

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)

Analysis of the potential use of landfill biogas energy and simulation of greenhouse gas emissions of different municipal solid waste management scenarios in Varginha, MG, Brazil

Alessandra Ribeiro de Souza^{1*} , **Alex Takeo Yasumura Lima Silva¹** ,
Aline Bhering Trindade¹ , **Flávio Ferreira Freitas¹** , **Jaíne Alves Anselmo¹** 

RESUMO

O presente trabalho propõe avaliar a viabilidade econômica e ambiental de aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário do município de Varginha (MG), além de analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o uso de energia em diferentes cenários hipotéticos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU). Considerou-se uma projeção de geração de RSU em 20 anos de funcionamento do aterro, cuja produção de biogás foi estimada por meio do *software* LandGEM[®]. A análise de viabilidade econômica foi realizada por meio dos indicadores de valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). As emissões de GEE foram estimadas aplicando-se o modelo *Waste Reduction Model* (WARM[®]), considerando o cenário atual e três cenários alternativos de gerenciamento de RSU. Os cenários diversificaram em estratégias de reciclagem, digestão anaeróbia, incineração e disposição em aterro, com recuperação energética. Somente o aproveitamento energético com potência de 150 kW resultou em viabilidade econômica. Já os maiores benefícios ambientais foram obtidos pelo cenário 3, baseado na recuperação de materiais recicláveis, digestão anaeróbia e incineração dos RSU, reduzindo consideravelmente o volume de RSU destinados ao aterro. Dentre as práticas de gerenciamento dos cenários propostos, a reciclagem obteve os maiores ganhos energéticos e remoção de emissões de GEE.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; manejo de resíduos; biogás; aproveitamento energético.

ABSTRACT

The present work proposes to evaluate the economic and environmental viability of energy recovery from biogas in the landfill of Varginha-MG, as well to analyze greenhouse gas emissions (GHG) and energy consumption in different scenarios of municipal solid waste (MSW) management. A 20-year projection of MSW generation and landfill operation were considered, whose biogas production was estimated through LandGEM software. The economic feasibility analysis was performed using the net present value (NPV), and the internal rate of return (IRR) as indicators. GHG emissions were estimated by applying the WARM model (Waste Reduction Model) considering the current MSW management scenario and three alternative ones. The scenarios diversified into recycling strategies, anaerobic digestion, landfill disposal and incineration with energy recovery. Only the energy recovery with a power of 150 kW resulted in economic viability. Moreover, the largest environmental benefits were obtained by scenario 3, based on the recovery of recyclable materials, anaerobic digestion and incineration of MSW, considerably reducing the volume of MSW landfilled. Among all management practices of the proposed scenarios, recycling resulted in greater energy gains and GHG emission removal.

Keywords: municipal solid waste, waste management, biogas, energy recovery.

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

*Autor correspondente: alessandra.ribeirods@gmail.com

Recebido: 25/10/2017 - Aceito: 02/08/2018 - Reg. ABES: 187066

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a temática dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tem ganhado destaque no cenário ambiental. No Brasil, ganhou reforços com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), que estabeleceu um marco regulatório no setor de resíduos sólidos (BRASIL, 2010a). Moreira, Silva e Barros (2017) destacam alguns princípios da referida lei, tais como responsabilidade compartilhada, análise do ciclo de vida, logística reversa, padrões sustentáveis de consumo e produção, reciclagem, integração dos catadores no gerenciamento, entre outros. No entanto, segundo os autores, as principais mudanças estão nas condições da disposição final dos RSU, cuja problemática é destacada como um dos maiores desafios do gerenciamento sustentável. O manejo incorreto dos RSU gera, por sua vez, impactos ambientais e também na saúde da população (GOUVEIA, 2012).

Entre suas diversas instruções, a política prevê como prioridades a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos, incluindo seu aproveitamento energético, considerando como último recurso a disposição final em aterros (BRASIL, 2010a). A prática de disposição final em aterros sanitários é desencorajada devido à produção de chorume e à emissão de poluentes, aliadas à escassez de espaços adequados consequentes dos avanços de tecnologias e urbanização. Contudo, independentemente da eficiência da aplicação de técnicas de manejo sustentáveis de RSU, a existência de aterros sanitários é sempre necessária em função da produção final de resíduos pela execução de qualquer atividade (OTHMAN *et al.*, 2013).

Esses aterros, normalmente, quando sedimentados e fechados, não possuem aeração e, com isso, torna-se propícia a proliferação de bactérias e arqueas anaeróbias, produzindo, conseqüentemente, o biogás, rico em metano. Esse biogás, por sua vez, pode ser de baixo, médio ou alto teores, sendo coletado por tubulações onde será conduzido e/ou processado e aproveitado (BARROS, 2013). Ele pode ser convertido para diversas formas de energia útil, tais como térmica para aquecimento de água, ar ou ambiente e eletricidade a partir de tecnologias como microturbinas, motores a pistão, turbinas a gás e vapor, bem como sistemas de ciclo combinado para potências superiores a 10 MW (CRA, 2004).

Atualmente, no Brasil, existem basicamente duas formas de aproveitar os RSU para geração de energia elétrica. O biogás possui capacidade instalada de geração elétrica de 122.250 kW, e o carvão de resíduo urbano, com uma usina instalada em Cabreúva (SP), apresenta 2.700 kW de capacidade instalada. O carvão proveniente do resíduo urbano passa por um processamento físico-químico no qual sofre o processo de carbonização em um ambiente ausente de oxigênio. Esses dois aproveitamentos juntos apresentam uma participação de aproximadamente 0,08% na matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2017).

