

Biogás de resíduo sólido urbano como uma fonte de energia alternativa no litoral norte

Biogas from municipal solid waste as an alternative energy source on the north coast

Eduardo Benhur Rodrigues Cavalheiro¹
Gabriela Pereira da Silva Maciel²

Resumo

A produção do biogás, a partir dos resíduos sólidos urbanos (RSU), é uma fonte renovável de geração de energia que possibilita a redução de emissões de metano (CH_4) para a atmosfera, além de ganhos econômicos pelo fornecimento de energia. Este estudo apresenta o aproveitamento do biogás de aterro, como combustível na geração de energia elétrica, através da estimativa de produção de biogás, oriundo do RSU da região do litoral norte do Rio Grande do Sul. Para estimar a quantidade total de biogás produzida, o modelo matemático LandGEM foi aplicado. A previsão da potência e energia disponível, a partir do RSU de 10 (dez) municípios do litoral norte, em função da quantidade de metano gerada por ano, supera 3 MW de potência e 25 MWh/dia de energia, utilizando motor de combustão interna de ciclo Otto, com potencial médio ao longo dos anos de 15 MWh/dia e geração em torno de 5.000 MWh por ano, sendo suficiente para atender aproximadamente 15 mil habitantes da região com energia limpa e sustentável.

Palavras-chave: aterro sanitário; biogás; energia limpa.

Abstract

The production of biogas, from municipal solid waste (MSW), is a renewable source of energy generation, that makes possible to reduce methane (CH_4) emissions in the atmosphere, in addition to economic gains by providing energy. This study presents the use of landfill biogas, as fuel in the generation of electricity, through the estimation of biogas production from MSW in the region of the north coast of Rio Grande do Sul. To estimate the total amount of biogas produced, the LandGEM mathematical model was applied. The forecast of available power and energy, from the MSW of 10 (ten) municipalities on the north coast, depending on the amount of methane generated per year, exceeds 3 MW of power and 25 MWh/day of energy, using Otto cycle internal combustion engine, with an average potential over the years of 15 MWh/day and generation around 5,000 MWh per year, being enough to serve approximately 15 thousand inhabitants of the region with clean and sustainable energy.

Keywords: landfill; biogas; clean energy.

1 Engenheiro de Gestão de Energia e graduado no Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Tramandaí, RS, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8019-951X>. E-mail: edutdai@hotmail.com

2 Doutora em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS. Professora do curso de Engenharia de Gestão de Energia do Departamento Interdisciplinar do Campus Litoral Norte da UFRGS. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5253-4720>. E-mail: gabriela.pereira@ufrgs.br

Artigo recebido em 25.04.2022 e aceito em 24.08.2022.



1 Introdução

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são os resíduos originados das atividades domésticas em residências urbanas, restaurantes, cafés, refeitórios, mercados, entre outros e aqueles oriundos de limpeza urbana (varrição, limpeza de praças, vias públicas e outros serviços de limpeza urbana). Geralmente, esses materiais são classificados em: orgânicos – de origem animal e vegetal (restos de alimentos). Esses tipos de resíduos apresentam maior proporção de umidade e biodegradabilidade. Além disso, há os inorgânicos (metais, vidros, borrachas e plásticos) (ZHANG *et al.*, 2007; LEBERSORGER; SCHNEIDER, 2011). Os materiais mais comuns presentes nos RSU são: restos de alimentos, papéis, papelão, plásticos, borrachas, couro, isopor, embalagens metalizadas, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, vidros, metais, entulhos, resíduos de jardins, tecidos, madeiras, pilhas, baterias, lâmpadas, eletroeletrônicos, materiais volumosos e outros.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) foi adotada no dia 02 de agosto de 2010. Essa Lei torna o aterramento sanitário do lixo obrigatório, e o reaproveitamento dos resíduos sólidos é promovido, através da logística reversa. A logística reversa envolve todos os elos das cadeias de produção e consumo quanto à coleta e restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento no ciclo produtivo, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Os resíduos orgânicos são um dos grandes problemas de resíduos do mundo. Um estudo de 2019 (VERMA *et al.*, 2020) demonstra as alarmantes quantidades de alimentos que vão para os aterros todos os anos. Esses alimentos não só aumentam os aterros já lotados, mas também se misturam com outros itens que apodrecem nesses locais, produzindo gás metano que é prejudicial ao meio ambiente (MANFREDI; TONINI; CHRISTENSEN, 2010). No entanto, o gás metano, presente no biogás de aterro, pode ser usado para produzir energia na forma de calor e eletricidade (GHOSH *et al.*, 2019).

