

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CAMPUS LITORAL NORTE
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

EDUARDO BENHUR RODRIGUES CAVALHEIRO

***ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS QUANTITATIVOS
PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO NO
LITORAL NORTE GAÚCHO***

Tramandaí

2020

EDUARDO BENHUR RODRIGUES CAVALHEIRO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS QUANTITATIVOS
PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO NO
LITORAL NORTE GAÚCHO**

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo(a) Orientador(a) e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª. Gabriela Pereira da Silva Maciel, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme de Lemos Pinto Aydos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Rafael Aislan Amaral, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brasil

Coordenadora Substituta COMGRAD-EGE: _____

Prof^ª. Dr^ª. Gabriela Pereira da Silva Maciel



Tramandaí-RS, 02 de dezembro de 2020.

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO NO LITORAL NORTE GAÚCHO

Eduardo Benhur Rodrigues Cavalheiro – eduardo.benhur@ufrgs.br

Gabriela Pereira da Silva Maciel – gabriela.pereira@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia

Resumo. *A produção do biogás a partir dos resíduos sólidos urbanos (RSU) vem sendo amplamente estudada e utilizada como uma fonte renovável de geração de energia elétrica, proporcionando a redução de emissões de metano (CH_4), bem como ganhos financeiros em diversas cidades brasileiras. No entanto, no litoral norte do Rio Grande do Sul, o lixo urbano não é visto como uma oportunidade de renda e geração de energia. Este estudo, apresenta subsídios técnicos e científicos que comprovam a viabilidade do aproveitamento do biogás de aterro, como combustível na geração de energia elétrica, através da estimativa de produção de biogás oriundo dos resíduos sólidos urbanos da região. Para estimar a quantidade total de biogás produzida, foram aplicados três modelos matemáticos, propostos pelo Banco Mundial, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC). Dentre os modelos analisados, o modelo proposto pelo Banco Mundial indicou ser o mais adequado a realidade da região, e apresentou uma estimativa de produção média de 1,5 milhões de $Nm^3 CH_4/ano$. A partir dessa projeção, pela comparação da potência elétrica estimada com base na geração de metano, são sugeridas duas opções viáveis para a conversão em energia elétrica, motores de combustão interna e micro turbinas a gás. Nota-se que existe um potencial para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos nessa região, e que, após estudos futuros que determinem a vazão e as características químicas do biogás gerado, é possível propor e projetar uma instalação em aterro sanitário que atenda a região de maneira sustentável, gerando energia e renda aos municípios do litoral norte gaúcho.*

Palavras-chave: *Aterro Sanitário, Biogás, Energia limpa*

1. INTRODUÇÃO

O biogás é uma mistura de diferentes gases produzidos pela decomposição de matéria orgânica, na ausência de oxigênio, formado principalmente por metano (45-60%), gás que confere valor energético ao biogás, dióxido de carbono (40-60%), nitrogênio (2-5%), oxigênio, hidrogênio, ácido sulfídrico e amônia (compostos com percentuais inferiores a 1%). O biogás é uma fonte de energia renovável e pode ser oriundo de diferentes matérias-primas, como por exemplo, resíduos agrícolas, esterco, lixo orgânico, esgotos, entre outros materiais orgânicos (CDM, 2016).

Dentro dessa esfera de possíveis matérias primas para a obtenção do biogás, o uso dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem chamado a atenção dos pesquisadores, visto que no Brasil e no Mundo, este é um fator problemático em todas as cidades e centros urbanos. Segundo dados da ABRELPE (2018), a quantidade de RSU gerado diariamente no Brasil está em torno de 220 mil toneladas, e apenas 59,5 % desses resíduos recebe a destinação final correta. Ainda hoje, após 10 anos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), perduram os lixões a céu aberto, aterros controlados sem queima de gás nos *flares*, ocasionando graves problemas ambientais. Algumas cidades brasileiras, que não dispõem de aterro sanitário local, precisam enviar seus resíduos para aterros em cidades vizinhas, os quais muitas vezes precisam ser transportados por muitos quilômetros em grandes carretas, o que gera mais emissões de gases de efeito estufa, altos custos aos cofres públicos e o mau aproveitamento do potencial econômico e energético dessa matéria prima.

Até poucas décadas, o biogás era visto apenas como um subproduto, obtido a partir da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos. No entanto, a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, a implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos, bem como a crescente elevação do preço dos combustíveis convencionais, vêm aumentando as pesquisas e investimentos na produção de energia a partir de novas fontes alternativas e economicamente atrativas, que possibilitem a preservação dos recursos naturais esgotáveis (SALOMON, 2007).

A geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários é uma alternativa ambiental importante, e hoje é uma realidade, pois com a extração do biogás procedente da decomposição dos resíduos orgânicos, é possível gerar energia elétrica. No Estado do Rio Grande do Sul, cidades como São Leopoldo, Santa Maria e Minas do Leão, já possuem projetos relacionados ao aproveitamento da energia do RSU (CRVR, 2017). Entretanto, para tornar essa prática economicamente exequível, é necessário um bom entendimento da produção do biogás, das características químicas do gás produzido, e principalmente das formas confiáveis de estimar essa produção ao longo dos anos, visando a obtenção de investimentos a longo prazo, para viabilizar a execução de projetos que possibilitem o aproveitamento dessa energia.

Nesse aspecto, a região do litoral norte carece de estudos básicos sobre o entendimento da população, suas características econômicas e da geração dos resíduos sólidos urbanos. Além disso, desde abril de 2018, a região não conta

com o aterro sanitário de Tramandaí e o aterro sanitário de Capão da Canoa, atualmente, não tem capacidade para receber os resíduos de todos os municípios da região. Desta forma, para a destinação adequada, cada município envia seus resíduos para outras cidades ou regiões com diferentes operações de transbordo que atuam tanto pelo setor público, como a partir da contratação de empresas privadas, onde o lixo de uma ou mais cidades é recebido e encaminhado para aterros sanitários a quilômetros de distância do litoral norte. O pouco entendimento sobre o tema, por parte da sociedade e dos gestores públicos, provoca uma consequente falta de políticas públicas voltadas para resolver o problema do RSU a longo prazo, visto que, os aterros sanitários para onde são enviados os resíduos atualmente, também possuem datas de encerramento, como é o caso do aterro de Minas do Leão, inaugurado em 2001, com vida útil estimada de 23 anos e que deverá operar até 2024 (CRVR, 2020).

Nesse contexto, o presente estudo compara modelos matemáticos comumente utilizados na estimativa de produção de biogás ao longo do tempo e avalia a aplicabilidade de cada modelo à realidade da geração de RSU na região do litoral norte gaúcho, oferecendo assim, os subsídios técnicos e científicos necessários para mostrar aos gestores públicos e empresários o potencial de geração de biogás a partir do RSU gerado pelos municípios, e indicar alternativas tecnológicas sustentáveis para futuros projetos de aproveitamento energético do biogás na região.

2. MODELOS MATEMATICOS DE ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Existem várias formas de estimar a produção do biogás em aterros sanitários. As metodologias, baseadas em modelos matemáticos já testados, são citadas em diversos estudos internacionais, bem como em manuais de aproveitamento energético, como por exemplo, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM), que cita 3 metodologias distintas de estimativa, sendo elas: I – Scholl-Canyon , II – LandFill Gas Emission Model(LandGEM) e III – International Panel of Climate Change (IPCC) .

2.1 Scholl-Canyon

Amplamente conhecido e recomendado pelas principais agências reguladoras e instituições financeiras de fomento a projetos de energia renovável na América Latina, conforme destacado pelo Banco Mundial (2003), no Manual de Projetos para Aproveitamento de Biogás, por isso muitas vezes é também chamado de Modelo do Banco Mundial. O seu uso é incentivado devido sua confiabilidade e simplicidade. Esse modelo baseia-se na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro sanitário por unidade de tempo, o que pode ser expresso a partir da Eq. 1 de primeira ordem:

$$Q_{CH_4} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH_4} = Quantidade de metano produzido no ano “i” (m³/ano);

k = Taxa de geração de metano (ano⁻¹);

L_0 = Potencial de geração de metano em massa de lixo (m³/t);

m_i = Massa de resíduos depositados no ano “i” (t);

t = Tempo após o fechamento do aterro (ano).

A taxa de geração de metano (k), também chamada de constante de decaimento pode assumir valores entre 0,001 ano⁻¹ para aterros secos, até 0,26 ano⁻¹ para aterros úmidos. Essa condição depende da precipitação anual na região onde está situado o aterro e da condição de decomposição dos resíduos depositados. O Banco mundial sugere valores conforme a Tab.1

Tabela 1 - Valores sugeridos para k - Fonte World Bank 2004.

