

Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos em Pau dos Ferros (RN)

Estimates for biogas production and energy potential of solid residues in Pau dos Ferros, Brazil

Larissa Nathane Lima de Moraes¹, Joel Medeiros Bezerra², Alana Ticiane Alves do Rêgo³

RESUMO: Diante da destinação inadequada de resíduos sólidos que trazem consigo prejuízos ao meio ambiente, objetivou-se, neste trabalho, realizar a estimativa de produção de biogás dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Pau dos Ferros (RN), tal como avaliar o seu potencial de aproveitamento energético. Como metodologia, foram realizadas as estimativas do crescimento populacional e sua posterior geração de resíduos, almejando calcular a emissão de metano e biogás. Para tal, utilizou-se o modelo LandGEM para os cálculos de estimativas dos gases gerados pelos resíduos. A avaliação foi realizada mediante três cenários: destinação da totalidade dos resíduos para aterro sanitário (1), destinação de resíduos orgânicos alimentares para compostagem (2) e destinação da totalidade de resíduos para pirólise (3). Como resultados, observou-se que o cenário que apresentou maior produção de biogás foi o cenário 1, devido à elevada carga orgânica presente na composição dos resíduos. Enquanto o cenário 2 apresentou menor produção de gases em relação ao cenário 1, a reduzida geração de biogás ocorre devido a retirada da fração orgânica dos resíduos que seriam encaminhados para compostagem, essenciais para a produção desse gás. Já o cenário 3 apresentou menor emissão de biogás devido o mesmo receber apenas o resíduo resultante do processo de pirólise e que não possui grande potencial de geração de biogás. Com relação ao potencial energético dos resíduos, é possível que os mesmos possam ser utilizados para a geração de eletricidade dentro do próprio aterro.

Palavras-chaves: Compostagem. Pirólise. Tratamento de resíduos.

ABSTRACT: In the wake of inadequate deposits of solid waste jeopardizing the environment, current analysis estimates biogas production of urban solid wastes in the town of Pau dos Ferros RN Brazil, and its potential for energy use. Estimates of population growth and generation of wastes were undertaken to calculate the emission of methane and biogas. LandGEM was employed to calculate estimates of gases produced by wastes and evaluation was undertaken with three scenarios: (1) final deposit of residues for sanitary landfill; (2) final deposit of food organic wastes for compost; (3) final deposit of wastes for pyrolysis (3). Scenario 1 produced the greatest rate in biogas due to the high organic load in waste composition. Scenario 2 had the least production of gases when compared to scenario 1. Reduced generation of biogas was due to the removal of organic fraction of wastes, basic for gas production, that would go to composting. Scenario 3 had the lowest biogas rates since it merely comprised wastes from pyrolysis with low potential for gas production. In the case of the energy capacity of wastes, they may be used for the production of electricity within the landfill.

Keywords: Compost. Pyrolysis. Treatment of wastes.

Autor correspondente:

Alana Rêgo: alana_ticiane10@hotmail.com

Recebido em: 20/04/2020

Aceito em: 15/02/2021

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial e econômico aliado ao crescimento populacional e ao consumo exagerado traz consigo consequências como o aumento da geração de resíduos, tal como sua diversidade. Dessa maneira, percebe-se uma maior dificuldade da realização da gestão integrada frente o gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

¹ Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Integra o Grupo de Estudos em Engenharia, Meio Ambiente e Geotecnologias (GEEMAG/UFERSA). Pau dos Ferros (RN), Brasil.

² Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Pró-Reitor Adjunto de Extensão e Cultura e Professor Adjunto C no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental & Sanitária da Universidade Federal Rural do Semi Árido (UFERSA), Pau dos Ferros (RN), Brasil.

³ Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais (PPGCN/UERN). Integra o Grupo de Estudos em Saneamento Ambiental no Semiárido (ESAS/UFERSA). Mossoró (RN), Brasil.

Almejando a realização do descarte adequado dos RSU tem-se a proposta do dispositivo de aterro sanitário, o qual é definido como uma obra de engenharia que objetiva a destinação de RSU de maneira que não causem danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais (COSTA; RIBEIRO, 2013). Sua estrutura é composta por células escavadas no solo e sua base impermeabilizada, nas quais são despejados os resíduos e posteriormente cobertos com camadas de argila, associado com a presença de rede de drenagem do chorume e do biogás. Neste tipo de estrutura, os danos ambientais e sociais são minimizados, mediante implementação de medidas preventivas de controle ambiental.

Entretanto, a maioria das cidades brasileiras não conta com esse dispositivo. No ano de 2016, o Estado do Rio Grande do Norte foi atendido com 79% de coleta de resíduos, sendo que 64,4% do lixo coletado foi destinado para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2016). O cenário predominante nos municípios, principalmente de pequeno porte, é a **disposição dos resíduos sólidos em vazadouros a céu aberto**. Nesse caso, os resíduos são destinados aleatoriamente no solo e não existe nenhuma proteção dos compartimentos ambientais: litosfera, hidrosfera e atmosfera, tal como dos ecossistemas presentes no seu entorno.

Após o descarte final dos RSU, os micro-organismos presentes iniciam o processo de decomposição da matéria orgânica, mediante condições anaeróbias desencadeando a biodigestão gerando diversos gases, entre eles CH_4 , H_2S , CO_2 e NH_3 (BORGES, 2016). Esse processo de digestão transforma a matéria orgânica em biogás (BRAIDA *et al.*, 2016). Seu processo de formação ocorre devido às interações físico-químicas e biológicas, que possuem alto poder de contaminação da atmosfera, contribuindo para fenômenos como o efeito estufa e o aquecimento global.

Analisando o cenário local, na cidade de Pau dos Ferros (RN), o destino dos RSU também ocorre de maneira inadequada. Todo o resíduo coletado no município é destinado para um vazadouro a céu aberto que se localiza cerca de 4 km de distância do centro urbano do município e que possui cerca de 2,45 ha (LOPES *et al.*, 2016).

Essa disposição inadequada promove problemas como a presença de vetores causadores de doenças para a população circunvizinha, presença de animais que se alimentam dos resíduos, presença de catadores que trabalham e até residem no local, representando, dessa forma, impactos além de ambientais, econômicos e sociais.

Devido tais consequências, a PNRS estabelece que os municípios deverão dar uma destinação ambientalmente adequada a seus resíduos em aterros sanitários e elaborem seus planos de gerenciamento de resíduos sólidos, estando passível o recebimento de multa aqueles municípios que não cumprirem com o determinado.