O biogás produzido, por digestão anaeróbia, é um recurso renovável e uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis como o gás natural. 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%) (CAVALHEIRO, 2020). O biogás pode ser oriundo de diferentes matérias-primas, como por exemplo, resíduos agrícolas, esterco, lixo orgânico, esgotos, entre outros materiais orgânicos (CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM, 2016). Dentro dessa esfera de matérias-primas para a obtenção do biogás, o uso dos resíduos sólidos urbanos (RSU) que são compostos, em média, de 45,3% de matéria orgânica, têm chamado a atenção dos pesquisadores. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020), a quantidade de RSU, gerado no Brasil, no ano de 2019, está em torno de 79 milhões de toneladas (cerca de 1 kg/hab/dia), e apenas 60 % desses resíduos recebe a destinação final adequada. Nos dias de hoje, após 10 (dez) anos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), existem lixões a céu aberto, aterros controlados sem queima de gás nos *flares*, ocasionando graves problemas ambientais (CAVALHEIRO, 2020).

O biogás, gerado a partir de resíduos, através da decomposição da matéria orgânica, pode ser utilizado para geração de energia limpa e renovável. Além disso, a utilização do biogás pode ser objeto de projetos que visem ter como recompensa financeira a comercialização de Créditos de Carbono, em mercados voluntários ou Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, conforme previsto no Protocolo de Quioto (CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM, 2016). A geração de energia elétrica, a partir do biogás de aterros sanitários é uma alternativa ambiental importante. Segundo Reichert (2019), cada tonelada de resíduo disposto possui potencial energético da ordem de 0,1 a 0,2 MWh. No estado do Rio Grande do Sul, cidades como: São Leopoldo, Santa Maria e Minas do Leão, possuem projetos relacionados ao aproveitamento do biogás de aterro para a geração de energia (COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS, 2017). Entretanto, para tornar essa prática viável economicamente, é necessário um bom entendimento da produção do biogás, das características químicas do gás produzido e, principalmente, das formas de estimar a produção de metano ao longo dos anos (CAVALHEIRO, 2020).

Nesse contexto, o presente estudo aplica o modelo matemático *LandFill Gas Emission Model* (LandGEM), para estimar a quantidade total de biogás a ser produzida pelos resíduos de 10 (dez) municípios do litoral norte que vão para aterros sanitários e mostrar o potencial de geração de energia elétrica sustentável na região.

2 Metodologia

2.1 Área do estudo

A pesquisa foi realizada na região do litoral norte do Rio Grande do Sul, ou aglomeração urbana do litoral norte, que 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, representados na figura 1.

Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas as quantidades de RSU destinadas para aterro

sanitário, no ano de 2019, dos dez municípios com maior população e maiores geradores de resíduo sólidos urbanos, sendo eles: Capão da Canoa, Tramandaí, Osório, Santo Antônio da Patrulha, Torres, Imbé, Xangri-lá, Cidreira, Balneário Pinhal e Mostardas. A população dos 10 (dez) municípios citados representa 80 % da população total do litoral norte e somam 314.714 habitantes. Os dados foram fornecidos pelas Secretarias de Meio Ambiente e Secretarias de Obras dos municípios estudados. A composição dos resíduos gerados pelos 10 (dez) municípios foi estimada, a partir do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) dos municípios que possuíam o plano.

Figura 1 – Aglomeração urbana do litoral norte do RS



Fonte: Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional (2011).

