

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BIANCA WALLID GONÇALVES AWADA

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL ENERGÉTICO:
estudo de caso no aterro sanitário do município de Campo Mourão - Paraná**

CAMPO MOURÃO

2020

BIANCA WALLID GONÇALVES AWADA

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL ENERGÉTICO:
estudo de caso no aterro sanitário do município de Campo Mourão - Paraná**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado ao Departamento Acadêmico de Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Morais de Castro

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cristiane Kreutz

CAMPO MOURÃO

2020

BIANCA WALLID GONÇALVES AWADA

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS E DO POTENCIAL ENERGÉTICO:
ESTUDO DE CASO NO ATERRO SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE CAMPO
MOURÃO - PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de dezembro de 2020

Morgana Suszek Gonçalves
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vanessa Corneli Gonçalves
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristiane Kreutz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Morais de Castro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2020

Dedico este trabalho a minha avó Rosângela Leone Moreira Gonçalves, que sempre sonhou com a minha graduação e hoje não está presente para viver comigo este momento.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha família, minha falecida avó Rosângela Leone Moreira Gonçalves, minha mãe Livia Moreira Gonçalves, meu pai José Carlos Gonçalves, minha madrinha Roseli Leone Moreira da Silva e meu padrinho Luís Roberto da Silva que sempre acreditaram no meu potencial e, com muitas dificuldades, conseguiram me manter em outra cidade durante os cinco anos de faculdade. Também agradeço aos meus tios Luiza Moreira Gonçalves e João José Moreira Gonçalves. Todos me apoiaram desde o início na minha escolha, mudar de cidade para ter uma boa graduação e alcançar meus objetivos de vida. Também sou grata as minhas irmãs mais novas, Maysa Gonçalves de Oliveira e Nicole Gonçalves de Oliveira, que me motivaram a ser um exemplo para elas.

A minha eterna gratidão a minha falecida avó Rosângela, por todo esforço empreendido quando precisei mudar de cidade. Eu sei o quanto a senhora sonhava com a minha formatura e acreditava que eu seria uma excelente profissional. Obrigada por me motivar todos os dias a continuar e realizar esse sonho, que é o NOSSO sonho.

Aos meus amigos que moram na minha cidade natal, que mesmo à distância sempre estiveram presentes. Agradeço também aos meus amigos que fiz durante a universidade, Beatriz Rodrigues da Silva, Jociane Queiroz e Iasmim Moraes, que estiveram comigo desde o começo, Letícia Scala Frâncica, Felipe Macedo Alves e Ederson Vecchietti Gonçalves que se aproximaram um pouco depois, mas que me acompanharam em todos os momentos bons e ruins, dentro e fora da universidade, sendo minha segunda família. Aos amigos que moraram anos comigo, Beatriz Rodrigues da Silva e Rodrigo José, por estarem presentes também em todos os momentos e foram ótimos colegas de apartamento.

Meus agradecimentos a todos os professores que tive na graduação, pelos conhecimentos e experiências passados, que irei levar para a vida toda, contribuindo com a minha formação acadêmica e pessoal. Também reconheço especialmente a minha co-orientadora, Prof^{ta} Dr^a. Cristiane Kreutz, por ter me acolhido na sua iniciação científica quando ainda estava no início da graduação e acreditado no meu potencial, oportunizando a mim conhecer essa área da universidade e aprender, além da ajuda e paciência comigo neste final de curso.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Morais de Castro, por ter me acolhido na sua iniciação científica, por todos seus ensinamentos em diversas áreas e assuntos, por toda a paciência que teve, especialmente nesse período de pandemia, que foi tão difícil para todos, fiquei muito grata com a atenção e ajuda que tive.

À minha banca examinadora, Prof^a Dr^a Vanessa Corneli Medeiros e Prof^a Dr^a Morgana Suszek Gonçalves, por aceitarem o convite, pelo interesse e apontamentos que contribuíram para a melhoria do meu trabalho.

Gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Campo Mourão, pelo acolhimento e estrutura necessária para as aulas práticas e teóricas e iniciação científica, não deixando nada a desejar.

Por fim, sou grata também a todos que direta ou indiretamente, de alguma forma, puderam contribuir durante o período da minha graduação, mesmo não citados.

RESUMO

AWADA, Bianca Wallid Gonçalves. **Estimativa da geração de biogás e do potencial energético: estudo de caso no aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão – PR, 2020.

O presente estudo teve como objetivo estimar a geração de biogás e o potencial energético a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) a serem dispostos no Aterro Sanitário de Campo Mourão – Paraná considerando uma perspectiva de 20 anos (2021-2040). Foi adotada a progressão geométrica para projeção populacional que variou de 96.868 a 100.620 habitantes no período. Para estimar a geração de metano foram utilizados os métodos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e do software LandGEM e, posteriormente, o potencial energético foi estimado a partir da metodologia constante no Manual para Aproveitamento do Biogás. A geração per capita de resíduos sólidos do município encontrada foi de $0,73 \text{ kg} \cdot (\text{hab} \cdot \text{d})^{-1}$, acrescentado 1% deste valor anualmente para cálculo da geração de resíduos sólidos e foram considerados somente os resíduos destinados ao aterro, que representou 96% da geração total. Os resultados obtidos, no ano de 2041 (ano de pico), para a geração anual de metano (CH_4) foram de $1.581.874,2 \text{ m}^3$ de acordo com o software LandGEM e $920.676,3 \text{ m}^3$ pelo método do IPCC. As potências máximas foram de 0,32 MW e 0,19 MW, pelo software LandGEM e pelo método do IPCC, respectivamente. Para a produção máxima de energia, foram estimados $6,75 \text{ MWh} \cdot \text{d}^{-1}$ e $3,93 \text{ MWh} \cdot \text{d}^{-1}$ pelo software LandGEM e pelo método do IPCC, respectivamente. O método IPCC retratou melhor a realidade do estudo, pois utilizou um maior número de dados disponíveis em relação ao aterro sanitário da pesquisa, além disso permitiu selecionar o país estudado e a condição climática de acordo com a região. Assim, a partir dos dados obtidos no método do IPCC, a energia gerada no aterro poderia abastecer aproximadamente 767 residências do município no ano de pico de produção de metano, em 2041. Por fim, recomendam-se estudos de viabilidade econômica para o aproveitamento energético no aterro e também o monitoramento da geração de biogás e metano *in loco*.

Palavras-chave: Geração de metano; Método do IPCC; Produção de energia; Resíduos sólidos urbanos; Software LandGEM.

ABSTRACT

AWADA, Bianca Wallid Gonçalves. **Estimation of biogas generation and energy potential: a case study at the landfill in the municipality of Campo Mourão – Paraná.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão – PR, 2020.

The present study aimed to estimate the biogas generation and the energy potential from solid urban waste (MSW) to be disposed at the Campo Mourão - Paraná Landfill considering a 20-year perspective (2021-2040). The geometric progression for population projection was adopted, which ranged from 96,868 to 100,620 inhabitants in the period. To estimate methane generation, the methods of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the LandGEM software were used and, subsequently, the energy potential was estimated from the methodology contained in the Manual for the Use of Biogas. The per capita generation of solid waste in the municipality found was $0.73 \text{ kg} \cdot (\text{inhab} \cdot \text{d})^{-1}$, added 1% of this value annually to calculate the generation of solid waste and only waste destined for landfill, which represented 96% of total generation. The results obtained, in the year 2041 (peak year), for the annual methane generation (CH_4) were $1,581,874.2 \text{ m}^3$ according to the LandGEM software and $920,676.3 \text{ m}^3$ by the IPCC method. The maximum powers were 0.32 MW and 0.19 MW, using the LandGEM software and the IPCC method, respectively. For maximum energy production, $6.75 \text{ MWh} \cdot \text{d}^{-1}$ and $3.93 \text{ MWh} \cdot \text{d}^{-1}$ were estimated using the LandGEM software and the IPCC method, respectively. The IPCC method best portrayed the reality of the study, as it used a greater number of available data in relation to the research landfill, in addition to allowing to select the country studied and the climatic condition according to the region. Thus, from the data obtained in the IPCC method, the energy generated in the landfill could supply approximately 767 residences in the municipality in the year of peak methane production, in 2041. Finally, economic feasibility studies are recommended for energy use at the landfill and also monitoring the generation of biogas and methane on site.

Key words: Methane generation; IPCC method; Production of energy; Solid urban waste, LandGEM software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e geração per capita de resíduos no Brasil para os anos de 2017 e 2018.....	17
Figura 2 – Esquematização de um aterro sanitário.	19
Figura 3 - Fases de formação do gás de aterro ao longo do tempo	21
Figura 4 - Mapa de localização do aterro sanitário localizado no município de Campo Mourão – Paraná.....	31
Figura 5 - Resultados obtidos de vazão de metano ($m^3.ano^{-1}$) para o aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.	40
Figura 6 - Resultados obtidos para potência disponível (MW) no aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.	42
Figura 7 - Resultados obtidos para produção de energia disponível ($MWh.d^{-1}$) no aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Empreendimentos que produziam energia elétrica proveniente do biogás de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil no levantamento realizado em 2014.	20
Tabela 2 - Dados de geração de metano em metodologias diferentes e lugares distintos.....	24
Tabela 3 - Modelos para estimativa de geração de biogás em aterros sanitários.....	26
Tabela 4 - Projeção populacional para 20 anos do município de Campo Mourão – Paraná pelos métodos de progressão aritmética, progressão geométrica e método dos mínimos quadrados.	37
Tabela 5 - Estimativa de geração de resíduos para o município de Campo Mourão – Paraná durante 20 anos.	38
Tabela 6 - Resumo de dados de geração de metano ($m^3.ano^{-1}$), potência disponível (MW) e produção de energia ($MWh.d^{-1}$) encontrados na literatura em comparação com os resultados do presente estudo.	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
4.1 Resíduos sólidos urbanos	16
4.2 Aterros sanitários	18
4.3 Fases do aterro e digestão anaeróbia	21
4.4 Geração de biogás em aterros sanitários.....	23
4.5 Métodos para estimativa de geração de biogás.....	25
4.5.1 Modelo <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (IPCC).....	27
4.5.2 Modelo LandGEM.....	28
4.6 Geração de energia elétrica a partir de biogás	28
5 MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1 Caracterização da área de estudo	31
5.2 Projeção populacional e estimativa da geração de resíduos.....	32
5.3 Estimativa da geração de biogás	33
5.3.1 <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	34
5.3.2 Software LandGEM.....	35
5.4 Produção de energia a partir do biogás.....	36
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
6.1 Projeção populacional e geração de resíduos.....	37
6.2 Geração de metano e potencial energético	39
7 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e das atividades industriais, há uma maior geração de resíduos sólidos, e este, quando descartado incorretamente, pode impactar negativamente o ambiente, resultando na degradação ambiental e no esgotamento de alguns recursos naturais. Assim, há uma busca permanente por soluções ambientalmente corretas, economicamente viáveis e socialmente justas.

Há algumas ações para diminuir a quantidade dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) antes da disposição final, que envolvem: a redução, a reutilização e/ou a reciclagem. Mas, para os considerados rejeitos, exige-se a destinação final adequada, que geralmente é a disposição em aterros sanitários, conforme prevê a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010a).

Nos aterros sanitários ocorre a geração de biogás, que é uma mistura gasosa, combustível, resultante da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, que se dá através dos micro-organismos, sendo composto principalmente por gás metano (CH_4), representando 50% a 70% do volume do gás produzido, e dióxido de carbono (CO_2), variando entre 25 a 50% deste mesmo volume (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1992), ambos os gases são considerados gases de efeito estufa (REGATTIERI, 2009).