Precipitação Anual no Aterro	VALORES RECOMENDADOS PARA k (ano ⁻¹)		
	Relativamente Inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
<250 mm	0,01	0,02	0,03
250 a 500 mm	0,01	0,03	0,05
500 a 1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Por sua vez, L_0 representa o volume de gás gerado por tonelada de matéria orgânica presente no RSU depositado no aterro, podendo variar de 1 m³/t para aterros com pouco resíduo orgânico, até 312 m³/t para aterros com grande presença de material orgânico depositado, conforme Elk (2007). O Banco Mundial em seu Manual disponibiliza valores indicados de L_0 para tipos determinados de concentração de matéria orgânica no aterro, conforme a Tab. 2.

Tabela 2 - Valores sugeridos para L_0 - Fonte World Bank 2004.

CATEGORIA DOS RESÍDUOS	VALOR MÍNIMO DE L_0 (m ³ /t)	VALOR MÁXIMO DE L_0 (m ³ /t)
Relativamente Inerte	5	25
Moderadamente Degradável	140	200
Altamente Degradável	225	300

Os coeficientes k e L_0 , são parâmetros que refletem as condições físicas e químicas do aterro, pois dependem da combinação de fatores como clima, umidade, precipitação anual e principalmente a composição dos resíduos presentes no aterro, dessa forma são muito importantes nos modelos de estimativas. O refinamento desses parâmetros depende da confiabilidade e disponibilidade de dados acerca do aterro a ser estudado. Ter acesso a dados confiáveis das características do local e do material depositado são extremamente fundamentais para a melhor aplicação e validação dos modelos matemáticos utilizados.

2.2 LandFill Gas Emission Model (LandGEM)

O LandGEM, também conhecido como Modelo de Emissão de Gás de Aterro (Landfill Gas Emission Model), foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), amplamente utilizado internacionalmente, tendo sido usado pelo Ministério do Meio Ambiente brasileiro para estimar o potencial de geração de energia dos municípios (Elk, 2007).

Utilizando como base a equação de primeira ordem do modelo Scholl-Canyon, esse modelo contabiliza as quantidades e variações de gases durante a vida do aterro, sendo expressa pela Eq. 2 cinética de primeira ordem a seguir:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (2)$$

Onde:

- Q_{CH_4} = Quantidade de metano produzido por ano (m³/ano);
- L_0 = Potencial de geração de metano em peso de lixo (m³/t);
- R = Quantidade anual de resíduo depositado no aterro (t/ano);
- k = Taxa de geração de metano (ano⁻¹);
- c = Tempo desde o fim da operação do Aterro (ano);
- t = Tempo desde o início da operação do Aterro (ano).

A Eq. 2 pode ainda ser dividida em duas equações distintas, sendo uma delas para quando o aterro está em plena operação e outra após o encerramento do aterro (EPA, 2008), ficando da seguinte forma:

Equação para aterro em funcionamento:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

Equação para aterro desativado:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (4)$$

Os parâmetros R , c e t do modelo LandGEM são determinados a partir do conhecimento prévio, bem como de uma simples análise dos dados do aterro sanitário. por sua vez os coeficientes L_0 e k , representam aspectos físicos e

químicos do aterro, da mesma forma como ocorre no modelo anterior. Dessa forma, a própria EPA propõe valores sugeridos em sua bibliografia de 2008, na Tab. 3 temos os valores sugeridos para k :

Tabela 3 - valores sugeridos para k - Fonte EPA, 2008

PRECIPITAÇÃO ANUAL NO ATERRO	VALOR RECOMENDADO DE k (ano ⁻¹)
< 635 mm/ano	0,02
>635 mm/ano	0,04

O valor recomendado para L_0 no modelo LAndGEM é de 100 m³ a cada tonelada de resíduo depositado. Esse parâmetro foi corrigido para a confecção de estimativas destinadas a inventários de emissões (EPA, 2008) sendo adotado por conter uma maior concordância entre as estimativas teóricas e os valores empíricos medidos em 40 aterros nos Estados Unidos, cuja emissão de gases foi estudada pela EPA.

2.3 International Panel of Climate Change (IPCC)

O *International Panel of Climate Change* (Painel Internacional de Mudanças Climáticas) de 1996, teve como um dos seus objetivos, incentivar a implantação de aterros sanitários que contassem com métodos de controle e aproveitamento das emissões de gás metano, oferecendo um modelo simplificado capaz de estimar a quantidade anual de metano produzida por uma população que deposita o resíduo em aterro sanitário.

Este método também é chamado de método do inventário, pois busca estabelecer o potencial contido em determinada quantidade de RSU em uma cidade, região ou mesmo um país. Para isto se utiliza da Eq. 5, que leva em conta uma série de coeficientes de fração dos gases gerados:

$$Q_{CH_4} = \left(Pop_{urb} \cdot RSU_t \cdot RSU_f \cdot FCM \cdot COU \cdot COU_f \cdot F \cdot \frac{16}{12} - R \right) \cdot (1 - OX) \quad (5)$$

Onde:

Q_{CH_4} = Quantidade de metano produzido (tCH₄/ano)

Pop_{urb} = População urbana envolvida no processo

RSU_t = Taxa total de geração de resíduos (tRSU/ano)

RSU_f = Fração de resíduos disposta no aterro (%)

FCM = Fator de correção de metano (%)

COU = Carbono orgânico degradável disponível (gC/gRSU)

COU_f = Fração do Carbono Orgânico disponível que realmente se degrada (%)

F = Fração de CH₄ no gás de aterro (%)

R = Quantidade de CH₄ recuperada (tCH₄/ano)

OX = Fator de oxidação (adimensional)

A aplicação correta desse modelo, exige o conhecimento de uma série de informações específicas do aterro, relativas à composição dos resíduos, teor de carbono orgânico degradável, quantidade de metano recuperada, entre outros. Alguns desses parâmetros são padronizados, e seus valores recomendados são apresentados a seguir (IPCC, 1996).

– Fator de correção de metano (FCM): Leva em conta o tipo e a profundidade da cobertura de aterramento dos resíduos, conforme a Tab. 4

Tabela 4 – Valores sugeridos de FCM – Fonte IPCC, 1996.

SITUAÇÃO DO ATERRO	VALOR RECOMENDADO
Controlado	1,0
Não Controlado Profundo (> 5m)	0,8
Não Controlado Raso (< 5m)	0,4
Valor Padrão	0,6

Tabela 5 – Valores sugeridos de COU – Fonte IPCC, 1996.

TIPO DE RESÍDUO	COU (% DE MASSA)
(A) Papel e Têxtil	40
(B) Jardinagem e outros	17
(C) Resíduos de alimentos	15
(D) Madeira e Palha	30

- Carbono orgânico degradável (COU): deve ser determinado para cada tipo de resíduo presente no aterro. Os valores recomendados para as principais categorias de resíduos são apresentados na Tab. 5, sendo possível também calcular o valor para a área de estudo a partir da Eq. (6).

$$COU = 0,4(A) + 0,17(B) + 0,15(C) + 0,30(D) \quad (6)$$

Onde (A), (B), (C) e (D) são as porcentagens de resíduos presentes, conforme as categorias apresentadas na Tab. 5.

– Fração de metano no gás de aterro (F): diz respeito à concentração de CH₄ no gás liberado. O valor recomendado para aterros sanitários é de 0,5.

– Fator de oxidação (OX): representa a quantidade de CH₄ que é oxidada no solo das camadas superiores de cobertura dos resíduos, onde há oxigênio. Caso não haja dados sobre o fator de oxidação do local, assume-se o valor de 0 (zero), na falta de valores mundialmente aceitos.

O IPCC também admite a utilização de um modelo de estimativa de produção de metano baseado na cinética de primeira ordem, semelhante aos modelos anteriores, nessa formulação é contabilizada a influência do tempo sobre a estimativa apresentada pelo modelo da eq. (5) Esse modelo é representado pela eq (7) e baseia seus parâmetros nos mesmos valores sugeridos pela EPA, sendo os valores de *k* contidos nas Tab. 3, e o valor de *L*₀ igual a 100 m³/ton.

$$Q_{CH_4x} = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (7)$$

Onde:

*Q*_{CH₄*x*} = Quantidade de metano produzida no ano *x* (m³/ano);

k = Constante de geração de metano (ano⁻¹);

*R*_{*x*} = Quantidade de RSU depositado no aterro no ano *x* (t);

*L*₀ = Potencial de Geração de metano (m³/t);

T = Ano de realização do inventário (ano);

x = Ano de interesse.

