

Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população

Power generation using landfill biogas in Brazil: a study of energy potential and economic viability in terms of the population

Giovanna Loiola Fernandes¹ , Ivan Felipe Silva Santos^{1*} , Hellen Luisa Castro e Silva¹ , Regina Mambeli Barros¹ 

RESUMO

A busca por energias alternativas que sejam renováveis está cada vez maior, assim como a preocupação com o crescente aumento da geração de resíduos pela população mundial. O aproveitamento energético do gás gerado pela decomposição dos resíduos sólidos é um caminho atrativo para a solução, de uma só vez, desses dois problemas. Com objetivo de contribuir para o desenvolvimento da geração de energia elétrica a partir de aterros sanitários no Brasil, o presente trabalho compreende uma análise de potencial energético e de viabilidade financeira dessa alternativa energética no Brasil. Para a construção das análises, utilizaram-se dados de geração de resíduos e climáticos de seis cidades brasileiras, o que permitiu a estimativa da vazão de produção de gás nos aterros de cada uma dessas localidades, a potência ótima a ser instalada em cada um desses aterros e da viabilidade econômica dessa alternativa. Os valores de custo de geração obtidos variaram entre R\$ 345 e 440 MWh, sendo fortemente influenciados por fatores como população, captação de resíduos e aspectos climáticos, sendo, em geral, superiores aos valores típicos de tarifa de venda de energia no país. Isso implica uma necessidade de formulação de políticas públicas de incentivo à geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Palavras-chave: resíduos sólidos; biogás; aproveitamento energético; viabilidade econômica.

ABSTRACT

The search for alternative and renewable sources of energies is growing, as is the concern with the growing increase in the generation of waste by the world population. The energy use of the gas generated by the decomposition of solid waste at landfills is an attractive way to solve these two problems, at once. In order to contribute to the development of electric power generation from landfills in Brazil, the present work comprises an analysis of the energy potential and financial viability of this energy alternative in the country. For the construction of the analyses, waste and climate generation data from six Brazilian cities were used, which allowed the estimation of the gas production flow in the landfills of each city, the optimum power to be installed in each of these landfills and the economic viability of this alternative. The generation cost values obtained ranged between R\$ 345 and 440 MWh, being strongly influenced by factors such as population, waste capitation and climatic factors, being, in general, higher than the typical values of energy sales tariff in the country. This implies a need to formulate public policies to encourage the generation of energy from solid urban waste in Brazil.

Keywords: solid waste; biogas; energy use; economic viability.

¹Universidade Federal de Itajubá – Itajubá (MG), Brasil.

*Autor correspondente: ivanfelipedeice@hotmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 08/06/2020 – Aceito: 06/03/2021 – Reg. ABES: 20200210

INTRODUÇÃO

Pesquisas e aplicações de formas de geração de energias alternativas e renováveis vêm ganhando destaque com a crescente preocupação sobre impactos ambientais de combustíveis fósseis, que, além de serem derivados de materiais não renováveis, contribuem para a poluição do ar e o aquecimento global. Outra grande preocupação atual, adicional ao uso de combustíveis fósseis, é a geração de resíduos sólidos, cada vez mais crescente e, muitas vezes, sem destinação correta. No Brasil, cada habitante produz mais de 1 kg de resíduo sólido por dia, resultando em elevado volume: em 2018, foram mais de 78 ton (ABRELPE, 2019).

Da destinação de resíduos sólidos urbanos a aterros sanitários resulta a produção de gás de aterro. Os resíduos depositados nos aterros sanitários passam por um processo de digestão anaeróbia, em que diversos grupos de microrganismos trabalham na conversão da matéria orgânica complexa em uma mistura de gases (denominado biogás) composta por metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), água (H_2O), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), além de novas células bacterianas (Chernicharo, 2005).

Como o biogás é um combustível renovável com diversas aplicações para fins energéticos, ele pode auxiliar na resolução de ambos os problemas acima citados. Segundo Li *et al.* (2015), o gás dos aterros pode ser utilizado para muitas finalidades (em função do nível de tratamento aplicado a ele), como: uso direto, geração de eletricidade, geração combinada de calor e eletricidade, além de abastecimento veicular.

Em 2015, 58,7% dos resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil eram enviados para aterros sanitários (ABRELPE, 2015). Como o Brasil tem se esforçado para eliminar o uso de lixões pelo programa Brasil sem Lixões, estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), o índice de disposição de resíduos em aterros sanitários tem aumentado e tende a aumentar ainda mais, visto que constituem a opção mais barata em face das demais. Os custos de operação dos aterros em países de renda média estão entre US\$ 15 e 65.ton (Agamuthu, 2013; Hoornweg *et al.*, 2012), e o aumento do índice de utilização de aterros resulta em maior potencial de geração de energia a partir de resíduos urbanos no Brasil. Santos *et al.* (2018b) estimaram um potencial de geração de eletricidade a partir de biogás de aterros sanitários no país que pode atingir até 1,7 GW.

Nesse sentido, este trabalho apresenta uma análise do aproveitamento energético e da viabilidade econômica da utilização de biogás produzido em aterros sanitários de diversas cidades brasileiras, considerando-se os métodos de otimização de potência, a fim de verificar a sua viabilidade financeira para diferentes faixas de população no Brasil. Trabalhos de análise de potencial energético e viabilidade financeira auxiliam a ampliar o conhecimento de determinada fonte de energia, fornecendo dados úteis para pesquisas futuras, para o planejamento energético nacional e regional, bem como para tomadas de decisão, colaborando para maior difusão dessa forma de geração e para maior aproveitamento do potencial energético de biogás no Brasil.

METODOLOGIA

Projeção populacional e produção de resíduos

Os municípios escolhidos para desenvolvimento do estudo foram: Vigia (PA), Ariquemes (RO), Dourados (MS), Cascavel (PR), Jundiaí (SP) e Niterói (RJ), selecionados devido ao fato de representarem diferentes regiões do país e

diferentes valores de população (a cidade de Vigia, por exemplo, tem cerca de 50 mil habitantes, enquanto Niterói se aproxima dos 500 mil) e produção de resíduos. Três modelos de crescimento de população foram utilizados para os cálculos do presente trabalho:

- linear (ou aritmético): que considera que o comportamento da população em função do tempo segue uma tendência linear, sendo o crescimento da população constante a cada ano (Equações 1 e 2);
- logístico: que considera que o crescimento populacional é decrescente e se estabiliza atingindo uma população de saturação (Equações 3 a 6); e
- modelo com taxa de crescimento populacional constante: que considera que a taxa de crescimento populacional (e não o valor absoluto do crescimento da população – como é o caso do modelo linear) é constante a cada ano (Equação 7) (Qasin, 1999; Sha'Ata *et al.*, 2007).

