

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL EM MUNICÍPIOS**

RAPHAEL IURY NEVES

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM ATERRO  
SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE PONTA  
GROSSA-PR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

MEDIANEIRA  
2018

RAPHAEL IURY NEVES



**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM ATERRO  
SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE PONTA  
GROSSA-PR**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Ambiental em Municípios – Polo UAB do Município de Cruzeiro do Oeste, Modalidade de Ensino à Distância, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Medianeira.

Orientador: Prof. Eduardo Borges Lied

MEDIANEIRA  
2018



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário: Um estudo de caso na região de Ponta Grossa-PR.

Por

**Raphael Iury Neves**

Esta monografia foi apresentada às 11h30 do dia 25 de agosto de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista no Curso de Especialização em Gestão Ambiental em Municípios – Polo de Cruzeiro do Oeste, Modalidade de Ensino a Distância, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Eduardo Borges Lied  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(orientador)

---

Prof. Dr. Thiado Edwiges  
UTFPR – Câmpus Medianeira

---

Prof. Dr. Valdemar Padilha Feltrin  
UTFPR – Câmpus Medianeira

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso-

Dedico à Deus, quem me dá toda força e sabedoria.

## RESUMO

NEVES, Raphael Iury. Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário: Um estudo de caso na região de Ponta Grossa-PR. 32 folhas. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

O processo de urbanização atrelado ao rápido crescimento populacional e mudanças nos padrões de vida, acarretaram em um aumento significativo no consumo de bens e serviço e, conseqüentemente na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). A técnica de aterramento de resíduos é a mais difundida no país para o tratamento e destinação final dos RSU, no entanto, alguns municípios ainda utilizam métodos incongruentes com a legislação ambiental, sendo responsáveis por danos severos ao meio ambiente. De modo geral, a recuperação energética do biogás gerado em aterro tem as seguintes vantagens: redução de gases do efeito estufa, geração de energia, receita adicional para os aterros (energia e créditos de carbono) e redução do risco de autoignição ou explosão do aterro devido as altas concentrações de metano. Somado a isso, o aumento pela demanda global de energia e limitadas fontes fósseis, elevaram o interesse pela produção de energia a partir de fontes renováveis. Nessa perspectiva, o trabalho propôs um levantamento do potencial energético de um aterro sanitário a ser implantado na região de ponta grossa, no estado do paraná, contando com 10 municípios da região, de acordo com o proposto no plano de regionalização da gestão integrada de resíduos sólidos do estado do paraná. Para estimar o potencial de geração de metano no aterro sanitário utilizou-se o modelo matemático *LandGEM* elaborado pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). De acordo com as análises, o aterro geraria em 20 anos de vida útil uma potência útil de 566.081.834 kw e atenderia 233.584 habitantes, minimizando a emissão de gases do efeito estufa e impactos ambientais.

**Palavras-chave:** biogás, metano, energia elétrica.

## ABSTRACT

NEVES, Raphael Iury. Estimativa do potencial energético de um aterro sanitário: Um estudo de caso na região de Ponta Grossa-PR. 32 folhas. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

The urbanization process, coupled with rapid population growth and changes in living standards, led to a significant increase in the consumption of goods and services and, consequently, the generation of solid urban waste. The landfilling technique is the most widespread in the country for the treatment and final destination of MSW, however, some municipalities still use methods that are inconsistent with environmental legislation and are responsible for severe damage to the environment. In general, the energy recovery of landfill biogas has the following advantages: reduction of greenhouse gases, generation of energy, additional revenue for landfills (energy and carbon credits) and reduction of the risk of self-ignition or explosion of the landfill due to high concentrations of methane. In addition to this, the increase in global energy demand and limited fossil fuels has raised interest in energy production from renewable sources. In this perspective, the work proposed a survey of the energy potential of a sanitary landfill to be implanted in the region of Ponta Grossa, in the state of Paraná, counting on 10 municipalities of the region, according to the proposal in the Regionalization Plan of Integrated Waste Management Solids of the State of Paraná. To estimate the potential for methane generation in the landfill the LandGEM mathematical model was developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA). According to the analyzes, the landfill would generate in a 20-year useful life a useful power of 566,081,834 kW and would serve 233,584 inhabitants, minimizing the emission of greenhouse gases and environmental impacts.