Portanto, devido aos impactos ambientais promovidos pelo biogás produzido decorrente da decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos em vazadouros a céu aberto e a necessidade de adequação do manejo de resíduos sólidos à Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), buscou-se quantificar essas emissões, bem como propor e avaliar cenários de aproveitamento energético do biogás.

Para contemplar a estimativa da geração de biogás e Gases de Efeito Estufa (GEE) decorrente da decomposição dos resíduos orgânicos em aterros tem-se na literatura o emprego de modelos matemáticos de previsão, entre esses pode-se citar a ferramenta do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2006), como exemplo o *software* LandGEM (*Landfill Gas Emissions Model*) da USEPA, recomendado pela

Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2005). Além de modelos de decaimento de primeira ordem (MACHADO *et al.*, 2009), os quais incorporam o efeito do tempo na degradabilidade dos insumos.

Diante dessa premissa, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar a estimativa de produção de biogás dos resíduos sólidos urbanos, tal como avaliar o seu potencial de aproveitamento energético na cidade de Pau dos Ferros (RN). Para isso, propôs como objetivos específicos avaliar cenários de aproveitamento do biogás em Pau dos Ferros (RN), estimar o potencial de produção de biogás dos resíduos sólidos urbanos e avaliar o potencial energético do biogás diante dos cenários.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Pau dos Ferros (RN) possui um vazadouro a céu aberto o qual localiza-se em área rural do município supracitado, no semiárido do Rio Grande do Norte (Figura 1). O município possui uma área de aproximadamente 260 km² e uma estimativa populacional de 30.452 habitantes para o ano de 2017 (IBGE, 2017).

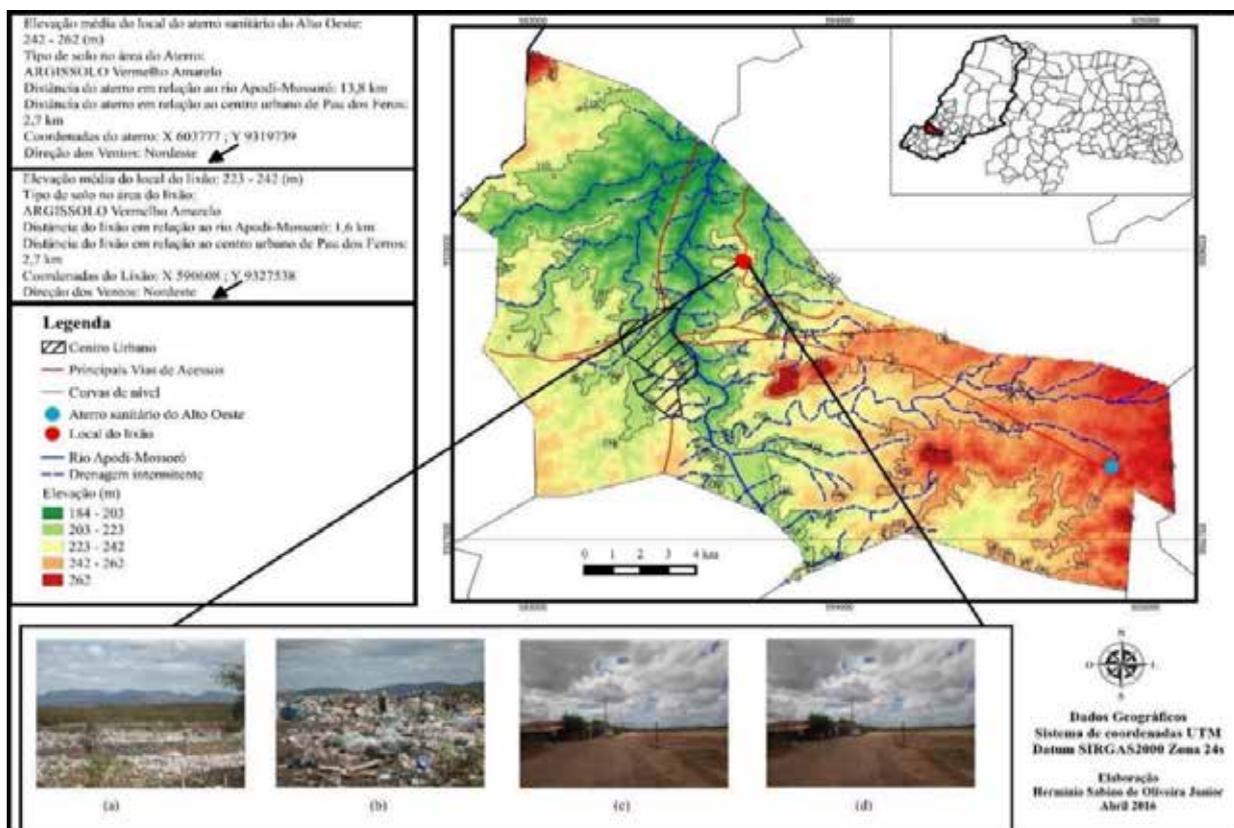


Figura 1. Mapa de localização do lixão da cidade de Pau dos Ferros

Fonte: Santos (2016).

O vazadouro a céu aberto de Pau dos Ferros, conhecido popularmente como lixão, recebe diversos resíduos: domésticos, de construção civil, de poda, da saúde e até de abatedouros (LUNES *et al.*, 2016).

2.2 ESTIMATIVA POPULACIONAL

O método utilizado para estimar a população do ano de 2016 até o ano de 2036 foi o método geométrico (TSUTIYA, 2006). Esse método considera a mesma porcentagem de aumento da população para períodos iguais (Equação 1).

$$P = P_2 e^{K_g \cdot (t-t_2)} \quad (1)$$

Sendo:

P = população estimada no ano t (hab);

P₂ = população do ano inicial (hab);

t₁, t₂ = ano inicial; ano final;

K_g = taxa de crescimento geométrico.

A taxa de crescimento geométrico é representada pela Equação 2.

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

Em que:

K_g = coeficiente de crescimento geométrico;

P₁, P₂ = populações nos anos t₁ e t₂;

t₁, t₂ = ano inicial; ano final.

2.3 ESTIMATIVA DO VOLUME DE RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS

Para a estimativa dos RSU gerados anualmente utilizou-se a Equação 3.

$$\text{Volume de RSU} = \text{população} \times \text{geração per capita} \times 365 \text{ dias} \quad (3)$$

O valor da geração *per capita* a ser utilizado na equação foi o calculado pela pesquisa ABRELPE (2016) que é de 0,741 Kg/hab.dia para o Estado do RN.