De acordo com um estudo realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), em conjunto com o Programa das Nações Unidas

para o Desenvolvimento (PNUD), o Brasil possui um grande potencial de crescimento em relação ao potencial de geração de energia a partir de saneamento como fonte alternativa de energia renovável (BRASIL, 2010b). No entanto, existem entraves técnicos, tecnológicos e financeiros e déficit no serviço de saneamento básico que impedem o avançamento dessa fonte como uma matriz limpa, renovável e significativa dentro do mercado energético brasileiro.

Para que sejam sustentáveis, as estratégias de manejo dos resíduos sólidos devem maximizar a recuperação energética e material e, ao mesmo tempo, reduzir a poluição e a quantidade final de resíduos destinados aos aterros. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e as mudanças no setor econômico, o número de opções disponíveis para definição de estratégias de gerenciamento integrado está em constante crescimento, fazendo com que tomadores de decisões se questionem se o método de gerenciamento utilizado é o mais eficaz para seus objetivos (CHERUBINI; BARGIGLI; ULGIATI, 2009; ALLESCH; BRUNNER, 2014).

Nesse contexto, este trabalho propõe o estudo da viabilidade econômica e ambiental do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário do município de Varginha, no estado de Minas Gerais, bem como objetiva analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o uso de energia em diferentes cenários hipotéticos de gerenciamento de RSU.

METODOLOGIA

Local de estudo

O município de Varginha está localizado na região Sudeste do Brasil, no sul de Minas Gerais, e tem uma população de 123.081 habitantes em uma área de 396 km² (IBGE, 2010). A cidade é um centro de industrialização e comercialização da produção de café, contemplando o maior produto interno bruto (PIB) da região do sul de Minas e um dos maiores do estado.

De toda a população da cidade, 96,73% das pessoas são atendidas com coleta convencional de RSU, e apenas a zona rural não é coberta. Até o ano de 2012, os resíduos eram destinados a um lixão do município, que posteriormente atuou como aterro controlado (PREFEITURA DE VARGINHA, 2013) até ter suas atividades encerradas em 2017. O município se regularizou no mesmo ano com o início da operação do aterro sanitário, localizado aproximadamente a 8 km do centro da cidade. Em 2015, estimou-se uma quantidade de 32.200 t de resíduos destinada ao aterro controlado de Varginha (SNIS, 2015).

Apesar de contar com 14 empresas de reciclagem, não há informações repassadas à prefeitura sobre a quantidade e qualidade dos resíduos recicláveis coletados por elas. Dos resíduos que chegaram para triagem no ano de 2012, a maior parte era compostos de metais, plástico, papelão, papel, vidro e rejeitos (PREFEITURA DE VARGINHA, 2013).

Projeção da população e da quantidade de resíduos sólidos urbanos

A projeção populacional e o cálculo da quantidade de RSU gerada pela área de estudo são fundamentais nas análises de produção de biogás no aterro sanitário e das simulações de geração de GEE. Assim, estimou-se o crescimento populacional com base em dados históricos dos censos demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para um período de 20 anos (2017 a 2037), por meio do modelo de taxa decrescente de crescimento, descrito pela Equação 1, cujas variáveis são determinadas pelas Equações 2 e 3 (BARROS, 2013).

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \left[1 - e^{-k_d(t-t_0)} \right] \quad (1)$$

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

$$k_d = \frac{-\ln \left[(P_s - P_2) / (P_s - P_0) \right]}{t_2 - t_0} \quad (3)$$

Em que:

P_t = população estimada no ano t (habitantes);

P_0 , P_1 e P_2 = populações nos anos t_0 , t_1 e t_2 (habitantes) (censos demográficos);

P_s = população de saturação (habitantes);

k_d = coeficiente.

Para o cálculo da geração de resíduos sólidos, adotou-se o índice de geração *per capita* de RSU de 0,7 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ no ano de 2015 (SNIS, 2015), considerando, para a projeção, um incremento anual de 1% do índice.

Estimativa da produção de biogás e potencial energético

Muitos são os *softwares* desenvolvidos para a estimativa do potencial de geração de biogás em um aterro sanitário de resíduos sólidos, como o LandGEM[®] (USEPA, 2005) e o Biogás[®] (CETESB, 2006). Por apresentar baixas variações e muitas similaridades, o estudo foi realizado tomando como base o LandGEM[®]. Esse modelo permite realizar a previsão das taxas de emissão de gás total do aterro, a saber: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), compostos orgânicos não metano e poluentes atmosféricos individuais de aterros sanitários de RSU. A Equação 4 rege o modelo de geração do LandGEM[®] (USEPA, 2005):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) \cdot e^{-k t_{i,j}} \quad (4)$$

Em que:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m³ CH₄.ano⁻¹);

i = incremento de tempo de 1 ano;

n = (ano do cálculo) – (ano inicial do cálculo);

j = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de geração de metano;

L_0 = capacidade potencial de geração de metano (m³.Mg⁻¹);

M_i = massa de resíduos aceita do *i*-ésimo ano (Mg);

$t_{i,j}$ = idade da *j*-ésima seção de massa de resíduo M_i , aceita no *i*-ésimo ano (anos em número decimal, por exemplo, 3,2 anos).