Com a crise ambiental, ocorreu a validação do Protocolo de Kyoto, no ano de 2005, que regulamentou a possibilidade da utilização de mecanismos para a redução de gases de efeito estufa, porém este foi substituído pelo Acordo de Paris, que começou a vigorar em 2020 e tem como objetivo limitar o aquecimento global em até 1,5 °C até o ano de 2100 (CHIARETTI, 2019; INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017) e se expande a todos os países, independente do estágio de desenvolvimento socioeconômico em que se encontram (INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, 2017). Também houve, com essa crise ambiental, a implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que consiste na certificação de projetos de redução de emissões nos países em desenvolvimento e posterior venda destas reduções. Com isso houve o aumento de pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas (SALOMON; LORA, 2005).

É importante destacar que o biogás possui potencial energético, proveniente do metano, portanto, o aproveitamento deste gás, além de não ser liberado no ambiente, o que contribuiria com o efeito estufa, pode gerar energia, colaborando com a manutenção da qualidade ambiental e também em relação aos aspectos econômicos. Quando este gás é

proveniente do aterro sanitário, pode ser quantificado para avaliar o potencial de geração de energia deste aterro, podendo ser analisada a possibilidade de investimento neste processo ou se deve ser adotado outro sistema mais simples, como por exemplo, a queima antes da liberação para a atmosfera.

Dessa forma, existem algumas metodologias que estimam a geração de biogás ao longo do tempo, utilizando-se de modelos matemáticos. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam. Em comparação com outros métodos (como os métodos de campo), os modelos teóricos apresentam vantagens, como o baixo custo e resultados rapidamente observáveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo estimar a geração de biogás e o potencial energético a partir de resíduos sólidos urbanos a serem dispostos no Aterro Sanitário de Campo Mourão – Paraná considerando uma perspectiva de 20 anos (2021-2040).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a geração de biogás e o potencial energético a partir de resíduos sólidos urbanos a serem dispostos no Aterro Sanitário de Campo Mourão – Paraná considerando uma perspectiva de 20 anos (2021-2040).

2.2 Objetivos específicos

Para cumprir com o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar a variação populacional de Campo Mourão – Paraná em um cenário futuro de 20 anos;
- Estimar a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) com base no método de projeção populacional selecionado;
- Estimar, comparar e discutir a geração de biogás a partir das metodologias selecionadas;
- Avaliar o potencial energético em função das estimativas de geração de biogás.

3 JUSTIFICATIVA

O município de Campo Mourão – Paraná, no ano de 2020, possuía uma estimativa populacional de 95.488 habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2020), com taxa de crescimento populacional de 0,30% ao ano (CAMPO MOURÃO, 2018). Estima-se uma geração de resíduos sólidos de 2.000 toneladas por mês, incluindo resíduos orgânicos, recicláveis não disponibilizados para coleta seletiva e rejeitos (CAMPO MOURÃO, 2018).

Os resíduos sólidos depositados no aterro sanitário, juntamente com o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos e efluentes industriais, são apontados como uma das maiores fontes de gás metano liberado para a atmosfera. Este gás, quando gerado em aterros sanitários, por meio da decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos pode apresentar riscos para o ambiente local quando não controlado corretamente, migrando lateralmente para áreas próximas ou mesmo emanar pela superfície, prejudicando a saúde humana e a vegetação (ENSINAS, 2003), além de contribuir para o agravamento do efeito estufa, pois o acúmulo do gás metano na atmosfera afeta a temperatura do sistema climático da Terra, sendo responsável por 15 a 20% do efeito estufa (REGATTIERI, 2009).

Com a captação e aproveitamento do biogás como fonte de energia, dois problemas ambientais podem ser minimizados, dentre eles a diminuição do lançamento deste gás diretamente na atmosfera e a possibilidade de geração de energia a partir desta fonte alternativa, podendo resultar na redução da utilização de combustíveis fósseis.

Portanto, é importante estimar a quantidade gerada deste biogás a partir de métodos diferentes para verificar o potencial de geração de energia de aterro sanitário, e posteriormente seu potencial energético.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Resíduos sólidos urbanos

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), fundamentada na Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010a), regulamentada por meio do Decreto nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b), os resíduos sólidos são definidos como:

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 técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A PNRS (BRASIL, 2010a) ainda classifica os resíduos segundo a origem e segundo a periculosidade. Quanto à origem, podem ser: RSU (que englobam os domiciliares, sendo originários de atividades domésticas em residências urbanas e os de limpeza urbana, originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana). E quanto à periculosidade, classifica os resíduos em perigosos e não perigosos.

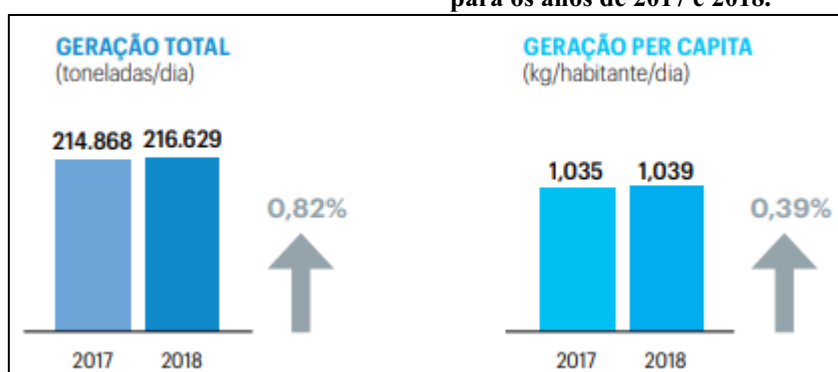
Em função da periculosidade de alguns resíduos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - Normas Brasileiras 10004 (2004) classifica os resíduos como: Resíduos Classe I (perigosos): pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, que podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada; Resíduos Classe II-A (não perigosos – não inertes): incluem-se nesta classe os resíduos potencialmente biodegradáveis ou combustíveis; Resíduos Classe II-B (inertes): perfazem esta classe os resíduos considerados inertes e não combustíveis.

Os RSU, de maneira geral, são aqueles caracterizados como resíduos gerados na área urbana pela comunidade. São procedentes de domicílios, comércio, escritórios, serviços, limpeza de vias públicas, mercados, feiras e festejos, e a responsabilidade da sua gestão é do Poder Público Municipal (ALCÂNTARA, 2007). Cabe destacar que em função das legislações municipais, o Poder Público Municipal pode elaborar regras específicas, definindo pequenos e grandes geradores e suas responsabilidades.

Os impactos ambientais negativos relacionados a estes resíduos surgiram juntamente com o aparecimento dos primeiros aglomerados humanos e desde então vem aumentando, assim, devem possuir um gerenciamento adequado, pois este é um papel relevante no controle da qualidade ambiental (ALCÂNTARA, 2007).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018), a geração de RSU no Brasil aumentou quase 1% entre os anos de 2017 e 2018 e chegou a 216.629 toneladas diárias. Como a população também cresceu neste período (0,40%), a geração per capita de resíduos teve elevação um pouco menor (0,39%) (Figura 1).

Figura 1 - Geração total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e geração per capita de resíduos no Brasil para os anos de 2017 e 2018.



Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018).

Primariamente, a quantidade de resíduos sólidos é função do quantitativo populacional que gera, mas podem depender de outros fatores, como poder aquisitivo, hábitos e costumes da população, condições climáticas e nível educacional. Quando o poder de consumo da população aumenta, a quantidade de resíduos também se eleva (ALSAMAWI et al., 2009; COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECLICLAGEM, 2018).

O aumento da população ao longo dos anos reflete no aumento da demanda por matéria prima, e conseqüentemente, na maior geração de resíduos sólidos. Outro fator que contribuiu foi a migração da população da área rural para as cidades, mudando os hábitos e aumentando o consumo de produtos industrializados (ONOFRE, 2011).

Em outro estudo realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2007)¹ *apud* Onofre (2011), mostrou que para municípios com até 30 mil habitantes, a massa de resíduos sólidos per capita foi de 0,53 kg.(hab.d)⁻¹, para populações com mais de 3 milhões de habitantes, essa massa foi de 0,83 kg.(hab.d)⁻¹ e a média do diagnóstico deste estudo foi de 0,76 kg.(hab.d)⁻¹. Com isso, pode-se observar que a taxa de geração per capita de resíduos sólidos aumenta quanto maior for a população do município.

¹Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. 2007 (SNIS), disponível em <<http://snis.gov.br>>. 2007

Alguns processos são utilizados para o tratamento de RSU, como por exemplo, a reutilização, reciclagem, compostagem, incineração e disposição em aterros sanitários. Esta disposição em aterros figura como uma das mais comuns e, mesmo sendo uma técnica antiga, é largamente utilizada, devido à facilidade de operação, custo relativamente baixo e em virtude aos aspectos sociais envolvidos (ALCÂNTARA, 2007).

Em relação ao município de Campo Mourão, de acordo com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) (CAMPO MOURÃO, 2018) estima-se que sejam gerados mensalmente aproximadamente 2.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos incluindo resíduos orgânicos, recicláveis não disponibilizados para coleta seletiva e rejeitos, coletados em domicílios, estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços, sendo estes destinados ao aterro sanitário. É de responsabilidade da SEAMA - Secretaria de Agricultura e Meio Ambiente a estrutura operacional da coleta convencional e seletiva de resíduos no município, porém atualmente a prestação do serviço é realizada por uma empresa terceirizada (CAMPO MOURÃO, 2018).

De acordo com o diagnóstico realizado em 2018 na elaboração no PMGIRS, a coleta seletiva de Campo Mourão atendia todos os bairros da cidade, dividida em 3 setores, de segunda a sábado, sendo 2 dias para cada setor. Havia uma empresa terceirizada responsável por essa coleta e estima-se que eram coletadas 86,64 toneladas de resíduos nesta categoria por mês (CAMPO MOURÃO, 2018).

O Aterro Sanitário Municipal de Campo Mourão foi construído em 2001, teve sua operação iniciada em 2002, possui área total de 251.401,44 m² e está localizado a noroeste do município, na zona rural, no lote A-1, subdivisão da Fazenda Indaiá, distante 12 km do centro do município (GASQUES, 2013).

4.2 Aterros sanitários

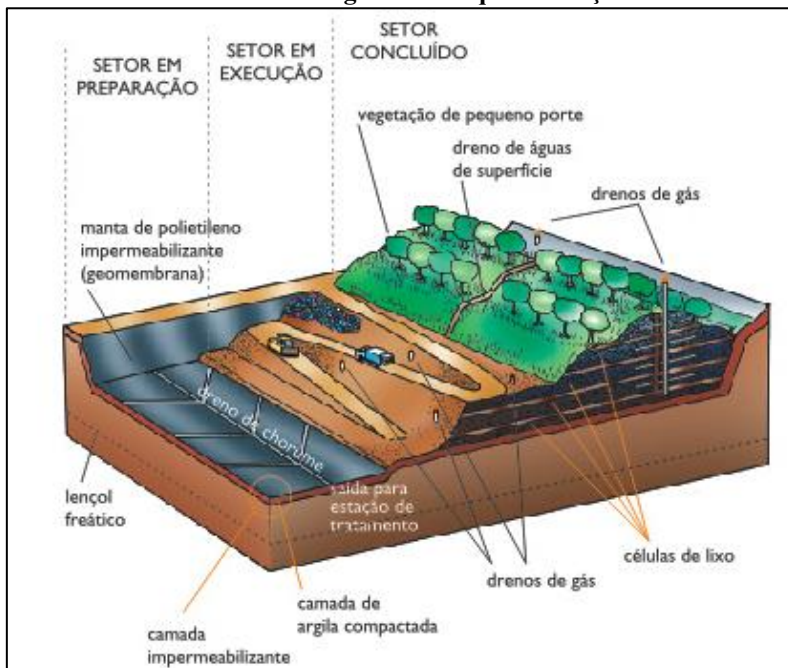
Uma alternativa para a minimização dos impactos ambientais causados pela disposição inadequada de resíduos sólidos é o aterro sanitário. Como o nome já sugere, nessa forma de disposição final, os resíduos são aterrados (MACEDO, 2019) e segundo Cavalcanti (2013), é possível citar, dentre os métodos de aterramento, os métodos: da trincheira (em que o lixo é disposto em valas escavadas no solo, compactado e coberto), da rampa (em que o lixo é compactado de encontro a um talude natural ou construído) e da área (método em que as camadas de resíduos se superpõem, se elevando de forma de tronco de pirâmide acima do nível original do terreno).