2.4 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Para a estimativa do biogás gerado pela decomposição orgânica dos resíduos sólidos foi utilizada a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O procedimento proposto para estimar a produção de biogás utilizará um modelo teórico de estimativa como ferramenta de previsão do volume de metano a ser gerado pelo período considerado, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006).

O mesmo é apresentado por Carvalho *et al.* (2019) e se aplica para a determinação de emissões anuais em países ou regiões específicas, empregando o modelo LanGEM, podendo ser determinado pela Equação 4, apresentada por Jaco *et al.* (2015).

$$ECH_4 = k * Rx * L_0 * e^{-k * (X-T)} \quad (4)$$

Em que:

ECH_4 = Emissão de Metano (Kg de CH_4 /ano);

k = Constante de decaimento;

Rx = Fluxo de resíduos do ano (ton de RSD);

L_0 = Potencial de geração de metano (m^3 biogás/ton RSD);

X = Ano atual;

T = Ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação).

O valor de k é obtido a partir da Tabela 3.3 do Módulo 5 - Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 1996. Tem-se o valor de k para clima tropical - resíduo úmido (de acordo com a composição do lixo). De forma que para papel: k = 0,07; para resíduos orgânicos: k = 0,17; para têxteis: k = 0,07; para madeira: k = 0,035.

Para estimar o potencial de geração de metano L_0 é necessário conhecer a composição dos resíduos. O valor do parâmetro L_0 foi estimado pela Equação 5, que se baseia no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico.

$$L_0 = FCM * COD * CODf * F * \frac{16}{12} \quad (5)$$

Sendo:

L_0 : potencial de geração de metano do lixo [kg de CH_4 /kg de RSD];

FCM: fator de correção de metano [%];

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

CODf: fração de COD dissociada [%];

F: fração em volume de metano no biogás [%];

F: Fração de metano presente no biogás;

(16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH_4 /kg de C].

O método envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico (CO) degradável presente nos RSU, calculando assim a quantidade de metano (CH_4) que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado.

O parâmetro FCM varia em função do local de disposição. Entre as categorias existentes e os respectivos valores de FCM adotou-se o valor de 1,0 para aterro sanitário.

O parâmetro COD é estimado pela Equação 6, que se baseia na composição do RSU e no potencial de produção de carbono que cada componente apresenta (ver Tabela 5).

$$COD = (0,40 * A) + (0,17 * B) + (0,15 * C) + (0,40 * D) + (0,30 * E) \quad (6)$$

Sendo:

COD: carbono orgânico degradável [kg de C/kg de RSD];

A: fração de papel e papelão no RSU;

B: fração de resíduos de parques e jardins no RSU;

C: fração de restos de alimentos no RSU;

D: fração de tecidos no RSU;

E: fração de madeira no RSU.

Por fim o parâmetro da fração de carbono orgânico degradável (COD_f) é obtido pela Equação 7. O mesmo indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica.

$$COD_f = (0,014 * T) + 0,28 \quad (7)$$

Sendo:

COD_f: fração de COD dissociada [%];

T: temperatura na zona anaeróbia [°C].

O potencial de geração de metano corresponde ao total produzido por massa de RSU (m³ de metano por tonelada de RSU). Seu valor é dependente da composição do resíduo. É estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e em um fator de conversão estequiométrico. Seus valores típicos podem variar entre 125 m³ e 310 m³ de CH₄ por tonelada de resíduo.

2.5 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Para a análise do potencial energético foram propostos três distintos cenários, sendo:

- Cenário 1: assume-se que todo o resíduo coletado no município tem como destino o aterro sanitário sem passar por nenhum tratamento;
- Cenário 2: os resíduos orgânicos alimentares serão segregados em Centrais de Tratamento de Resíduos (CTRs), tendo como destino a compostagem;
- Cenário 3: assume-se que a totalidade dos resíduos passará pelo processo de pirólise, tendo apenas as suas cinzas resultantes do processo destinado ao aterro.

Para a estimativa de produção de metano e biogás para os 3 cenários utilizaram-se os parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para equação modelo LandGEM

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
K	0,028	0,07	0,17
L ₀	0,055	0,02	0,054

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Segundo o IPCC (2006) tem-se o valor de k para clima tropical - resíduo úmido (de acordo com a composição do lixo), de forma que para papel: $k = 0,07$; para resíduos orgânicos: $k = 0,17$; para têxteis: $k = 0,07$; para madeira: $k = 0,035$. Buscando representar a situação real da composição dos resíduos, os valores de k foram calculados através de médias ponderadas considerando a fração de cada resíduo.

Para o cenário 1, o qual destinará a totalidade de resíduos para aterro sanitário, procedeu-se ao cálculo do L_0 conforme metodologia. A composição gravimétrica dos resíduos sólidos de Pau dos Ferros (RN) foi obtida através do método de quarteamento realizado por Lunes (2017) e, para o cálculo do COD, consideraram-se os valores da Tabela 2.

Tabela 2. Valores para cálculo de COD

Componentes	Total (%)	% (COD) (massa)
Papel	4,7	40
Matéria orgânica	45,4	15
Tecido	4,7	40

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Logo, para os cenários 1 e 3 tem-se que $COD = 10,57\%$ ou $0,1057$.

Considerando uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme Jaco *et al.* (2015), tem-se:

$$COD_f = 0,77$$

Por se tratar de uma simulação em aterro sanitário, adotou-se 1 (um) para o FMC. Considerando-se a fração de metano presente no biogás (F) como 0,5, tem-se:

$$L_0 = 0,054\text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}$$

Para o cenário 2, o valor de restos de alimentos (c) presente no COD foi desconsiderado já que a matéria orgânica alimentar presente nos resíduos será destinada para compostagem.

Logo, $COD = 3,76\%$ ou $0,0376$.

Considerando uma temperatura de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme Jaco *et al.* (2015), tem-se:

$$COD_f = 0,77$$

Considerando FMC igual a 1 e F igual a 0,5, tem-se:

$$L_0 = 0,019\text{ kg CH}_4/\text{kg RSD}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 PROJEÇÃO POPULACIONAL

Para realizar as estimativas de produção de resíduos e de geração de biogás, foi necessário primeiramente realizar a estimativa populacional dos anos de 2016 a 2036 do município de Pau dos Ferros (RN) (Figura 2).