Os dados de geração de RSU nos anos de 2017 a 2037 são então ingressados no modelo, que fará a projeção da quantidade de biogás gerada ao longo da vida útil do aterro sanitário. Como parâmetros de entrada, considerou-se uma taxa de coleta de 100% dos RSU, o potencial de geração de metano (L_0) de 170 m³ de CH₄ e a taxa de geração de metano (k) de 0,05.

A partir da vazão estimada de metano gerado por ano, pode-se determinar, por meio da Equação 5, a potência da central a biogás a ser construída, considerando, entre outros fatores, a eficiência de conversão do grupo motor-gerador (no caso, motor a pistão com rendimento de 25%), a taxa de captação do biogás (60%) e também seu poder calorífico (modificado de CETESB, 2006):

$$P = Q_{CH_4} \cdot E \cdot E_c \cdot PC_{CH_4} \cdot \left(\frac{1}{31.536.000} \cdot \frac{1}{1.000} \right) \quad (5)$$

Em que:

P = potência disponível a cada ano (kW);

Q_{CH_4} = vazão de metano a cada ano (m³ CH₄.ano⁻¹);

PC_{CH_4} = poder calorífico do metano (igual a 35,53.10⁶ J.m³ CH₄⁻¹);

E_c = eficiência de coleta de biogás (%);

31.536.000 = número de segundos em 1 ano (s.ano⁻¹);

1/1.000 = para transformação da unidade de J.s⁻¹ para kW.

Análise da viabilidade econômica

Para a análise de viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás no período de 2017 a 2037, consideraram-se três possibilidades diferentes: um aproveitamento de 150 kW com entrada em operação em 2020, outro de 300 kW a partir de 2024 e, finalmente, um com 450 kW com início em 2028, e as entradas em operação estão relacionadas à geração de biogás do aterro.

Para a análise, utilizaram-se como indicadores econômicos o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR). O VPL, calculado a partir da Equação 6, traz os valores futuros do benefício líquido, isto é, as receitas e os custos do período de funcionamento do empreendimento para o presente, corrigidos por uma taxa de juros (RODRIGUES; MELO, 2017).

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{R_j - C_j}{(1+i)^j} - I \quad (6)$$

Em que:

R_j = receitas do período j ;

C_j = custos do período j ;

i = taxa de juros;

I = investimento inicial.

Conforme Rodrigues e Melo (2017), um VPL acima de zero indica a viabilidade do empreendimento.

A taxa de juros utilizada foi a de 8,7% a.a., conforme Brasil (2016). Já a TIR pode ser definida como a taxa que zera o VPL, conforme Equação 7.

$$0 = \sum_{j=0}^n \frac{R_j - C_j}{(1 + TIR)^j} - I \quad (7)$$

Em que:

R_j = receitas do período j ;

C_j = custos do período j ;

TIR = taxa interna de retorno;

I = investimento inicial.

Ela deve, segundo Rodrigues e Melo (2017), ser superior à taxa mínima de atratividade (TMA), sendo esta adotada como 15% a.a.

O custo de implantação da central, em dólares, foi obtido por meio da equação proposta por Silva *et al.* (2017) (Equação 8), sendo P a potência a ser instalada (até 1 MW).

$$\text{Custo (US\$)} = 4 \times 10^6 P + 258,311 \quad (8)$$

Considerou-se a conversão de moedas de US\$ 1,00 (dólar americano) para R\$ 3,136 referente ao dia 19 de setembro de 2017, conforme BACEN (2017). Em relação ao valor da tarifa de energia, considerou-se o disposto pela Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012) e sua revisão, a Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015), nas quais se estabelece que a energia ativa injetada pela unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída pode se converter em créditos com a distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica pelo sistema (PIN *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018).

Quanto à produção de energia, de acordo com a ANEEL (2016), a microgeração distribuída é caracterizada por gerar energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto a minigeração distribuída se refere às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas, ou 5 MW para outras fontes como o biogás. No caso em estudo, considera-se que a pequena central geradora atenderá às condições de autossuprimento de energia em baixa tensão no empreendimento.

Em relação ao consumo de energia, por sua vez, as unidades consumidoras de energia são classificadas, no Brasil, em dois grupos tarifários: A, caracterizado pela tarifa binômica, e B, definido pela monômica. A divisão se dá basicamente em função do nível de tensão atendido e, conseqüentemente, da demanda de potência exigida (kW). Enquanto as unidades consumidoras que requerem tensão abaixo de 2,3 kV são classificadas no grupo B (baixa tensão), as do A (alta tensão) são atendidas em tensão igual ou superior a 2,3 kV. Este é subdividido em seis subgrupos, enquadrando geralmente indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande portes, enquanto as unidades do grupo B são divididas em quatro subgrupos: B1 (residencial), B2 (rural), B3 (demais classes, como comercial, industrial e outros) e B4 (iluminação pública) (ANEEL, 2010). Pelo fato de o aterro sanitário não exigir um nível de tensão superior a 2,3 kV, considera-se a instalação enquanto consumidora dentro do subgrupo B3 como unidade consumidora de baixa tensão.

Diante do exposto, conforme realizado por Silva *et al.* (2017), adotou-se, no cálculo da viabilidade, a tarifa de 509,74 R\$.MWh⁻¹, apresentada na Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) pela CEMIG Distribuidora, entre 8 de abril de 2015 e 7 de abril de 2016. Tal tarifa refere-se ao valor da energia homologado e cobrado das unidades consumidoras de classe B3, descontados os impostos ICMS, PIS/PASEP e COFINS, sendo utilizada, na análise de viabilidade econômica, como receita equivalente aos custos evitados de consumo de energia elétrica no contexto do regime de compensação disposto pelas resoluções normativas da ANEEL supracitadas.