Modelo linear

$$P_{tlin} = K_a(t - t_2) \quad (1)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Modelo logístico

$$P_s = \frac{2P_0 \times P_1 \times P_2 - (P_1)^2 \times (P_0 + P_2)}{P_0 \times P_2 - (P_1)^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln \left[\frac{P_0 \times (P_s - P_1)}{P_1 \times (P_s - P_0)} \right] \quad (5)$$

$$P_{tlog} = \frac{P_s}{1 + C \times e^{K_1(t-t_0)}} \quad (6)$$

Modelo com taxa de crescimento populacional constante

$$P_{trc} = P_0(1+r)^t \quad (7)$$

Em que:

t_0 , t_1 e t_2 = 1991, 2000 e 2010;

P_0 , P_1 e P_2 = dados de população histórica relativos aos anos de 1991, 2000 e 2010, obtidos por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020);

K_a = constante de proporcionalidade do método linear;

P_s = população de saturação;

C = constante do modelo;

K_1 = coeficiente de crescimento logístico;

t = ano atual;

r = taxa de crescimento percentual média da cidade;

P_{tlin} = população estimada pelo modelo linear no ano t ;

P_{tlog} = população estimada pelo modelo logístico no ano t ;

P_{trc} = população estimada pelo modelo com taxa de crescimento constante no ano t .

Os dados históricos de 1991, 2000 e 2010, provenientes do IBGE, foram utilizados para cálculo da taxa de crescimento populacional entre os anos de 1991 e 2000 e de 2000 e 2010. Nas cidades cujo crescimento populacional se aproximava de uma constante, aplicou-se o modelo de projeção populacional linear. Nas cidades em que o crescimento populacional era decrescente, aplicou-se o

modelo logístico. Por fim, para as cidades que apresentavam elevação na taxa de crescimento populacional, utilizou-se o modelo de taxa de crescimento constante, sendo considerado o crescimento verificado entre os anos 2000 e 2010. Uma das cidades (Ariquemes, RO) apresentou forte decrescimento entre 1991 e 2000, e expressivo crescimento populacional entre 2000 e 2010, cidade para a qual adotou-se a projeção linear para modelar a projeção populacional. A Tabela 1 apresenta os dados de população, captação de resíduos e climáticos (temperatura média e precipitação média anual), bem como informa os modelos de projeção populacional adotados em cada uma das cidades estudadas.

Posteriormente, a captação de resíduos, em kg.hab.dia, calculada a partir dos dados de produção de resíduos mostrados na Tabela 2 e acrescida de 0,5% no valor para cada ano posterior (conforme sugerido por BARROS, 2012; PIN *et al.*, 2018), foi utilizada para estimativa da geração total de resíduos por ano, conforme a Equação 8.

$$R_t = \frac{365 \times (I_{ger_t} \times P_t)}{1000} \quad (8)$$

Na qual:

R_t = geração de resíduos no ano t em ton;

P_t = população no ano t em habitantes;

I_{ger_t} = captação de resíduos no ano t em kg.hab.dia.

Estimativa do aproveitamento energético

Na segunda parte do estudo utilizaram-se os dados de geração de resíduos com o auxílio do software LandGem® (USEPA, 2005), que, por meio da Equação 6, estimou, para um período de 20 anos, a produção de biogás de determinado aterro para cada um dos municípios. O modelo é utilizado com base em uma equação de primeira ordem, como mostrado na Equação 9, e tem sido utilizado por diversos autores (SOUZA *et al.*, 2019). Dois parâmetros importantes são utilizados na modelagem: a constante da taxa de produção de metano (k) e o potencial de produção de metano (L_0) (FALLAHIZADEH *et al.*, 2019).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (9)$$

Em que:

Q_{CH_4} = geração anual de CH₄ por ano em m³.ano;

i = incremento de tempo de 1 ano;

n = ano do cálculo – ano inicial de aceitação de resíduos;

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de decaimento da geração de metano em 1/ano;

L_0 = potencial de geração de CH₄ em m³/ton;

M_i = massa de resíduos aceita no i-ésimo ano em ton;

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

A determinação dos valores de k é um tema debatido em muitos trabalhos e diversas estimativas e tabelas para determinação desse parâmetro são apresentadas na literatura. Dentre os fatores de influência nos valores de k estão os climáticos, como temperatura e precipitação, e aqueles relacionados com as características dos resíduos, como composição gravimétrica (BANCO MUNDIAL, 2004; Karanjekar *et al.*, 2015; Krause *et al.*, 2016; PLOCOSTE *et al.*, 2016). Contudo, Krause *et al.* (2016) pontuam que os efeitos da composição dos resíduos sobre os valores de k ainda não são totalmente conhecidos. Por essa razão, no presente trabalho, utilizou-se uma estimativa de k que é função somente da precipitação (P em mm·ano – valores apresentados na Tabela 1), conforme apresentada e utilizada por Plocoste *et al.* (2016) para áreas tropicais (Equação 10). Devido à indisponibilidade de dados de composição gravimétrica dos resíduos nas cidades estudadas, que permitiriam uma determinação mais acurada do parâmetro L_0 , optou-se por utilizar o valor médio de 170 m³/ton, conforme sugerido por Banco Mundial (2004) e USEPA (2005).

$$k = 3,2 \times 10^{-5} \times P + 0,01 \quad (10)$$

Encontraram-se, por meio desses resultados, as vazões de gás coletadas e a potência disponível (Equações 11 e 12). Para a determinação da potência

Tabela 2 – Valores da taxa de decaimento de metano em cada cidade.

Cidade	Taxa de decaimento de metano k (L.ano)
Ariquemes (RO)	0,0798
Vigia (PA)	0,0942
Niterói (RJ)	0,0485
Jundiaí (SP)	0,0527
Cascavel (PR)	0,0683
Dourados (MS)	0,0557

Tabela 1 – dados de população, modelos de projeção e produção de resíduos nas cidades estudadas.

Cidade	População em habitantes ¹			Captação de resíduos em t.dia ²	Modelo de projeção adotado	T (em °C ³)	Precipitação (em mm.ano ⁴)
	1991	2000	2010				
Ariquemes (RO)	83.684	74.503	90.353	82,9	Linear	25,4	2.181
Vigia (PA)	37.419	40.176	47.889	66,5	Taxa de crescimento populacional constante	27	2.632
Niterói (RJ)	436.155	459.451	487.562	553,1	Linear	23,4	1.204
Jundiaí (SP)	289.269	323.397	370.126	361,7	Taxa de variação populacional constante	18,5	1.334
Cascavel (PR)	193.202	245.369	286.205	260,5	Logístico	18,2	1.822
Dourados (MS)	135.984	164.949	196.035	230,7	Linear	22,7	1.428

¹Dados obtidos no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2020). ²Dados relativos a 2016, obtidos no Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS, 2016). ^{3,4}Dados obtidos em Climate-Data.Org (2020).

instalada, utilizou-se o procedimento de otimização de potência desenvolvido por Santos (2018a). A potência foi variada entre os valores mínimos e máximos disponíveis em cada aterro, o tempo de disponibilidade de cada uma foi determinado e a produção energética total de cada uma delas foi calculada pela Equação 13. A potência instalada foi escolhida como a potência que resultava na máxima produção energética, como esquematizado pela Figura 1.

$$Q_{coletado} = Q_{biogás} \times \eta_{coletado} \quad (11)$$

$$P = Q_{coletado} \times \eta \times PCI \times 3,1536 \cdot 10^{-7} \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$E = \frac{P \times Fc \times t}{1000} \quad (13)$$

Em que:

$Q_{coletado}$ = vazão coletada de biogás em cada ano, em $m^3 \cdot \text{ano}$;

$\eta_{coletado}$ = eficiência de coleta, onde foi adotado o valor de 55,50% — média dos valores encontrados por Silva *et al.* (2013) e Watermolen *et al.* (2012);

P = potência disponível em kW;

η = rendimento da conversão energética = 0,33 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2006);

PCI = poder calorífico do biogás, de $22 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ CH}_4$ (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2006);

$3,1536 \times 10^{-7}$ = constante para conversão da vazão de m^3/ano para m^3/s ;

10^{-3} = constante para conversão da potência de W para kW;

E = energia disponível anualmente, em MWh/ano;

Fc = fator de capacidade, de 80%, conforme Santos *et al.* (2018b);
 t = tempo de operação, em h/ano.