2.2 Potencial teórico de geração de energia

Para os cálculos do potencial de produção de biogás, foi considerado 20 anos de vida útil do aterro sanitário e mais vinte anos de acompanhamento,

após o encerramento do aterro, conforme estabelecido pela PNRS (BRASIL, 2010), o que totaliza quarenta anos de análise da produção de biogás. Existem vários modelos para determinar a produção de biogás

em aterros sanitários e a energia gerada pela combustão do metano que geralmente utilizam equações matemáticas. As metodologias de cálculo de geração de metano mais utilizadas são as apresentadas pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA), Banco Mundial e IPCC. No Brasil, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) criou o *software* Biogás que também utiliza equações cinéticas de primeira ordem e considera os mesmos parâmetros de entrada, como: massa de resíduos que ingressa ao aterro, tempo de atividade do aterro, ou após o fechamento, taxa de geração de metano (k) e potencial de geração de metano (L_0).

O potencial de geração de energia, a partir de gás de aterro, depende principalmente do volume capturado de metano gerado, por isso para esse estudo a produção anual de metano foi estimada, utilizando o *software* LandFill Gas Emission Model (LandGEM) versão 3.03 (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2020) para prever a geração de biogás, por considerar o sistema de disposição sem controle. O LandGEM, foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Esse modelo contabiliza as quantidades e variações de gases, durante a vida do aterro, sendo expressa pela equação cinética de primeira ordem, equação (1):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

onde:

$Q(CH_4)$ = Geração anual de metano (m^3/ano);

L_0 = Potencial de geração de metano em peso úmido (m^3/Mg);

k = Taxa de geração de metano (ano^{-1});

M = Massa de resíduo aceita no ano (Mg);

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

i = ano de vida do aterro;

j = incremento de 1/10 no cálculo.

Os parâmetros M e t do modelo LandGEM são determinados, a partir do conhecimento prévio dos dados do local. 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, condições importantes nos modelos de estimativas. O refinamento desses parâmetros depende da confiabilidade e disponibilidade de dados. Neste estudo, os valores utilizados para k (taxa de decaimento do RSU) foi de $0,04 \text{ ano}^{-1}$, valor recomendado para aterros com precipitação anual maior que 635 mm/ano , como apresentado na tabela 1 (CAVALHEIRO, 2020). De acordo, com os dados

coletados junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (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 $2776,1 \text{ mm}$ no ano de 2018, o que coloca a região no índice mais alto de precipitação anual. O potencial final médio de geração de metano (L_0) de $100 \text{ m}^3/Mg$ foi assumido, conforme recomendado pelo AP-42 da EPA dos EUA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008), pois se considerou o RSU como um substrato (BROUN; SATTLER, 2016), uma vez que os municípios mais populosos têm coleta seletiva e central de reciclagem. A fração de metano no biogás foi considerada 50% , como descrito pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (1996), United States Environmental Protection Agency (2008) e Aydi *et al.* (2015). A quantidade de resíduos depositadas no aterro foi atribuída, segundo os dados de 2019, fornecidos pelas prefeituras. A projeção da quantidade de resíduo disposta no aterro até o ano de 2040 foi baseada na projeção de geração de resíduos sólidos urbanos dos municípios com uma taxa média de crescimento populacional de 2% (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019).

Tabela 1 – Valores sugeridos para k

Precipitação anual no aterro	Valor recomendado de k (ano^{-1})
< 635 mm/ano	0,02
>635 mm/ano	0,04

Fonte: Cavalheiro (2020).

O potencial de geração de eletricidade de gás de aterro, para a geração de energia elétrica, depende da quantidade de metano capturado da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no aterro. Portanto, a potência elétrica disponível de geração de eletricidade foi determinada de acordo com a equação (2):

$$P_x = (Q_{CH_4} \cdot P_c \cdot E_c) / 31.536.000 \quad (2)$$

onde:

P_x = Potência disponível por ano ($kW \text{ ano}^{-1}$);

Q_{CH_4} = Vazão do CH_4 por ano ($m^3 \text{ ano}^{-1}$);

P_c = Poder calorífico do CH_4 por ano = $35,53 \times 10^3 \text{ kJ m}^{-3}$;
 $31.536.000$ = quantidade de segundos por ano ($s \text{ ano}^{-1}$);

E_c = Eficiência de coleta de gases (75%).