2.4 CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA ELÉTRICA

Existem diversas tecnologias que podem ser utilizadas para o aproveitamento energético a partir do metano contido no biogás de aterros sanitários, a princípio qualquer tecnologia desenvolvida para conversão de energia elétrica a partir de combustíveis como gás natural, pode ser adaptada para o uso do biogás, desde que, este passe por processos de limpeza e filtragem adequados, isso inclui a utilização direta da energia térmica para aquecimento de caldeiras a vapor, geração de energia elétrica a partir de motores de combustão interna, microturbinas, células de combustível, entre outros (Zicari, 2003).

2.4.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna, são tradicionalmente, o meio mais utilizado para a conversão da energia térmica contida no metano presente no biogás por ter uma tecnologia consolidada, e com um alto grau de confiabilidade, o que é conveniente principalmente em projetos que exigem financiamentos de bancos e organismos internacionais, onde geralmente, se opta por uma tecnologia estabelecida, ao invés de apostar em novos métodos ainda não consolidados devido ao risco inerente.

Nos motores de combustão interna o trabalho mecânico é obtido por meio de uma sequência de processos para conversão da energia química contida no combustível, ou seja, o poder calorífico do metano, que é queimado liberando calor, que por sua vez, gera o movimento de rotação no motor, sendo assim aproveitado mecanicamente, e a partir de um gerador acoplado, pode ser transformado em energia elétrica. As classes de motores mais comumente utilizadas são os motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel.

A eficiência de conversão da energia química para energia mecânica, ou rendimento global de um motor de combustão interna, pode ser determinada de acordo com a Eq. (8) Para motores de ciclo Otto, essa eficiência geralmente se mantém entre 25 e 33%, enquanto para motores de ciclo Diesel, se encontra entre 35 e 40% (Heyhood, 1988).

$$\eta_m = \frac{w_m}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (8)$$

onde:

η_m = eficiência do motor (adimensional)

w_m = potência mecânica efetiva do motor (kW)

\dot{m}_c = vazão em massa do combustível (kg/s)

PCI = poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

Motores de ciclo Otto vêm sendo empregados e estudados amplamente nos últimos anos, em 2015 o grupo de pesquisas do LabCET da UFSC, realizou um experimento utilizando um conjunto de motor a combustão que inicialmente operava com alimentação a gás natural veicular (GNV), onde foram realizados diversos testes para avaliar a potência, rendimento e consumo do motor. Após a adaptação do motor para operar com biogás, foi observado um rendimento superior ao do GNV para a geração de energia elétrica. Com isso, foi determinado que o conjunto deveria ser abastecido com uma injeção de biogás entre 11,4 e 19 Nm³/h, com no mínimo de 60% de CH₄ e dessa forma, ser capaz de gerar 60 kWh (SILVESTRE et al., 2015).

A vantagem da utilização de motores de combustão interna movidos a biogás, se dá pelo fato de que os motores, tanto no ciclo Otto como o ciclo Diesel, possuem uma boa versatilidade, sendo possível a adaptação de modelos existentes para o combustível gasoso, ou até mesmo misturas de combustível, o que faz baixar o valor do investimento. Além disso, a manutenção desse tipo de motor é amplamente conhecida, bem como as peças e componentes são facilmente encontrados no mercado nacional (Suzuki et al., 2011).

2.4.2 Microturbinas

As microturbinas são turbinas de combustão de pequeno porte que podem fornecer potências na faixa de 10 kW a 500 kW. Operam com elevada velocidade de rotação, podendo alcançar 120.000 rpm, e podem ser adaptadas para operarem com os mais diversos tipos de combustíveis. A grande maioria das microturbinas a gás (MTG) produzidas e comercializadas são projetadas para o uso de gás natural. Para que uma MTG utilize o biogás como combustível, é necessário que alguns aspectos da estrutura sejam ajustados de acordo com o tipo de biogás a ser utilizado.

O princípio de funcionamento das microturbinas é atualmente bem compreendido, e se baseia no ciclo termodinâmico de Brayton, que é um ciclo aberto (Çengel, 2008), sendo compostas basicamente de um compressor, que é responsável pela elevação da pressão do ar e pelo aumento da quantidade de ar injetado na câmara de combustão; da

câmara de combustão, local onde ocorre a mistura do ar a alta pressão e do combustível, e posterior reação química de oxidação exotérmica (combustão); da turbina, onde ocorre a expansão dos gases resultantes da combustão e a realização de trabalho mecânico útil; e de um regenerador ou recuperador de calor, cuja função é pré-aquecer o ar do compressor, antes de sua entrada na câmara de combustão (Van Wyllen e Sontaag, 2014).

De acordo com Çengel (2008), a eficiência térmica de uma microturbina a gás operando no ciclo Brayton aberto é definida pela equação Eq. (9), e se mantém entre 15% e 30%.

$$\eta_t = \frac{w_{liq}}{q_e} \quad (9)$$

onde:

η_t = eficiência térmica da turbina (adimensional)

w_{liq} = Trabalho líquido realizado (kJ)

q_e = Calor liberado pela câmara de combustão (kJ)

Dentre os benefícios apresentados na utilização de microturbinas, destacam-se as baixas emissões atmosféricas, baixos níveis de ruído e vibração, dimensões reduzidas e versatilidade de instalação, podendo ser instalada em locais cobertos ou ao ar livre. Outra característica interessante é que se pode trabalhar com biogás pobre com uma quantidade mínima de 35 a 40% em gás metano (HAMILTON, 2003). Alguns fabricantes, como a CAPSTONE, já possuem uma linha de microturbinas adaptadas especialmente para serem abastecidas com biogás. Esta linha de produtos foi desenvolvida para receber o biogás da decomposição anaeróbica, ou seja, biogás com baixo teor de gás metano e altos níveis de contaminantes, como o ácido sulfídrico, por exemplo (Coloma e Pietro, 2010) e, por isso, esta linha de microturbinas necessita ser mais robusta e resistente a corrosão.

3. CONTEXTO DA REGIAO DO LITORAL NORTE

A região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, ou aglomeração urbana do Litoral Norte, originalmente criada em 2004, tinha 20 municípios, atualmente conta com 23 municípios, sendo eles: Arroio do Sal, Balneário Pinhal, Capão da Canoa, Capivari do Sul, Caraá, Cidreira, Dom Pedro de Alcântara, Imbé, Itati, Mampituba, Maquiné, Morrinhos do Sul, Mostardas, Osório, Palmares do Sul, Santo Antônio da Patrulha, Tavares, Terra de Areia, Torres, Tramandaí, Três Cachoeiras, Três Forquilhas e Xangri-lá.

O crescimento demográfico do Litoral Norte, nas últimas décadas, foi acima da média estadual e nacional. Em 2000, por exemplo, a taxa de crescimento da população era de 2,84%, superior à média nacional (1,63%) e à do Rio Grande do Sul (1,23%) (Estado do Rio Grande do Sul, 2014). De acordo com o último censo realizado pelo IBGE em 2010, a população fixa da região era de 284.046 habitantes, distribuídos em uma área de 5.136,723 km², resultando em uma densidade demográfica de 55,3 hab/km². A falta de um novo censo demográfico realizado pelo governo federal, levanta uma discussão a respeito da atual população fixa da região, visto que nos últimos anos, notou-se uma acentuação na migração de moradores de outras regiões como serra e região metropolitana para o litoral, fazendo aqui a residência fixa, e não mais apenas um local de férias e veraneio. Em sua projeção de população para 2019 o IBGE apontava uma previsão de crescimento populacional para a região, com população aproximada de 397.063 (IBGE, 2019), ou seja, um aumento de mais de 100 mil habitantes no período de 9 anos, o que representa um aumento significativo de 39% no período, ou 4,33% por ano, um índice muito superior à média do restante do Estado do Rio Grande do Sul que ficou em 8% no período, ou 0,9% ao ano.

O COREDE em 2015, destacou em seu planejamento socioeconômico uma série de consequências devido ao grande fluxo de pessoas para a região do litoral, que resultam em problemas ligados à informalidade dos empregos, baixa geração de renda, prestação de serviços públicos e à organização territorial, como problemas de habitação e saneamento. Considerando-se ainda que, além do crescimento populacional, esses problemas são agravados com os grandes fluxos de população temporária que se destinam às praias durante o verão, o saneamento é um dos pontos a ser observado com atenção, em especial a coleta e destinação dos resíduos sólidos urbanos, visto que a gestão dos resíduos sólidos costuma ser um problema para os pequenos municípios, principalmente no que tange ao manejo e à disposição final. Apesar do percentual médio de coleta ser de 96,25% (COREDE, 2015), persistem, em quase todos os municípios, práticas inadequadas como: queima ou enterro de resíduo na propriedade; depósito em terreno baldio ou logradouro; lançamento em rio, lago ou mar ou outro destino, apresentando um potencial risco ambiental à bacia hidrográfica, principalmente, devido a crescente poluição dos lençóis freáticos superficiais, e consequentemente das lagoas e lagunas que permeiam toda a extensão do litoral.