O aterro sanitário se trata de uma área selecionada e projetada para o recebimento de resíduos em solo impermeabilizado, com a devida cobertura e sistemas de drenagem de lixiviado e de biogás, com a queima e possível tratamento deste último (MACEDO, 2019). A Associação Brasileira de Normas Técnicas - Normas Brasileiras 8419 (1992) estabelece o seguinte conceito para aterro sanitário:

técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Para a construção de um aterro sanitário devem ser seguidas as especificações técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - Normas Brasileiras 8419 (1992). Os principais componentes que constituem um aterro sanitário são: camada de impermeabilização inferior, sistema de coleta de chorume, sistema de captação dos gases, camada de impermeabilização superior, tratamento de chorume, monitoramento de águas superficiais e lençóis freáticos e drenagem de águas pluviais (GASQUES, 2013), conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Esquemática de um aterro sanitário.



Fonte: PROIN/CAPES; UNESP/IGCE (1999).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018), das 72,7 milhões de toneladas coletadas no Brasil em 2018, 59,5% tiveram

disposição final adequada e foram encaminhadas para os aterros sanitários (2,4% a mais em relação ao ano anterior). Portanto, em 2018, 43.300.315 toneladas de resíduos sólidos urbanos foram destinadas aos aterros sanitários e o restante foi encaminhado para aterros controlados e lixões.

Ainda segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018), 2.569 municípios do Brasil destinaram os resíduos sólidos aos aterros sanitários no ano de 2018, sendo 93 na região Norte, 454 na região Nordeste, 162 na região Centro-Oeste, 820 na região Sudeste e 1.040 na região Sul.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2014) existiam 11 empreendimentos cadastrados que produziam energia elétrica proveniente do biogás de RSU (Tabela 1) no levantamento realizado em 2014. A potência total outorgada era de 73.953 kW.

Tabela 1 – Empreendimentos que produziam energia elétrica proveniente do biogás de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil no levantamento realizado em 2014.

Usina	Município	Potência (kW)
Energ-Biog	Barueri – SP	30
São João Biogás	São Paulo – SP	24.640
Salvador	Salvador - BA	19.730
Biotérmica Recreio	Minas de Leão – RS	8.556
Bandeirantes	São Paulo – SP	4.624
Asja BH	Belo Horizonte – MG	4.278
Uberlândia	Uberlândia – MG	2.852
CTR Juiz de Fora	Juiz de Fora – MG	2.852
Arrudas	Belo Horizonte – MG	2.400
Ambient	Ribeirão Preto – SP	1.500
Itajaí Biogás	Itajaí – SC	1.065
Total		73.953

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2014)

É possível observar que a maioria das Usinas listadas na Tabela 1, se localiza na região Sudeste do Brasil, sendo 4 usinas no estado de São Paulo e 4 usinas no estado de Minas Gerais. Na região Sul há somente 2 empreendimentos, localizados no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, não havendo nenhum no estado do Paraná. E há somente 1 usina na região Nordeste, localizada na Bahia.

Constatando que uma residência brasileira consome 300 kWh por mês de energia, 3600 kWh por ano, a potência total dos 11 empreendimentos a biogás funcionando continuamente durante 1 ano, obteria 638.953.920 kWh. Essa potência abasteceria com energia elétrica 177.787 residências, diversificando a matriz energética do país (MIRANDA; NETO, 2017).

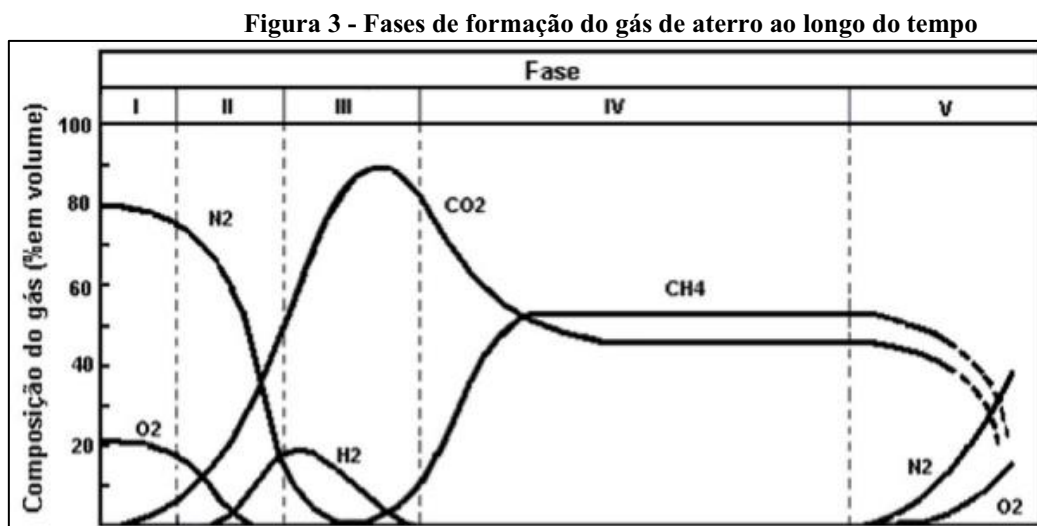
Para coletar esse biogás no aterro sanitário, um sistema padrão é utilizado, composto por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão e sistema de purificação do biogás, e na maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui *flare* para a queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos de geração de energia elétrica (FIGUEIREDO, 2011).

Há algumas tecnologias para converter esse biogás em energia, como por exemplo, os motores de combustão interna (ciclo Otto), turbinas e microturbinas a gás e caldeiras a vapor. Os motores a combustão interna possuem maior eficiência de conversão elétrica, porém as turbinas podem apresentar um aumento da eficiência global do processo quando operadas em cogeração (FIGUEIREDO, 2011).

O biogás proveniente destes aterros sanitários é gerado por meio da digestão anaeróbia dos RSU, tem se destacado ambientalmente e economicamente devido a três vantagens: possibilidade de substituição energética dos combustíveis fósseis, controle da poluição ambiental e contribuição na redução do estresse sobre os sistemas convencionais que já não suprem a demanda energética da sociedade (OLIVEIRA; SILVA, 2014).

4.3 Fases do aterro e digestão anaeróbia

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do biogás do aterro sanitário são variadas ao longo do tempo e seguem várias fases diferentes que podem ser observadas na Figura 3.



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous; Theisen e Vinil (1993).

Estas fases estão descritas a seguir (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN E VINIL, 1993).

- Fase I (Ajuste inicial): A decomposição biológica da matéria orgânica ocorre em condições aeróbias, pois no interior do aterro possui uma certa quantidade de ar. Nesta etapa, a terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro é a principal fonte de micro-organismos para a decomposição aeróbia.
- Fase II (Transição): Na segunda fase, diminui a quantidade de oxigênio, e as reações anaeróbias começam a se desenvolver. Assim, os micro-organismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase o pH do chorume começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO₂ dentro do aterro.
- Fase III (Ácida): O dióxido de carbono é o principal gás gerado e os micro-organismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas. As demandas bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume.
- Fase IV (Metanogênica): Predominam micro-organismos anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase tende a ser mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0.
- Fase V (Maturação): A umidade ainda continua a migrar pela massa de lixo, portanto há porções de material biodegradável ainda não convertidos, que acabam reagindo. A geração de gás diminui, pois a maioria dos nutrientes foi consumido nas fases anteriores, e os substratos que restam são de degradação lenta.

A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, sendo um processo fermentativo a que diversos tipos de resíduos são submetidos (urbanos, industriais ou rurais), possuindo como finalidade o tratamento destes resíduos, como por exemplo, remover matéria orgânica poluente e micro-organismos patogênicos, produção de

biofertilizantes mais ricos em nutrientes e com melhores qualidades sanitárias em relação ao material original e a produção de biogás proveniente das diversas populações de bactérias que convertem a matéria orgânica numa mistura de metano, dióxido de carbono e baixas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e sulfeto de hidrogênio (SOUZA, 1984; PINTO, 1999).

O processo de degradação anaeróbia consiste em quatro etapas distintas na conversão global de matéria orgânica, sendo estas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na primeira fase, convertem-se materiais particulados em materiais dissolvidos mais simples através da hidrólise pela ação de exo-enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas (COTRIM, 2009). Na segunda fase, a matéria orgânica é transformada em ácidos graxos voláteis pelas bactérias acidogênicas, e também são formados outros compostos nesse processo devido ao acúmulo de hidrogênio durante as perturbações no sistema, como o hidrogênio, dióxido de carbono e álcoois. Na terceira etapa, as bactérias acetogênicas, produtoras de hidrogênio, transformam os produtos acidogênicos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo que o hidrogênio pode ser convertido em acetato pelas bactérias acetogênicas. Na quarta etapa, ocorre o processo de metanogênese, que é conduzido por bactérias acetoclásticas, que convertem ácido acético em dióxido de carbono e metano, sendo estas responsáveis pela maioria do metano produzido. Já as hidrogenofílicas, produzem este metano utilizando hidrogênio e dióxido de carbono. Estas correspondem a cerca de 30% e de 70% da produção, respectivamente (SOUZA, 1984; SIMÕES, 2017).

4.4 Geração de biogás em aterros sanitários

O aterro de RSU é um sistema que envolve reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físicas, químicas e suas inter-relações. Dentro do ecossistema do aterro, processos físicos, químicos e biológicos promovem a degradação da fração orgânica de RSU com geração de efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos que é contida por sistemas de impermeabilização de base e de cobertura (ALCÂNTARA, 2007).

Quando o resíduo sólido é depositado nos aterros, permanecem um período de tempo descoberto e em contato com o ar atmosférico, e neste período já é observada a emissão de compostos voláteis que constituem a massa do resíduo. Mesmo após aplicação do material de cobertura e do fechamento da célula do aterro, esses compostos continuarão a serem emitidos (ENSINAS, 2003).

De acordo com *United States Environment Protection Agency* (1991), diversos fatores influenciam a taxa de geração de gás de aterro, como a composição do resíduo sólido, pois quando possui maior porcentagem de materiais biodegradáveis (restos de alimentos, papel/papelão, resíduos de parques e jardins e madeiras) é gerado mais gases, a umidade do resíduo, quanto mais úmido, mais aumenta a geração do biogás, idade do resíduo, pois a geração do gás segue fases de decomposição, temperatura do aterro (ideal para digestão anaeróbia entre 29 e 38 °C) e pH do material a ser decomposto (pH ótimo para produção do metano entre 7.0 e 7.2).

Segundo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1996), os aterros são responsáveis por cerca de 5% a 20% do total de metano liberado por fontes com origem em atividades humanas, e este gás metano é um dos gases que contribuem significativamente para o efeito estufa, sendo este uma importante fonte de energia alternativa. Assim, a utilização deste gás para a geração de energia enquadra-se nos quesitos de desenvolvimento sustentável, devido a grande quantidade de emissões de metano que deixariam de ser lançadas na atmosfera (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA, 2004).