A metodologia do Intergovernmental Panel on Climate Change (1996) sugere o cálculo da energia elétrica disponível, conforme pode ser observado na equação (3):

$$E = P_x \cdot Rend \cdot \Delta t \quad (3)$$

onde:

E = Energia disponível por ano (kWh ano^{-1});
 P_x = Potência disponível por ano (kW ano^{-1});
 Δt = Tempo de operação durante um ano (8760 h);
 $Rend$ = Rendimento de motores (30%).

Dessa forma, em função da vazão de metano, pode-se realizar os cálculos da potência (MW) e da energia (MWh/dia) disponíveis nos municípios do litoral norte.

3 Resultados e discussões

Dentre os municípios participantes da pesquisa, apenas cinco deles possuíam Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos (PMGIRS), apesar de tais planos serem obrigatórios desde 2014 pela Lei 12.305 de 2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos). Alguns municípios do litoral norte ainda não possuem

o PMGIRS e outros estão com o plano desatualizado. Nos planos de alguns desses cinco municípios, constam as análises gravimétricas do RSU coletado, mostrando a composição dos resíduos gerados pelos municípios, fornecendo importantes dados para o embasamento dos cálculos de potencial de geração de biogás (CAVALHEIRO, 2020). Compilando os dados, chega-se no cenário para a região, apresentado na tabela 2. Analisando a figura 1, 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 45% da massa de resíduos que é coletada e disposta em aterros sanitários (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2020).

Tabela 2 – Composição do RSU do Brasil e litoral norte do RS

Tipo de resíduo	Quantidade percentual Brasil ¹	Quantidade percentual litoral norte ²
Orgânico	45,3	49
Plásticos	16,8	8
Vidros	2,7	1
Metais	2,3	1
Papel	10,4	7
Rejeito	14,1	34

Fonte: ¹ adaptado de Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020);
² adaptado de Capão da Canoa (2016), Imbé (2016), Tramandaí (2013) e Xangri-lá (2015).

A partir dos dados fornecidos pelas secretarias municipais de meio ambiente, ou obras dos 10 (dez) municípios estudados, foi possível quantificar o montante de RSU que foi encaminhado para aterro sanitário no ano de 2019. A estimativa do potencial de produção de biogás foi obtida com base na projeção de deposição de resíduos, a partir do apresentado na tabela 3, considerando 2019 como o ano inicial da deposição de resíduos e 2020 como o primeiro ano de geração, pois se adota como hipótese o período de um ano entre o depósito do resíduo no aterro e o início da geração de biogás. Além disso, contou-se com um aumento gradativo que foi calculado com base no aumento populacional dos últimos 10 (dez) anos, com uma taxa média de crescimento populacional de 2% segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). O prognóstico da população estimada é apresentado na figura 2.

Para análise do potencial energético do biogás gerado no aterro, calculou-se a vazão de metano (m^3/ano), a

partir de 2020, por considerar os dados fornecidos pelas secretarias municipais do ano de 2019 e a projeção para 20 anos de funcionamento do aterro. Os dados de potencial de geração de energia, taxa de geração de metano e a eficiência do motor de combustão são dados médios que podem ser modificados, dependendo das características dos RSU e da quantidade de metano gerada. Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019), a população dos 10 (dez) municípios somava 314.714 habitantes, e a quantidade de resíduo depositado, no ano de 2019 no aterro, foi de aproximadamente 103.118 toneladas, o que representa uma geração per capita de 0,90 kg/hab./dia.