Análise de viabilidade econômica

Nesta etapa realizou-se análise de viabilidade econômica, considerando-se variações nos valores de taxa e tarifa de venda de energia. Para isso, consideraram-se o valor presente líquido (VPL) e o custo nivelado de energia (LCOE), definidos nas Equações 14 e 15 (BRANKER *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2020). O VPL indica quando o projeto é viável ou não economicamente, admitindo valores maiores que zero para o primeiro caso e menores que zero para o segundo, respectivamente (VÖGELI *et al.*, 2014). O LCOE representa a tarifa mínima de venda de energia que deve ser praticada para que a viabilidade econômica do empreendimento seja assegurada.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{(E_n T) - C_{om}}{(1+i)^n} - I \quad (14)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^m \frac{C_n}{(1+i)^n}}{\sum_{t=0}^m \frac{E_n}{(1+i)^n}} \quad (15)$$

Em que:

E_n = energia produzida pela potência ótima no ano de análise;

T = tarifa de venda de energia, em R\$/MWh;

C_{om} = custo de operação e manutenção, em R\$/ano;

i = taxa de juros, adotada como sendo igual a 7% ao ano;

I = investimento inicial, em R\$;

m = vida útil do projeto, em anos;

n = ano de análise;

C_n = custo associado ao empreendimento em cada ano.

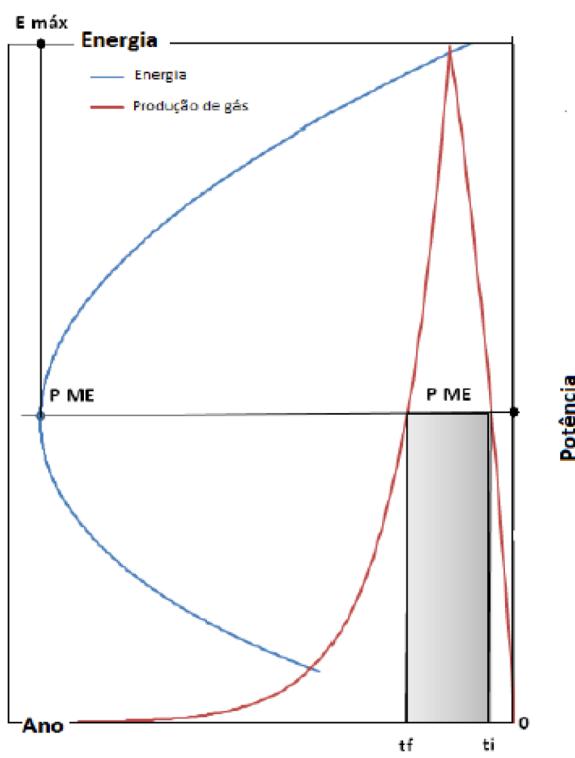


Figura 1 - Exemplificação da potência máxima de produção energética.

Para o cálculo do investimento inicial na usina termelétrica a partir do biogás (I), utilizou-se estimativa agregada desenvolvida por Gómez *et al.* (2010) (Equação 16), em função da potência instalada P (em kW), que engloba os sistemas de captação do gás (queimador e compressor), de transporte e armazenamento (gasodutos e gasômetro) e, por fim, de geração de energia (motor de combustão interna e gerador elétrico). Os valores foram obtidos em euros e convertidos para reais por meio da média do valor do euro em 2020 (obtida em INVESTING, 2020). Considerou-se ainda um acréscimo nos custos de 30%, valor típico de taxa de importação de equipamentos térmicos no Brasil (RECEITA FEDERAL, 2019). O custo de operação e manutenção do sistema foi considerado como 5% do valor do investimento (SANTOS *et al.*, 2018a) acrescido do valor do tratamento do gás para remoção de CO_2 , obtido de COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2006) e corrigido para 2021 por meio da calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2020), sendo igual a R\$ 0,023.m³.

$$I = 66990(P^{0,78}) \quad (16)$$

Considerou-se uma tarifa de venda de energia de R\$ 292 MWh, valor adotado por usinas termelétricas do leilão A-6 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019). Com base nesse valor, pode-se calcular a receita do empreendimento devido à venda de energia. É necessário ressaltar que a desvalorização da moeda real em relação ao euro foi de 31,8%, quando comparados

os anos de 2019 e 2020. Dessa forma, utilizou-se o câmbio de R\$ € 5,80, considerando-se o valor médio da moeda obtido entre os meses de janeiro e novembro de 2020 (INVESTING, 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados de projeção populacional obtidos para cada uma das cidades estudadas. Nota-se que as evoluções das populações nas cidades estão divididas em diferentes patamares. As cidades de Ariquemes e Cascavel tendem a apresentar tendência à estabilização em função do pequeno crescimento de suas populações a cada ano. Já Jundiaí apresenta maior tendência de crescimento, igualando-se aos resultados de população obtidos para Niterói (RJ) nos últimos anos de análise. Tal fato pode estar associado à localização e ao desenvolvimento de Jundiaí, que fica próxima à cidade São Paulo, a mais importante do país em termos econômicos.

Os resultados das estimativas das taxas de decaimento de metano (k) para cada uma das cidades estudadas estão listados na Tabela 2, na qual nota-se que, devido à maior precipitação, as cidades com maior taxa de decaimento são as cidades de Vigia e Ariquemes, ambas localizadas no Norte do Brasil.

A produção de metano foi prevista para cada uma das cidades avaliadas. Na Figura 3, a curva que apresenta crescimento é a vazão de metano gerada durante o período de aporte de resíduos no aterro, enquanto a que decresce é aquela gerada durante a produção residual, ou seja, após o fechamento do aterro, em que não há aporte de novos resíduos e só os resíduos já contidos no aterro são decompostos. Assim sendo, o pico de vazão previsto pelo modelo utilizado

se dá sempre imediatamente após o último ano de disposição de resíduos no aterro (20 anos). Pela segunda parte da curva, de produção residual, nota-se que o decaimento da produção do metano se dá em velocidades distintas entre as diferentes cidades, visto que os valores de taxa de decaimento foram utilizados em função da precipitação de cada cidade.

Usando-se a curva de produção de metano da Figura 3, pode-se calcular a potência disponível em cada ano em cada cidade por meio da Equação 12. A partir disso, estabeleceram-se intervalos de 20 kW para a variável de potência até atingir-se o valor máximo de potência disponível para cada cidade. Pela relação entre potência e tempo anteriormente citada, calculou-se o tempo de disponibilidade de cada uma das potências a serem instaladas em cada aterro. Em seguida, por meio da Equação 13, calcularam-se as energias totais produzidas para cada uma das potências disponíveis, as quais são expostas na Figura 4. Nota-se que as curvas de energia por potência aumentaram gradativamente até atingir um pico, que caracteriza a potência ótima, de máxima produção energética, a qual será a potência instalada no empreendimento.