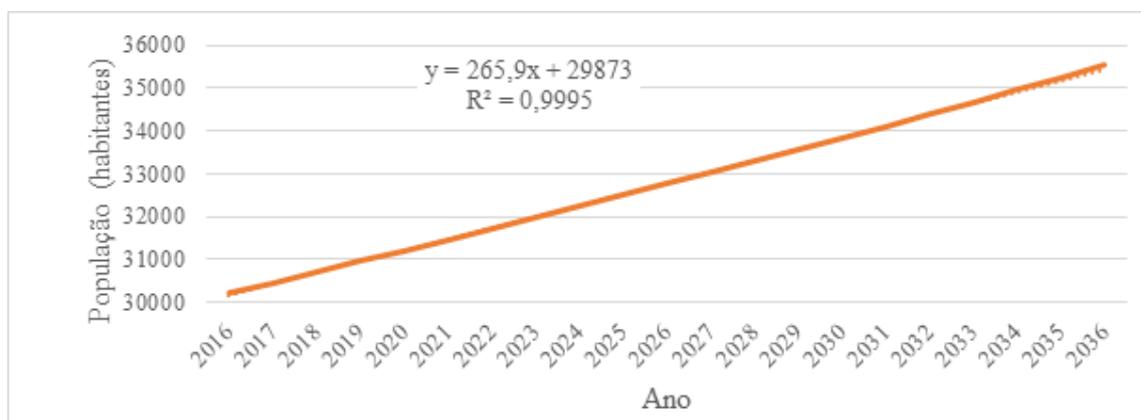


Figura 2. Estimativa populacional de Pau dos Ferros - 2016 a 2036.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

532 A população estimada para o ano de 2016 de acordo com IBGE (2017) era de 30.206 habitantes. Aplicando a estimativa populacional pelo método geométrico (TSUTIYA, 2006), observa-se que ao longo dos 20 anos há uma estimativa de aumento da população até o ano de 2036, com 35.526 habitantes, havendo, então, o acréscimo de 246 habitantes por ano, representando um incremento de 5.320 habitantes ao longo dos 20 anos de funcionamento do aterro sanitário.

3.2 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para a geração de resíduos entre os anos de 2016 a 2036 utilizou-se o valor de geração *per capita* de 0,741 Kg/hab.dia conforme ABRELPE (2016), ver Figura 3.

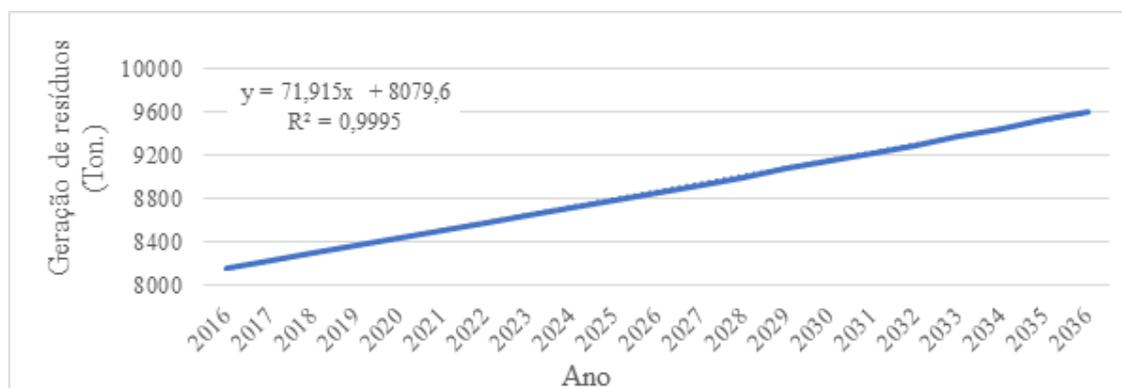


Figura 3. Estimativa da geração de RSU de Pau dos Ferros - 2016 a 2036

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Observa-se o aumento linear da geração de resíduos sólidos em Pau dos Ferros (RN), que no primeiro ano é 8.236,2 toneladas. O mesmo apresenta crescimento linear até o ano de 2036 com 9.608,50 toneladas, tendo o incremento anual de 68,2 toneladas por ano, uma vez que não ocorra a adoção de nenhuma medida administrativa de gerenciamento destes RSU, tal como promoção da sensibilização da sociedade.

3.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO E BIOGÁS

De posse dos dados foi possível realizar a estimativa de produção de metano e biogás para os 3 cenários, sendo determinado um valor de geração de metano de 0,054 kg CH₄/kg RSD para o cenário 1 considerando a simulação com adoção de um aterro sanitário, já o cenário 2 obteve um valor de 0,019 kg CH₄/kg RSD, uma vez que a fração orgânica dos resíduos é destinada para o processo de compostagem.

Já para o cenário 3, o valor de L₀ permanece o mesmo que o do cenário 1, já que a mesma totalidade de resíduos sólidos produzidos pela cidade de Pau dos Ferros (RN) será destinada para processo de pirólise.

De acordo com as variáveis aplicadas, tem-se o resultado da estimativa de metano e biogás para os 3 cenários propostos descritos na Figura 4.

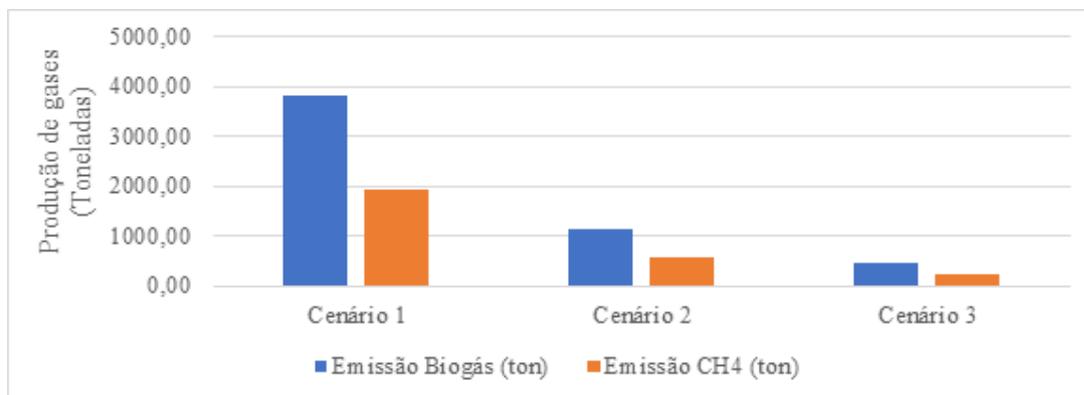


Figura 4. Estimativa de produção acumulada de metano e biogás pelo aterro sanitário em Pau dos Ferros (RN) - 2016 a 2036.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

O cenário em que houve uma maior produção de metano e biogás foi o cenário 1, pois ele destina sua totalidade de resíduos para o aterro sanitário, ocasionando maior produção de gases. Já o cenário em que houve menor produção foi cenário 3, já que o aterro recebe apenas o produto restante da pirólise.