Considerando que o total de resíduos enviados para aterro sanitário no ano de 2019 foi de 103.118 toneladas, das quais, 49 % é matéria orgânica; consequentemente, 50.528 toneladas de resíduo são geradoras de metano. Segundo a projeção populacional apresentada na figura 2, a população estimada do

litoral norte em 2040 é de aproximadamente 477 mil habitantes, com prognóstico de geração de 156.293,7 toneladas de RSU nesse ano, com vazões de biogás na faixa de 198.520 Nm³ CH₄/ano a 3.634.259 Nm³ CH₄/ano entre 2020 e 2040. Adotando-se a concentração de metano no biogás igual a 50% e considerando que 75% do biogás gerado será coletado, a potência disponível por ano pode ser estimada. A energia disponível pode ser calculada, a partir dessa

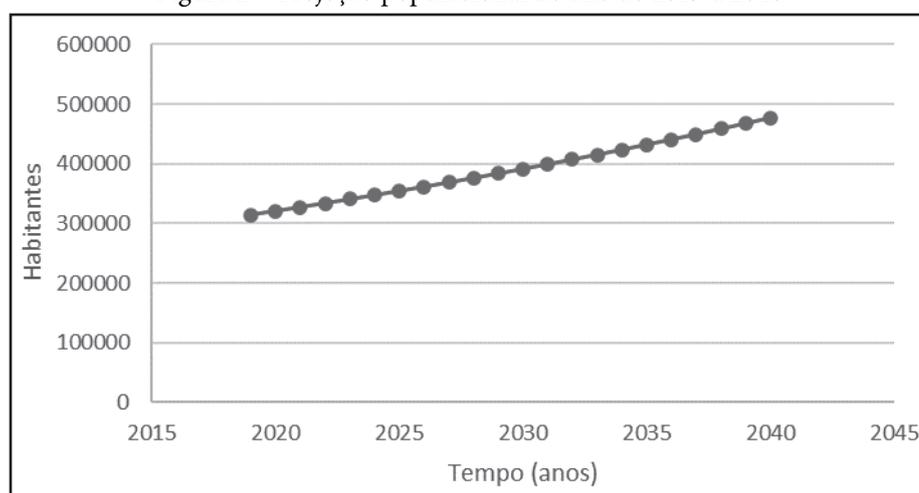
potência e, se consideramos a eficiência do motor de 30%, a faixa de energia será de 1,33 MWh/dia em 2020 a 24,3 MWh/dia no ano de 2040. A tabela 4 apresenta o prognóstico da vazão de metano anual, em função da quantidade de resíduos gerados pelos municípios e depositada no aterro, a partir de 2019, e a previsão da potência e energia disponível, a partir da quantidade de metano produzida no aterro até o ano de 2040.

Tabela 3 – Quantidade de RSU enviado para aterro sanitário em 2019 dos municípios estudados

Município	População estimada (habitantes) ¹	Quantidade de RSU em 2019 (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: Cavalheiro (2020).

Figura 2 – Projeção populacional do ano de 2019 a 2040



Fonte: O autor (2022).

A estimativa de emissões, utilizando o *software* LandGEM resulta em dados das emissões para os principais gases gerados pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos, dos quais o metano é o que

tem o poder calorífico necessário para a combustão e geração de energia. Os resultados demonstraram uma capacidade de produção máxima de 3.792.647,14 Nm³ CH₄, no ano de 2041, primeiro ano após a desativação

do aterro, com uma produção acumulada em 40 anos de cerca de 94.750.951,77 Nm³ de CH₄, o que corresponderia a uma média de 1.579.182,53 Nm³/ano de CH₄. Pode-se observar o aumento anual das emissões no aterro sanitário, com os valores máximos dos

gases registrados no ano de 2041, com decaimento da emissão de biogás, após a desativação do aterro. Esse cenário possui comportamento similar ao retratado por outros pesquisadores (FERNANDES *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2019; PIÑAS *et al.*, 2016).