Atualmente, a falta de um aterro sanitário com capacidade para atender toda a região faz com que os resíduos sólidos urbanos sejam levados para municípios distantes, ocorrendo apenas a triagem e a separação na área do antigo aterro de Tramandaí, que foi desativado em abril de 2018, após 22 anos de operação, o qual atendia 17 municípios da região. A empresa que opera a instalação de transbordo na área do antigo aterro de Tramandaí recebe os resíduos de 14 municípios do litoral norte e após a triagem de uma fração do RSU por uma cooperativa de reciclagem, o que é rejeito juntamente

com o restante dos resíduos que não passaram pela triagem são alocados em carretas e enviados para o Aterro Sanitário de Minas do Leão, com um custo significativo ao erário dos municípios atendidos.

Em 2015, houve a inauguração da primeira termoeletrica movida a biogás de aterro no Rio Grande do Sul, localizada no aterro de Minas do Leão, com isso, uma série de projetos foi colocada em andamento com a liberação para a instalação de usinas em Santa Maria e em São Leopoldo (CRVR, 2017). A Biotérmica Energia, construída junto ao Aterro Sanitário de Minas do Leão, gera 8,55 MWh em média com potencial máximo de 15 MWh de energia limpa. No total produz 70 mil MWh ao ano, o que representa atender cerca de 50 mil residências com energia elétrica sustentável ou uma cidade com cerca de 200 mil habitantes (CRVR, 2020), isto demonstra que é preciso olhar para essa fonte de energia que, até então, vem sendo totalmente desperdiçada no litoral norte.

Portanto, estimar corretamente a produção de biogás proveniente do RSU coletado na região, pode contribuir como avalizador para projetos que visem captar a energia dessa fonte renovável proveniente da biomassa presente no lixo urbano, fornecendo assim, subsídios para que estudos econômicos de viabilidade possam criar o cenário de um aterro sanitário regional, administrado em consórcio pelos municípios, com uma planta energética que atenda a região e seus 23 municípios, viabilizando a geração de emprego, renda e fomentando o desenvolvimento sustentável.

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa constituiu-se de uma revisão da literatura a partir de artigos e publicações científicas relevantes ao tema. As referências analisadas para a produção deste trabalho foram consultadas através das bases de dados Science Direct, Scielo, Scopus, entre outras. Os principais termos utilizados para a pesquisa foram: “aterros sanitários”, “produção de biogás”, “estimativas de biogás” e “modelos matemáticos”. Para especificar e reduzir a gama de publicações selecionadas, utilizou-se um segundo critério, onde foi feita a leitura do resumo disponível. Dessa forma, foram selecionadas algumas publicações que serviram como base para a pesquisa e, a partir delas buscou-se as referências base.

Como metodologia de pesquisa foi utilizada a abordagem quantitativa de natureza exploratória, a partir de entrevistas semiestruturadas e questionários abertos aplicados aos servidores ligados as secretarias de meio ambiente e/ou de obras dos municípios da região a ser estudada, bem como a algumas empresas ligadas ao setor de coleta de lixo, e gerenciamento de aterros sanitários. Estes questionários foram enviados por e-mail, e as entrevistas foram realizadas por contatos telefônicos, respeitando assim, todas as normas vigentes do distanciamento social aplicado devido a pandemia da Covid-19 que estava em vigor durante este trabalho.

Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas as quantidades anuais de RSU que vão para aterro sanitário dos dez municípios com maior população de acordo com o IBGE em 2019. Essa restrição da amostra é justificada pelo fato de que os 10 municípios mais populosos somam 314.714 habitantes, o que representa 80 % da população total da região e são os maiores produtores de resíduos sólidos urbanos. De posse dos dados, foram aplicados os modelos matemáticos escolhidos e realizada a análise dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dentre os municípios contatados durante a pesquisa apenas cinco deles possuíam planos municipais de gerenciamento de resíduos (PMGRS), apesar de tais planos serem instituídos pela Lei 12.305 de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) e serem obrigatórios desde 2014, a grande maioria dos municípios do litoral norte ainda não possui o PMGRS, está com o plano desatualizado, ou deixou o gerenciamento dos resíduos a cargo das empresas contratadas para coleta e destinação. Nos planos de alguns desses cinco municípios constam as análises gravimétricas do RSU coletado, mostrando a composição dos resíduos gerados pelo município, fornecendo importantes dados para o embasamento dos cálculos de potencial de geração de biogás. Compilando os dados obtidos, chega-se no cenário para a região apresentado na Tab. 6. Analisando a Tab. 6 pode-se considerar que a composição do RSU do litoral norte se aproxima à composição gravimétrica média dos resíduos sólidos no Brasil, em que a matéria orgânica chega a representar mais de 50% da massa de resíduos que é coletada e disposta em aterros sanitários (IPEA, 2012).

Tabela 6 – Composição do RSU do Brasil e litoral norte gaúcho.

TIPO DE RESÍDUO	QUANTIDADE PERCENTUAL BRASIL ¹	QUANTIDADE PERCENTUAL LITORAL NORTE
Orgânico	51	49
Plásticos	14	8
Vidros	2	1
Metais	3	1
Papel	13	7
Rejeito	17	34

Fonte: ¹ Adaptado de IPEA, 2012.

A partir das entrevistas com as secretarias municipais de meio ambiente e/ou obras dos dez municípios mais populosos da região, foi possível a aquisição dos dados referentes ao total de RSU que foram levados para aterro sanitário no ano de 2019 por cada município. As três estimativas do potencial de produção de biogás foram obtidas com base na projeção de deposição de resíduos a partir do apresentado na Tab. 7, considerando 2020 como o ano inicial da deposição de resíduos e contando com um aumento gradativo calculado com base no aumento populacional dos últimos 10 anos analisados pelo IBGE. Os resultados do aumento gradativo de disposição de resíduos em função do aumento populacional são apresentados no Anexo A. Para os cálculos do potencial de produção de biogás, foi considerado um aterro sanitário com vida útil de vinte anos, e posteriormente ao seu fechamento, mais vinte anos de acompanhamento, conforme estabelecido pela PNRS (2010), totalizando quarenta anos de análise da produção de biogás no aterro sanitário. Todas as estimativas se basearam em modelos de primeira ordem, sendo eles: o modelo Scholl-Canyon, LandGEM e o modelo do IPCC. Exemplos de cálculos são mostrados no Anexo B e os resultados ao longo dos 40 anos de operação são apresentados no Anexo C.

Tabela 7 – Quantidade de RSU enviado para aterro sanitário em 2019 dos municípios estudados.

Município	População Estimada (habitantes) ¹	Quantidade Anual de RSU (t)
Capão da Canoa	53.049	17.392,88
Tramandaí	51.715	16.760,04
Osório	45.994	11.544,95
Santo Antônio da Patrulha	42.890	9.125,00
Torres	38.732	13.900,00
Imbé	22.800	11.428,65
Xangri-Lá	16.408	11.826,94
Cidreira	16.254	6.023,97
Balneário Pinhal	14.068	1.800,00
Mostardas	12.804	2.005,92
Total	314.714	103.117,80

Fonte: ¹Adaptado de IBGE, 2019.

Para a aplicação dos modelos matemáticos de estimativas de produção de biogás, levou-se em conta os valores de k e L_0 recomendados pelas respectivas bibliografias. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) o resíduo é classificado como moderadamente degradável. Além disso, de acordo com os dados coletados junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018), a região apresentou um alto índice pluviométrico com o total acumulado de chuvas na região correspondente ao litoral norte do Rio Grande do Sul de 2776,1 mm no ano de 2018, o que coloca a região no índice mais alto de precipitação anual. Dessa forma, fazendo todas as considerações, os valores da constante de decaimento (k) calculados e utilizados nos cálculos de cada modelo são apresentados na Tab. 8.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes k e L_0 para cada modelo estudado.