Os resultados podem ser confrontados aos encontrados por Figueiredo (2012), ao realizar a estimativa de biogás em um aterro sanitário para o recebimento de RSU de 51 consorciamentos entre cidades denominados de ATO - Arranjo Territorial Ótimo no Estado de Minas Gerais. Semelhante a este trabalho, o autor realizou a proposta de 3 cenários distintos, sendo estes: destinação dos resíduos para aterro sanitário, destinação de resíduos orgânicos como papel, papelão e restos alimentares para compostagem e destinação de resíduos para pirólise.

Comparando os resultados obtidos de estimativa de biogás de RSU com a de um ATO de menor população, sendo esta de 239.924 habitantes (FIGUEIREDO, 2012), tem-se a Tabela 3.

Tabela 3. Comparação entre as produções de biogás (toneladas)

	Estimativa calculada de biogás	Estimativa para ATO
Cenário 1	3.832,56	47.471,54
Cenário 2	1.129,76	31.492,75
Cenário 3	474,13	30.943,98

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

As emissões contabilizadas no ATO muito se excedem à estimada calculada, fato esse devido à população ser cerca de 8 vezes maior que a de Pau dos Ferros (RN). Outro ponto a se destacar é que a pouca diferença entre os cenários 2 e 3 calculados por Figueiredo (2012) deve-se ao fato de que, no último cenário, assume-se que os municípios do ATO com população maior que 30 mil habitantes irão destinar seus resíduos para aterro sanitário (resultando maiores volumes de material orgânico) com os resíduos da pirólise dos municípios inferiores a 30 mil habitantes.

3.4 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: CENÁRIO 1

O cenário 1 considera que todo o resíduo gerado pela cidade de Pau dos Ferros (RN) tem como destino o aterro sanitário, sem passar por nenhum tratamento. Conforme ocorre a disposição do resíduo no aterro sanitário, inicia-se o processo de decomposição anaeróbia, que irá ter como resultado o biogás. Essa produção inicia-se já no primeiro ano de abertura do aterro (2016) e tem a primeira contabilização no ano de 2017 com 24,27 toneladas de biogás. Essa produção cresce ao longo do funcionamento do aterro, tendo sua produção máxima no último ano de funcionamento (2036) com 308,75 toneladas de biogás.

Após o encerramento do aterro sanitário, os resíduos que ainda estão confinados continuam com sua produção de biogás. Entretanto, por não receber mais resíduos, essa produção cai ao longo dos anos tendo sua produção considerada mínima no ano de 2130.

Tal comportamento pode ser explicado pelas fases de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos através da presença de micro-organismos que realizam a transformação de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples (GOMES *et al.*, 2012). Tais fases são: i) fase aeróbia inicial; ii) fase de transição; iii) fase ácida anaeróbia; iv) fermentação metânica; e v) fase de maturação.

De acordo com Gomes *et al.* (2012), na fase aeróbia inicial o CO₂ é produzido proporcionalmente ao consumo de O₂, já a redução de N₂ é relativamente pequena. Na fase de transição, o meio que era aeróbio começa a transformar-se em anaeróbio devido ao consumo de oxigênio, caracterizado também por baixas concentrações de N₂. Já na fase ácida anaeróbia intensifica-se a atividade microbiana e o CO₂ é o principal gás gerado. Entretanto, apenas em alguns casos observa-se a produção de CH₄. É apenas na fase seguinte, de fermentação metânica, que os micro-organismos metanogênicos convertem ácido acético, CO₂ e H₂ em CH₄ e CO₂. Após a conversão em CH₄ e CO₂ de praticamente todo o resíduo orgânico, inicia-se a fase de maturação que é caracterizada pela redução considerável da taxa de geração de gás e pelo ressurgimento de N₂ e O₂.

Pode-se observar o comportamento da produção de metano e biogás no aterro sanitário durante e após a sua vida útil na Figura 5.

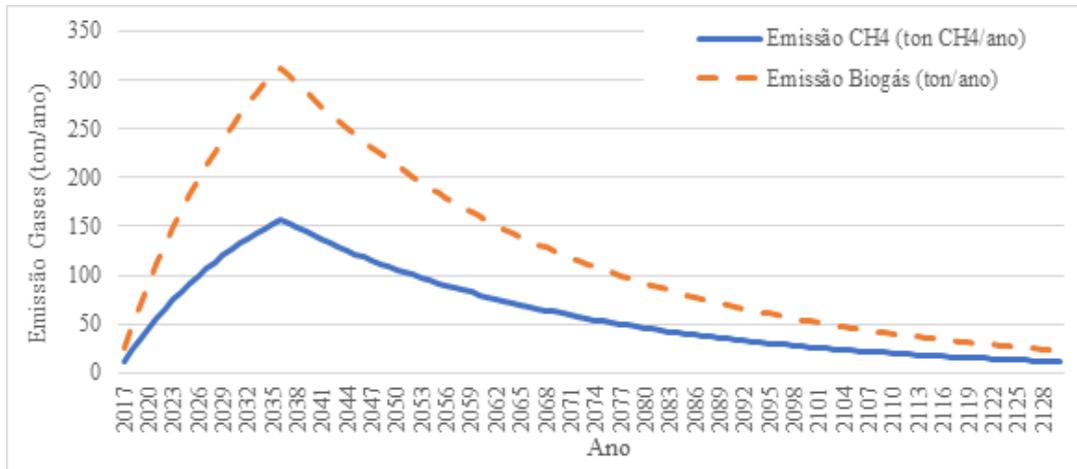


Figura 5. Projeção da geração de gases no aterro sanitário de Pau dos Ferros (RN)

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Os comportamentos das emissões de gases podem ser relacionados às fases de degradação biológica que ocorrem no processo de bioestabilização dos resíduos.

Após as disposições dos resíduos, a atividade microbiana começa a realizar o processo de bioestabilização dos resíduos, tendo como principal gás formado no início da de degradação, o CO_2 , que tem sua maior produção ao final da fase ácida anaeróbica (III). Embora que o metano exista em pequenas concentrações no início do processo, tem surgimento ao final da fase III, crescendo exponencialmente em seguida e permanecendo constante durante toda a fase de fermentação metânica (IV). E é somente ao final dessa fase que o CH_4 e o CO_2 decrescem até chegarem em valor mínimo ao final da fase de maturação (V).