Estimativa da emissão de gases de efeito estufa em diferentes cenários de gerenciamento

De acordo com Bove e Lunghi (2006), a geração de biogás pode ocasionar a combustão do metano por centelha ou por autoignição e o conseqüente aumento de GEE pelo fato de emitir metano à atmosfera. Esse gás é inodoro, asfíxiante, inflamável e explosivo e tem potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao dióxido de carbono (IPCC, 2014). No entanto, 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.

Para estimar as emissões de GEE em diversos cenários de gerenciamento de RSU, utilizou-se o modelo de redução de resíduos *Waste Reduction Model* (WARM[®]), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América. A ferramenta WARM[®] tem como objetivo principal o apoio à tomada de decisão através da comparação das implicações no ciclo de vida dos GEE e na energia resultantes de diferentes práticas de gestão de resíduos sólidos, tais como redução na fonte, reciclagem, disposição em aterro sanitário, combustão, digestão anaeróbia e compostagem. Ao comparar um cenário de linha de base a cenários alternativos, portanto, o WARM[®] permite

estimar as alterações de emissões de GEE e o uso de energia ao longo do ciclo de vida de diversos materiais (USEPA, 2016).

Como dados de entrada do modelo, considerou-se a quantidade acumulada de resíduos sólidos estimada para os 20 anos de projeto (808.219,72 t), a distância média de transporte de 8 km até as unidades de tratamento de resíduos e a composição gravimétrica estimada pelo Diagnóstico de Resíduos Sólidos Urbanos do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), conforme Figura 1.

A análise de estimativa dos GEE e de uso de energia foi efetuada para quatro cenários de gerenciamento de RSU, sendo um representativo do cenário atual (linha de base) e outros três alternativos, contemplando diferentes práticas de gestão. A definição dos cenários hipotéticos baseou-se no plano de metas desfavorável proposto pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (versão preliminar) para a Região Sudeste, determinando redução percentual de resíduos recicláveis secos e orgânicos dispostos em aterros em taxas de 50 e 55%, respectivamente. Com exceção do cenário base, considerou-se, para os demais, a recuperação energética do biogás de aterro. Os cenários são descritos a seguir:

- cenário base: corresponde à linha de base para comparação e supõe que todos os RSU são dispostos em aterro sanitário, uma vez que não há informações suficientes para determinação da eficiência de reciclagem no município atualmente;
- cenário 1: representa uma tendência pessimista de gerenciamento, considerando que apenas 10% dos resíduos recicláveis secos são reciclados, sendo o restante destinado ao aterro;

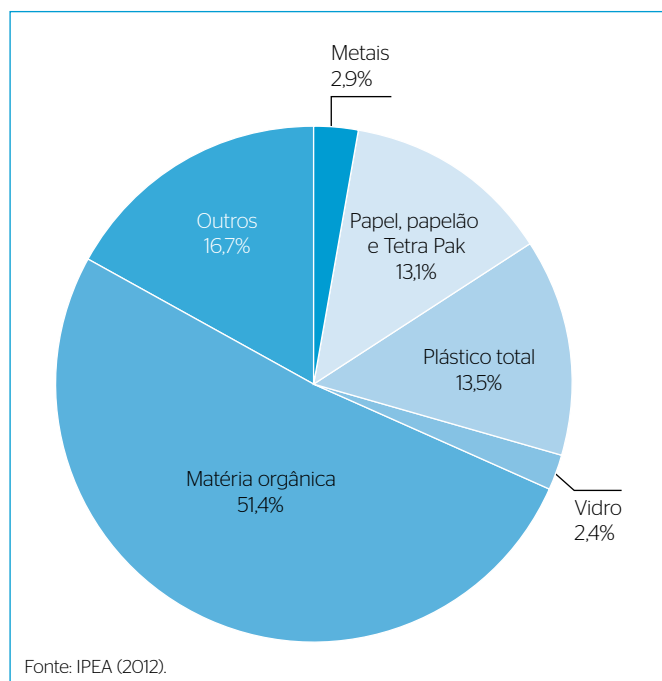


Figura 1 - Composição gravimétrica estimada para os resíduos sólidos urbanos coletados.

- cenário 2: indica uma tendência pouco otimista, estabelecendo enfoque na recuperação de materiais por meio da reciclagem de 30% dos resíduos recicláveis secos e da implementação do tratamento por digestão anaeróbia para 25% dos resíduos orgânicos. Os demais resíduos sólidos misturados são enviados diretamente ao aterro;
- cenário 3: corresponde a um cenário otimista pelo cumprimento do plano de metas mínimo do PNRS. Essa alternativa determina a reciclagem de 50% dos materiais recicláveis e a digestão anaeróbia de 55% dos resíduos orgânicos e inclui ainda a abordagem de redução do volume de resíduos pela incineração de 50% dos resíduos sólidos misturados, sendo o restante encaminhado ao aterro.

