	Resíduos destinados ao aterro sanitário (t/ ano)	Metano estimado (m³/ ano)	Biogás estimado (m³/ ano)	Energia elétrica potencial estimada (kWh/ ano)
2017	12.467,55	819,78	1.496,11	3.306,39
2018	16.037,70	1.054,53	1.924,52	4.253,20
2019	16.407,90	1.078,88	1.968,95	4.351,37

Fonte: O autor (2021).

Com isso, os resultados obtidos indicam relevante contribuição do aterro sanitário para as emissões de metano, considerando ainda o potencial 21 vezes superior ao do dióxido de carbono para contribuir com o efeito estufa. Os resultados foram comparados com as estimativas realizadas por Sbalqueiro (2014) e Prefeitura

Municipal de Belo Horizonte (2020) que utilizaram a mesma metodologia *Methane Commitment* para estimar as emissões de metano para os aterros sanitários de Foz do Iguaçu-PR e Belo Horizonte-MG, obtendo relações de geração de 0,1258 m³ e 0,1010 m³ de biogás para cada tonelada de RSU, respectivamente.

Essas relações encontradas foram muito similares aos resultados obtidos para o aterro sanitário de Francisco Beltrão no ano de 2017 de 0,1200 m³ de biogás para cada 1 tonelada de RSU, como visualizado na Tabela 6.

TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE BIOGÁS PARA OS ATERROS DE FRANCISCO BELTRÃO, FOZ DO IGUAÇU (SBALQUEIRO, 2014) E BELO HORIZONTE (SNIS, 2018 E PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2020)

Ano	Aterro Sanitário	Resíduos destinados ao aterro sanitário (ton/ ano)	Biogás estimado (m³/ ano)	Relação biogás estimado/ resíduos destinado ao aterro sanitário
2010	Foz do Iguaçu (PR)	92.238,00	11.604,54	0,1258
2017	Francisco Beltrão (PR)	12.467,55	1.496,11	0,1200
2018	Belo Horizonte (MG)	990.556,70	100.069,97	0,1010

Fonte: O autor (2021).

A variação entre o biogás produzido nas duas cidades está relacionada à quantidade superior de resíduos destinados aos aterros em Foz do Iguaçu e Belo Horizonte, considerando que suas populações nos anos avaliados eram de 256.081 habitantes (IBGE, 2010) e 2.521.564 (IBGE, 2019), respectivamente, contrastando com a população de Francisco Beltrão para o ano de 2017 de 88.465 habitantes (IBGE, 2017). Além disso, as pequenas variações podem ser explicadas pela possível diferença na composição gravimétrica dos RSU destinados aos aterros.

Ao calcular a estimativa de potencial de conversão em energia elétrica, foi possível obter resultados caso o biogás seja convertido para esse fim. Para contextualizar a dimensão do potencial energético resultante, foram feitas comparações com o consumo médio mensal das famílias paranaenses em 2020 (AEN, 2021) conforme a Tabela 7.

TABELA 7 – ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA POR ANO, ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA POR MÊS, ESTIMATIVA DE ECONOMIA ANUAL, ESTIMATIVA DE ECONOMIA MENSAL E ESTIMATIVA DE FAMÍLIAS NO PARANÁ ATENDIDAS NOS ANOS DE 2017, 2018 E 2019

Ano	Energia elétrica potencial estimada (kWh/ ano)	Energia elétrica potencial estimada (kWh/ mês)	Valor em R\$ por ano (R\$0,17 por kWh)	Valor em R\$ por mês (R\$0,17 por kWh)	Famílias atendidas pela energia elétrica potencial estimada por mês (167 kWh/ família)
2017	3.306,39	275,53	562,08	46,84	1,64
2018	4.253,20	354,43	723	60,25	2,12
2019	4.351,37	362,61	739,68	61,64	2,27

Fonte: O autor (2021).

Os resultados obtidos na Tabela 7 consideram a aquisição de equipamentos de geração de energia a partir do biogás e a adaptação da atual estrutura do aterro sanitário para que as tubulações alimentem o gerador por essa fonte. Entre alguns dos gastos estimados, apenas o motor de potência 5 kW, ideal para pequenas células como a de Francisco Beltrão, tem investimento na ordem de R\$ 20.000,00 (ICLEI, 2009). Considerando o valor em R\$ de retorno por kWh em 2019, seriam pelo menos duas décadas de geração através dessa fonte para cobrir o custo exclusivamente do motor, desconsiderando os demais investimentos necessários.