MODELO	VALOR UTILIZADO PARA k (ano ⁻¹)	VALOR UTILIZADO PARA L_0 (m ³ /t)
Scholl-Canyon	0,06	150
LandGEM	0,04	100
IPCC de Primeira Ordem	0,04	100

5.1 Modelo Scholl-Canyon (Modelo do Banco Mundial)

Aplicando o valor da taxa de decaimento da Tab. 8 para o modelo Scholl-Canyon na Eq. 1 tem-se:

$$Q_{CH_4} = 0,06 \cdot 150 \cdot mi \cdot e^{-0,06t}$$

Os resultados dessa equação ao longo de 40 anos são mostrados na Fig.1

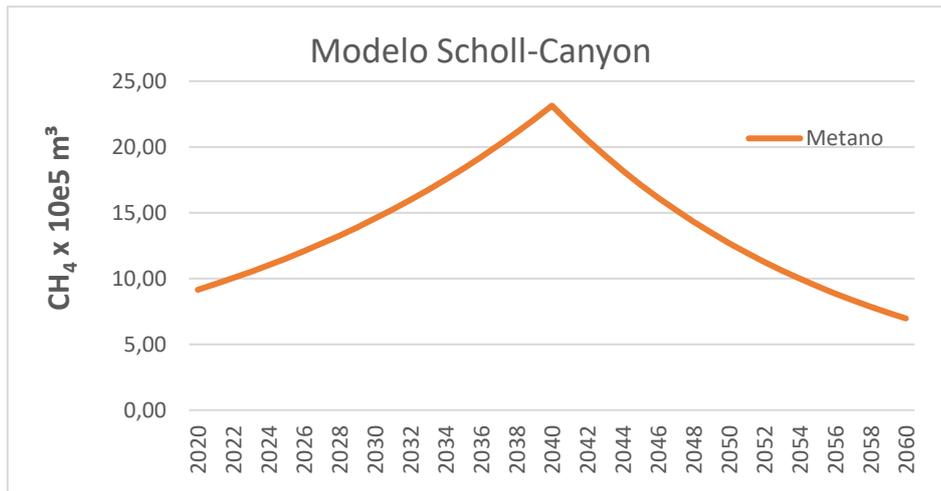


Figura 1 – Estimativa de produção de CH₄ pelo modelo Scholl-Canyon até o ano de 2060.

De acordo com a estimativa desse modelo, o valor máximo de produção de CH₄ ocorreria no ano de 2040, quando o aterro produziria 2.387.190,75 Nm³ de CH₄. Após seu fechamento, haveria um decaimento, chegando em um valor final no ano de 2060 de cerca de 719.068,04 Nm³ de CH₄, sendo que, ao longo dos 40 anos, o valor acumulado de produção de metano seria de 59.755.020,30 Nm³ de CH₄, o que corresponderia a uma média de 1.493.875,51 Nm³ de CH₄ por ano.

5.2 Modelo LandGEM

Aplicando os valores dos coeficientes da Tab. 8 na Eq. 2 tem-se:

$$Q_{CH_4} = 100 \cdot R \cdot (e^{-0,04c} - e^{-0,04t})$$

Os resultados dessa equação ao longo de 40 anos são mostrados na Fig.2

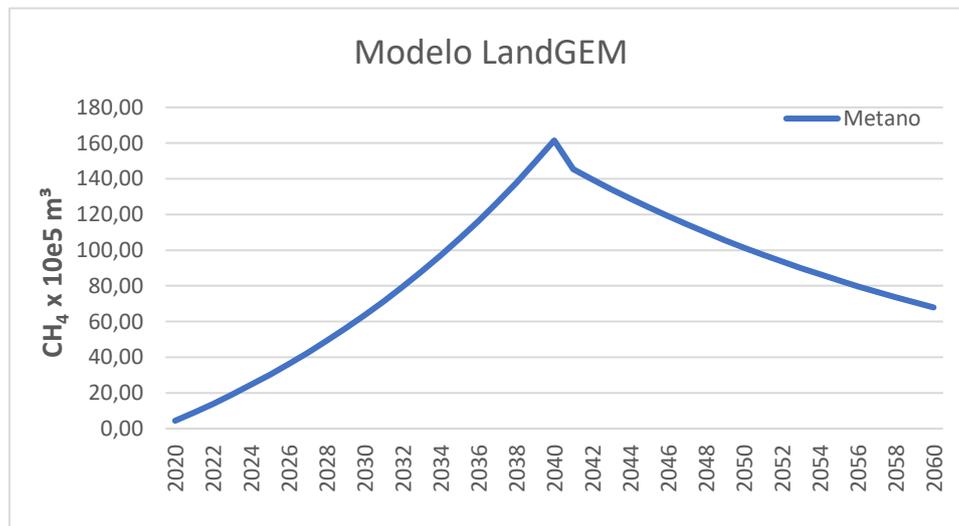


Figura 2 – Estimativa de produção de CH₄ pelo modelo LandGEM até o ano de 2060.

De acordo com a estimativa do Modelo LandGEM, o metano gerado no aterro chegaria em sua produção máxima em 2040, quando seria produzido 16.150.183,10 Nm³ de CH₄. Após seu fechamento, haveria um decaimento do metano, chegando em um valor final no ano de 2060 de cerca de 6.797.607,87 Nm³ de CH₄, sendo que, ao longo dos 40 anos, o valor acumulado de produção de metano seria de 352.504.405,04 Nm³ de CH₄, o que corresponderia a uma média de 8.812.610,13 Nm³ de CH₄ por ano, aproximadamente seis vezes maior que o modelo de Scholl-Canyon.

5.3 Modelo de Primeira Ordem do IPCC

Aplicando os valores dos coeficientes da Tab. 8 na Eq. 7 tem-se:

$$Q_{CH_4x} = 0,04 \cdot R_x \cdot 100 \cdot e^{-0,04(T-x)}$$

Os resultados dessa equação ao longo de 40 anos são mostrados na Fig.3

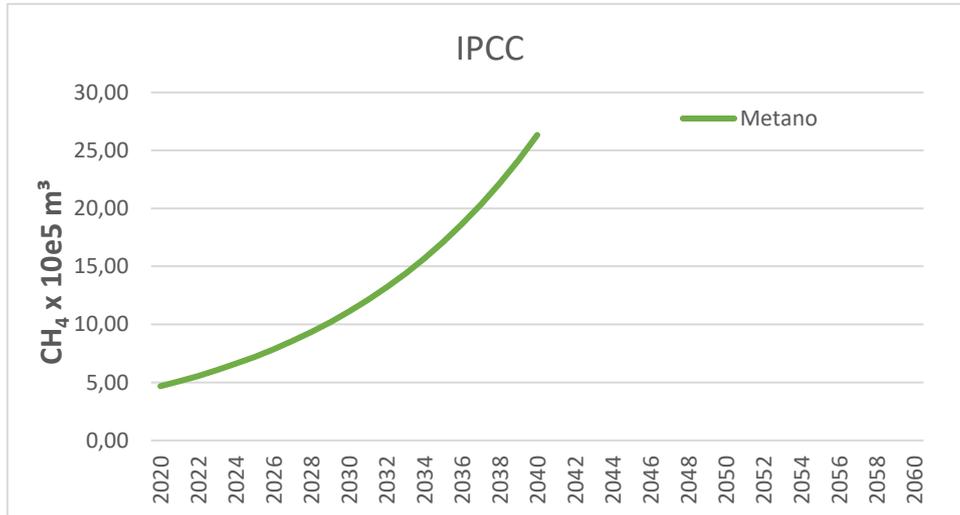


Figura 3 – Estimativa de produção CH₄ pelo modelo IPCC até o ano de 2060.

De acordo com a estimativa do Modelo IPCC o metano gerado no aterro chegaria em sua produção máxima em 2040, quando seria produzido 2.633.147,53 Nm³ de CH₄. Este modelo não contempla o decaimento do metano, dessa forma o valor acumulado de produção em 20 anos de funcionamento do aterro seria de 26.627.316,01 Nm³ de CH₄, o que corresponderia a uma média de 1.331.365,80 Nm³ de CH₄ por ano.

Na Fig. 4 é apresentado um gráfico comparativo dos 3 modelos estudados, demonstrando as diferenças entre eles.

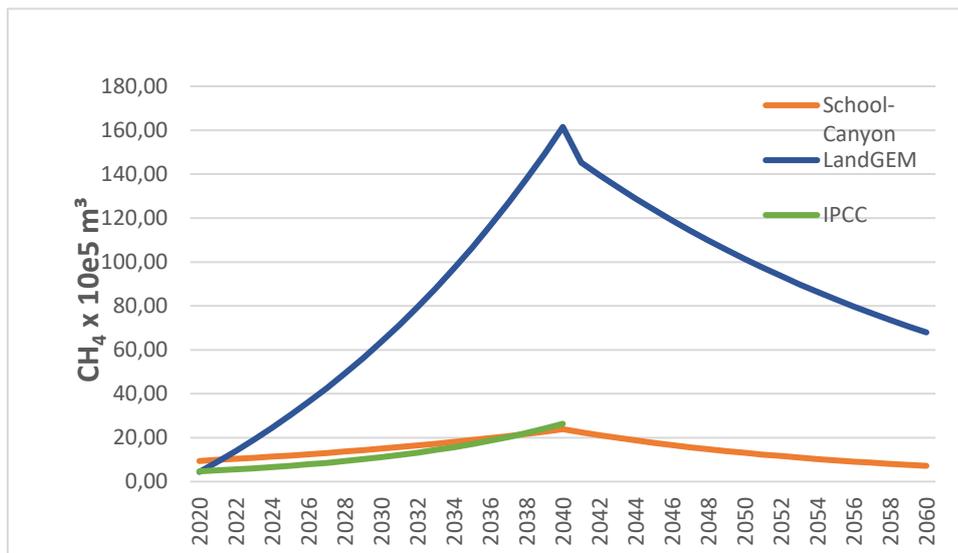


Figura 4 – Comparativo de produção de CH₄ entre os modelos estudados.