Tabela 4 – Previsão da potência e energia disponível em aterro, em função da quantidade de metano gerada por ano

Ano	Quantidade de resíduo (t/ano)	Quantidade de resíduo orgânico (t/ano)	Vazão de metano (Nm ₃ CH ₄ /ano)	Vazão de metano (Nm ₃ CH ₄ /dia)	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh/dia)
2019	103.117,8	50.527,7	-	-	-	
2020	105.181,2	51.538,6	198.520	543,9	0,17	1,33
2021	107.284,8	52.569,3	393.226	1.077,3	0,33	2,63
2022	109.430,5	53.620,7	584.347	1.600,9	0,49	3,91
2023	111.619,1	54.693,1	772.105	2.151,3	0,65	5,17
2024	113.851,5	55.787	956.714	2.621,1	0,80	6,40
2025	116.128,5	56.902,7	1.138.383	3.118,8	0,96	7,62
2026	118.451,1	58.040,8	1.317.311	3.609,1	1,11	8,81
2027	120.820,1	59.201,6	1.493.696	4.092,3	1,26	10,0
2028	123.236,5	60.385,6	1.667.726	4.596,1	1,41	11,2
2029	125.701,2	64.593,3	1.839.581	5.039,9	1,55	12,3
2030	128.215,3	62.825,2	2.009.445	5.504,3	1,70	13,4
2031	130.779,6	64.081,7	2.177.487	5.965,7	1,84	14,6
2032	133.395,2	65.363,4	2.343.878	6.421,6	1,98	15,7
2033	136.063,1	66.670,6	2.508.779	6.873,4	2,12	16,8
2034	138.784,3	68.004,0	2.672.351	7.321,5	2,26	17,9
2035	141.560,0	69.364,1	2.834.748	7.766,4	2,39	19,0
2036	144.391,2	70.751,4	2.996.121	8.208,5	2,53	20,0
2037	147.279,0	72.166,4	3.156.617	8.648,3	2,67	21,1
2038	150.224,6	73.609,7	3.316.379	9.086,0	2,80	22,2
2039	153.229,1	75.081,9	3.475.547	9.522,0	2,94	23,2
2040	156.293,7	76.583,6	3.634.259	9.956,9	3,07	24,3

Fonte: O autor (2022).

De acordo com a figura 3, nota-se que o ano de 2041 é o ano de maior potencial de geração de energia com 25,3 MWh/dia, o que está de acordo com o valor encontrado por Fernandes *et al.* (2022) que relata a geração de 24,86 MWh/dia, para uma população de 342.095 habitantes, em seu estudo para a cidade de Cascavel, no Paraná. Nota-se que, mesmo após os 20 anos de vida útil do aterro ou fechamento da célula, há geração de energia em menor quantidade por mais

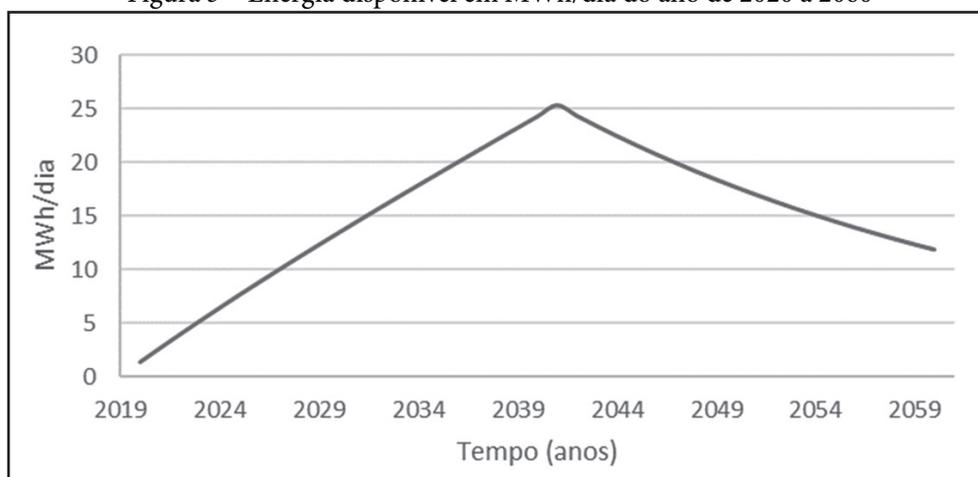
20 anos, pois não será mais incorporada matéria orgânica ao aterro sanitário, mas a decomposição dos resíduos e geração de biogás não cessam com a desativação do aterro, o que também foi observado por Piñas *et al.* (2016) para um aterro sanitário da cidade de Três Corações, Minas Gerais, no qual utilizou os modelos LandGEM e Biogás. Alguns pesquisadores relatam que os modelos LandGEM e Biogás levam a resultados similares, sem diferenças significativas,

por se tratar de dois modelos lineares (SOUZA *et al.*, 2019; PIÑAS *et al.*, 2016).