Os resultados de GEE são fornecidos em toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (MTCO₂E). A Tabela 1 apresenta os dados quantificados de entrada de RSU em cada unidade de tratamento para os cenários em estudo em 20 anos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Projeção da população e da quantidade de RSU

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, a projeção populacional e a geração de RSU em Varginha (MG) no período de 2017 a 2037. Segundo a curva de taxa decrescente de crescimento, a população aumenta de 128.769 habitantes, em 2017, para 136.421 habitantes em 2037, considerando-se uma população de saturação de 139.759 habitantes. A quantidade anual coletada de RSU, por sua vez, passa de 33.561,7 t.ano⁻¹ para 43.385,3 t.ano⁻¹ no período em estudo, equivalente a um índice de geração *per capita* de 0,87 kg.hab⁻¹.ano⁻¹ no último ano. A quantidade acumulada coletada de RSU, ao fim do projeto, é de 808.219,72 t.

Estimativa da produção de biogás

Através do *software* LandGEM[®], estimam-se geração ou emissão de gases, sendo metano o principal, pois é aquele que tem a capacidade e o poder calorífico necessário para a combustão e geração de energia. Esses gases são

Tabela 1 - Quantidade de resíduos sólidos urbanos destinada às unidades de tratamento segundo as práticas de gerenciamento desses resíduos de cada cenário em estudo.

Cenário	Entradas de RSU em cada tipo de tratamento (t)			
	Reciclagem	Digestão anaeróbia	Incineração	Aterro sanitário
Base	0	0	0	808.219,7
1	25.782,2	0	0	782.437,5
2	77.346,6	103.856,2	0	627.016,9
3	128.911,0	228.483,7	225.412,5	225.412,5

RSU: resíduos sólidos urbanos.

gerados por meio da decomposição anaeróbia dos RSU e são compostos basicamente por metano, dióxido de carbono e compostos orgânicos não metálicos (NMOC, na sigla em inglês), totalizando o gás total de aterro.

A Figura 4 apresenta as frações de gás emitidas pelo aterro sanitário por meio da digestão anaeróbia de forma parcial e também completa. Verifica-se que, em 2038, ocorrem as máximas produções de gás — $43,61.10^5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4.\text{ano}^{-1}$, $43,61.10^5 \text{ m}^3 \text{ CO}_2.\text{ano}^{-1}$ e $0,3489 \text{ m}^3 \text{ NMOC}.\text{ano}^{-1}$ —, resultando em uma produção total de $87,23. 10^5 \text{ m}^3$ de gás de aterro.

Análise da viabilidade econômica

Para o aproveitamento de 150 kW, obteve-se VPL de R\$ 52.075,36 e TIR de 8,8% a.a., enquanto o aproveitamento de 300 kW resultou em um VPL de -R\$ 188.723,82 e uma TIR de 6,4% a.a. Por fim, a recuperação energética de 450 kW resultou em VPL de -R\$ 604.777,04 e TIR de 0,8% a.a.

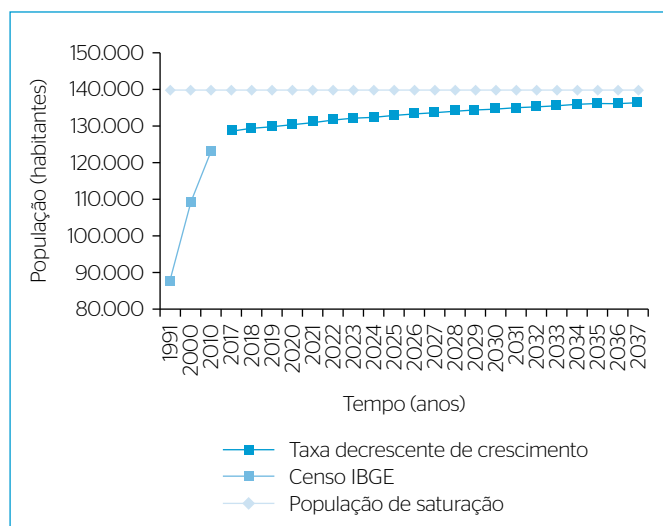


Figura 2 - Projeção populacional de Varginha (MG) entre os anos de 2017 e 2037.

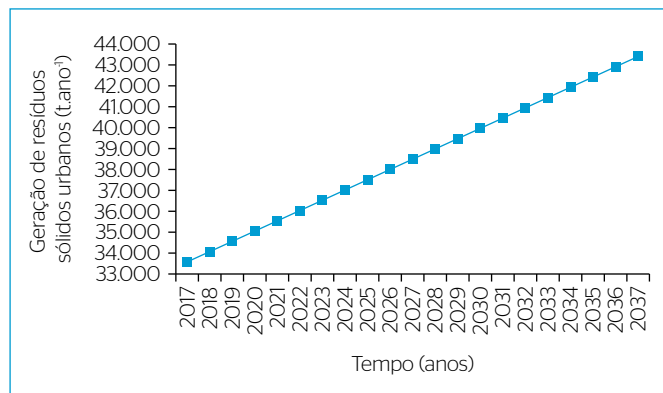


Figura 3 - Projeção da geração de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG) no período de 2017 a 2037.

Assim, os aproveitamentos de 300 kW e 450 kW não foram capazes sequer de pagar o investimento inicial, ao passo que o aproveitamento de 150 kW conseguiu fazê-lo, tendo, teoricamente, viabilidade econômica, embora a TIR de 8,8% seja inferior a TMA (15%), demonstrando ser um investimento sem atratividade econômica.