Na Tabela 3 são expostos os dados de população média e os resultados energéticos de cada uma das cidades estudadas. Os valores de potência ótima obtidos variaram entre 429 e 2.407 kW, enquanto a energia calculada variou entre 3.006 e 16.873 MWh.ano. De posse dos valores do consumo de energia *per capita* de cada região do país (obtidos em EPE, 2019) e da média brasileira de número de habitantes por residência (ROSAS, 2016), pode-se calcular a população que poderia ser abastecida pela energia produzida em cada uma das cidades, bem como a razão entre essa população e a população total (R_p – veja Tabela 2). Os valores obtidos dessa relação variaram entre 3,4 e 6,8%, sendo

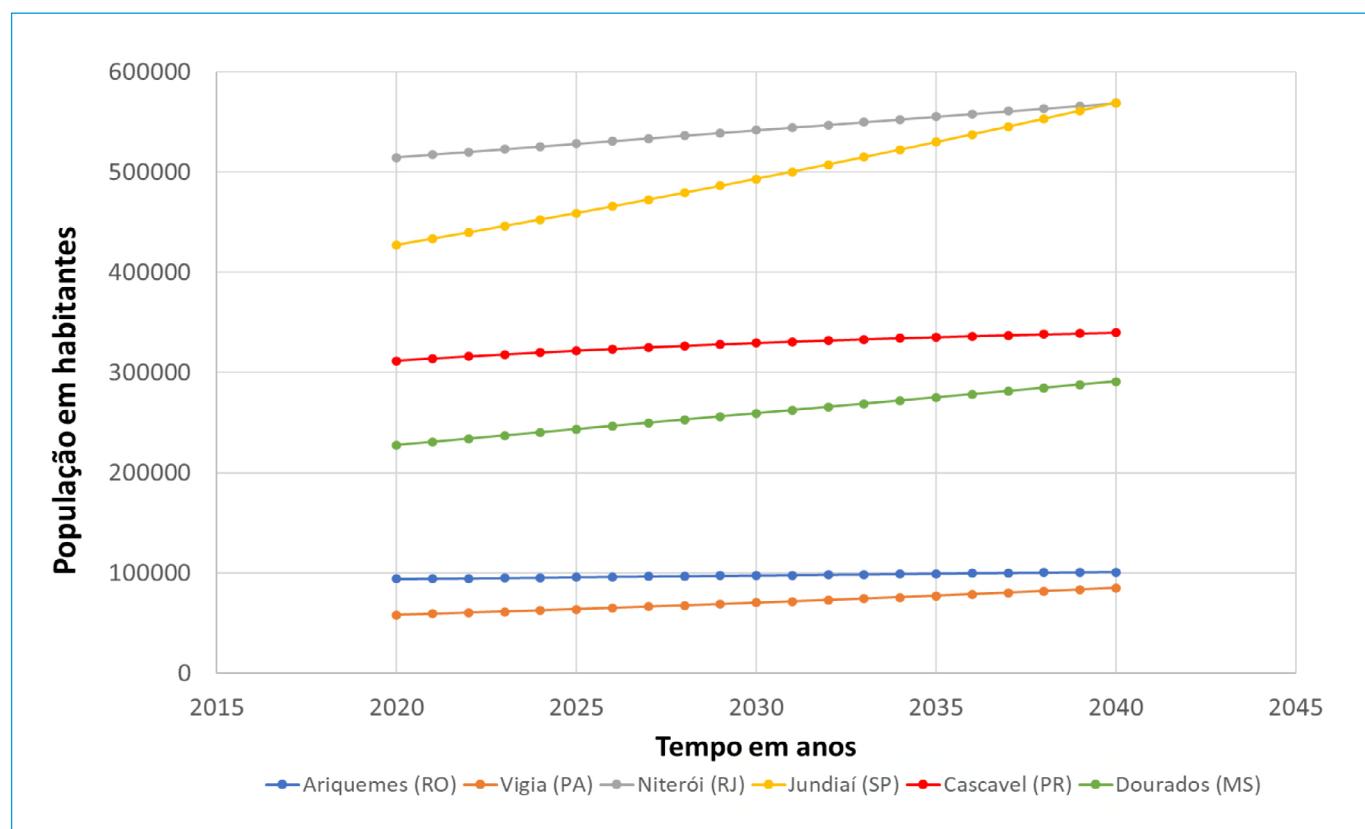


Figura 2 - Resultado das projeções populacionais.

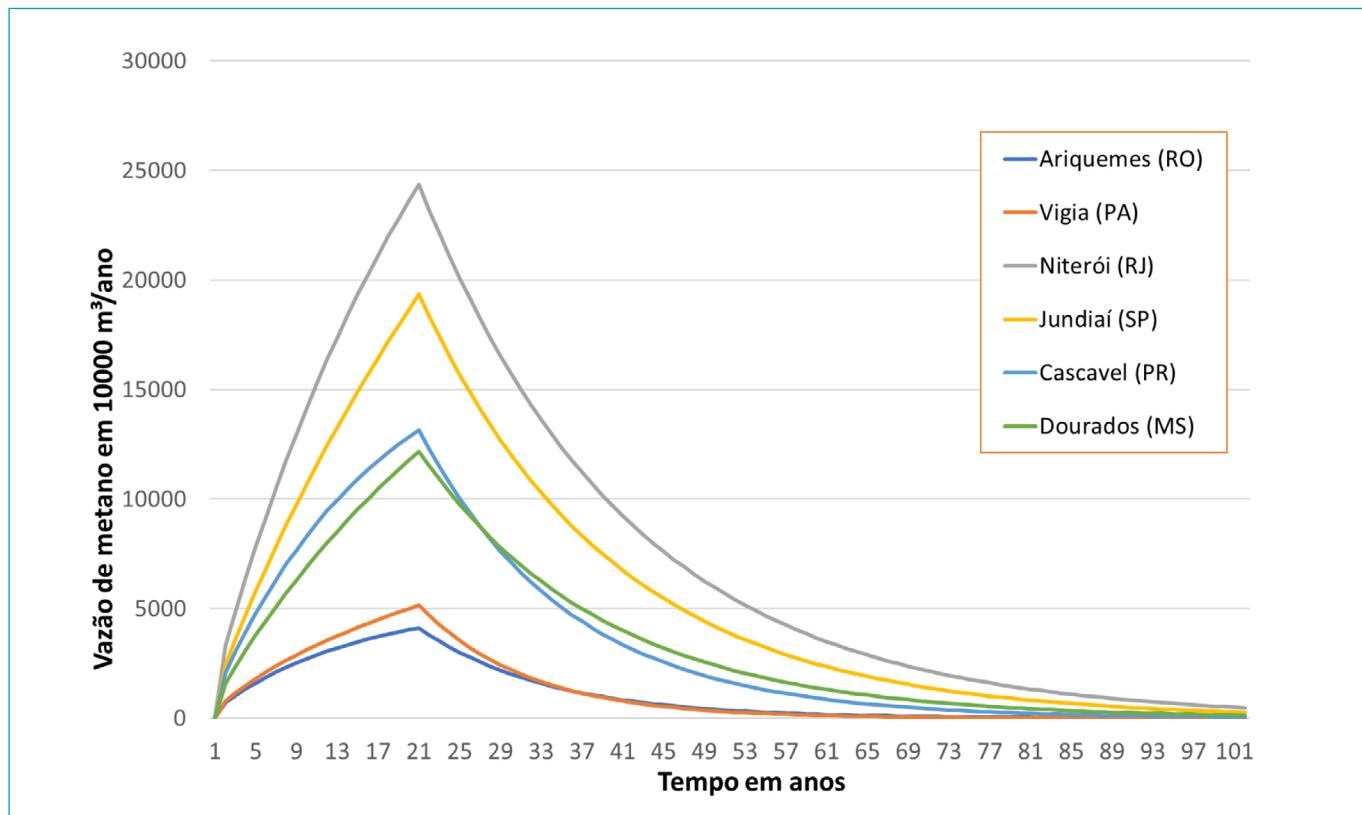


Figura 3 - Comparação da potência com aporte de resíduos e da potência durante a produção residual das diferentes cidades.