**Keywords:** biogas, methane, energy

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de crescimento logístico populacional .....	24
Figura 2 - Estimativas das emissões de gases no aterro .....	26
Figura 3 - Geração de metano em m <sup>3</sup> no aterro .....	27
Figura 4 - Energia disponível (MWh/ano) .....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do biogás.....	16
Tabela 2 - Equivalência de outras fontes energéticas comparadas ao biogás.....	16
Tabela 3 - Matérias primas para digestão anaeróbia, rendimento e teor de metano	17
Tabela 4 - População estimada nos municípios da região nos censos de 1991, 2000 e 2010 .....	23
Tabela 5 - Estimativa da geração de resíduos .....	24
Tabela 6 - Estimativa das emissões geradas no aterro.....	25
Tabela 7 - Potência e energia disponível em função da geração de metano no aterro .....	27
Tabela 8 - Estimativa da população atendida pela energia elétrica gerada no aterro .....	29

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
2.	<b>OBJETIVO GERAL</b>	12
2.1	Objetivos Específicos	12
3.	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	13
3.1.	RESÍDUOS SÓLIDOS	13
3.1.1.	Classificação dos Resíduos Sólidos	13
3.2.	PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PARANÁ - PERS/PR	14
3.3.	ATERRO SANITÁRIO	15
3.4.	BIOGÁS	15
3.4.1.	Processo de geração de biogás	17
3.4.2.	Aspectos gerais do processo de digestão anaeróbia	17
3.5.	MODELOS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS	19
4.	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	20
4.1.	LOCAL DA PESQUISA	22
5.	<b>RESULTADOS</b>	23
5.1.	ESTIMATIVA POPULACIONAL	23
5.2.	ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS A SEREM DISPOSTOS NO ATERRO	24
5.3.	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO E ENERGIA ELÉTRICA	25
6.	<b>CONCLUSÃO</b>	30
	REFERÊNCIAS	31

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização atrelado ao rápido crescimento populacional e mudanças nos padrões de vida, acarretaram em um aumento significativo no consumo de bens e serviço e, conseqüentemente na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). A gestão inadequada destes RSU pode causar problemas socioambientais, econômicos e de saúde (OLIVEIRA & GALVÃO JÚNIOR, 2016).

A técnica de aterramento de resíduos é a mais difundida no país para o tratamento e destinação final dos RSU, no entanto, alguns municípios ainda utilizam métodos incongruentes com a legislação ambiental, sendo responsáveis por danos severos ao meio ambiente.

Embora tenha havido um progresso na gestão de RSU no Brasil, é comum observar a destinação destes em locais ambientalmente inadequados. A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece diretrizes, princípios e metas para a gestão de resíduos sólidos vislumbrando o desenvolvimento econômico e social, também determina a erradicação dos lixões em 4 anos a partir da sanção da referida Lei (BRASIL, 2010).

O aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos no solo, sem causar danos à saúde pública, à segurança, minimizando impactos ao meio ambiente. Utilizando princípios de engenharia, os resíduos são confinados em área impermeabilizada a fim de reduzir o volume dos resíduos depositados e recobertos com terra e compactados após conclusão da jornada de trabalho. O tratamento dos resíduos dispostos em aterros sanitários ocorre por digestão anaeróbia, processo que gera como efluente um lixiviado (chorume) que necessita posterior tratamento e biogás que pode ser queimado ou aproveitado energeticamente (ABNT, 1992; FELICORI et al., 2016; KUMAR & SMADER, 2017). A composição dos resíduos sólidos dispostos no aterro pode variar, porém a maior fração volumétrica é de origem orgânica passível de degradação anaeróbia (HNAIN et al., 2011).

De modo geral, a recuperação energética do biogás gerado em aterro tem as seguintes vantagens: redução de gases do efeito estufa, geração de energia, receita adicional para os aterros (energia e créditos de carbono) e redução do risco de autoignição ou explosão do aterro devido as altas concentrações de metano.

Somado a isso, o aumento pela demanda global de energia e limitadas fontes fósseis, elevaram o interesse pela produção de energia a partir de fontes renováveis.

A Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA/PR) assinou, em 30 de dezembro de 2011, o contrato para executar a elaboração do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS/PR), que se caracteriza como um importante instrumento na gestão dos resíduos sólidos no estado. O PERS/PR propõe um plano de regionalização da gestão integrada de resíduos sólidos no Paraná, incentivando os consórcios intermunicipais e promovendo a cooperação e autonomia municipal (PARANÁ, 2013).

A cidade de Ponta Grossa dispõe de um aterro sanitário em condições ambientais inadequadas e que ainda está sendo operado. Nesse contexto, faz-se necessário o desenvolvimento da presente pesquisa, tendo como proposta a realização de um levantamento quantitativo do potencial de geração de energia elétrica a partir de recuperação do biogás gerado em um novo aterro sanitário na cidade de Ponta Grossa, recebendo RSU dos municípios pertencentes a região 13, proposta pelo PERS/PR.