Os modelos estudados são baseados em equações exponenciais de primeira ordem, por isso as curvas seguem o mesmo padrão. No entanto, apenas dois destes modelos apresentam a curva decrescente que representa o decaimento do metano após o fechamento das operações no aterro sanitário. Na análise dos gráficos, percebe-se uma pequena diferença entre os valores encontrados pelos modelos Scholl-Canyon e IPCC, porém estes mantiveram valores aproximados de

produção de metano ao longo dos 20 anos de funcionamento do aterro. Quando comparados aos valores dos modelos Scholl-Canyon e IPCC aos valores obtidos de produção de metano pelo modelo LandGEM, observa-se uma grande diferença de produção ao longo dos anos. O modelo LandGEM chegou a apresentar valores 10 vezes maiores do que nos demais modelos em alguns dos anos. Esse resultado, apesar de parecer discrepante, mostrou-se coerente com as análises realizadas por BORBA (2007), que também calculou pelas três metodologias a produção de metano para o aterro de Nova Iguaçu no Rio de Janeiro.

Em seu estudo de 2010, Tarazona também utilizou esses três modelos para determinar estimativas da produção de CH_4 do aterro municipal de Duque de Caxias/RJ, juntamente com a utilização do software Moduelo 4.0, específico para estimativa de produção de biogás em aterros. No estudo de Tarazona, o modelo LandGEM resultou em valores muito maiores do que os encontrados pelos modelos do IPCC e Scholl-Canyon e os resultados do software Moduelo 4.0 foram menores do que dos 3 modelos analisados, porém, os valores obtidos pelo software Moduelo 4.0 se aproximaram aos valores do modelo Scholl-Canyon. (TARAZONA, 2010).

Conforme constatado por Pereira e Castilhos (2017), que utilizaram os mesmos modelos matemáticos aplicados nesse estudo ao aterro da cidade de Brusque/SC, mesmo que se utilize valores idênticos de k e L_0 para todos os modelos, ainda assim, os resultados do LandGEM sempre permanecem maiores que os demais. Os autores ressaltam ainda, que a escolha desses parâmetros deve ser feita com critério, observando as condições presentes no aterro sanitário a ser observado. Essa diferença entre os resultados também foi observada por Mendes e Sobrinho (2007), que destacam a falta do fator de decaimento no modelo do IPCC, o que dificulta sua comparação com os demais ao fim do tempo útil do aterro, e consideram a utilização do modelo Scholl-Canyon como a melhor alternativa devido a sua estimativa conservadora, o fato de demonstrar a cinética e o decaimento do biogás ao longo dos anos.

Da mesma forma, Necker e Rosa (2013) consideraram em seu estudo no município de Ji-paraná/RO, que o Método do Banco Mundial, foi o mais fiel a realidade do aterro, pois este método considera que a geração de metano cresce com o tempo de maturação e com o acúmulo de resíduos no aterro sanitário e estima também a geração de metano nos anos posteriores ao fechamento do aterro.

Silvestre et al (2015), apresentam a tentativa de calcular os parâmetros de k e L_0 com base em dados laboratoriais de análise dos resíduos do aterro de Brusque/SC. Os pesquisadores tinham o objetivo de obter parâmetros extremamente fiéis a realidade do local e assim calibrar o modelo, mas concluíram que a definição dos valores desses parâmetros a partir de ensaios laboratoriais precisa ser bem fundamentada e controlada, o que é dificultada pela heterogeneidade das amostras e falta de padronização nos testes.

É consenso entre os pesquisadores que a maior dificuldade para aplicação dos modelos de estimativa de produção de biogás é a calibração dos coeficientes para a realidade de cada aterro sanitário, pois muitas vezes os valores recomendados pela literatura dos próprios modelos não se aplicam a nossa condição de solo, clima, etc. Além disso, alguns modelos desenvolvidos especificamente para determinados aterros podem não ser aplicáveis à realidade de outros locais, é o que acontece com o modelo LandGEM, desenvolvido para aterros nos Estados Unidos, mas que não é devidamente aplicado a realidade brasileira. Modelos de maior precisão são igualmente mais complexos, e demandam uma série de informações específicas sobre a quantidade e composição dos resíduos, bem como de características geológicas, climáticas e topográficas da área do aterro sanitário. Na maioria dos casos esses dados não estão disponíveis ou não existem, ou ainda, são de posse de empresas que realizam a prestação de serviço de coleta e destinação para os municípios, e por questões de interesses econômicos, os dados não são divulgados.

Considerando os resultados desta pesquisa e analisando as discussões propostas em outros estudos na mesma área, verificou-se que a estimativa mais utilizada e difundida é a obtida a partir do modelo Scholl-Canyon, proposto pelo Banco Mundial (2004). O modelo consta em um manual para o aproveitamento energético de aterros sanitários na América Latina e no Caribe e, portanto, mostra-se mais adequado à nossa realidade e as necessidades interdisciplinares que um projeto de aterro sanitário exige.

5.4 Projeção de Geração de Energia

Considerando os resultados obtidos pelas estimativas de produção de biogás, pode-se estimar o potencial de geração de energia elétrica em uma instalação de aterro sanitário na região. Aplicando os valores encontrados pelo modelo Scholl-Canyon e levando em conta uma recuperação de 75% do biogás produzido, é possível estimar a captação ano a ano em Nm^3 de biogás. Lembrando que, segundo o Banco Mundial (2004), o biogás apresenta em sua composição 44% de CH_4 é possível calcular a produção anual de metano passível de queima em um motor de combustão interna ou uma microturbina.

De acordo com Okamura (2013), o poder calorífico do metano é de 50000 kJ/kg, e sua densidade é de 0,717 kg/m³, dessa forma podemos calcular o potencial de energia térmica em kJ/ano, a partir do total anual de metano gerado a partir da Eq. 10

$$P_{termica} = Q_{CH_4} \cdot 0,717 \cdot 50000 \quad (10)$$

Considerado uma eficiência de conversão de 33% para um motor de ciclo Otto, e 30% para uma microturbina, e 95% para o gerador acoplado, e aplicando o fator de conversão $2,78 \times 10^{-7} \text{ MWh/kJ}$ podemos calcular o potencial de geração de energia elétrica em MWh, pela Eq. 11 e Eq. 12 respectivamente

$$P_{eletrica} = P_{termica} \cdot 0,33 \cdot 0,95 \cdot 0.000278 \quad (11)$$

$$P_{eletrica} = P_{termica} \cdot 0,30 \cdot 0,95 \cdot 0.000278 \quad (12)$$

O potencial de energia elétrica que poderia ser instalada no aterro sanitário do litoral norte, aterro que receberia os resíduos dos dez municípios mais populosos segundo o IBGE (2019), calculado para cada ano de operação é demonstrado na Fig. 5 e no Anexo D.