Por fim, foi possível observar que a cidade de Francisco Beltrão está passando por aumento populacional, o que acarreta em aumento na geração de resíduos sólidos e, por sua vez, no aumento das emissões de biogás, metano e, finalmente, de potencial de geração de energia elétrica à partir dessa fonte. A população prevista para Francisco Beltrão em 2040 é de 105.100 habitantes (IPARDES, 2019), indicando também que o potencial na geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário no município permanecerá em ascensão pelas próximas décadas.

6. CONCLUSÕES

Cidades possuem um papel determinante na mitigação da crise climática considerando que a maior parte das atividades humanas que emitem GEEs ocorrem no contexto urbano. Assim, a gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (RSU) possui importante contribuição na parcela dos gases emitidos em escala municipal.

A presente pesquisa utilizou a metodologia *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emissions Inventory* para estimar a quantidade de gás metano e biogás produzidos pela disposição de RSU no aterro sanitário de Francisco Beltrão nos anos de 2017, 2018 e 2019.

Com os resultados foi possível estimar também o potencial de geração de energia pela conversão do biogás em eletricidade e, apesar do fator ambiental positivo na queima desse produto para geração de energia elétrica, a quantidade de biogás produzido no aterro não é suficiente para justificar o investimento financeiro da adaptação do sistema de captação de gases do aterro e da aquisição de motores para esse fim por parte da gestão municipal. Isso se dá por dois motivos principais: a baixa geração de metano nesta célula e pelo baixo tempo de vida útil ainda disponível para este aterro. Nesse caso, para mitigar o impacto negativo da emissão do biogás livre na atmosfera, sugere-se a implementação de *flares* (queimadores), nas saídas das estruturas de captação dos gases produzidos no interior do aterro para que seja feita a conversão da parcela de metano na composição do biogás em dióxido de carbono, um gás 21 vezes menos nocivo na intensificação do fenômeno do aquecimento global.

Ainda, considerando que o atual aterro está chegando ao final de sua vida útil indicando a necessidade próxima de construção de uma nova célula no aterro sanitário e o crescimento previsto da cidade nos próximos anos, sugere-se que seja implementado um sistema adequado de aproveitamento energético do biogás desde o planejamento e construção da nova estrutura. Também sugere-se a possibilidade de dimensionar essa nova estrutura em consórcio com os demais municípios da região com o objetivo de aumentar o potencial de geração de biogás do aterro. Com isso, será possível maximizar tanto o retorno financeiro dessa conversão do biogás em energia elétrica, quanto a mitigação das emissões de metano gerado pela disposição dos resíduos sólidos urbanos dos municípios consorciados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 9 nov 2019.

ALVES G., MARINHO M. M. DE O. Inventários Urbanos de Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil: uma análise preliminar. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2015. **Anais...** Disponível em: <<http://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/307.pdf>>. Acesso em: 9 nov 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, Setembro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12896/1997: **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

BARREIRA, L. P. *et al.* Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 11, n. 4, p. 385-393, out./dez. 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília. 2010.

BORBA, S. M. **Análises de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudos de caso Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ, 2006.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. *et al.* **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades**. Rio de Janeiro, 2003. p. 32.

CENBIO - CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Nota técnica VII – Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais**. Florianópolis, 2001.

AEN - AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS DO PARANÁ. **Consumo residencial de energia teve alta de 5,5% em 2020**. Disponível em: <<http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=110899&tit=Consumo-residencial-de-energia-teve-alta-de-55-em-2020>>. Acesso em: 11 abril 2021.

COSTA, D. F.; FERLING, F. F.; NOGUEIRA, F. G. **Produção de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de Graduação Interdisciplinar para Conclusão de Curso da Faculdade de Engenharia FAAP. São Paulo, 2001.