Dessa forma, ao observar a Figura 5, verifica-se que em 2037 ocorre a máxima produção de biogás e metano, caracterizando a fase metanogênica, coincidindo com o tempo de vida útil previsto para o aterro para deposição de RSU, dessa forma corroborando com os resultados obtidos por Barrak (2017). Após tal período ocorre o decaimento da produção de tais gases iniciando a fase de maturação, tal fato pode-se justificar devido ao aterro já não receber RSU e pela recalcitrância microbiana, ou seja, a incapacidade dos micro-organismos na degradação e reciclagem de nutrientes (BARRAK, 2017).

3.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: CENÁRIO 2

No cenário 2 é considerada uma triagem dos resíduos sólidos urbanos em CTRs, as quais realizam a separação dos resíduos orgânicos alimentares e os encaminham para compostagem. Com isso, serão segregados os resíduos orgânicos alimentares e destinados para compostagem, reduzindo o volume a ser direcionado para o aterro, conseqüentemente prolongando o tempo de vida útil do equipamento, tal como promovendo menor área útil para dimensionamento do projeto executivo.

Dessa maneira, cerca de 45,4% da totalidade dos resíduos são destinados para este fim, restando apenas 54,6% da totalidade dos resíduos destinados para o aterro sanitário. Observa-se a distribuição e tendência da produção de metano e biogás durante a vida útil do aterro e após o seu encerramento na Figura 6.

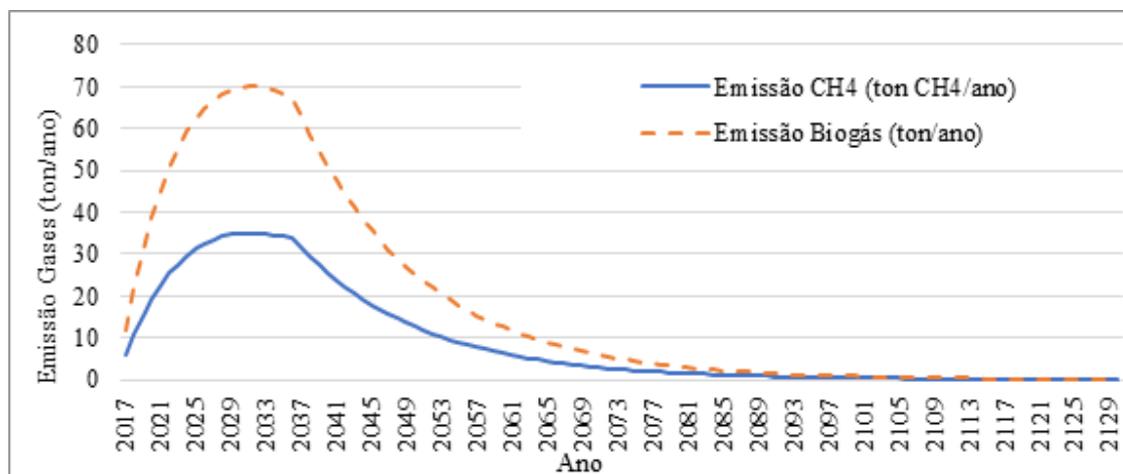


Figura 6. Projeção da geração de gases no aterro sanitário de Pau dos Ferros (RN), com destino da matéria orgânica para compostagem

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Percebe-se uma menor produção de metano e biogás em relação ao cenário 1. A produção que no primeiro ano é de 11,33 toneladas de biogás cresce durante a vida útil do aterro, tendo a sua produção máxima no último ano de funcionamento com 64,80 toneladas de biogás. Após o encerramento, a produção decresce chegando ao seu valor mínimo no ano de 2127. Logo, em virtude da ausência de materiais de origem orgânica a escala de produção de biogás é inferior, limitada pelas fases ácida e metanogênica.

Assim como no cenário I, a atividade microbiana se inicia com o aumento da produção de CO₂ até o final da fase ácida (III), tendo assim maior contabilização de biogás, enquanto o CH₄ produzido na fase metânica (IV) ocorre em maiores concentrações apenas após 16 anos da disposição dos resíduos.

Uma das vantagens em se adotar a compostagem como forma de tratamento é a geração de um produto que serve como fertilizante utilizável na agricultura (SANTOS *et al.*, 2014). Ao ser adicionado ao solo, pode melhorar as suas características físicas, físico-químicas e biológicas para o manejo do solo e da cobertura vegetal, podendo o mesmo ser utilizado no solo do próprio aterro sanitário, mediante criação de uma área de cinturão verde, ou mesmo de horta de mudas.

Assumindo esse tratamento, faz-se necessário projetos de educação ambiental principalmente em escolas para que se possa incentivar a população a realizar a segregação e o tratamento de seus resíduos tanto em sua própria casa, como em locais e órgãos públicos. Outra forma de auxiliar a segregação prévia dos RSU é que haja dois tipos de coletas de resíduos: uma feita apenas para o lixo úmido e outra para o resíduo seco.

3.6 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: CENÁRIO 3

Neste cenário é considerado que todo o resíduo sólido urbano é destinado para a pirólise, tratamento que consiste na degradação térmica de hidrocarbonetos na ausência de oxigênio e em temperaturas entre 300 a 1000 °C (COSENZA *et al.*, 2014). O processo possibilita uma redução de 80% no volume de resíduos. Logo, o resíduo destinado para o aterro sanitário corresponde a apenas 20% da totalidade dos resíduos sólidos produzidos fazendo com que, dessa maneira, haja um aumento da vida útil do aterro sanitário ou ainda redução na área útil das células do aterro. Observa-se o comportamento da produção de metano e biogás no aterro sanitário durante e após a sua vida útil na Figura 7.