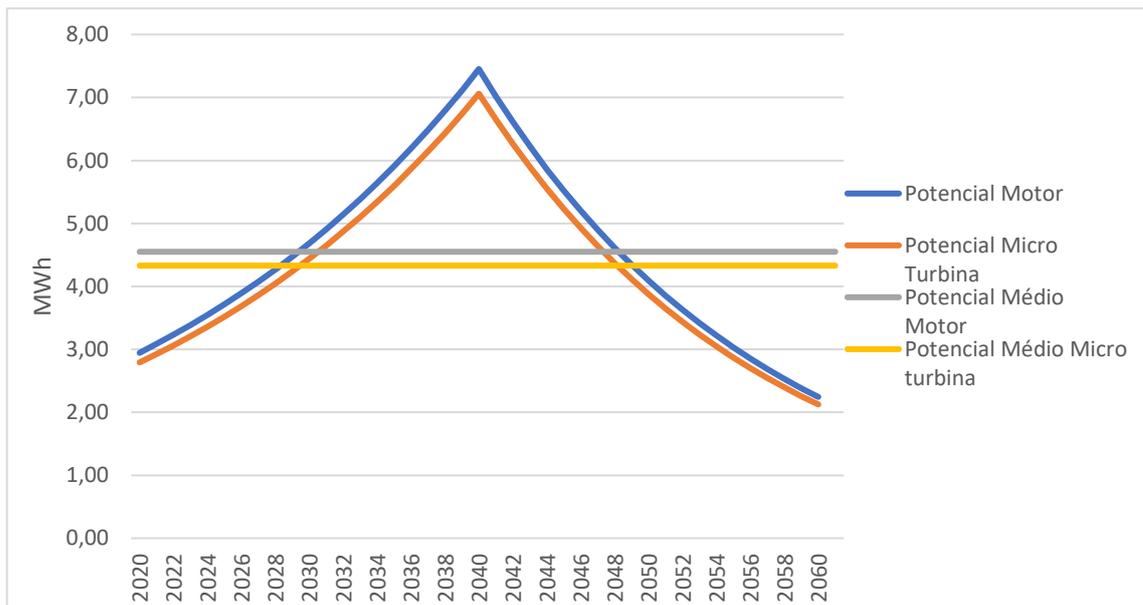


Figura 5 – Gráfico comparativo da energia elétrica estimada utilizando motor de combustão interna e microturbina a gás.

A partir da análise do gráfico da Fig. 5, pode-se estimar um potencial de geração de energia elétrica máxima em torno de 8 MWh, com uma média ao longo dos anos de 4,55 MWh, multiplicando-se pelo número de horas de um ano teríamos em torno de 40.000 MWh por ano, utilizando-se um motor de combustão interna de ciclo Otto para a conversão, enquanto que, utilizando uma microturbina a gás, o potencial de geração de energia elétrica máxima estimada seria de 7 MWh, a geração média ao longo dos anos de 4,33 MWh, o que geraria aproximadamente 38.000 MWh por ano. Comparando a produção de energia elétrica entre as duas formas de conversão apresentadas, podemos notar uma ligeira vantagem na casa dos 5% do motor de combustão sobre a micro turbina a gás. Ambas as tecnologias apresentadas, mostraram uma capacidade de produção de energia elétrica limpa a partir do biogás de aterro, considerando um consumo médio residencial de 154 kWh/mês (COREDE, 2015), seria capaz de atender aproximadamente 25 mil residências, ou aproximadamente 100 mil habitantes, o que representaria quase um terço da população dos 10 municípios pesquisados.

A escolha entre qual tecnologia de conversão melhor se aplicaria no contexto da região, dependerá de uma série de fatores técnicos, mas, principalmente econômicos. Visto que a produção final de energia é muito semelhante, cabe considerar as diferenças entre sua aplicabilidade, instalação, custo de operação e manutenção.

Nesse contexto, as micro turbinas a gás tem a vantagem de ser amplamente utilizadas nesse tipo de projeto, dessa forma já existem fabricantes disponibilizando equipamentos prontos para a instalação, porém seu custo de manutenção ainda é alto, principalmente devido aos efeitos da corrosão causada pelo biogás. Já os motores de combustão interna, apresentam uma vantagem nesse sentido, tendo uma manutenção fácil e relativamente barata, contando com peças e mão de obra acessíveis, por outro lado, ainda não existem fabricantes disponibilizando equipamentos de médio porte prontos para instalação, o que levaria a necessidade de adaptação de grupos geradores movidos a diesel ou gasolina para o seu funcionamento com biogás.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pela estimativa do modelo do Banco Mundial (Scholl-Canyon) foram mais conservadores em relação aos demais modelos utilizados nessa pesquisa. Dessa forma, considerou-se como mais adequado para a finalidade do trabalho, visto ser o modelo mais utilizado na América Latina, apresentar valores próximos ao modelo IPCC e mostrar a taxa de decaimento de produção de metano após o encerramento das atividades do aterro.

Os resultados da aplicação do modelo do Banco Mundial demonstraram uma capacidade de produção máxima de biogás de 2.387.190,75 Nm³ CH₄, no ano de 2040, quando o aterro seria encerrado, com uma produção acumulada em 40 anos de cerca de 59.755.020,30 Nm³ de CH₄, o que corresponderia a uma média de 1.493.875,51 Nm³/ano. A partir desses dados, pode-se estimar um potencial de geração de energia elétrica máxima em uma instalação no aterro, utilizando motor de combustão interna de ciclo Otto, em torno de 8 MWh, e um potencial médio ao longo dos anos de 4,55 MWh, com uma geração em torno de 40.000 MWh por ano, sendo suficiente para atender aproximadamente 100 mil habitantes da região com energia limpa e sustentável.

A coleta e análise do biogás gerado nos aterros sanitários em funcionamento na região, bem como o monitoramento da vazão total de biogás liberada nesses locais, são dados importantes para complementar o estudo do potencial de geração de energia a partir do gás de aterro. Espera-se que, em um futuro próximo, os gestores públicos da região pense em novas formas sustentáveis de destinar seus resíduos de maneira a diminuir a distância de deposição final e assim, diminuir a poluição ambiental pela liberação de milhares de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) que vão para a atmosfera devido ao transporte do RSU a longas distâncias.

A instalação de uma unidade geradora de energia em aterro sanitário para a utilização do gás, que atualmente vai para a atmosfera ou é queimado em *flares*, na geração de energia elétrica limpa e sustentável, é uma forma de economia de despesas, geração de empregos, lucro para a região e geração distribuída de energia, que traz benefícios sociais, ambientais e econômicos para o litoral norte gaúcho e corrobora com o desenvolvimento sustentável da região.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018-2019*. São Paulo: ABRELPE, 2018.
- Borba, S. M. P., Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- CDM. Clean Development Mechanism. United Nations, 2016. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/>. Acesso em: 03/05/2020.
- Çengel, Y. A. Thermodynamics and Heat Transfer. p. 83, 414–441, 2008.
- Coloma, E. J.; Prieto, E, G. Estudo de Viabilidade de Sistemas de Purificação e Aproveitamento de Biogás: Capítulo 6 Microturbinas. Espanha: PSE PROBIOGAS, 2010.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos de 2013. São Paulo, 2013.
- Companhia Rio Grandense De Valorização De Resíduos. Biotérmica Energia. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://biotermicaenergia.com/>. Acesso em 15/09/2020.
- Companhia Rio Grandense De Valorização De Resíduos. Central de Tratamento de Resíduos de Santa Maria. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-tratamento-de-residuos-de-santa-maria/>. Acesso em: 15/09/2020
- Companhia Rio Grandense De Valorização De Resíduos. Central de Tratamento de Resíduos de Minas do Leão. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://crvr.com.br/area-de-atuacao/central-de-residuos-do-recreio/>. Acesso em: 12/09/2020
- COREDE. Perfil Socio Econômico do Litoral Norte. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Secretaria de Planejamento. Porto Alegre, 2015.
- Dirkse, E. Biogas upgrading using the DMT TS-PWS. DMT Environmental Technology, 2007.
- Elk. A.G.H.P.V. Redução de emissões na Disposição Final. IBAM, 2007.

- EPA. United States Environmental Protection Agency. Background information document for updating AP42 section 2.4 for estimating emissions from municipal solid waste landfills. EPA, 2008.
- Estado Do Rio Grande Do Sul. Plano de Desenvolvimento Regional de Turismo. Planos de ação setorial da Secretaria Estadual de turismo. Porto Alegre, 2014.
- Hamilton, S. L. Microturbine Generator Handbook. PennWell Corporation, 2003.
- Heyhood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Columbus: McGraw-Hill, 1988.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico do Brasil de 2010. Brasília: IBGE, 2010.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Tabela de Projeção populacional dos Municípios 2019. Brasília, 2019.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Índice padronizado de precipitação. Brasília, 2018.
- IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. v. 2. IPCC, 1996.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: Relatório de pesquisa. Brasília, 2012.
- Mendes, L. G.; Sobrinho, P. M. Comparação entre métodos de estimativa de produção de biogás em aterro sanitário. Revista biociência. Taubaté-SP, v.13, n.3-4, p.134-142. 2007.
- Necker, H. S.; Rosa, A. D. Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas – UFSM. Santa Maria-RS, v. 17, p. 3416- 3424. 2013.
- Okamura, L. A. Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos. Tese de Mestrado. – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2013.
- Pereira, M. W.; Castilhos Jr., Armando B. Simulação da Geração de Biogás: Estudo de Caso Aterro de Brusque, SC. Revista Eletrônica do PRODEMA, Fortaleza-CE, v. 12, n. 3, p.30. 2017.
- PNRS - Plano Nacional De Resíduos Sólidos. Lei 12.305/2010. Ministério do Meio Ambiente, 2010.
- Salomon, K.R. Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2007.
- Silvestre, V.V.; Capanema, M. A.; Neves, L. V.; Belli Filho, P.; Castilhos Jr., A. B. de. Avaliação do potencial de geração de biogás de um aterro sanitário com vistas à produção de energia elétrica. Anais 6º Congresso Interamericano de la Asociación de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. San Salvador, 2015.
- Suzuki, A. B.; Fernandes, D. M.; Faria, R. A.; Vidal, T. C. Uso de biogás em motores de combustão interna. Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.
- Tarazona, C. F. Estimativa de produção de gás em aterros de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.
- Wyllen, V; Sonntag, E. Fundamentos de Termodinâmica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2014.
- World Bank. Handbook for the preparation of Landfill gas to Energy Projects to American Latin and Caribbean. The world Bank, 2004.
- Zicari, S. M. Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. Cornell University, New York, 2003.