As condições de análise de viabilidade, no entanto podem variar, sendo mais favoráveis ou desfavoráveis. Em estudo realizado por Barros, Tiago Filho e Silva (2014), constatou-se viabilidade financeira de aproveitamento energético de biogás de aterro apenas para populações superiores a 200 mil habitantes. Assim, os autores indicam a necessidade urgente de formulação de políticas que incentivam a utilização de aterros sanitários como fonte de energia renovável, ampliando o número de iniciativas financeiras econômicas para geração de energia para populações inferiores a esse número. Deve-se levar em consideração ainda as questões ambiental e energética ao se decidir pelo investimento na geração.

Com a potência de 150 kW, enquanto produtora de energia elétrica a partir da conversão do biogás em eletricidade para seu autoconsumo, dentro do regime de compensação de energia, a unidade é caracterizada como minigeração distribuída, por produzir entre 75 kW e 5 MW de potência instalada.

Estimativa do potencial energético de conversão do biogás em energia elétrica

Considerando os parâmetros adotados, os resultados anuais de potência da central a biogás são apresentados na Figura 5.

Pela análise de viabilidade econômica do empreendimento, notou-se que a potência do motor a pistão para que o projeto seja viável sob a ótica econômica deve ser de 150 kW. Assim, a área superior à linha de

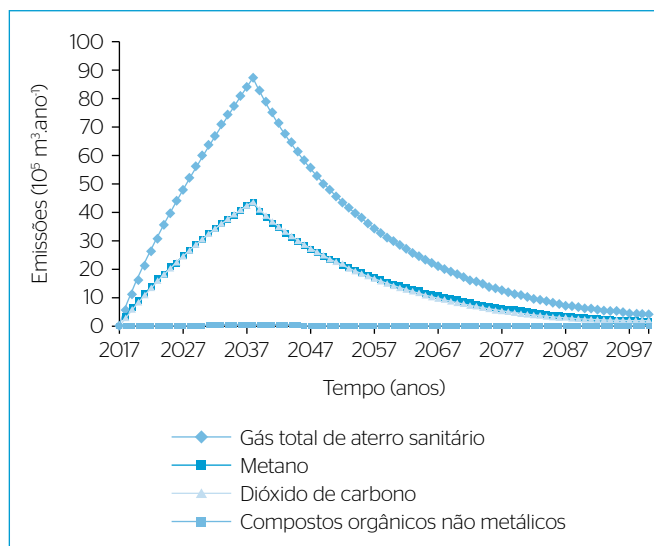


Figura 4 - Estimativa de emissões de gases de aterro sanitário, por meio do uso do software LandGEM®, para o município de Varginha (MG).

potência instalada do gráfico representa a porção não passível de ser aproveitada viavelmente para produção de energia elétrica. No entanto, destaca-se a possibilidade de recuperação dessa energia na forma térmica ao se aproveitar a sobra para conversão de energia química do gás em energia calorífica por qualquer empreendimento que faça seu uso e que esteja próximo ao local de geração do biogás.

Estimativa da geração de gases de efeito estufa

A Tabela 2 traz um resumo dos principais resultados de emissões de GEE e impactos de energia nos cenários construídos para fins

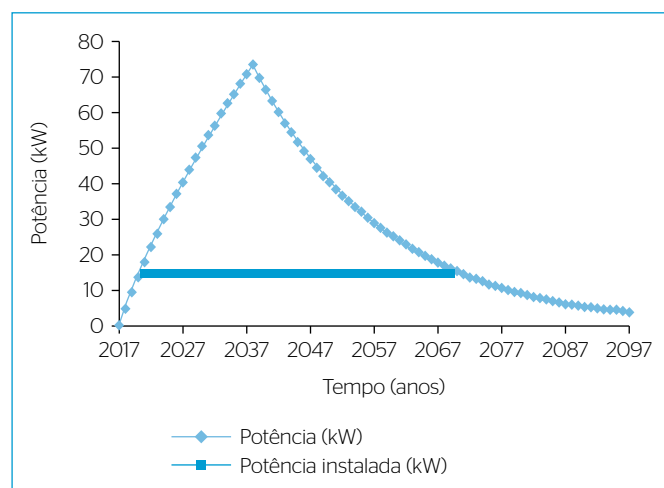


Figura 5 - Estimativa de potências disponível e instalada em uma central de geração de energia elétrica a partir do biogás do aterro sanitário de Varginha (MG).

Tabela 2 - Resultados da simulação com o WARM® para cenários hipotéticos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Varginha (MG).

Simulação	Cenário	Emissões totais de GEE (MTCO ₂ E)	Uso energético (MWh)
Simulação 1 (cenário base versus cenário 1)	Linha de base	288.969	55.594
	Cenário 1	102.970	(243.685)
	Emissões incrementais de GEE/ balanço energético	(185.999)	(299.279)
Simulação 2 (cenário base versus cenário 2)	Linha de base	288.969	55.594
	Cenário 2	(71.585)	(740.991)
	Emissões incrementais de GEE/ balanço energético	(360.554)	(796.585)
Simulação 3 (cenário base versus cenário 3)	Linha de base	288.969	55.594
	Cenário 3	(308.394)	(1.574.118)
	Emissões incrementais de GEE/ balanço energético	(597.363)	(1.629.782)

GEE: gases de efeito estufa.

comparativos, oferecendo, assim, informações aos gestores quanto à elaboração de projetos e à construção de cenários favoráveis de gerenciamento integrado de RSU com vistas à redução da emissão de GEE e do uso energético.