Foram encontrados alguns valores na literatura para geração de metano utilizando diferentes metodologias e em locais distintos, estes dados estão inseridos na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de geração de metano em metodologias diferentes e lugares distintos.

continua...		
Geração de metano	Condições experimentais	Referências
4.954.669,3 m ³ .ano ⁻¹	Metodologia IPCC; Aterro Sanitário Caximba localizado em Curitiba - PR; L ₀ = 0,17m ³ ·kg ⁻¹ e k= 0,09	SILVA et al. (2009)
146.822.229 m ³	Teste do Potencial Bioquímico de Metano (BMP); Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.	SILVA (2012)
211.072.273,3 m ³ .ano ⁻¹	Metodologia IPCC; Aterro Sanitário de Santo André; L ₀ = 79,59 m ³ CH ₄ ·tonelada de resíduo ⁻¹ ; funcionamento de 1986 até 2036 (de acordo com a curva de decaimento).	ICLEI (2009)
40.012.771,89 m ³ .ano ⁻¹	Modelo <i>School Canyon</i> ; Aterro Sanitário de Nova Iguaçu, localizado próximo ao Rio de Janeiro – RJ; L ₀ = 170 m ³ ·t ⁻¹ ; k = 0,04.	BRITO FILHO (2005)

Fonte: A autoria própria (2020).

Tabela 2 – Geração de metano em metodologias diferentes e lugares distintos.

Geração de metano	Condições experimentais	Referências
11.768.462,32 m ³ .ano ⁻¹	Modelo <i>School Canyon</i> ; Aterro Controlado Terra Brava, localizado próximo ao Rio de Janeiro – RJ; L ₀ = 100 m ³ .t ⁻¹ ; k = 0,04	BRITO FILHO (2005)

Fonte: Autoria própria (2020).

Observa-se que as condições experimentais variam de acordo com a localização, metodologia utilizada e valor das variáveis, sendo que estes variam de acordo com as condições do local, como, por exemplo, a precisão dos dados que são disponibilizados, clima e tipo de aterro.

4.5 Métodos para estimativa de geração de biogás

Para a quantificação da geração de metano em aterros sanitários são utilizados método de inventário ou método de cinética. No primeiro é realizado o cálculo da produção máxima teórica, que leva em consideração as reações de decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Nas estimativas cinéticas, as taxas de produção do metano são descritas por modelos empíricos que são baseados em equações matemáticas e simulam o processo biológico e físico-químico da produção de biogás no aterro. O parâmetro mais importante que influencia esses modelos é a quantidade de resíduo presumido passível de decomposição, e essa produção total e a taxa em que os gases são gerados podem variar de modelo para modelo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Existem algumas metodologias abordadas por diferentes autores em termos de geração de biogás em aterros ou experimentos envolvendo biodegradação de resíduos sólidos urbanos, estas metodologias estão inseridas na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos para estimativa de geração de biogás em aterros sanitários.

Equação	Parâmetros e unidades	Referências
$Q_{CH_4} = \frac{A \cdot L_0}{(t_f - t_1)}$	<p>Q CH₄ = geração anual de CH₄ (m³.ano⁻¹) A = Quantidade de resíduo (t) L₀ = Potencial de geração de CH₄ (m³.resíduo⁻¹) t₁ = intervalo lag (ano) t_f = tempo para término da geração de gás (ano)</p>	SCS Engineers (1997) – Ordem Zero
$Q_{CH_4} = M \cdot L_0$ $L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOCf \cdot F \cdot \frac{16}{12}$	<p>Q CH₄ = geração anual de CH₄ (m³.ano⁻¹) M = quantidade anual de resíduo (t.ano⁻¹) L₀ = potencial de geração de CH₄ (tCH₄.resíduo⁻¹) MCF = fator de correção do CH₄ DOC = carbono orgânico degradável (tC.resíduo⁻¹) DOCf = fração do DOC transformado em biogás (%) F = concentração de CH₄ no biogás (%)</p>	INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1996) – Ordem Zero – Default method
$G = G_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$ $G_0 = 1,868 \cdot C_0 \cdot (0,014 \cdot T + 0,28)$	<p>G = geração acumulada de biogás até o ano “t” (m.resíduo⁻¹) k = constante de degradação (ano⁻¹) C₀ = quantidade de carbono orgânico no resíduo (kgC.resíduo⁻¹) G₀ = potencial de geração de biogás de aterro (m³.resíduo⁻¹) t = idade do resíduo (ano) T = temperatura (°C)</p>	Tabasaran (1976) – Primeira Ordem
$Q_{CH_4} = \varepsilon \sum_{j=1}^3 1,87 \cdot A_i \cdot C_{0,i} \cdot k_{1,i} \cdot e^{-k_{t,i} \cdot t}$	<p>Q CH₄ = formação do gás (m³.ano⁻¹) ε = fator de geração que indica a fração do resíduo que é convertida em biogás k_{1,i} = constante de degradação do material i (ano⁻¹) A_i = quantidade de resíduo do tipo i depositada no local (kg) C_{0,i} = quantidade de carbono orgânico degradável no resíduo do tipo i (kgC.(kg de resíduo)⁻¹) 1,87 = volume de biogás gerado por kg de resíduo em m³ t = tempo desde a disposição do resíduo (ano)</p>	Oonk et al. (1994) – Primeira Ordem

Fonte: Adaptado de Maciel (2009).

Para este estudo serão utilizados: o modelo do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), encontrado software biogás da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2020) e do software LandGEM (CLIMATE & CLEAN AIR COALITION, 2020), ambos sendo de primeira ordem, pois para essas metodologias haviam dados suficientes para os cálculos, outros estudos para posteriores discussões, e além disso, os dois modelos de primeira ordem levam em conta o tempo de degradação do resíduo, sendo importante pois se não for utilizada uma taxa de geração constante no tempo, não levaria em conta a idade dos resíduos depositados, implicando em erros mais significativos nos resultados, fazendo com que modelos de primeira ordem sejam os mais utilizados (MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017).

4.5.1 Modelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)

A metodologia apresentada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1996) é um método relativamente simples para estimativa de emissão de metano em aterros sanitários que considera a estimativa de carbono orgânico degradável presente no resíduo, sendo este o que possibilita o cálculo da quantidade de metano que pode ser gerado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos urbanos. O método utiliza dados estatísticos da população, como por exemplo, o número de habitantes e características dos resíduos sólidos urbanos, referente à sua gravimetria, colocando em foco os resíduos orgânicos (BRITO FILHO, 2005). Também são necessários dados relativos ao clima (médias anuais de temperatura e precipitação), qualidade de operação do aterro e as quantidades de CH₄ recuperada e oxidada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013).

Na metodologia do IPCC, que envolve cinética de primeira ordem, estima-se as emissões de CH₄ gerados pela decomposição dos resíduos, admitindo que este seja emitido ao longo do tempo. Neste método, é acrescentado a constante de decaimento e o intervalo de tempo da disposição de resíduos no aterro (MACEDO, 2019). O resíduo depositado no ano 1 degradará lentamente e de forma exponencial até “n” anos após a sua deposição, o resíduo depositado no ano 2 degradará da mesma forma, assim como os resíduos depositados nos anos seguintes (ALVES; FILHO, 2002).

4.5.2 Modelo LandGEM

O modelo LandGEM 3.02 - *Landfill Air Emissions Model* é uma ferramenta desenvolvida no Microsoft Excel pela *Environmental Protection Agency* (EPA), considerado padrão em relação a gases de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013). Ele é recomendado para a elaboração de projetos e inventários de emissão de biogás e metano em aterros e locais de disposição final (FIRMO, 2013). Este modelo está baseado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo.

O método requer algumas informações básicas como as datas de operação do aterro e a quantidade de resíduos existente no local. Ele emprega uma função exponencial de primeira ordem, baseada na ideia de que o montante da produção teórica máxima de Gás de Aterro (LFG) gerado a partir dos resíduos sólidos alcança um pico após um período de tempo para geração de metano. O modelo também presume que para cada unidade de resíduos, a geração de LFG diminui exponencialmente (após intervalo de um ano), à medida que a fração orgânica dos resíduos é consumida. Normalmente, o ponto de geração máxima de LFG ocorre no ano de fechamento ou no ano seguinte ao fechamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013).

Os padrões do modelo seguem os regulamentos federais para aterros sanitários dos Estados Unidos e é possível alterar os valores padronizados na calibração do modelo, permitindo que o usuário insira dados obtidos por análises in situ e edite concentrações. Uma desvantagem é que os padrões do modelo são empíricos, formulados segundo as situações dos aterros norte-americanos, o que pode limitar a aplicação para outros aterros sem a alteração dos parâmetros (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005).

4.6 Geração de energia elétrica a partir de biogás

As energias renováveis, como por exemplo, solar, eólica e de biomassa, trazem consigo pontos positivos, como o desenvolvimento das áreas econômicas e social e colaboração com o meio ambiente. Assim, o investimento na geração de energia que utiliza biogás como fonte combustível pode ser viável economicamente devido à apropriação de receitas oriundas da venda de energia elétrica e comercialização dos créditos de carbono (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2010).

Para incentivo do uso de energias renováveis, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002, pelo Governo Federal, com o objetivo de aumentar a participação de energia elétrica produzida pelo Produtores Independentes Autônomos (PIA) no Sistema Interligado Nacional (SIN), a partir das fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa. Também houve a redução de tarifas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para empreendimentos com base em fontes solar, eólica, biomassa ou cogeração e também o desenvolvimento do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) em 2008, que visa orientar, estruturar e coordenar as ações do governo e dos diversos setores da sociedade na redução das emissões de gases de efeito estufa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013).

O metano possui poder calorífico da ordem de 35.800 kJ m^{-3} , assim o poder calorífico do biogás pode variar de 22.500 a 25.000 kJ m^{-3} . Isto significa um aproveitamento de 6,25 a 10 kWh m^{-3} (JORDÃO; PESSOA, 1995). Se o CO_2 for retirado dessa mistura gasosa, o poder calorífico do biogás pode atingir 60% do poder calorífico do gás natural (MEREGE, 2011).

Este biogás gerado nos aterros sanitários pode ser aproveitado e gerar benefícios para os governos locais com venda de créditos de carbono, estimulando a adoção de práticas de engenharia que maximizam a geração e a coleta do biogás e reduzindo também os riscos de contaminação do meio ambiente (OLIVEIRA; SILVA, 2014).

No Brasil, até o ano de 2016, 30 projetos foram registrados com potência de 286,04 MW, juntos, sendo que o primeiro ocorreu em Nova Iguaçu - RJ, no aterro sanitário Nova Gerar, em 2004. Estão localizados principalmente na região sudeste (20 projetos) e são responsáveis por 72% do total do potencial estimado (206,2 MW) (NASCIMENTO et al. 2019).

O Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (2004) realizou um estudo com 101 municípios das regiões metropolitanas do Brasil, na maioria de médio a grande porte (acima de 200 mil habitantes) e estimou o potencial de geração de energia a partir do biogás nos aterros destas regiões. Para os municípios com mais de milhão de habitantes, a média de potencial de geração de energia foi de 19,5 MW por município, devido a maior quantidade de pessoas e conseqüentemente, maior geração de resíduos. Já para municípios menores, entre 500 mil e 1 milhão de habitantes, apresenta potencial de 2MW, e municípios de 200 mil a 500 mil habitantes, cerca de 1MW.