A escolha da tecnologia para a geração de eletricidade, com base no biogás, depende do porte do aterro, bem como das características econômicas do

projeto. Atualmente, no mercado existem três tecnologias principais: motores de combustão interna, turbinas a gás e microturbinas. Cada tecnologia tem as suas especificidades, com vantagens e desvantagens de utilização.

Figura 3 – Energia disponível em MWh/dia do ano de 2020 a 2060



Fonte: O autor (2022).

A partir da análise do gráfico da figura 3, pode-se estimar um potencial de geração de energia elétrica máxima em torno de 25 MWh/dia, com uma média ao longo dos anos de 15 MWh/dia o que corresponde a mais de 5 GWh por ano. Considerando um consumo médio residencial de 154 kWh/mês (RIO GRANDE DO SUL, 2015), seria possível atender aproximadamente 3 mil residências ou, aproximadamente 15 mil habitantes, com energia limpa e renovável.

Entretanto, uma alternativa aos aterros sanitários para a geração de energia a partir do biogás, é a utilização de biodigestores de RSU que são processos facilmente controlados, que conseguem garantir um fluxo maior e mais estável de biogás em comparação com aterros e, portanto, são considerados tecnologias mais eficientes. Os biodigestores de RSU podem gerar em um período de 18 dias o equivalente à metade do que seria gerado, por uma mesma quantidade de resíduo, em um aterro sanitário, ao longo de 80 anos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014).

Apesar das inúmeras vantagens relacionadas à utilização dos biodigestores de RSU, em comparação com os aterros sanitários, como por exemplo: não são necessárias grandes áreas para construção; não ocorrem vazamentos de gases com frequência; o biogás gerado é facilmente coletado; não ocorre a proliferação de animais e insetos transmissores de doença e maior controle do processo, os biodigestores de RSU

precisam enfrentar algumas barreiras como: consolidação da tecnologia; custos de investimentos; custos de operação e a carência de recursos humanos especializado. Mas, mesmo com essas barreiras a serem superadas, os biodigestores, juntamente com as rotas termoquímicas, são considerados o futuro para o tratamento do RSU no Brasil. Estima-se que em breve a construção de novos aterros sanitários, próximo aos grandes centros populacionais, seja proibida no País com conseqüente motivação para a busca de novas tecnologias para tratamento de resíduos e geração de energia próxima aos centros de carga.

4 Conclusões

Os resíduos sólidos urbanos são um dos recursos de energia renovável que pode ser usado na produção de energia, calor, combustível e eletricidade. O RSU é a matéria-prima mais econômica e ecológica em comparação com outras fontes de energia renováveis, mas acaba sendo enterrado, desperdiçando todo o seu potencial energético e causando danos ambientais. O aproveitamento do biogás de aterro pode ocorrer para diversos fins, por isso é importante que os gestores públicos considerem o potencial e as limitações do seu uso como fonte de energia.

A instalação de uma unidade geradora de energia em aterro sanitário ou biodigestores, para a utilização do gás que atualmente vai para a atmosfera ou é

queimado em *flares*. Porém, na geração de energia elétrica limpa e sustentável, é uma forma de geração distribuída de energia, economia de despesas, geração de empregos e lucros para a região, o que traz benefícios sociais, ambientais e econômicos para o litoral norte gaúcho e colabora com o desenvolvimento sustentável dos municípios.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2019-2020**. São Paulo, 2020.

AYDI, A. *et al.* Assessing the potential for electricity generation and the feasibility of collecting gas from fugitive emissions in a landfill in Tunisia. **Energy Strategy Reviews**, v. 8, p. 8-14, 2015. DOI: 10.1016/j.esr.2015.06.002.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, n. 147, p. 3-6, 3 de ago. 2012.