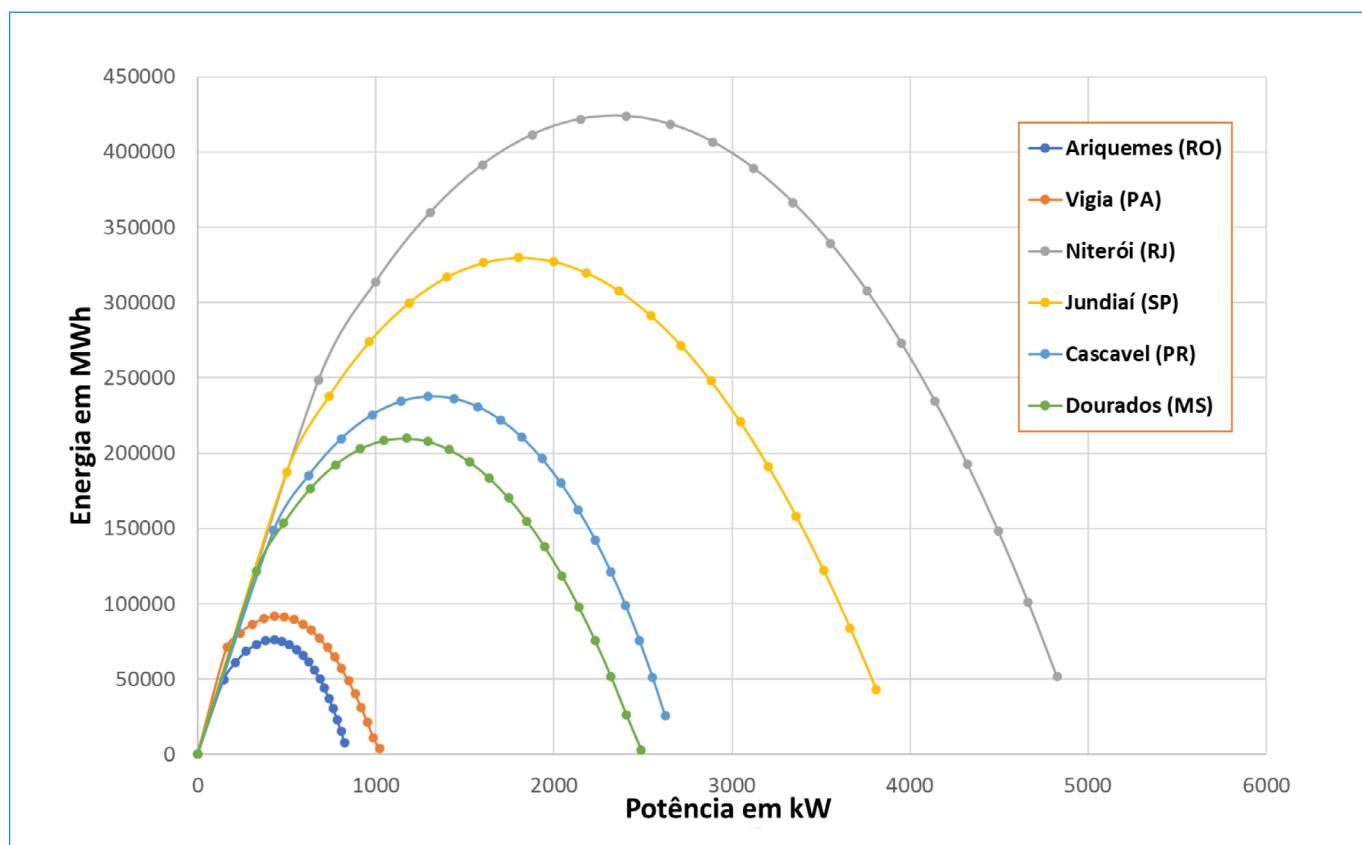


Figura 4 - Curvas de energia produzidas pelas diferentes potências e identificação das potências ótimas de funcionamento, para cada uma das cidades.

Tabela 3 - Dados básicos de comparação entre população e potências calculadas.

Cidade	População média (em habitantes)	$P_{óptima}$ (em kW)	Energia (em MWh.ano)	Relação entre $P_{óptima}$ e população (em W.hab)	Relação entre a população abastecida e população total R_p (%)
Ariquemes (RO)	102.242	429,1	3.006,9	4,20	4,35
Vigia (PA)	74.042	486,9	3.412,4	6,58	6,82
Niterói (RJ)	568.759	2.407,8	16.873,9	4,23	4,34
Jundiaí (SP)	519.738	1.803,4	12.637,9	3,47	3,55
Cascavel (PR)	342.095	1.294,8	9.073,9	3,78	3,70
Dourados (MS)	272.209	1.171,4	8.209,4	4,30	4,19

mais elevados em Estados de menor consumo energético (PA e RO) e menos elevados em Estados de maior consumo energético (SP e PR).

Ainda com base na Tabela 3, ao se observar as relações entre potência e população, percebe-se a elevada variação dos valores obtidos entre as diferentes cidades. Esse resultado deixa claro que não só a população, mas também a geração e a composição dos resíduos interferem sobre os resultados de potência e dos parâmetros de geração de biogás em aterros, como, por exemplo, a taxa de decaimento de metano (k).

Na Tabela 4 são expostos os investimentos iniciais, o custo unitário, bem como a receita anual passível de ser obtida na implementação do sistema em cada um dos municípios estudados. Tais resultados foram fundamentais para os cálculos da viabilidade econômica. Pela comparação das Tabelas 3 e 4 é possível observar o efeito de escala no custo unitário dos empreendimentos. Quanto maior a população contribuinte ao aterro, maior a potência e menor o custo unitário da implantação da usina. Esse comportamento explica a elevada variação nos custos unitários encontrados ao longo das cidades e aponta para a necessidade de uma potência mais elevada na usina, para que se diminua o custo unitário, ampliando, assim, a possibilidade de a viabilidade econômica ser assegurada.

De posse desses dados, pode-se prosseguir com a análise econômica. Na Tabela 5 são expostos os valores de VPL e LCOE dos empreendimentos em cada uma das cidades estudadas. A Figura 5 apresenta a relação entre LCOE e a população média de cada cidade, demonstrando que, com a elevação da população (e consequente potência), os custos de geração decrescem. Observa-se, pela Figura 5, que, apesar de outros fatores de influência, como a produção de resíduos e os parâmetros associados à geração de metano, não terem sido considerados nessa relação, um elevado coeficiente de determinação R^2 foi obtido.