Salomon e Lora (2005), em seus estudos, analisaram 5 tipos de resíduos orgânicos para verificar o potencial de geração de energia elétrica por ano (MW) a partir de um grupo

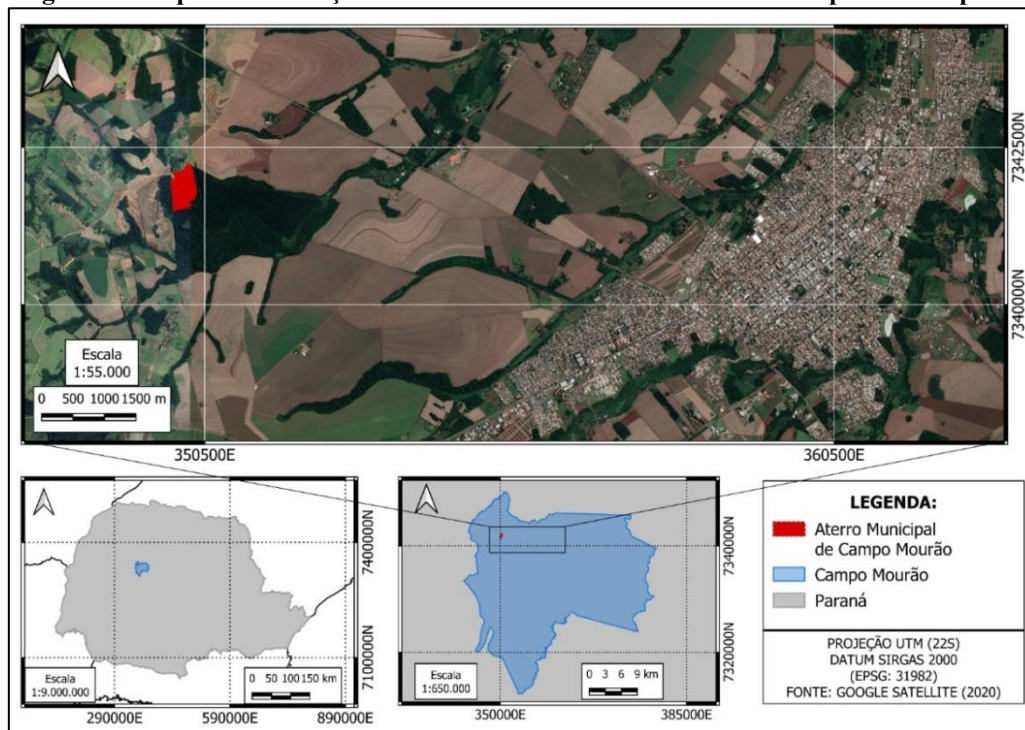
gerador de 80 kW (com rendimento de 29%), o resíduo de vinhaça foi o que obteve maior potência, de 879,96 MW, seguido de resíduos de aterro sanitário, com 285,44 MW. Os outros resíduos analisados foram de estação de tratamento de esgotos, dejetos de bovino e dejetos de suínos, gerando 18,22 MW, 21,13 MW e 3,83 MW, respectivamente.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo foi o aterro sanitário, localizado no município de Campo Mourão – PR (Figura 4), ocupando uma área de 251.401,44 m², localizado a 12 km de distância do centro do município (CAMPO MOURÃO, 2018; GASQUES, 2013). Campo Mourão possui área de 757,875 km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2010) e altitude de até 630 m. De acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger, o clima é a classificado como Cfa e possui uma temperatura média de 19,9 °C e pluviosidade média anual de 1570 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2016). O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (2020) estimou para o ano de 2020 uma população de 95.488 habitantes.

Figura 4 - Mapa de localização do aterro sanitário localizado no município de Campo Mourão – Paraná.



Fonte: Autoria própria (2020).

5.2 Projeção populacional e estimativa da geração de resíduos

Para a projeção populacional do município para um período futuro de 20 anos, foram utilizados 3 métodos: Progressão Aritmética (PA), Progressão Geométrica (PG) e Métodos dos Mínimos Quadrados (MMQ).

A PA indica o crescimento populacional segundo uma taxa constante e é utilizado para estimativas de menor prazo, conforme as Equações 1 e 2 (VON SPERLING, 2014).

$$P_2 - P_1 = K_a (t_2 - t_1) \quad \text{Eq. (1)}$$

$$P = P_2 + K_a (t - t_2) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

t_1 = ano 1 de referência;

t_2 = ano 2 de referência;

P_1 = população no ano 1;

P_2 = população no ano 2;

K_a = razão aritmética;

P = população futura.

A PG mostra o crescimento populacional em função da população existente a cada instante. Também é utilizado para estimativas de menor prazo. A expressão geral utilizada neste método é dada pela Eq. 3 (VON SPERLING, 2014).

$$P = P_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{t-t_2}{t_2-t_1}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

t_1 = ano 1 de referência;

t_2 = ano 2 de referência;

P_1 = população no ano 1;

P_2 = população no ano 2;

P = população futura.

Já o MMQ resume-se ao cálculo da equação da reta dos mínimos quadrados para os valores obtidos em censos anteriores e sua extrapolação para anos futuros, conforme as Equações 4, 5 e 6 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

$$P_n = a \times t_n + b \quad \text{Eq. (4)}$$

$$a = \frac{\sum t_i \sum P_i - M \sum t_i P_i}{(\sum t_i)^2 - M \sum (t_i)^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$b = \frac{\sum t_i \sum t_i P_i - \sum P_i \sum (t_i)^2}{(\sum t_i)^2 - M \sum (t_i)^2} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

P_n = população no ano “n”

t_n = ano “n”

a e b = parâmetros a serem estimados por mínimos quadrados

M = número de censos disponíveis

t_i = ano em que se apurou a população P_i

A partir dos dados censitários da população municipal (rural e urbana) encontrados no Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (2010), os resultados para as projeções populacionais foram obtidos e um dos métodos foi selecionado para estimar a geração de RSU de Campo Mourão em função das características do município. Os dados de geração e destinação de resíduos ao aterro sanitário e de composição gravimétrica foram obtidos a partir do levantamento realizado para elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), inserido na Lei Municipal nº 3.898, de 08 de fevereiro de 2018 (CAMPO MOURÃO, 2018). Todos estes dados foram estimados para 20 anos de funcionamento do aterro sanitário, considerando 2021, o ano de início e 2040, o ano de encerramento do aterro.

5.3 Estimativa da geração de biogás

Para calcular a geração de biogás foram utilizados dois métodos, sendo estes o IPCC, do software Biogás da CETESB e o software LandGEM. A seleção das variáveis foi feita com base em *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2006) e *United States Environmental*

Protection Agency (2005) para as situações similares aos do presente estudo e os valores referentes à quantidade de resíduos disposta no aterro foram obtidos através da estimativa de geração de resíduos.

5.3.1 *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Para o cálculo utilizando o método do IPCC, a partir do software Biogás da CETESB, foi utilizada a Eq. 7, conhecida como metodologia cinética de primeira ordem, estimando as emissões de CH₄ pela decomposição de resíduos, admitindo que este seja emitido ao longo do tempo (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006).

$$\sum Q \text{CH}_4 = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(T-x)} \quad \text{Eq. (7)}$$

Sendo:

Q CH₄: Quantidade anual de metano gerado (m³CH₄.ano⁻¹);

k: Constante de decaimento (ano⁻¹)

R_x: Quantidade de resíduos dispostos no ano (kg);

L₀: Potencial de geração de metano dos resíduos (kg de CH₄.kg de RSD⁻¹)

T: Ano atual

x = Ano de deposição do resíduo.

O potencial de geração de metano (L₀) depende da composição do resíduo e, em particular, da fração de matéria orgânica presente (Eq. 8).

$$L_0 = \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{CODf} \times F \times \frac{16}{12} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

L₀: Potencial de geração de metano (kg CH₄.kg de RSU⁻¹);

FCM: Fator de correção de metano (%), cujos valor para aterro sanitário será de 1,0;

COD: Carbono orgânico degradável (kg de C.kg de RSD⁻¹), obtido pela Eq. 3;

CODf: Fração de COD dissociada (%), obtido pela Eq.4;

F: Fração em volume de metano no biogás (%);

(16/12): Fator de conversão de carbono em metano (kg de CH₄.kg de C⁻¹).

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (Eq. 9) foi baseado na composição do RSU e na quantidade de carbono em cada componente da massa de resíduo.

$$\text{COD} = (0,40 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,30 \times E) \quad \text{Eq. (9)}$$

Sendo:

COD: Carbono orgânico degradável (kg de C.kg de RSD⁻¹);

A: Fração de papel e papelão;

B: Fração de resíduos de parques e jardins;

C: Fração de restos de alimentos;

D: Fração de tecidos;

E: Fração de madeira.

A fração de COD dissociada (COD_f) indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela Eq. 10.

$$\text{COD}_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde:

COD_f: Fração de COD dissociada (%);

T: Temperatura na zona anaeróbia (°C).

5.3.2 Software LandGEM

Para o cálculo por meio do software LandGEM, o modelo matemático utilizado na sua configuração estima a produção de gases a partir da Eq. 11 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2013; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005).

$$Q_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \times L_0 \times \frac{M_i}{10} \times (e^{-k \times t_{ij}}) \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

Q CH₄= geração anual de metano no ano do cálculo (m³.ano⁻¹);

Σ = soma do ano de abertura +1 ($i=1$) até o ano de projeção [n];

k = taxa constante de geração de CH_4 (ano^{-1})

L_0 = potencial de geração de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$);

M_i = massa de resíduos sólidos disposta no primeiro ano i (Mg);

t_{ij} = idade da j -ésima seção da massa de resíduos M_i aceita no i -ésimo ano

5.4 Produção de energia a partir do biogás

Para estimar a produção de energia a partir do biogás, foi utilizada a vazão de metano no ano encontrada nos métodos anteriores, a partir das Equações 12 e 13 de acordo com o Manual para Aproveitamento do Biogás (ICLEI, 2009).

$$P = \frac{Q \text{ CH}_4 \times 5500 \times 0,28}{860000 \times 365 \times 24} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\text{Prod} = P_d \times 0,28 \times 24 \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW)

$Q \text{ CH}_4$ = Vazão de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

Poder calorífico do metano = 5500 (kcal m^3)

Rendimento em relação à potência = 0,28 (adimensional)

Conversão de kcal para MW = 860000

Prod = Produção de energia ($\text{MWh} \cdot \text{d}^{-1}$)

Tempo = 24 ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$)

Rendimento = 0,87 (adimensional)

Com os dados de geração de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$), potência disponível (MW) e produção de energia ($\text{MWh} \cdot \text{d}^{-1}$), foi possível elaborar gráficos para melhor visualização dos resultados, posterior comparação com outros estudos similares e avaliação do potencial energético.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Projeção populacional e geração de resíduos

A projeção populacional do município de Campo Mourão foi projetada com base nos métodos de progressão aritmética, progressão geométrica e método dos mínimos quadrados e os resultados obtidos para um período de 20 anos utilizando estes métodos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Projeção populacional para 20 anos do município de Campo Mourão – Paraná pelos métodos de progressão aritmética, progressão geométrica e método dos mínimos quadrados.

Ano	População (habitantes)		
	Progressão Aritmética	Progressão Geométrica	Método dos Mínimos Quadrados
2021	96.665	96.868	94.914
2022	97.267	97.547	95.526
2023	97.870	98.231	96.138
2024	98.472	98.920	96.750
2025	99.074	99.614	97.363
2026	99.676	100.312	97.975
2027	100.278	101.015	98.587
2028	100.880	101.724	99.199
2029	101.482	102.437	99.812
2030	102.084	103.155	100.424
2031	102.687	103.878	101.036
2032	103.289	104.607	101.648
2033	103.891	105.340	102.260
2034	104.493	106.079	102.873
2035	105.095	106.822	103.485
2036	105.697	107.571	104.097
2037	106.299	108.326	104.709
2038	106.901	109.085	105.321
2039	107.503	109.850	105.934
2040	108.106	110.620	106.546

Fonte: Autoria própria (2020).