FARRET, Felix Alberto. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1999.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de Energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso**. Universidade Presbiteriana Mackenzie: São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRANKENBERG *et al.* **Assessing Methane emissions from global space-borne observations**. *Science*, v. 308, n. 5724, p. 1010-1014, Washington, maio 2005.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS - FEAM. **Orientações Básicas para Operação de Aterros Sanitários**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. Cartilha.

HANSEN, J. *et al.* **Global Temperature Change**. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. v. 103, n. 39. Setembro 26, 2006.

HOORNWEG, D. SUGAR, L. GÓMEZ, C. L. T. Cities and greenhouse gas emissions: moving forward. **Environment and Urbanization**. v. 23, p. 207–227, 2011.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D.; **Atlas climático do estado do Paraná**. Londrina (PR): Instituto agrônomo do Paraná (IAPAR), 2019. E-book (210 p.). ISBN 978-85-88184-58-3. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/AtlasClimaticoPR.pdf>. Acesso em: 10 nov 2019.

ICLEI - GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009. ISBN 978-85-99093-06-1. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf>. Acesso em: 11 abril 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo estimado 2019**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/francisco-beltrao/panorama>>. Acesso em: 07 nov. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos: Relatório de Pesquisa**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf> Acesso em: 10 nov. 2019.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES. **Perfil avançado do município de Francisco Beltrão**. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=139&btOk=ok>. Acesso em: 07 nov. 2019.

IPCC, **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Published: IGES, Japan. 2006.

IPCC, **2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. Climate change 2014. Synthesis Report. *In: CORE, W. T. et al. (Ed.). Contribution of working groups 1, 2 and 3 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva: Switzerland, 2014.

IPCC, Summary for Policymakers. *In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp, 2018.

NASA. **Graphic: Earth's temperature record** Climate. 365 project - a collaboration of the NASA Earth Science News Team, NASA Goddard and Jet Propulsion Laboratory communications teams, and NASA websites Earth Observatory and Global Climate Change. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/climate_resources/9/graphic-earths-temperature-record/>. Acesso em: 07 nov. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **World Urbanization Prospects 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421)**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York, USA. 2019.

OUR WORLD IN DATA. **Global annual averaged atmospheric concentration of methane (CH₄), measured in parts per billion (ppb)**. 2019. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/ch4-concentration>>. Acesso em 09 nov. 2019.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado). São Paulo: USP, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **4º Inventário Municipal de Emissões de GEE - RELATÓRIO TÉCNICO DE ATUALIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DOS DADOS PERÍODO: 2009-2019**. Belo Horizonte - 2020. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/noticia/Meio%20Ambiente/4-edicao-inventario-de-gee-_versao-ascom-smma.pdf>. Acesso em: 11 abril 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FRANCISCO BELTRÃO. **Plano Diretor Municipal 2017**. Francisco Beltrão, 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FRANCISCO BELTRÃO. **Mapa de Francisco Beltrão no Estado do Paraná**. Disponível em: <http://www.franciscobeltrao.pr.gov.br/wp-content/uploads/2013/09/Localizacao_de_Francisco_Beltrao_no_Parana.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2019.

SBALQUEIRO, Larissa, Caroline. **Estudo da Viabilidade Econômica do Aproveitamento do Biogás Produzido no Aterro Sanitário de Foz do Iguaçu-PR como Fonte de Energia Elétrica**. Foz do Iguaçu: UTFPR Medianeira, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico Resíduos Sólidos - 2017**. Indicadores.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS. **Diagnóstico Resíduos Sólidos - Série Histórica - Belo Horizonte - 2018**. Indicadores.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

TCHBANOGLOUS, G. T. **Composicion y características, generacion, movimiento y control de los gases de Vertedero. Gestion Integral de liquidos**. s/l: McGraw Hill, 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Climate Change Indicators: Global Greenhouse Gas Emissions**. USA, 2014. Disponível em: <<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-global-greenhouse-gas-emissions#ref2>>. Acesso em: 09 nov 2019.

VAN ELK, A. G. H. P.; RITTER, E. **Gestão de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: UERJ, 2006.

WORLD RESOURCES INSTITUTE - WRI. **Greenhouse Gas Protocol: Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories**. USA. 2014.

WORLD BANK GROUP. **What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management**. Disponível em:

<https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2019.

ZANETTE, A. L., **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, 2009.