Com base nos resultados, conforme esperado, verifica-se que o cenário 3 proporciona os maiores benefícios ambientais em termos de emissão de GEE, permitindo, no horizonte de projeto, teoricamente, a remoção de emissões de 597.363 MTCO₂E, além de uma economia de energia de aproximadamente 1.629,8 GWh em comparação ao cenário atual.

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, as emissões de GEE e a utilização energética dos cenários estudados de acordo com cada tipo de manejo considerado. Entre as práticas adotadas no gerenciamento dos cenários hipotéticos, a reciclagem foi a que deu resultado a maiores ganhos energéticos e remoção de emissões de GEE, evidenciando,

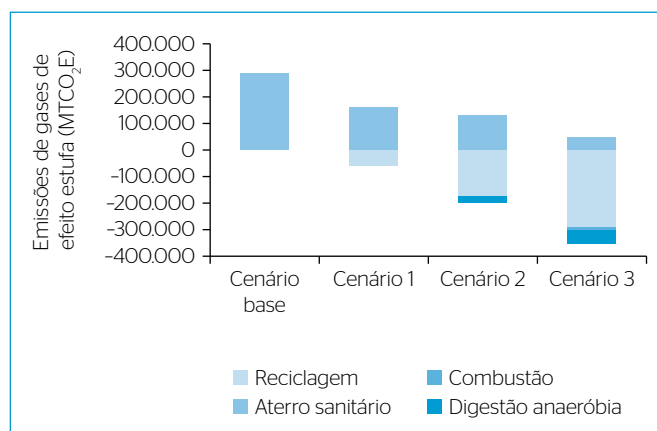


Figura 6 - Emissões de gases de efeito estufa, em toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (MTCO₂E), para cada tipo de manejo dos cenários hipotéticos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Varginha (MG).

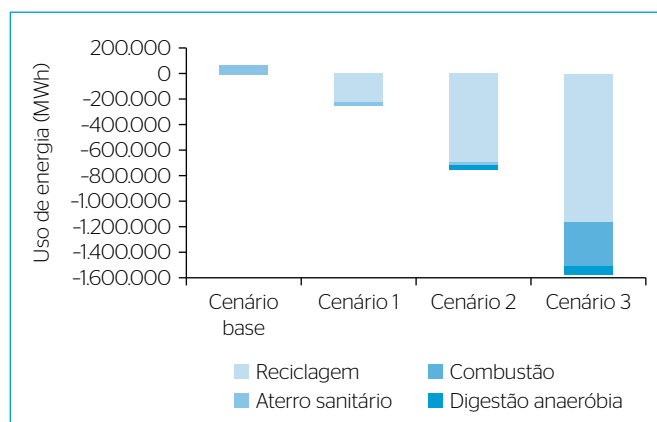


Figura 7 - Uso energético, em MWh, de cada tipo de manejo dos cenários hipotéticos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Varginha (MG).

portanto, a importância da integração das etapas de separação do lixo e reciclagem nas estratégias de manejo. De maneira geral, os materiais recicláveis apresentam grande potencial de remoção de emissões de GEE ao substituírem os materiais virgens que necessitam de grandes quantidades de energia e mistura de combustível no processo de fabricação (BARROS, 2013).

A prática de digestão anaeróbica foi a segunda maior colaboradora na redução das emissões de GEE. De acordo com Vergara, Damgaard e Horvath (2011), esse tipo de sistema maximiza a extração e utilização do metano que seria liberado pelo resíduo orgânico para a atmosfera e permite o aproveitamento energético renovável. Outros benefícios adicionais incluem a redução de emissões pela secagem do digestato antes de ser disposto em aterro sanitário, bem como seu possível aproveitamento em aplicações do solo após processamento devido ao seu valor nutritivo (N, P, K). Ademais, a separação da fração orgânica dos RSU pode contribuir na melhoria da eficiência de taxas de reciclagem, cujos materiais podem ser recuperados com mais facilidade sem estarem misturados com resíduos biodegradáveis.

Apesar de participar com a menor parcela na redução das emissões de GEE, a incineração no cenário 3 foi responsável pela segunda técnica que mais economiza energia. Contudo, apesar de apresentar vantagens como a redução do volume, a recuperação de energia e a esterilização e estabilização dos resíduos, a incineração é ainda fortemente criticada pela emissão de poluentes (LEME et al., 2014; MCDUGALL et al., 2001). Assim, ainda é preciso desenvolver pesquisas que incluam a tecnologia como possível parte de um gerenciamento sustentável de RSU para situações específicas, considerando-se o desenvolvimento avançado de sistemas de controle de poluição atmosférica.

Dentre os cenários distintos, o aterro sanitário para destinação final dos RSU possui o pior comportamento de emissão de GEE e consumo energético. Destaca-se que os resultados focam as implicações das mudanças climáticas pelo gerenciamento de RSU, não considerando outros impactos ambientais (como acidificação, toxicidade, eutrofização, entre outros), aspectos socioeconômicos e a viabilidade tecnológica das possíveis intervenções no município.

CONCLUSÕES

Após as análises dos dados de viabilidade econômica, concluiu-se que somente o aproveitamento de 150 kW torna-se viável para ser empregado. Em relação aos cenários avaliados na geração de GEE, observa-se que o cenário 3 proporciona os maiores benefícios ambientais em termos de emissão desses gases e uso de energia. Já para as práticas de gerenciamento dos cenários propostos, a reciclagem obteve os maiores ganhos energéticos e remoção de emissões de GEE, enquanto o aterro sanitário apresenta o pior comportamento em relação à economia de energia e emissão de GEE.