A população do município de Campo Mourão foi estimada com base no método de progressão geométrica, devido ao município estar em constante crescimento, pois do ano de 2019 para 2020, houve uma taxa de crescimento de 0,66% na população (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2020). Também há incentivos para o fortalecimento dos atuais e a vinda de novos estabelecimentos comerciais e industriais, onde é possível observar no Plano Diretor Municipal (CAMPO MOURÃO, 2012) que há tendência

de novas viabilidades de loteamentos e vindas de indústrias para a cidade (ARNDT, 2015). Assim, poderá aumentar a oferta de emprego e, conseqüentemente, um possível aumento da população. O município também é um Polo Educacional, onde estão presentes várias Escolas de ensino infantil, fundamental e médio, porém com expansão principalmente de Instituições de Ensino Superior, fazendo com que aumente a população, pois muitos alunos migram para Campo Mourão durante o período de estudo.

A geração per capita de resíduos sólidos do município adotada inicialmente foi de 0,73 kg.(hab.d)⁻¹, valor este obtido no diagnóstico do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (CAMPO MOURÃO, 2018). Este valor encontra-se abaixo da média da região Sul, que para o ano de 2018 foi de 0,759 kg.(hab.d)⁻¹ e abaixo da média nacional de 1,039 kg.(hab.d)⁻¹ para o ano de 2018 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2018). Santos (2019) estudou a geração de resíduos sólidos no município de Medianeira – Paraná e seus resultados apresentaram uma geração per capita de resíduos de aproximadamente 0,763 kg.(hab.d)⁻¹, sendo um valor próximo ao encontrado para o município de Campo Mourão.

Com os dados de população e valor da geração per capita, estimando acréscimo de 1% ao ano, conforme recomendado por Piñas et al. (2016), foi possível calcular a geração de resíduos durante o período de 2021 a 2040 (Tabela 5).

Tabela 5 - Estimativa de geração de resíduos para o município de Campo Mourão – Paraná durante 20 anos.

continua...

Ano	População (habitantes)	Geração per capita de resíduos sólidos (kg.(hab.d)⁻¹)	Geração de Resíduos Sólidos (toneladas)
2021	96.868	0,730	25.810,56
2022	97.547	0,737	26.251,44
2023	98.231	0,745	26.699,85
2024	98.920	0,752	27.155,92
2025	99.614	0,760	27.619,78
2026	100.312	0,767	28.091,57
2027	101.015	0,775	28.571,41
2028	101.724	0,783	29.059,46
2029	102.437	0,790	29.555,83
2031	103.878	0,806	30.574,17
2032	104.607	0,814	31.096,42
2033	105.340	0,823	31.627,59
2034	106.079	0,831	32.167,84

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5 - Estimativa de geração de resíduos para o município de Campo Mourão – Paraná durante 20 anos.

conclusão.

Ano	População (habitantes)	Geração per capita de resíduos sólidos (kg.(hab.d) ⁻¹)	Geração de Resíduos Sólidos (toneladas)
2035	106.822	0,839	32.717,31
2036	107.571	0,848	33.276,17
2037	108.326	0,856	33.844,58
2038	109.085	0,865	34.422,69
2039	109.850	0,873	35.010,68
2040	110.620	0,882	35.608,71

Fonte: Autoria própria (2020).

De acordo com o PMGIRS (CAMPO MOURÃO, 2018), apenas 4% do total dos resíduos gerados pela população e coletados pela empresa responsável, são destinados para a coleta seletiva municipal, portanto, 96% dos resíduos da coleta pública municipal são destinados ao aterro sanitário. A composição gravimétrica dos resíduos exigidos para os cálculos do método do IPCC foram: 7,63% de papel e papelão, 32,72% de resíduos orgânicos, 6,49% de tecidos e espumas e 1,69% de madeira (CAMPO MOURÃO, 2018).

6.2 Geração de metano e potencial energético

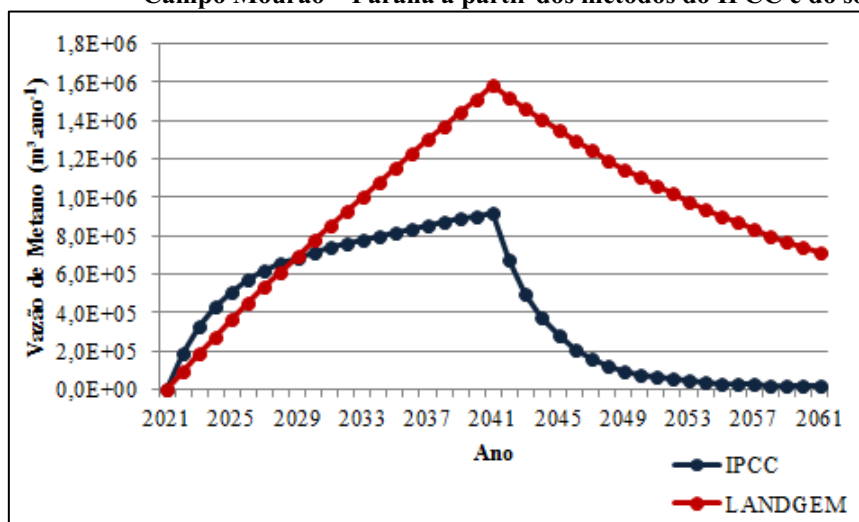
Para a aplicação da equação do método do IPCC, o valor de L_0 (potencial de geração de metano) foi obtido a partir da entrada de dados reais do aterro, encontrados no PMGIRS de Campo Mourão (CAMPO MOURÃO, 2018), de acordo com a análise gravimétrica. Após a inclusão dos dados de composição gravimétrica para calcular o COD (Carbono Orgânico Degradável) o software Biogás da CETESB gera o valores automaticamente para o L_0 e COD e não disponibiliza para visualização. Para o valor de k (taxa constante de geração de CH_4) foi utilizado valor *default* para clima subtropical úmido. Os demais parâmetros foram selecionados seguindo a metodologia proposta pelo IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006), em que: $MCF(t) = 1,0$, valor recomendado para aterros sanitários; $COD_f = 0,5$, considerando que alguns resíduos não se decompõem, ou sua taxa de decomposição é muito lenta e $F = 0,5$ pois pressupõem-se que 50% do biogás formado é composto por metano.

Para a aplicação da equação utilizada no software LandGEM, as variáveis k e L_0 foram de $0,04 \text{ ano}^{-1}$ e $100 \text{ m}^3.\text{Mg}^{-1}$, respectivamente, pois esses são os valores indicados pelo programa para inventários de emissões que podem refletir mais perto de condições reais do

aterro (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2005), considerando que neste estudo foi utilizado o dado de geração per capita de resíduos sólidos proveniente do PMGIRS do município em questão (CAMPO MOURÃO, 2018) que esta atualizado e também de acordo com o clima tropical, possuindo precipitação acima de 1000 mm por ano. O valor de F também foi de 0,5, igualmente ao utilizado no método do IPCC e os demais valores foram gerados automaticamente pelo software e não apresentados para visualização.

A partir do cálculo das equações do método do IPCC e do software LandGEM foram obtidos resultados para geração de metano (Figura 5), potência disponível e produção de energia para o município de Campo Mourão - Paraná, com o aterro sanitário funcionando por 20 anos, dando início ao seu funcionamento no ano de 2021 e com encerramento em 2040.

Figura 5 - Resultados obtidos de vazão de metano ($m^3 \cdot ano^{-1}$) para o aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.



Fonte: Autoria própria (2020).

Pode-se observar na Figura 5 que não há geração de metano no ano de início da operação do aterro em ambas as metodologias e devido a isso também não irá produzir energia durante o ano de 2021.

O pico de geração de metano, de acordo com os resultados apresentados na Figura 5 se dará no ano de 2041, que representa o ano posterior ao do encerramento do aterro sanitário, isso para ambas as metodologias. A produção de metano tenderá a diminuir após esse período, pois teoricamente não estaria mais recebendo resíduos neste aterro sanitário após 20 anos. Corroborando na discussão, Ensinas (2003) afirma que uma vez fechado o aterro este tende a atingir seu pico de produção de biogás dentro de poucos anos e continuará produzindo taxas cada vez menores por um longo período de tempo. A vazão do metano estimada em 2041, ano

do pico, será de 1.581.874,2 m³.ano⁻¹ para o software LandGEM e 920.676,3 m³.ano⁻¹ para o IPCC, este que representa 58,2% do total estimado pelo software LandGEM.

No estudo de Macedo (2019), que analisou o aterro sanitário do Jóquei Clube de Brasília – DF, que recebia resíduo de uma população de 2.570.160 habitantes, o seu pico de geração de metano é no ano de 2017 (sendo o período analisado de 1967 a 2018), estimando 40.405.405,41 m³.ano⁻¹, utilizando a metodologia do software LandGEM, sendo este valor maior do que no presente estudo, mesmo utilizando o mesmo cenário disponível no software, pois a quantidade de resíduos aterrados por ano foi maior, devido a população maior e geração per capita de resíduos sólidos de 1,0 kg.(hab.d)⁻¹. Para a metodologia do IPCC, o valor estimado foi de 27.432.432,43 m³.ano⁻¹, igualmente maior do que no presente estudo, pelo mesmo motivo relatado.

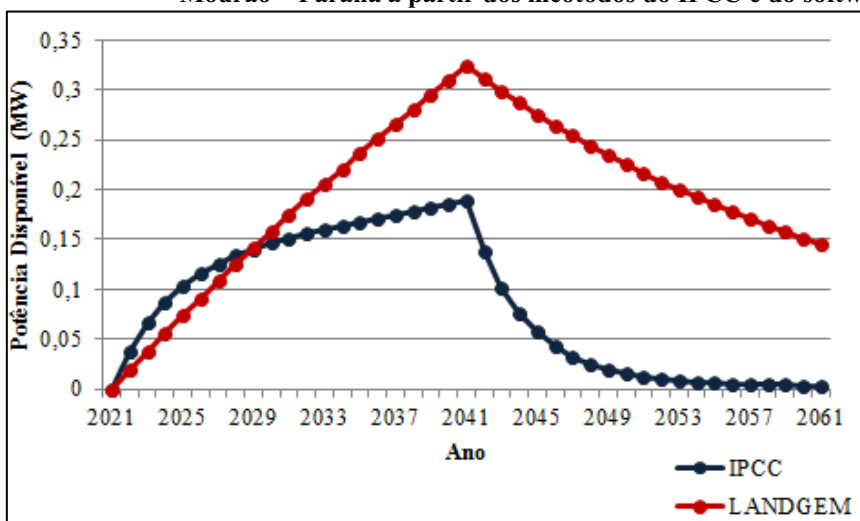
Bianek et al. (2018), que estudou o aterro sanitário de Guarapurava – PR, o pico de geração para ambas as metodologias aplicadas foi diferente (calculado para o período de 2011 a 2020), sendo gerado 3.227.394 m³.ano⁻¹ em 2020, utilizando a metodologia do IPCC e 2.612.322 m³.ano⁻¹ em 2021 utilizando o software LandGEM. Mesmo este estudo sendo em um aterro sanitário localizado no Paraná, o autor utiliza dados diferentes do presente estudo para k e L₀, sendo 0,05 ano⁻¹ e 170 m³.Mg⁻¹, respectivamente, devido às condições pluviométricas do local. Assim, a geração de metano, foi relativamente maior comparado a este estudo.