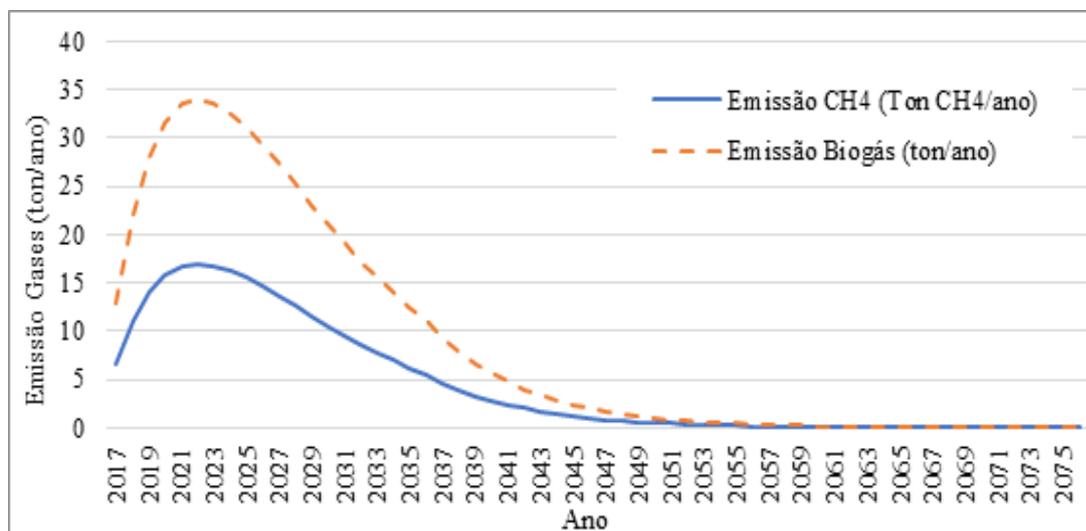


Figura 7. Projeção da geração de gases no aterro sanitário de Pau dos Ferros (RN), com resíduos da pirólise
Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Percebe-se que a produção de metano e biogás é a menor entre os 3 cenários, já que o aterro recebe apenas o produto da pirólise. A produção de biogás inicia-se no primeiro ano com 12,83 toneladas de biogás e devido o resíduo a ser destinado tratar-se das cinzas resultantes do processo, sua decomposição e a consequente conversão em biogás ocorre mais rapidamente devido a fatores químicos, físicos e biológicos envolvidos nas etapas dessa conversão. Pelo comportamento do gráfico, percebe-se uma acelerada digestão do material, atingindo seu valor máximo já no ano de 2021 e decrescendo exponencialmente até o seu valor mínimo no ano de 2074.

O tratamento de resíduos sólidos através do processo de pirólise apresenta vantagens como a capacidade de estabilização das características físico-químicas e biológicas dos resíduos, bem como o potencial de geração de energia na forma de combustíveis. Entretanto, fatores como o custo para o tratamento dos gases oriundos do processo e a necessidade de combustíveis necessários para iniciar o processo de queima são fatores econômicos limitantes para o uso de tal tecnologia (LEME *et al.*, 2017).

Diferente do processo de incineração, a pirólise minimiza as emissões de poluentes formados em atmosfera oxidante, tais como as dioxinas e os furanos (FILHO *et al.*, 2014), sendo esse outro fator positivo para o uso desse tratamento em relação aos incineradores.

De acordo com Caibre *et al.* (2016), a viabilidade econômica do processo de pirólise depende de fatores como: investimento inicial contemplando os custos com projetos, construção civil, instalações e equipamentos; custos e despesas compreendidos pelos gastos com materiais de escritório; depreciação anual dos equipamentos; custos de manutenções corretivas e preventivas de equipamentos; impostos, tributos e preço de venda dos subprodutos gerados.

Na análise de viabilidade econômica realizada por Caibre *et al.* (2016), a qual avaliou-se o fluxo financeiro entre entradas e saídas através de 7 diferentes cenários de aproveitamento para uma cidade de médio porte, observou-se que o tratamento de pirólise não se mostrou atrativo devido aos elevados custos operacionais a eles relacionados. Pode-se presumir o mesmo para o município de Pau dos Ferros (RN) por tratar-se de uma cidade de pequeno porte e que provavelmente não teria condições financeiras de arcar com tais investimentos.

3.7 POTENCIAL ENERGÉTICO

Todo o metano presente no biogás produzido durante a vida útil do aterro sanitário possui potencial de ser utilizado como fonte energética. Dessa maneira, tanto há o aproveitamento de forma sustentável do biogás, como evita que o mesmo seja emitido para a atmosfera. Considerando-se os 20 anos de funcionamento do aterro e adotando-se o valor de 13,88 kWh/kg de gás metano, têm-se os resultados para o potencial energético do aterro descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Potencial energético dos 3 cenários para disposição de RSU - 2016 a 2036

	Emissão de gás metano (kg)	Potencial energético (Gwh)
Cenário 1	1922427,29	26,68
Cenário 2	564878,09	7,84
Cenário 3	237065,08	3,29

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Segundo Souza *et al.* (2019), com a potência de 150 kW, enquanto produtora de energia elétrica a partir da conversão do biogás em eletricidade para seu autoconsumo, no regime de compensação de energia, a unidade é caracterizada como minigeração distribuída, por produzir entre 75 kW e 5 MW de potência instalada, podendo, dessa forma, suprir além das necessidades pontuais ainda suprir de modo complementar a matriz energética local.

De acordo com os valores apresentados, é possível perceber que o cenário que apresentou maior potencial energético foi o cenário 1, pois o aterro sanitário receberia em sua totalidade os RSU. E, devido à alta carga orgânica presente nos resíduos a serem dispostos, tem-se como consequência uma maior produção de gás metano e um maior potencial energético. Em contrapartida, o mesmo rapidamente ocuparia o volume das células de descarte, demandando maior área útil para o projeto, além de apresentar mais riscos em termos estruturais.

No caso do cenário 2, houve uma redução de 70,7% no potencial energético, já que neste cenário adota-se que o material orgânico contido nos resíduos será encaminhado para a compostagem, o que reduz significativamente a produção de gás metano e consequentemente o seu potencial energético.

Já o cenário 3 foi o que apresentou menor potencial energético entre os 3 cenários analisados. Devido à composição dos resíduos dispostos no aterro sanitário tratar-se de um resíduo inerte resultante da pirólise, o mesmo possui reduzida carga orgânica e volume extremamente reduzido, representando apenas 12,3% do potencial energético do primeiro cenário.

Tais valores de potencial energético podem ser comparados aos calculados por Piñas *et al.* (2016), em um estudo desenvolvido no município de Três Corações, localizado no Estado de Minas Gerais. O mesmo estimou a vazão de biogás gerada pelo aterro sanitário do município durante 20 anos de funcionamento, bem como o seu potencial e geração de energia elétrica. O acúmulo de biogás no aterro sanitário durante toda a sua vida útil resultou um potencial de 128,68 GWh, valor este que muito excede ao calculado neste trabalho. Tal fato pode ser explicado devido à população do município em questão ser mais que o dobro da de Pau dos Ferros (RN), e a sua elevada geração *per capita* de resíduos podendo chegar a 0,91 kg/hab./dia.