Nota-se, portanto, a importância que a reciclagem e a coleta seletiva exercem sobre as etapas de gerenciamento dos resíduos sólidos no município, tornando-se prática fundamental a ser adotada em uma estratégia sustentável de manejo. Nesse caso, os esforços dos gestores devem estar voltados para investimentos em infraestrutura e na conscientização e educação ambiental da população.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Banco de Informações de Geração*: BIG. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 11 out. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2010) Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. *Diário Oficial da União*, Brasília, n. 177. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2012) 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. *Diário Oficial da União*, Brasília, n. 76. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pubren2012482.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2015) 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. *Diário Oficial da União*, Brasília, n. 230. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pubren2015687.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2018.

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). (2016) *Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica*. 2. ed. Brasília: ANEEL. 31 p.
- ALLESCH, A.; BRUNNER, P.H. (2014) Assessment methods for solid waste management: A literature review. *Waste Management & Research*, v. 32, n. 6, p. 461-473. <https://doi.org/10.1177%2F0734242X14535653>
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (BACEN). (2017) *Cotações e boletins*. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>>. Acesso em: 20 set. 2017
- CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES (CRA). (2004) *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean*. Washington, DC: The World Bank - Energy Sector Management Assistance Programme (ESMAP). Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/18081/332640handbook.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 set. 2017.
- BARROS, R.M. (2013) *Tratado sobre Resíduos Sólidos: Gestão, uso e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Interciência.
- BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L.; SILVA, T.R. (2014) The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, p. 150-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- BOVE, R.; LUNGHI, P. (2006) Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*, v. 47, n. 11-12, p. 1391-1401. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.08.017>
- BRASIL. (2010a) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 10 out. 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2010b). *Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável*. São Paulo. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: 11 out. 2017.
- BRASIL. Ministério das Cidades. (2016) *Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás*. Brasília, DF: Probiogás. Disponível em: <<https://www.giz.de/en/downloads/Probiogas-EVTE-ETEs.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017.
- CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; UGIATI, S. (2009) Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, v. 34, n. 12, p. 2116-2123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.023>
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). (2006) *Biogás: geração e uso energético - versão 1.0/Cetesb*. São Paulo: CETESB. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>>. Acesso em: 15 set. 2017.
- GOUVEIA, N. (2012) Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência e Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010) *Panorama*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/varginha/panorama>>. Acesso em: 16 out. 2017.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). (2012) *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos: Relatório de Pesquisa*. Brasília: IPEA. 82 p.
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III for the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genebra: IPCC. 151 p.
- LEME, M.M.V.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; LOPES, B.M.; FERREIRA, C.H. (2014) Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 87, p. 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>
- MCDougall, F.; WHITE, P.; FRANKE, M.; HINDLE, P. (2001) *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*. 2. ed. Oxford, UK: Blackwell Science. 513 p.
- MOREIRA, L.A.; SILVA, T.A.C.; BARROS, R.M. (2017) Análise da produção de biogás sob diferentes cenários de gerenciamento de resíduos sólidos no município de Inconfidentes - MG. *Labor e Engenho*, v. 11, n. 1, p. 30-36. <https://doi.org/10.20396/labore.v11i1.8647872>
- OTHMAN, S.N.; NOOR, Z.Z.; ABBA, A.H.; YUSUF, R.O.; HASSAN, M.A.A. (2013) Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries. *Journal of Cleaner Production*, v. 41, p. 251-262. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.043>
- PIN, B.V.R.; BARROS, R.M.; LORA, E.E.S.; SANTOS, I.F.S. (2018) 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.002>
- PREFEITURA DE VARGINHA. (2013) *Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos*. Varginha: Prefeitura de Varginha. Disponível em: <[http://www.varginha.mg.gov.br/Pdfs_e_arquivos_de_leis/article/10027/Dec6560\(AnexoPlanoMunicipalGIRS\).pdf](http://www.varginha.mg.gov.br/Pdfs_e_arquivos_de_leis/article/10027/Dec6560(AnexoPlanoMunicipalGIRS).pdf)>. Acesso em: 16 out. 2017.
- RIBEIRO, E.M.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L.; SANTOS, I.F.S.; SAMPAIO, L.C.; SANTOS, T.V.; SILVA, F.G.B.; SILVA, A.P.M.; FREITAS, J.V.R. (2018) GHG avoided emissions and economic analysis by power generation potential in pasture aviaries in Brazil. *Renewable Energy*, v. 120, p. 524-535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.005>

RODRIGUES, W.; MELO, J.A. (2017) Economic evaluation of low carbon farming technologies in Brazilian savannas. *Informe IGEPEC*, v. 21, n. 1, p. 82-100.

SANTOS, I.F.S.; VIEIRA, N.D.B.; NÓBREGA, L.G.B.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L. (2018) 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>

SILVA, T.R.; BARROS, R.M.; TIAGO FILHO, G.L.; SANTOS, I.F.S. (2017) Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill. *Waste Management*, v. 65, p. 75-91. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.018>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO (SNIS). (2015) *Série histórica*. SNIS. Disponível em: <<http://app.cidades.gov.br/serieHistorica/>>. Acesso em: 16 out. 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2005) *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) - Version 3.02 - User's Guide*. Washington, D.C.: USEPA. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2017.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (2016) *Documentation Chapters for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Resource Conservation and Recovery.