Pela Tabela 5 nota-se a inviabilidade geral dos empreendimentos estudados, pois todos os VPLs obtidos foram menores que zero e os resultados de LCOE foram todos superiores à tarifa de venda de energia adotada (R\$ 292.MWh), típica de usinas termelétricas. Contudo, uma tarifa superior (23% superior), igual a R\$ 360.MWh (subsidiada ou incentivada para fomentar a tecnologia de biogás), já viabilizaria os empreendimentos em duas das cidades estudadas, a saber: Niterói (RJ) e Jundiaí (SP), que totalizam uma potência relevante e superior a 4,2 MW. Isso demonstra a necessidade de tarifas de venda de energia específicas para geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos com o objetivo de ampliar a difusão dessa forma de geração no país, ainda incipiente. Até 2019, o país tinha somente 20 usinas de geração de energia a partir de resíduos urbanos, que totalizavam somente 0,3% da potência instalada total em termelétricas (BIG-ANEEL, 2019). É possível que essa realidade se torne menos distante uma vez que estudos da Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN) apontam que o preço médio da energia elétrica produzida

Tabela 4 - Resultados de investimento inicial, custo de operação e manutenção e receita.

Município	Investimento inicial (em milhões de R\$)	Receita devida à venda de energia (em milhões de R\$.ano)	Custo unitário CAPEX de investimento (R\$.kW)
Ariquemes (RO)	9,85	0,88	22.950,65
Vigia (PA)	10,87	1,00	22.320,85
Niterói (RJ)	37,81	4,93	15.703,51
Jundiaí (SP)	30,18	3,69	16.734,61
Cascavel (PR)	23,31	2,65	17.999,85
Dourados (MS)	21,56	2,40	18.400,75

Tabela 5 – Resultados de valor presente líquido e custo nivelado de energia para os municípios analisados.

Cidade	VPL (em milhões de R\$)	LCOE (em R\$.MWh)
Ariquemes (RO)	-27,94	440,88
Vigia (PA)	-5,23	432,62
Niterói (RJ)	-9,90	345,91
Jundiaí (SP)	-9,28	359,42
Cascavel (PR)	-8,30	376,00
Dourados (MS)	-7,98	381,25

pelas usinas de tratamento térmico de resíduos pode variar de R\$ 450.MWh a R\$ 600.MWh, considerando-se a mesma tarifa paga para um aterro sanitário, a qual varia de R\$ 100 a 120 por ton. É necessário destacar que essa não é uma receita fixa e que ainda depende de uma série de fatores para ser estabelecida. Entretanto, ainda que se considere o valor mínimo de venda, esse tipo de usina pode ser competitivo do ponto de vista energético, uma vez que 33% das termoelétricas fósseis operam acima desse valor atualmente (ABREN, 2020).

A comparação dos resultados energéticos (Tabela 3) e econômicos (Tabela 5) nas cidades de Ariquemes (RO) e Vigia (PA) deixa claro que o potencial energético no aterro de determinada cidade não é função única da população, pois Vigia tem uma população menor que Ariquemes, apresentando, contudo, uma produção energética mais elevada e um LCOE inferior. Isso se deve a uma precipitação bem mais elevada e, consequentemente, a uma constante de decaimento da produção de metano mais alta ser verificada em Vigia (PA).

Ainda pela Tabela 5, nota-se também uma diferença de R\$ 85.MWh no custo de geração entre a cidade mais populosa (Niterói) e a menos populosa (Vigia). Para que seja possível a viabilização de empreendimentos em cidades

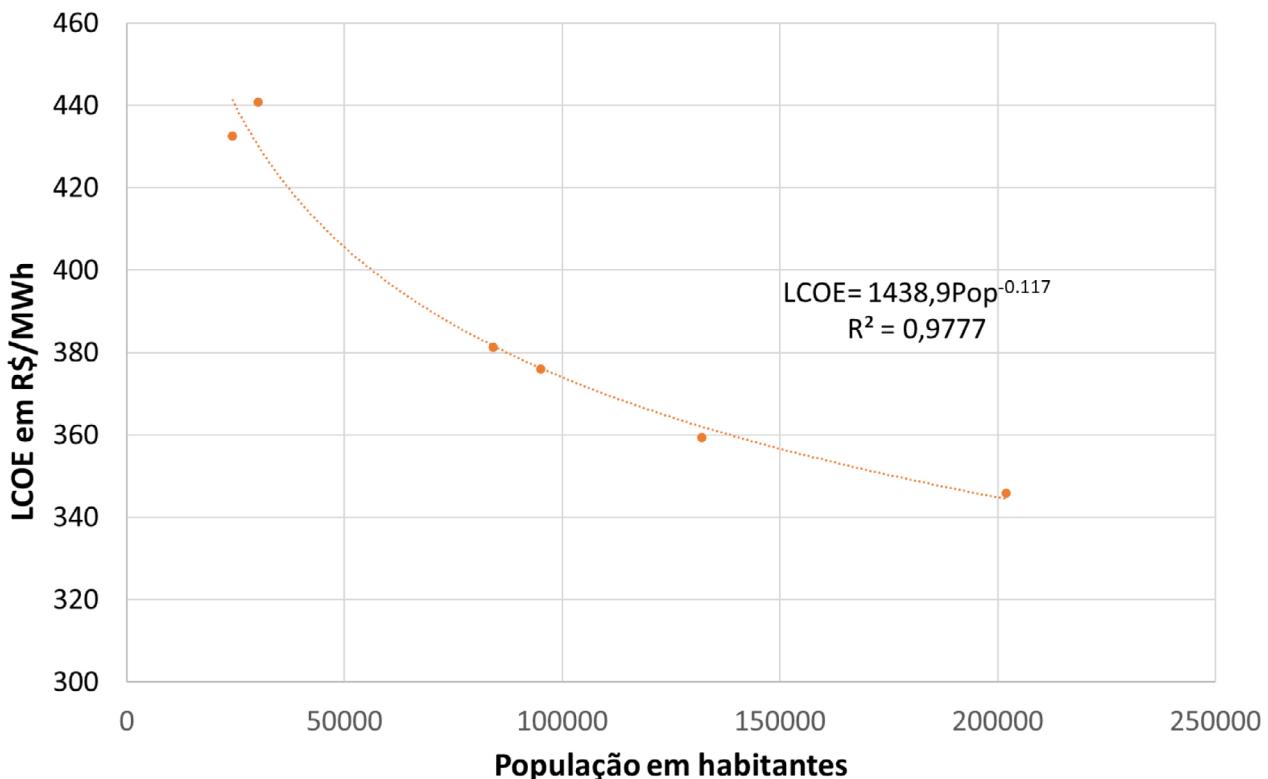


Figura 5 – Relação entre LCOE e população.

de menor população, tem-se a necessidade de maior remuneração da energia produzida, indicando a importância de se considerar a potência e a escala do empreendimento na definição das tarifas de venda de energia a serem praticadas em leilões de energia ou de, quando possível e viável, se estabelecer consórcios entre as cidades vizinhas, para construção conjunta de aterros sanitários com maior aporte de resíduos, já visando a produção de eletricidade. Isso pode ser visto no estudo de Barros *et al.* (2014), no qual os autores apontam que a tecnologia de gás de aterro se torna financeiramente atraente (taxa interna de retorno maior que 10%) para populações com mais de 200.000 habitantes.