## 2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é levantar de forma quantitativa, o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos que irão compor um aterro sanitário na região de Ponta Grossa-PR.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Obter os dados de projeção populacional e de geração de resíduos dos municípios Arapoti, Castro, Carambeí, Curiúva, Jaguariaíva, Palmeira, Piraí do Sul, Ponta Grossa, Porto Amazonas, São João do Triunfo e Sengés.
- Analisar as informações estimadas de geração gases em um aterro sanitário a ser instalado, utilizando o modelo matemático LandGEM.
- Identificar o potencial de energia elétrica a ser gerado no aterro sanitário;
- Verificar quantas pessoas poderiam ser atendidas se o metano gerado no aterro sanitário fosse aproveitado na forma de energia elétrica.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos:

Considera-se resíduos sólidos aqueles materiais, substância, objeto ou bem descartado resultante das atividades humanas, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujo lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água sejam inviáveis, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010).

##### 3.1.1. Classificação dos Resíduos Sólidos

Atualmente existem várias formas de classificar os resíduos sólidos, porém utiliza-se mais classificações que contemplam a origem e os potenciais riscos ao meio ambiente. A classificação mais difundida no Brasil é a baseada na NBR 10.004 (ABNT, 2004), que traz os seguintes conceitos:

- a) Resíduos Classe I: Também conhecidos como resíduos perigosos, por apresentar periculosidade ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- b) Resíduos Classe II: são os ditos resíduos não perigosos e subdividem-se em duas classes, os Classe II A, que são os não inertes e os Classe II B que são inertes.

A PNRS (Brasil, 2010), classifica os resíduos sólidos quanto a origem em:

- a) Resíduos Domiciliares;
- b) Resíduos de Limpeza Urbana;
- c) Resíduos Sólidos Urbanos: enquadrados nas alíneas “a” e “b”;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadoras de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;

- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

### 3.2. PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO PARANÁ - PERS/PR

Visando atender os dispostos na PNRS, nos dias 22 de dezembro de 2016, a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA/PR, firmou contrato para desenvolvimento do Plano Estadual de Resíduos Sólidos, que trata da gestão dos resíduos sólidos no estado.

São vários os problemas ambientais associados aos resíduos sólidos urbanos, sendo a disposição destes o assunto que demanda maior atenção. A disposição adequada requer trabalho multidisciplinar e tratamento complexo. Alguns municípios não dispõem de recursos técnicos e financeiros para realizarem o manejo correto desses resíduos, desta forma o PERS/PR tem como objetivo a regionalização do estado e incentivo à elaboração de consórcios intermunicipais para o tratamento de resíduos sólidos.

A partir dos critérios social, econômico e político institucional, o plano apresentou a proposta de regionalização do estado, dando origem a 20 regiões onde estão sendo realizados vários trabalhos com gestores locais para a criação dos consórcios públicos, visando a melhoria do panorama estadual dos resíduos sólidos.

### 3.3. ATERRO SANITÁRIO

Monteiro et al. (2001) consideram aterro sanitário um método de disposição final dos resíduos sólidos sobre o solo, através do seu confinamento em camadas cobertas de solo, segundo normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ao meio ambiente.

Já a norma ABNT 8419/1992 define aterro sanitário como:

Uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário.

Há quem considere aterro sanitário os lixões e os aterro controlados, porém cabe ressaltar que há diferenças, uma vez que os dois últimos não utilizam técnicas de engenharia para a disposição dos resíduos e dispensam tratamento de chorume e drenagem de gases.

### 3.4. BIOGÁS

O biogás é uma energia renovável que pode ser obtida a partir da biomassa e da fração orgânica de resíduos sólidos e efluentes líquidos oriundos de diversas atividades humanas. É composto por uma mistura de gases como o metano (aproximadamente 55-70% por volume), dióxido de carbono (aproximadamente 30-45%) e outros gases (monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio e gás sulfídrico) em menores quantidades, como apresentado na tabela 1, no entanto, sua composição é influenciada pela matéria prima de que se origina e por parâmetros operacionais a que foi submetida (Perrson, 2003; Kaparaju e Rintala, 2013; Surendra et al., 2014; Zhang, Hu e Lee, 2016).

**Tabela 1 - Composição do biogás**

<b>Composto</b>	<b>Quantidade aproximada</b>
CH <sub>4</sub>	55-70 (%vol.)
CO <sub>2</sub>	30-45(%vol.)
O <sub>2</sub>	<1 (%vol.)
N <sub>2</sub>	<1-2 (%vol.)
H <sub>2</sub> S	0-2000 (ppm)

Fonte: Adaptado de Kaparaju e Rintala (2013).

O potencial energético do biogás está intimamente ligado com o teor de metano presente na mistura, o que determina seu poder calorífico (Salomon e Lora, 2005). A tabela 2 mostra a comparação entre o biogás e outras fontes energéticas.