BROUN, R.; SATTLER, M. A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional landfills and bioreactor. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2664-2673, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.010.

CAPÃO DA CANOA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. 2016. Disponível em: <http://www.capaodacanoa.rs.gov.br/site/noticia/visualizar/idDep/58/id/3268/?PLANO-MUNICIPAL-DE-SANEAMENTO-BASICO.html>. Acesso: 20 jun. 2021.

CAVALHEIRO, E. B. R. **Estudo comparativo entre métodos quantitativos para a produção de biogás em aterro sanitário no Litoral Norte gaúcho**. 2020. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Gestão de Energia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. 2016. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/>. Acesso em: 13 jun. 2021.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS. **Central de tratamento de resíduos de Santa Maria**. 2017. Disponível em: <http://crvr.com.br/area-de-atuacao/>

central-de-tratamento-de-residuos-de-santa-maria/. Acesso em: 30 set. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Economicidade e competitividade no aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2014. 40 p. (Série Recursos, Nota Técnica DEA 16/14).

FERNANDES, G. *et al.* Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 67-77, 2022. DOI: 10.1590/S1413-415220200210.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO E REGIONAL. **Aglomeração urbana do Litoral Norte**. 2011. Disponível em: <http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/default.asp>. Acesso em: 13 jun. 2021.

GHOSH, P. *et al.* Assessment of methane emissions and energy recovery potential from the municipal solid waste landfills of Delhi, India. **Bioresource Technology**, v. 272, p. 611-615, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.10.069.

IMBÉ. Prefeitura Municipal. **Lei nº 1758, de 08 de junho de 2016**. Aprova o Plano Municipal de Saneamento Básico. 2016. Disponível em: https://www.imbe.rs.gov.br/download_anexo/lei%201.758%20-%202016-%20APROVA%20O%20PLANO%20MUNICIPAL%20DE%20SANEAMENTO%20BASICO.pdf. Acesso em: 21 jun. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela de projeção populacional dos municípios 2019**. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/> Acesso em: 15 abr. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Índice padronizado de precipitação**. Brasília, 2018.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: workbook**. Geneva, 1996.

LEBERSORGER, S.; SCHNEIDER, F. Discussion on the methodology for determining food waste in household waste composition studies. **Waste Management**, v. 31, n. 9-10, p. 1924-1933, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.023.

- MANFREDI, S.; TONINI, D.; CHRISTENSEN, T. H. Contribution of individual waste fractions to the environmental impacts from landfilling of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 30, n. 3, p. 433-440, 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.017.
- PIÑAS, J. *et al.* Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 33, n. 1 p. 175-188, 2016. DOI : 10.20947/S0102-309820160009.
- REICHERT, G. A. **Tecnologias e rotas tecnológicas para RSU**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento. **Perfil socioeconômico do Litoral Norte**. Porto Alegre: COREDE, 2015.
- SOUZA, A. *et al.* Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019. DOI: 10.1590/s1413-41522019187066.
- TRAMANDAÍ. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Gerenciamento de Resíduos Sólidos do Município de Tramandaí – P.M.G.R.S.** Tramandaí, 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Background information document for updating AP-42 section 2.4 for estimating emissions from municipal Solid waste landfills**. Washington, DC, 2008.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide**. 2020. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso: 15 jun. 2021.
- VERMA, M. V. D. B. *et al.* Consumers discard a lot more food than widely believed: estimates of global food waste using an energy gap approach and affluence elasticity of food waste. **PloS One**, v. 15, n. 2, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0228369.
- ZHANG, R. *et al.* Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 4, p. 929-935, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.02.039.
- XANGRI-LÁ. Prefeitura Municipal. **Lei nº 1791, de 09 de setembro de 2015**. Institui o Plano de Saneamento Básico do município de Xangri-lá. 2015. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/rs/x/xangri-la/lei-ordinaria/2015/179/1791/lei-ordinaria-n-1791-2015-institui-o-plano-de-saneamento-basico-do-municipio-de-xangri-la-e-da-outras-providencias?r=p>. Acesso em: 21 jun. 2021.