Ainda, Santos *et al.* (2019) avaliaram a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos em três tipos de sistemas (biogás de aterros sanitários; metanização da fração orgânica em digestores anaeróbios e combustão em incineradores) por meio de análises econômicas e energéticas no município de São José dos Campos (estado de São Paulo). De acordo com os autores, o valor de LCOE para sistema de biogás implementado em aterro sanitário é 40 e 31,64% menor quando comparados aos valores das tecnologias de incineração e usina de digestão anaeróbica, nessa ordem. Paralelamente, Santos *et al.* (2018c) realizaram uma análise de cinco cenários sobre o potencial energético e a viabilidade econômica do uso combinado do biogás produzido para geração de eletricidade na cidade de Itajubá (estado de Minas Gerais). De acordo com a pesquisa, do ponto de vista energético, o melhor cenário é o uso combinado de biogás de aterro sanitário e estação de tratamento de esgoto. Como resultado, pode-se obter uma potência instalada de 685 kW, com o fornecimento de energia de, aproximadamente, 10% do valor requisitado pela cidade. Em relação ao aspecto econômico, os autores ressaltam que a melhor opção seria a

utilização do biogás proveniente de aterro sanitário de forma isolada, devido à menor distância de transporte do gás, em comparação com outros cenários. Outro estudo, conduzido por Castro e Silva *et al.* (2020), buscou analisar o potencial energético e a viabilidade econômica de implementação de um sistema de recuperação de biogás de aterro sanitário e de uma usina de digestão anaeróbica para o consórcio do Maciço de Baturité, no estado do Ceará. De acordo com a pesquisa, os autores obtiveram uma potência ótima de 460 kW, com geração de energia máxima de 3.223.680 kWh.ano para o sistema de recuperação de biogás pelo aterro sanitário, enquanto, para a usina de digestão anaeróbica, a potência e a energia obtidas foram, respectivamente, de 252 e 1.986.754,86 kWh. Ambos os projetos ainda não têm viabilidade de implementação, entretanto, o preço da unidade de energia gerada, em kWh, foi 42,42% menor para o sistema de recuperação de biogás do aterro sanitário em relação à usina de digestão anaeróbica.

Santos *et al.* (2018a) apresentam uma metodologia para o planejamento do uso de energia de aterro, baseando-se em uma escalada de potências dada pela adição de unidades geradoras ao longo da vida de exploração. Segundo os autores, o número de unidades geradoras varia conforme os parâmetros econômicos avaliados, apresentando uma única taxa de gerador com energia de até 100 USD.MWh e aumento em até 20 USD.MWh com o incremento de um novo gerador. Todavia, caso não seja viável a recuperação de biogás para gerar eletricidade, para minimizar as emissões de gases de efeito estufa como nos estudos apresentados, deve-se queimar o biogás produzido ou, melhor ainda, implementar sistemas de compostagem de orgânicos e dispor no aterro o mínimo de resíduos possível.

Santos *et al.* (2016) realizaram um estudo econômico para implementação de sistemas de biogás em sistemas de tratamento de esgoto. De acordo com os autores, seriam necessários 300 mil habitantes para a viabilidade do sistema. Paralelamente, Santos *et al.* (2019) calcularam os custos típicos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil por meio de outras tecnologias que não o biogás de aterro sanitário, como incineração e digestão anaeróbia da fração orgânica em reatores fechados. As faixas de valores obtidas pelos autores foram de R\$ 566–917.MWh para os incineradores e de R\$ 516–781. MWh para os digestores. Os valores de LCOE obtidos no presente trabalho para os aterros sanitários variaram entre R\$ 345 e 440.MWh, valor bastante inferior ao dessas tecnologias, mas, ainda assim, inviável no mercado regulado de geração de energia. Esses resultados reforçam a necessidade de implantação de uma política nacional de incentivo à geração de eletricidade a partir dos resíduos urbanos que torne essas fontes competitivas diante das demais fontes renováveis e permita uma aplicação mais efetiva da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Todos os aterros analisados apresentaram potência inferior a 5 MW, o que os torna aptos a serem analisados dentro do mercado de mini e microgeração distribuída brasileiro, definido a partir das Resoluções nº 482, de 2012, e nº 687, de 2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012, 2015). Nesse mercado, dentre diversas opções de geração, um empreendedor pode gerar energia no aterro e acumular créditos para abatimento em uma unidade consumidora que tenha demanda suficiente para consumir esses créditos, economizando, dessa forma, na compra de energia das distribuidoras. Como as tarifas das distribuidoras são, em geral, superiores a R\$ 500.MWh, o valor economizado seria superior a qualquer um dos LCOEs identificados na Tabela 5, o que tornaria qualquer um dos empreendimentos estudados economicamente viável. Tem-se então, na geração distribuída de pequeno porte, um caminho para a viabilização dos empreendimentos energéticos que utilizem o biogás de aterros sanitários no Brasil que deve ser mais amplamente discutido e estudado. Vale ressaltar que a distância entre o aterro sanitário e a rede de energia elétrica pode ser um fator oneroso a essa forma de geração, visto que os aterros são, normalmente, construídos em locais mais afastados.

CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou estimar uma análise quantitativa e econômica da produção energética a partir de resíduos sólidos destinados a aterros sanitários, tomando como base seis cidades de diferentes regiões e com diferentes faixas populacionais e geração de resíduos. Os resultados obtidos demonstram

que os parâmetros energéticos e econômicos dos empreendimentos em cada cidade são influenciados não somente pela população, mas também pela geração de resíduos e por fatores climáticos. Isso ficou claro com o exemplo da cidade de Vigia (PA), que, mesmo com menor população e captação de resíduos dentre as cidades estudadas, apresentou resultados de energia e LCOE, respectivamente, superiores e inferiores aos de Ariquemes (RO).

Nenhuma das cidades estudadas apresentou viabilidade financeira para geração de energia nos aterros, o que demonstra o grande índice de inviabilidade da tecnologia no Brasil e explica seu pequeno percentual na matriz elétrica brasileira. Contudo, um aumento de 23% nos valores de tarifa de venda de energia, por meio de subsídios ou incentivos, já viabilizaria seu uso em duas das cidades estudadas. Isso demonstra a necessidade de se avaliar a possibilidade de criação de tarifas de venda de energia específicas para essa forma de geração que sejam mais elevadas e permitam maior competitividade dessa fonte. A viabilidade econômica das usinas de geração de energia pode se tornar um meio para agregação de valor nos aterros sanitários, auxiliando, assim, em uma maior difusão dessas estruturas, o que resultará em melhoria das condições sanitárias do país.

Os valores de LCOE obtidos variaram entre R\$ 345 e 440.MWh, apresentando acentuada redução em função do aumento da população e da potência. Tais valores são bastante inferiores às tarifas de venda de energia da distribuição praticadas no país, o que sinaliza a possibilidade de utilização dos aterros sanitários no mercado de geração distribuída.

Como o Brasil ainda tem elevado índice de destinação inadequada dos resíduos, a tendência futura é a diminuição do uso de lixões e de aterros controlados, bem como a ampliação do uso de aterros sanitários, fazendo o potencial de geração de energia nessas estruturas ser ainda maior e mais relevante. Nota-se a necessidade de construção de uma política nacional de incentivos à geração de energia a partir desses resíduos que possibilite a redução dos custos de geração dessas fontes, tornando-as competitivas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Fernandes, G.L.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Software, Escrita – Primeira Redação. Santos, I.F.S.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Software, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Silva, H.L.C.: Conceituação, Curadoria de Dados, Escrita – Revisão e Edição. Barros, R.M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015*, 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. Acesso em: 3 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2018/2019, 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 6 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS (ABREN). *Novo marco do saneamento como grande propulsor da valorização energética de resíduos no Brasil (Estadão)*. 2020. Disponível em: <https://abren.org.br/2020/07/08/novo-marco-do-saneamento-como-grande-propulsor-da-valorizacao-energetica-de-residuos-no-brasil-2/>. Acesso em: 30 nov. 2020.