Em Piñas et al.(2016), que utilizou dados do aterro sanitário de Três Corações – MG e analisa os dados para um período de 2015 a 2034, observa-se dados de população (69.618 habitantes) e geração de resíduos (19.058 toneladas no ano) menores do que o presente estudo, mesmo utilizando geração per capita de resíduos sólidos próxima a de Campo Mourão, de 0,75 kg.(hab.d)⁻¹. A geração de metano pelo método do IPCC e pelo software LandGEM foram de 27.476.360 m³.ano⁻¹ e 26.075.960 m³.ano⁻¹, respectivamente, no seu ano de pico (em 2035), um ano após o encerramento do aterro, igualmente a do estudo em questão. Porém, a diferença que se dá nos valores da geração de metano em relação ao presente estudo é devido ao valor dado as variáveis k e L₀, 0,05 e 170 m³.CH₄⁻¹, respectivamente.

A potência disponível apresentou o pico no mesmo ano onde ocorrerá a máxima geração de metano, ou seja, em 2041, como pode ser observado na Figura 6, sendo de 0,32 MW a partir do software LandGEM e de 0,19 MW para o método do IPCC. No estudo de Ensinas (2003), que analisou esse potencial para o aterro Delta, localizado em Campinas – SP, para o período de 1992 a 2006 e utilizou o método do IPCC, mostrou o pico de geração de

metano no ano de 2008, gerando aproximadamente $13.000.000 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ e potência de 4,3 MW, neste mesmo ano, valores maiores do que no presente estudo devido a ser um município muito maior, com cerca de 1.040.000 habitantes, gerando mais resíduos, tendo média mensal de 25.314,64 toneladas e, conseqüentemente, maior produção de metano e potência, sendo estes proporcionais, devido a equação de cálculo da potência depender da quantidade de metano gerada.

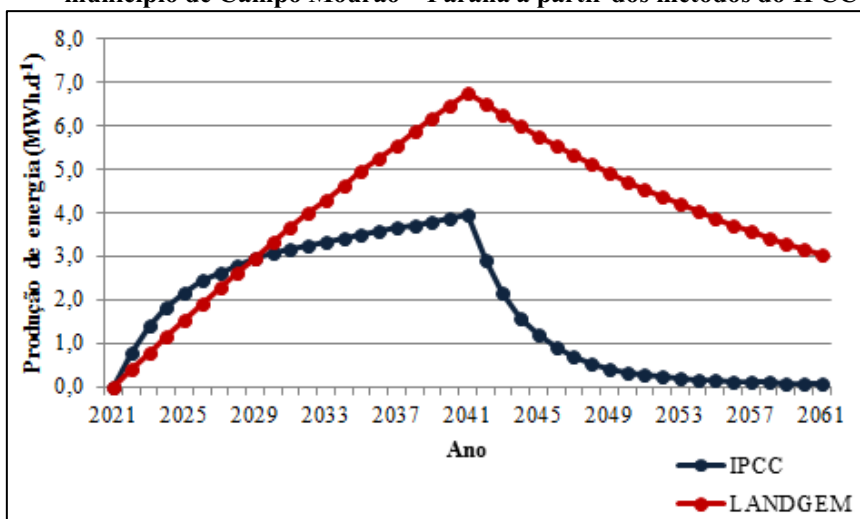
Figura 6 - Resultados obtidos para potência disponível (MW) no aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da potência gerada, o pico de produção de energia (Figura 7), que também será no ano de 2041 será de $6,75 \text{ MWh.d}^{-1}$ para o software LandGEM e $3,93 \text{ MWh.d}^{-1}$ para o método do IPCC. Em um outro estudo do aterro Delta, localizado em Campinas – SP, presente em ICLEI (2009), utilizando a metodologia de IPCC e apresentando comportamento similar na sua curva, o pico de geração de metano se dá no ano de 2011, sendo de $28.057.318,57 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, calculado para o período de 1992 a 2010, gerando 3,44 MW de potência e $71,85 \text{ MWh.d}^{-1}$ de energia, no seu ano de pico (1 ano após o encerramento do aterro), sendo maior do que o presente estudo pelo mesmo motivo mencionado anteriormente, número de habitantes e geração de resíduos.

Figura 7 - Resultados obtidos para produção de energia disponível (MWh.d⁻¹) no aterro sanitário do município de Campo Mourão – Paraná a partir dos métodos do IPCC e do software LandGEM.



Fonte: Autoria própria (2020).

Foi encontrado um comportamento similar, analisando a curva de geração de metano e de produção de energia, a partir do método do IPCC no estudo de Figueiredo (2011), elaborado no aterro da Essencis - Central de Tratamento de Resíduos (CTR), localizado em Caieiras – SP, que analisou a geração de metano para os anos de 2002 até 2040 e teve seu pico de geração no ano de 2024 (um ano após o encerramento do aterro) gerando 191.715.324,81 m³ de CH₄.ano⁻¹, 33,1 MW de potência e 635,1 MWh.d⁻¹ de produção de energia. Mesmo possuindo comportamento similar na curva, essa geração foi maior do que no presente estudo, pois no aterro Essencis, a partir do ano de 2007, passou a receber 75% dos resíduos da cidade de São Paulo, devido ao fechamento do aterro São João.

De acordo com Scharffe e Jacobs (2006), uma desvantagem da metodologia utilizada no software LandGEM é que esta não considera a composição da massa do aterro, diferentemente do método do IPCC, que utiliza dados de composição gravimétrica. Porém, quando não há essas informações para servirem de insumo a outros métodos (como do IPCC), a utilização do LandGEM pode ser vantajosa. Portanto, no software LandGEM, o cálculo das variáveis L_0 e k são limitados a 5 valores diferentes para cada uma das duas variáveis, conforme as condições do local, porém não utiliza dados específicos do aterro sanitário em questão. Já no método do IPCC, o L_0 é calculado de acordo com os dados de composição gravimétrica inseridos e o k de acordo com as condições pluviométricas do local.

O software LandGEM foi elaborado para estimar as emissões nos Estados Unidos, ou seja, em tipo de clima e gerenciamento de resíduos bem diferentes do que na região de estudo, portanto, pode superestimar ou subestimar as emissões, utilizando os valores disponíveis no

software (SILVA, 2017). No software Biogás da CETESB, que utiliza o método do IPCC, é possível indicar o país em que se está sendo elaborado o estudo e utilizar os valores para o clima adequado da região. Portanto, os resultados obtidos a partir do método do IPCC podem retratar melhor a realidade da área de estudo desta pesquisa.

O resumo de alguns dados encontrados em literatura está inserido na Tabela 6 como forma de apresentação de resultados que são oriundos da mesma temática do presente estudo.

Segundo a Agencia de Notícias do Paraná (2020), o consumo médio mensal de uma residência no estado do Paraná foi de 0,163 MWh por mês, sendo 1,956 MWh por ano. Portanto, o resultado da produção de energia no aterro sanitário de Campo Mourão, a partir de dados do método do IPCC, para diminuir o risco de superestimação, sendo de 3,93 MWh.d⁻¹, poderia abastecer aproximadamente 732 residências paranaenses por ano, no seu ano de pico de produção de metano e energia, em 2041.

Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (2020) indica que no município de Campo Mourão – Paraná, foi consumido por residência, em média, 0,155 MWh por mês no ano de 2019, aproximadamente 1,87 MWh por ano. Com base no método do IPCC, que obteve produção de energia de 1.434,45 MWh por ano, o aterro poderia abastecer aproximadamente 767 residências do município no ano de pico de produção de metano e energia, em 2041.

Figueiredo (2011) destaca algumas vantagens na geração de energia elétrica a partir do biogás, como a utilização de um combustível renovável de baixo custo, sendo proveniente de resíduos e conseqüentemente reduzindo a utilização de combustíveis fósseis, com menor emissão de poluentes. Também ocorre geração de empregos, possibilidade de receita adicional proveniente da venda da energia excedente, diminuição da dependência de energia concessionária local, melhor gerenciamento dos aterros sanitários e redução e monitoramento das emissões de gases de efeito estufa (FIGUEIREDO, 2011).

Tabela 6 - Resumo de dados de geração de metano ($\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$), potência disponível (MW) e produção de energia ($\text{MWh}\cdot\text{d}^{-1}$) encontrados na literatura em comparação com os resultados do presente estudo.

Geração de metano máxima ($\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$)	Potência disponível máxima (MW)	Produção de energia máxima ($\text{MWh}\cdot\text{d}^{-1}$)	Município	População (habitantes)	Geração de resíduos sólidos	Referências
1.581.874,2(LanGEM) 920.676,3 (IPCC)	0,32 (LandGEM) 0,19 (IPCC)	6,75 (LandGEM) 3,93 (IPCC)	Campo Mourão - PR	-	-	Presente estudo
40.405.405,41 (LandGEM) 27.432.432,43 (IPCC)	-	-	Brasília - DF	2.570.160	55.763,5 toneladas/ano	MACEDO (2019)
2.612.322 (LandGEM) 3.227.394 (IPCC)	-	-	Guarapuava - PR	179.256	100 toneladas/dia	BIANEK et al. (2018)
191.715.324,81 (IPCC)	33,1 (IPCC)	635,1 (IPCC)	Caieiras- SP	-	2.400.000 toneladas/ano	FIGUEIREDO (2011)
26.075.960 (LandGEM) 27.476.360 (IPCC)	-	-	Três Corações - MG	69.618	19.058 toneladas/ano	PIÑAS et al. (2016)
13.000.000 (IPCC)	4,3 (IPCC)	-	Campinas - SP	1.040.000	25.314,64 toneladas/mês	ENSINAS (2003)
28.057.318,57 (IPCC)	3,44 (IPCC)	71,85 (IPCC)	Campinas - SP	1.040.000	27.000 toneladas/mês	ICLEI (2009)

Fonte: Autoria própria (2020).

Em um estudo elaborado em um aterro sanitário localizado no município de Toledo – Paraná, Jacobowski (2018) concluiu que o volume de biogás gerado neste aterro, com vazão de 233,09 m³/dia, com 55,72% de metano no biogás, será suficiente para implantação de um sistema de cogeração de energia elétrica composto por motogeradores de 120 kWa e quanto maior for essa concentração de metano, melhor será a qualidade do biogás. Jacobowski (2018) também destaca-se que este sistema terá que trabalhar por no mínimo 20 horas diárias para se tornar viável e somente precisará trabalhar menos se a concentração de metano no biogás for maior.

Para o aterro Delta, localizado em Campinas – SP, a utilização do biogás para geração de energia em pequena central elétrica e em microturbinas, ambas com venda de créditos de carbono, o investimento no processo só será viável com a continuidade de vendas de créditos de carbono após 2012 (ano de pico de geração de energia), mas, sem as vendas de créditos de carbono, a receita proveniente da venda de energia não será suficiente para viabilizar o investimento em ambos os processos (ICLEI, 2009).

Figueiredo (2011) que estudou a viabilidade para geração de energia elétrica a partir do biogás no aterro Essencis – CTR, localizado em Caieiras – SP, concluiu que para os grupos motogeradores de grande porte, há viabilidade econômica para geração de energia a partir do biogás, pois os custos associados ao equipamento são menores e a produção de energia elétrica é maior, sendo uma boa alternativa para aterros com grande produção de biogás. Em 2016, foi implantada a Termoverde Caieiras, movida a biogás dos resíduos gerados no aterro sanitário da Essencis. Teve potência instalada de 29,5 MW e possui uma área de 15.000 m², com autorização para iniciar sua operação em julho de 2016 (SETOR ENERGÉTICO, 2016).

Destaca-se que no Brasil houve um projeto de aproveitamento energético em aterros sanitários na cidade de São Paulo, no aterro Bandeirantes, com área de 140 hectares e um potencial instalado de 20 MW com motores de combustão interna importados. A captação do biogás teve início em 2003, mas, por se tratar de um projeto de empresa privada, dados e resultados não foram divulgados, dificultando a elaboração de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (PINÃS et al., 2016; FIGUEIREDO, 2011).