Em relação à emissão de gases do efeito estufa, como o gás metano (CH₄) e a sua equivalência em dióxido de carbono (CO₂), está descrita na Tabela 5.

Tabela 5. Emissões de metano e equivalência em CO₂

	Ton CH ₄	Ton CO ₂
Cenário 1	1922,43	40.370,97
Cenário 2	564,88	11.862,44
Cenário 3	237,06	4.978,37

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Considerando 100% da captura e combustão do gás metano, deixarão de ser lançadas 40.370,97 toneladas de CO₂ no cenário 1, 1.862,44 toneladas de CO₂ no cenário 2 e 4.978,37 toneladas de CO₂ no cenário 3, uma vez que a combustão completa de um mol de metano produz um mol de gás carbônico totalizando em 21 vezes menos poluente o que o gás metano. As emissões que foram evitadas podem ser credenciadas para a geração de créditos de carbono. Além disso, seu aproveitamento como fonte energética elimina esse problema, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, uma vez que é classificado como uma fonte renovável de energia.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos cenários propostos avaliados foi possível concluir que o cenário que apresentou maior vazão de biogás e maior potencial energético foi o cenário 1, devido destinar em sua totalidade os resíduos para o aterro sanitário o que gera uma maior quantidade de biogás devido à alta carga orgânica contida nos RSU. Entretanto, esse cenário de disposição tem como desvantagem maior a área a ser utilizada e menor tempo de vida útil do aterro, já que receberia um volume maior de resíduos.

Já no caso do cenário 2, houve uma significativa redução da produção de biogás e de seu potencial energético. Entretanto, possui outras vantagens como aumento da vida útil do aterro, já que recebe um volume menor de resíduos bem como tem como produto final da compostagem o húmus, além de áreas externas e programas de jardinagem e recuperação de áreas.

O cenário 3 foi o que apresentou menor emissão de biogás e teve menor potencial energético, em que a totalidade de RSU passaria pelo processo de pirólise, tendo apenas o seu produto final destinado ao aterro sanitário. Apesar dessa técnica evitar a emissão de gases (CH₄ e CO₂) e reduzir consideravelmente a vida útil do aterro sanitário, a mesma possui maiores custos envolvidos para dar como tratamento aos resíduos sólidos o processo de pirólise, além de envolver a queima do material.

Os picos de produção foram no ano de 2037 para o cenário 1, 2031 para o cenário 2 e 2021 para o cenário 3, sendo o valor de pico do cenário 3 cerca de 11,67% do cenário 1.

Realizando tais tratamentos dos RSU da cidade de Pau dos Ferros (RN), previne-se a poluição do ar, da água e do solo, impedindo que o biogás e o lixiviado produzidos pelos resíduos se dispersem no meio ambiente. Além da adequação à PNRS, que regulamenta que os municípios deem adequado destino aos seus resíduos, outra consequência positiva é a possibilidade de comercialização de créditos de carbono.

Quanto ao potencial energético em cada cenário avaliado, é possível que o mesmo seja utilizado como combustível para gerar eletricidade no próprio aterro sanitário, implementando a matriz energética local.

Entretanto, para se dar início ao processo de aproveitamento do biogás, são necessários investimentos em maquinários capazes de realizar a transformação do biogás em energia elétrica, possibilitando a viabilização de instalação de pequenas centrais elétricas para atender a demanda energética dos aterros.

O modelo do IPCC apresentou uma aplicabilidade nesse método possibilitando projeções em que os aterros ainda não se apresentassem funcionando. Nesse contexto, aplicou-se a mesma metodologia para criar cenários alternativos futuros, possibilitando simular a adoção de medidas complementares para otimização do tempo de vida útil do aterro sanitário.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2016. São Paulo: ABRELPE, 2016.

BARAK, E. Análise do potencial teórico da geração de energia a partir do biogás no aterro sanitário de Varginha/MG. **Natural Resources SUSTENERE**, v. 7, n. 1, p. 61-72, 2017.

BORGES, H. D. **Avaliação da viabilidade de recuperação e uso de biogás em uma estação de tratamento de esgoto**. 2016. 58f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

BRAIDA, V. *et al.* **Estudo dos resíduos sólidos urbanos no município de Ijuí-RS para aproveitamento energético e melhoria do processo de deposição dos mesmos**. Salão do Conhecimento - Ciência Alimentando o Brasil. 2016.

CARVALHO, A. L.; LYRA, G. B.; COSTA, T. S. Estimativa de geração de biogás no aterro sanitário da bacia leiteira do Estado de Alagoas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, p. 73-88, 2019.

COSTA, B. S.; RIBEIRO, J. C. J. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: direitos e deveres**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2013.

FIGUEIREDO, J. C. **Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais**. 2012. 138f. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte, MG, 2012.

FILHO, A.; FERREIRA, A.; MELO, G.; LANGE, L. Tratamento de resíduos de serviços de saúde pelo processo da pirólise. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 19, n. 2, p. 187-194, 2014.

GOMES, E. R. Análise das concentrações de biogás em lixão desativado no município de Juazeiro do Norte-CE. *In*: CONGRESSO NACIONAL EM EDUCAÇÃO E PRÁTICAS INTERDISCIPLINARES, CONEPI. **Anais [...]**. 2012.

JACO, R. O. *et al.* Estimativa teórica da produção de biogás do aterro controlado de Quixadá-CE. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DE ENGENHARIA E AGRONOMIA - CONTECC 2015, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, CE, Brasil.

LEME, G. R. *et al.* Utilização da pirólise para o tratamento de resíduos no Brasil. *In*: 8º FÓRUM NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 8., 2017. **Anais [...]**. Curitiba: Fórum Nacional de Resíduos Sólidos, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades, Pau dos Ferros**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil-RN/pau-dos-ferros/panorama>. Acesso em: 01 dez. 2017.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATES CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Japan: IGES, 2006.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J-P.; VILAR, O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, p. 153-161, 2009.

PIÑAS, J. A. V. *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.

SANTOS, L. A. V. **Gerenciamento de resíduos em torno da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró (RN)**. 2016. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, RN, 2016.

SANTOS, A. T. L. *et al.* Aproveitamento da fração orgânica dos resíduos urbanos para produção de composto orgânico. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, Rondônia, v. 3, n. 1, p. 15-28, 2014.

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). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 887-896, 2019.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2006.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills (EPA-600/R-05/072)**. Washington, 2005. 66p.