AGAMUTHU, P. Landfilling in developing countries. *Waste Management & Research*, v. 31, n. 1, p. 1-2, 2013. <https://doi.org/10.1177/0734242X12469169>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>. Acesso em: 23 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 23 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Aprovado edital do leilão A-6 deste ano*. Certame será realizado dia 18/10 em São Paulo. 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa/exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aprovado-edital-do-leilao-a-6-deste-ano/656877?inheritRedirect=false. Acesso em: 6 jun. 2020.

BARROS, R. M. *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 374 p.

BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L.; SILVA, T.R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, s.n., p. 150-164, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). *Calculadora do cidadão*. 2020. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>. Acesso em: 30 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Informações Gerenciais*. 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%A3o%20B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+de+2019/b860054f-79ec-6608-951a-fb2288701434>. Acesso em: 02 out. 2020.

Banco Mundial; CONESTOGA-ROVERS AND ASSOCIATES. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean. energy sector management assistance programme paper series. 2004. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18081>. Acesso em: 30 set. 2020.

BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 9, p. 4470-4482, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2010.

CASTRO E SILVA, H. L.; CARVALHO, H. C.; NASCIMENTO, L. W. D. S.; PINTO, J. A.; SILVA R. S. M. Gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos do Consórcio do Maciço de Baturité: Análise técnica e econômica da geração de biogás por aterro sanitário e usina de digestão anaeróbica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2021, v. 26, n. 05, p. 855-864, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202000155>

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Aterro: Geração de Biogás e uso energético, versão 1.0. CETESB, Departamento ambiental, Ministério brasileiro de ciência e tecnologia. São Paulo: SMA; CETESB: MCT, 2006. 1 audiolivro (CD-ROM), Manual do usuário v.1-2.

CHERNICHARO, C.A. L. *Princípios de Tratamento Biológico de Esgotos - Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

CLIMATE-DATA.ORG. *Dados climáticos para cidades mundiais*. Disponível em: <https://pt.climate-data.org>. Acesso em: 02 out. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica - Ano base 2018. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1lio_2019_WEB_alterado.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.

FALLAHIZADEH, S.; RAHMATINIA, M.; MOHAMMADI, Z.; VAEZZADEH, M.; TAJAMIRI, A.; SOLEIMANI, H. Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *Methodsx*, v. 6, s.n., p. 391-398, 2019.

GÓMEZ, A.; ZUBIZARRETA, J.; RODRIGUES, M.; DOPAZO, C.; FUEYO, N. Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. *Renewable Energy*, v. 35, n.2 p. 498-505, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.027>

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. *What a Waste: a global review of solid waste management*. Washington: World Bank, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *População*. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao.html>. Acesso em: 06 jun. 2020.

INVESTING. EUR/BRL - Euro Real Brasileiro. 2020. Disponível em: <https://br.investing.com/currencies/eur-brl-historical-data>. Acesso em: 01 nov. 2020.

KARanjeKAR, R. V.; BHATT, A.; ALTOQUI, S.; JANGIKHATOONABAD, N.; DURAI, V.; SATTLER, M. L.; HOSSAIN, M. D. S.; CHEN, V. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model. *Waste Management*, v. 46, p. 389-398, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.030>

KRAUSE, M. J.; CHICKERING, G. W.; TOWNSEND, T. G. Translating landfill methane generation parameters among first-order decay models. *Air & Waste Management Association*, Pittsburgh, v. 66, n. 11, p. 1084-1097, 2016.

LI, S.; YOO, H. K.; MACAULEY, M.; PALMER, K.; SHIH, J. S. Assessing the role of renewable energy policies in landfill gas to energy projects. *Social Science Research Network*. 2014. p. 687-697. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2518609>

PIN, B. V. R.; BARROS, R. M.; SILVA, L. E. E.; SANTOS, I. F. S. Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. *Energy Strategy Reviews*, v. 19, p. 31-43, 2018.

PLOCOSTE, T.; JACOBY-KOALY, S.; PETIT, R. H.; ROUSSAS, A. Estimation of Methane Emission from a Waste Dome in a Tropical Insular Area. *International Journal of Waste Resources*, v6, n. 2, p.1-7, 2016. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000211>

QASIN, S. R. *Wastewater treatment plants: planning, design and operation*. New York: CBS College Publishing, 1999.

RECEITA FEDERAL. *Simulador de taxas de importação*. Disponível em: <http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/Simulacao-tag.jsp>. Acesso em: 30 set. 2019.

ROSAS, R.; SARAIVA, A.; SALES, R. Em dez anos, cai pela metade proporção de residências superlotadas. *Valor econômico*, 2016. Disponível em: <https://www.valor.com.br/brasil/4794551/em-dez-anos-cai-pela-metade-proporcao-de-residencias-superlotadas>. Acesso em: 02 out. 2020.

SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Electricity generation from biogás of anaerobic wastewater treat plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, p. 504-514, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072>

SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G.L. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. *Sustainable Cities and Society*, v. 41, p. 587-600, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.029>

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N.D.B.; NÓBREGA, L.G.B.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 131, p. 54-63, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.201712.012>

SANTOS, I. F. S.; GONÇALVES, A. T. T.; BORGES, P. B.; BARROS, R. M.; LIMA, R. S. Combined use of biogas from sanitary landfill and wastewater treatment plants for distributed energy generation in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 136, p. 376-388, 2018c. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.011>

SANTOS, R. E.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; BERNAL, A. P.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, F. G. B. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management*, v. 231, p. 198-206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>

SHAATO, R.; ABOHO, S. Y.; OKETUNDE, F. O.; ENEJI, I. S.; UNAZI, G.; AGWA, S. Survey of solid waste generation and composition in a rapidly growing urban area in Central Nigeria. *Waste Management*, v. 27, n.3 p. 352-358, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.008>

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 95-104, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200001>

SILVA, L. J. V. B.; SANTOS, I. F. S.; MENSAH, J. H. R.; GONÇALVES, A. T. T.; BARROS, R. M. Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential. *Renewable Energy*, v. 149, p. 1386-1394, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134>

SOUZA, A. R.; SILVA, A. T. Y. L.; TRINDADE, A. B.; FREITAS, F. F.; ANSELMO, J. A. 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). *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n.5, p. 887-896, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019187066>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 1 de abr. de 2016.

USEPA. LandGEM. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 302 User's Guide. 2005. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnctc1/dirl/landgem-v302-guide.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2020.

VÖGELI, Y.; LOHRI, C. R.; GALLARDO, A.; DIENER, S.; ZURBRÜGG, C. Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies. Dübendorf: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), 2014, 137 p.

WATERMOLEN, B. T.; STRUBE, R. H.; SWAN, N. D.; CHANTON, J. Methane emission, oxidation and collection efficiency at a southeastern USA landfill. In: *Global waste management symposium*. Veolia environmental services. North America Solid Waste. 2012. Disponível em: <HTTP://DNR.WI.GOV/TOPIC/wASTE/DOCUMENTS/SWIP/20121115/mETHANEeMISSIONSuPDATE.PDF>. Acesso em: 19 fev. 2020.