7 CONCLUSÃO

Notou-se que a população de Campo Mourão – Paraná está em constante crescimento, considerando a progressão geométrica para estimar a variação da população do Município, houve uma variação de 96.868 habitantes a 110.620 habitantes, entre os anos de 2021 e 2040. A geração per capita de resíduos sólidos urbanos (RSU) do município, em 2018, foi de 0,73 kg.(hab.d)⁻¹ e dessa quantidade, foram considerados 96% dos resíduos que são destinados ao aterro sanitário. Dessa forma, o valor proporcional foi utilizado para estimar a geração anual de RSU total no período avaliado, que variou de 25.810,56 a 35.608,71 toneladas entre os anos de 2021 e 2040, respectivamente.

A geração de metano, no ano de 2041 (ano de pico), no aterro sanitário de Campo Mourão – PR foi de 1.581.874,2 m³.ano⁻¹ para o software LandGEM e 920.676,3 m³.ano⁻¹ para o método do IPCC. A potência, para o mesmo ano, foi de 0,32 MW para o software LandGEM e de 0,19 MW para o método do IPCC e a produção de energia, para o ano de pico (2041), 6,75 MWh.d⁻¹ para o software LandGEM e 3,93 MWh.d⁻¹ para método do IPCC.

Neste estudo, no software LandGEM foi obtido resultado maior de geração de metano e, conseqüentemente, para potência e produção de energia também. Porém esses valores podem ser superestimados, devido ao LandGEM utilizar parâmetros elaborados para estimar emissões no Estados Unidos. Portanto, o método do IPCC pode retratar melhor a realidade deste estudo, pois este utilizou um maior número de dados disponíveis em relação ao aterro sanitário da pesquisa e também permite selecionar o país estudado e a condição climática de acordo com a região.

O valor estimado pelo método do IPCC, de 3,93 MWh.d⁻¹, apresentou um potencial energético que poderia abastecer 767 residências do município de Campo Mourão, no seu ano de pico, em 2041. Recomenda-se que estudos de viabilidade econômica sejam realizados para os resíduos gerados no município, considerando as possíveis formas de aproveitamento do biogás (queima direta, conversão em energia elétrica ou uso veicular, por exemplo), além disso, recomenda-se o monitoramento *in loco*, para que sejam obtidos dados reais de vazão de biogás, de concentração de metano e de potencial de geração de energia para o aterro, possibilitando a comparação com os dados estimados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ. **Consumo de energia no Paraná cai 5,9% no segundo trimestre**. 24 jul. 2020. Disponível em: <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=108062&tit=Consumo-de-energia-no-Parana-cai-59-no-segundo-trimestre#:~:text=O%20consumo%20m%C3%A9dio%20mensal%20dos,por%20unidade%20consumidora%2C%20em%20m%C3%A9dia>. Acesso em: 11 nov. 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Banco de Informações de Geração: Usinas do tipo Biomassa em Operação**. 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Curso básico sobre aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário**, Módulo I: Conceitos básicos, Aula 3: Aterros sanitários, 2018.
- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Geotecnia, Geotecnia Ambiental, Recife - PE, 2007.
- ALEXANDER, A; BURKLIN, C. E; SINGLETON, A. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. 2005.
- ALSAMAWI, A. A.; ZBOON, A. R.; ALNAKEEB, A. Estimation of Baghdad Municipal Solid Waste Generation Rate. **Eng. & Tech. Journal**, v. 27, n. 1, 2009.
- ALVES, J. W. S.; FILHO, E. C. Métodos de estimativa de geração e recuperação energética de metano nos aterros. In: IX Congresso Brasileiro de Energia. IV Seminário Latino-Americano de Energia. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2002.
- ARNDT, L. T. **Método dos polígonos para projeção da população urbana**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis – SC, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2018/2019**. São Paulo: Abrelpe, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Atlas brasileiro de emissões de gases de efeito estufa e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo, 2013. 171 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **NORMAS BRASILEIRAS 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro – RJ, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NORMAS BRASILEIRAS 10004**: Resíduos sólidos: Classificação, Rio de Janeiro - RJ, 2004.

BIANEK, J.; SCHIRMER, W.N.; CABRAL, A.R.; MAYER, C.L.D.; EURICH, P.H.M.; MARTINS, E.H. Comparação entre metodologias usepa e ipcc para estimativa teórica de produção de biogás em aterro municipal. **Biofix Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 34-40, 18 dez. 2017. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i1.56038>.

BRASIL, **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010a**. 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, Seção 1. Brasília, terça feira, 03 agosto 2010. Disponível em: <http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=03/08/2010&jornal=1&pagina=3&totalArquivos=84>. Acesso em: 13 set. 2020.

BRASIL, **Decreto Federal nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010b**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 13 set. 2020.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2005.

CAMPO MOURÃO. **Lei nº 3.898 de 08 de fevereiro de 2018**. Institui o Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (PMGIRS), dispõe sobre a Política Municipal de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Campo Mourão, 08 fev. 2018.

CAMPO MOURÃO. **Lei Complementar nº 22/2012**. Dispões sobre o Plano Diretor Municipal de Campo Mourão, Campo Mourão – PR, 2012.

CAVALCANTI, M. M. **Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília – DF**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geofísica Aplicada) - Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil**. Relatório final, 280p. Piracicaba – SP, mar. 2004.

CHIARETTI, D. Metas do Acordo de Paris já são insuficientes para limitar aquecimento. **Econômico Valor (Globo)**. São Paulo – SP, 26 de novembro de 2019. Disponível em: <https://valor.globo.com/mundo/noticia/2019/11/26/metas-do-acordo-de-paris-ja-sao-insuficientes-para-limitar-aquecimento.ghtml>. Acesso em: 14 dez. 2020.

CLIMATE-DATA.ORG. **Clima**: Campo Mourão. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/campo-mourao-43688/>. Acesso em 03 nov. 2020.

CLIMATE & CLEAN AIR COALITION. **Modelo de emissão de gás de aterro sanitário (LandGEM) Versão 3.02**. 2020. Disponível em:

<https://www.waste.ccacoalition.org/document/landfill-gas-emissions-model-landgem-version-302>. Acesso em: 10 dez. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás: Definição**. 1992. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 12 nov. 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás: Softwares**. 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>. Acesso em: 10 dez. 2020.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECLICLAGEM (CEMPRE). **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento integrado**. 4 ed, 316 p. São Paulo - SP, 2018. Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/manuais>. Acesso em 04 nov. 2020.

COTRIM, L. H. B. **ASBR aplicado ao tratamento de efluente do processo de produção de biodiesel**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2009.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas – SP, 2003.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2011.

FIRMO, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2013.

GASQUES, A. C. F. **Caracterização quantitativa e gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Campo Mourão – PR**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão –PR, 2013.

ICLEI – Brasil- 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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS (IBGE). **Cidades**: Campo Mourão. Censo 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/campo-mourao/panorama>. Acesso em: 03 set. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. (IBGE). **Cidades e Estados**: Campo Mourão. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/campo-mourao.html>. Acesso em: 10 nov. 2020.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). (Des)acordo de Paris: os velhos “novos rumos” das negociações do Clima?. **Análises e Indicadores do Agronegócio**. v. 12, n. 1, janeiro 2017.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). Caderno Estatístico: Município de Campo Mourão. 2020. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/Pagina/Cadernos-municipais>. Acesso em 12 nov. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), **Guidelines for Greenhouse Gas inventory: reference Manual**, v. 3, 1996. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>. Acesso em: 02 set. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, v. 5, 2006. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>. Acesso em 03 nov. 2020.

JACOBOWSKI, M. **Viabilidade econômica da cogeração de energia elétrica do biogás: um estudo de caso no aterro sanitário de Toledo, Paraná**. 2018. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – PR. 2018.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C.A. Tratamento de esgotos domésticos. Rio de Janeiro: **ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 3 ed., 720p, 1995.

MACEDO, M. B. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás no aterro controlado do Jóquei Clube de Brasília**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2019.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2009

MAJDINASAB, Alireza; ZHANG, Zhenying; YUAN, Qiuyan. Modelling of landfill gas generation: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**. n. 16, p. 361-380, 2017

MEREGE, V. R. **Estratégias para medição de biogás e degradabilidade de matéria orgânica em reatores anaeróbios**. 2011. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Orientações para elaboração de plano simplificado de gestão integrada de resíduos sólidos – PSGIRS - para municípios com população inferior a 20 mil habitantes**. 3 ed. Brasília – DF, fev, 2016.

MIRANDA, Y. C.; NETO, F. F. M. Viabilidade do uso do biogás como fonte de energia renovável em aterros sanitários. **Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes**. v. 05, n. 12, 2017.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F. A. S.; GIANSANTE, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de

energia elétrica e biometano no Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.** Rio de Janeiro , v. 24, n. 1, p. 143-155, fev. 2019.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, E. C. Viabilidade energética do biogás gerado do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia. **Cientefico**, v. 14, n. 27, p. 121-134, Fortaleza, 2014.

ONOFRE, F. L. **Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa – PB, 2011.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ROALCABA, O. D. C. Aterros sanitários para a geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Rev. bras. estud. popul.**, São Paulo ,v. 33, n. 1, p. 175-188, abr. 2016.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaerobia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas - SP, 1999.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Estudo sobre o potencial de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Produto 6 – Resumo Executivo, Ministério do Meio Ambiente (MMA), São Paulo, nov. 2010. Disponível em:
https://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf. Acesso em: 13 set. 2020

PROIN/CAPES; UNESP/IGCE. **Material Didático**: arquivos de transparências. Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999. Disponível em:
<HTTP://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/imagens/residuos/aterro.gif>. Acesso em: 09 dez. 2020.

REGATTIERI, C. R. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário – estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluidos, São Carlos – SP, 2009.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & Energia**, v.2, n.1, p. 57-67, 2005.

SANTOS, R. A. R. **Estimativa da produção de biogás em aterro sanitário municipal no oeste do Paraná**. 2019. Monografia (Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira – PR, 2019.

SCHARFF, H. JACOBS, J. Applying guidance for methane emission estimation for landfills. **Waste Management**, v.26, p. 417-429, 2006.

SETOR ENERGÉTICO. **Termoverde Caieiras movida a biogás será entregue dia 16.** 2016. Disponível em <https://setorenergetico.com.br/termoverde-caieiras-movida-biogas-sera-entregue-no-dia-16-18981/>. Acesso em: 10 dez. 2020.

SILVA, C. L. da; RABELO, J. M. O.; RAMAZZOTTE, V. C. B.; ROSSI, L. F. S. R.; BOLLAMAN, H. A. A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba. **Innovar**, Bogotá, v. 19, n. 34, p. 83-98, maio, 2009.

SILVA, G.A. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, João Pessoa – PB, 2012.

SILVA, R. S. **Emissões de gases de efeito estufa de um aterro na Amazônia: simulação das emissões do metano no aterro do Aurá – região metropolitana de Belém, PA.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Belém – PA, 2017.

SIMÕES, A. N. **Processamento do glicerol bruto em reatores anaeróbios de leite fluidificado, acidogênico e metanogênico, em temperatura mesofílica.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos – SP, 2017

SOUZA, M. E. de. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, Viçosa, v. 44, n. 137, p.88-94, jun. 1984.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. & VINIL, S. **Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues.** Irwin MacGraw-Hill. 978p. 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills** (EPA-450/3-90-011a), 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) **First Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills** (EPA-600/R05/072). Washington, DC. 2005. 66 p.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Editora UFMG, v. 1, 4 ed., 472 p, 2014.