COMPARATIVE STUDY BETWEEN QUANTITATIVE METHODS FOR THE PRODUCTION OF BIOGAS IN A LANDFILL IN THE NORTH COAST OF RIO GRANDE DO SUL - BRAZIL

Abstract. *The production of biogas from solid urban waste (MSW) has been widely studied and used as a renewable source of electricity generation, providing a reduction in methane (CH₄) emissions, as well as financial gains in several Brazilian cities. However, on the north coast of Rio Grande do Sul, urban waste is not seen as an opportunity for income and energy generation. This study presents technical and scientific subsidies that prove the feasibility of using landfill biogas as a fuel in the generation of electric energy, through the estimation of biogas production from urban solid waste in the region. To estimate the total amount of biogas produced, three mathematical models were applied, proposed by the World Bank, the United States Environmental Protection Agency (EPA) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Among the models analyzed, the model proposed by the World Bank indicated to be the most adequate to the reality of the region and presented an average production estimate of 1.5 million Nm³ CH₄/year. From this projection, by comparing the estimated electrical power based on methane generation, two viable options are suggested for the conversion to electrical energy, internal combustion engines and gas micro turbines. It is noted that there is a potential for the energy use of urban solid waste in this region, and that, after future studies that determine the flow and chemical characteristics of the biogas generated, it is possible to propose and design a facility in a landfill that serves the region, in a sustainable manner, generating energy and income for the municipalities of the north coast of Rio Grande do Sul.*

Key words: *Landfill, Biogas, Clean energy*

ANEXO A – Quantidade de RSU estimado ao longo dos anos de vida útil do aterro, levando em conta o crescimento populacional anual de 4,75%.

Ano	Quantidade de RSU produzida em toneladas
2019	103117,80
2020	112338,13
2021	117674,19
2022	123263,72
2023	129118,75
2024	135251,89
2025	141676,35
2026	148405,98
2027	155455,26
2028	162839,39
2029	170574,26
2030	178676,53
2031	187163,67
2032	196053,94
2033	205366,51
2034	215121,42
2035	225339,68
2036	236043,32
2037	247255,38
2038	259000,01
2039	271302,51
2040	284189,37

ANEXO B – Exemplos de cálculos para cada modelo estudado.

- Modelo Scholl-Canyon

$$Q_{CH_4} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt}$$

Onde:

Q_{CH_4} = Quantidade de metano produzido no ano “i” (m³/ano);

k = Taxa de geração de metano (ano⁻¹);

L_0 = Potencial de geração de metano em peso de lixo (m³/t);

m_i = Massa de resíduos depositados no ano “i” (t);

t = Tempo após o fechamento do aterro (anos);

Aplicando para o ano 2024 temos:

$$Q_{CH_4} = 0,06 \cdot 140 \cdot 135251,89 \cdot e^{-0,06 \cdot 0}$$

$$Q_{CH_4} = 1136115,84 \text{ m}^3$$

- Modelo LandGEM

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Onde:

Q_{CH_4} = Quantidade de metano produzido por ano (m³/ano);

L_0 = Potencial de geração de metano em peso de lixo (m³/t);

R = Quantidade anual de resíduo depositado no aterro (t);

k = Taxa de geração de metano (ano⁻¹);

c = Tempo desde o fim da operação do Aterro (ano);

t = Tempo desde o início da operação do Aterro (ano);

Aplicando para o ano 2024 temos:

$$Q_{CH_4} = 100 \cdot 135251,89 \cdot (e^{-0,04 \cdot 0} - e^{-0,04 \cdot 5})$$

$$Q_{CH_4} = 2451700,76 \text{ m}^3$$

- Modelo IPCC

$$Q_{CH4x} = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)}$$

Onde:

Q_{CH4x} = Quantidade de metano produzida no ano x (m³/ano);

k = Constante de geração de metano (ano⁻¹);

R_x = Quantidade de RSU depositado no aterro no ano x (t);

L_0 = Potencial de Geração de metano (m³/t);

T = Ano de realização do inventário (ano);

Aplicando para o ano 2024 temos:

$$Q_{CH42024} = 0,04 \cdot 135251,89 \cdot 100 \cdot e^{-0,04(2019-2024)}$$

$$Q_{CH42024} = 660788,11 \text{ m}^3$$

ANEXO C – Tabela de potencial de geração de metano ao longo dos anos por modelo estudado.

	SCHOLL-CANYON (Nm³/ano)	LANDGEM (Nm³/ano)	IPCC (Nm³/ano)
2020	943640,32	440484,12	467690,96
2021	988463,24	904722,20	509899,73
2022	1035415,24	1393860,75	555917,82
2023	1084597,46	1909100,85	606089,01
2024	1136115,84	2451700,76	660788,11
2025	1190081,35	3022978,60	720423,76
2026	1246610,21	3624315,26	785441,49
2027	1305824,20	4257157,30	856327,03
2028	1367850,84	4923020,15	933609,93
2029	1432823,76	5623491,32	1017867,56
2030	1500882,89	6360233,86	1109729,38
2031	1572174,83	7134989,93	1209881,66
2032	1646853,13	7949584,58	1319072,62
2033	1725078,65	8805929,65	1438117,98
2034	1807019,89	9706027,95	1567907,10
2035	1892853,33	10651977,52	1709409,60
2036	1982763,87	11645976,20	1863682,59
2037	2076945,15	12690326,35	2031878,62
2038	2175600,05	13787439,83	2215254,21
2039	2278941,05	14939843,19	2415179,32
2040	2.387.190,75	16.150.183,10	2.633.147,53
2041	2248171,58	14535163,26	
2042	2117248,26	13965231,36	
2043	1993949,32	13417646,80	
2044	1877830,75	12891533,35	
2045	1768474,40	12386049,10	
2046	1665486,47	11900385,16	
2047	1568496,09	11433764,39	
2048	1477153,99	10985440,07	
2049	1391131,24	10554694,81	
2050	1310118,06	10140839,30	
2051	1233822,72	9743211,31	
2052	1161970,48	9361174,53	
2053	1094302,59	8994117,62	
2054	1030575,37	8641453,23	
2055	970559,33	8302617,00	
2056	914038,35	7977066,73	
2057	860808,90	7664281,47	
2058	810679,30	7363760,70	
2059	763469,01	7075023,51	
2060	719008,04	6797607,87	
Total Acumulado	59.755.020,30	352.504.405,04	26.627.316,01

ANEXO D – Potencial de geração de energia elétrica ao longo dos anos.

ANO	MOTOR A CUMBUSTÃO INTERNA (MWh)	MICRO TURBINA A GAS (MWh)
2020	2,95	2,79
2021	3,09	2,92
2022	3,23	3,06
2023	3,39	3,21
2024	3,55	3,36
2025	3,72	3,52
2026	3,89	3,69
2027	4,08	3,86
2028	4,27	4,05
2029	4,47	4,24
2030	4,69	4,44
2031	4,91	4,65
2032	5,14	4,87
2033	5,39	5,10
2034	5,64	5,34
2035	5,91	5,60
2036	6,19	5,86
2037	6,48	6,14
2038	6,79	6,43
2039	7,11	6,74
2040	7,45	7,06
2041	7,02	6,65
2042	6,61	6,26
2043	6,23	5,90
2044	5,86	5,55
2045	5,52	5,23
2046	5,20	4,93
2047	4,90	4,64
2048	4,61	4,37
2049	4,34	4,11
2050	4,09	3,87
2051	3,85	3,65
2052	3,63	3,44
2053	3,42	3,24
2054	3,22	3,05
2055	3,03	2,87
2056	2,85	2,70
2057	2,69	2,55
2058	2,53	2,40
2059	2,38	2,26
2060	2,24	2,13
MÉDIA	4,55	4,33