**Tabela 2 - Equivalência de outras fontes energéticas comparadas ao biogás**

<b>Fonte</b>	<b>Equivalência</b>
Gasolina (L)	0,61 – 0,70
Querosene (L)	0,58 – 0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
GLP (kg)	0,40 – 1,43
Etanol (L)	0,80
Carvão Mineral (kg)	0,74
Lenha (kg)	3,50
Eletricidade (kWh)	1,25 – 1,43

Fonte: Adaptado de Pompermayer (2000).

As aplicações energéticas mais frequentes do biogás residem na cocção de alimentos, aquecimento, iluminação e geração de energia elétrica. Em áreas rurais, sobretudo em países em desenvolvimento, o biogás pode ser explorado de maneira inteligente, uma vez que gerado no tratamento de dejetos e efluentes, auxilia na minimização de impactos ambientais da fonte poluidora (Bond e Templeton, 2011).

Segundo Holm-Nielsen et al. (2009), o ciclo de produção do biogás representa um sistema integrado de utilização de recursos, produção de energia renovável, tratamento de efluentes orgânicos e reciclagem e redistribuição de nutrientes, proporcionando a diminuição de gases do efeito estufa, redução de patógenos através do saneamento e produção de energia.

Por outro lado, é recomendada a utilização de todo o biogás gerado e evitar o lançamento deste para a atmosfera, pois possui metano e dióxido de carbono na sua composição o que contribui para com o efeito estufa. Somado a isso, o biogás, pode conter sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) em sua composição, gás que exerce efeito tóxico em animais e pessoas e efeito corrosivo em materiais, portanto, exige um pré-tratamento para sua utilização (Chiodo et al., 2016).

#### 3.4.1. Processo de geração de biogás

O biogás pode ser produzido através da digestão anaeróbia de dejetos animais, resíduos agrícolas, efluentes industriais, esgoto sanitário e da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, a tabela 3 mostra algumas matérias primas utilizadas na digestão anaeróbia para produção de biogás, seus respectivos rendimentos e teor de metano presente. (Ganzoury et al., 2015).

**Tabela 3 – Principais matérias primas para digestão anaeróbia, rendimento e teor de metano**

<b>Substratos</b>	<b>Rendimento (m<sup>3</sup> biogás/tonelada de dejeto)</b>	<b>Percentual de metano no biogás</b>
Dejetos suínos líquidos	28	65
Dejetos bovinos líquidos	25	60
Resíduos sólidos orgânicos	100	61
Dejetos de aves	80	60
Silagem de milho	202	52

Fonte: Adaptado de Al Seadi (2008).

#### 3.4.2. Aspectos gerais do processo de digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico de digestão por etapas (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) realizado por um consórcio de microrganismos que na ausência de oxigênio, transformam materiais orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos em CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> (Foresti et al., 1999; Sharma et al., 2000; Sá et al., 2014; Fagbohunge et al., 2016).

- Hidrólise: na primeira etapa do processo ocorre a hidrólise ou solubilização, as bactérias hidrolíticas degradam a matéria orgânica complexa, originando compostos dissolvidos de menor peso molecular. As proteínas após serem

degradadas por polipeptídeos, formam aminoácidos, carboidratos se transformam em açúcares solúveis (monossacarídeos e dissacarídeos) e lipídeos são convertidos em ácidos graxos de cadeia longa de carbonos e glicerina (Foresti et al., 1999)

- **Acidogênese:** na etapa acidogênica, os produtos solúveis oriundos da etapa anterior são metabolizados no interior das células bactérias fermentativas acidogênicas, gerando produtos ainda mais simples como ácidos orgânicos voláteis, álcoois, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, além de novas células bacterianas (Sá et al., 2014)
- **Acetogênese:** nesta fase, as bactérias acetogênicas realizam a oxidação dos produtos gerados na fase anterior, transformando-os em substratos adequados (H<sub>2</sub> e ácido acético) que serão metabolizados pelas bactérias metanogênicas, na etapa posterior do processo.
- **Metanogênese:** dois grupos de bactérias produzem o metano em função de sua afinidade com o substrato: as arqueias metanogênicas acetoclásticas (utilizam ácido acético como substrato) e as arqueias metanogênicas hidrogenotróficas (utilizam o hidrogênio como substrato).

Os processos entrópicos a partir do biogás consistem basicamente em transformar a energia química presente em suas moléculas em energia térmica e energia mecânica, por processos de combustão controlada. Em sequência, essa energia mecânica é convertida em energia elétrica através de um gerador (COELHO *et al.*, 2006).

Segundo COELHO *et al.* (2006), para esse tipo de conversão energética, as tecnologias mais indicadas são os motores de combustão interna do tipo ciclo-Otto, e turbinas e microturbinas à gás, que também utilizam de sistemas térmicos para a conversão.

Os estudos sobre a recuperação energética do biogás já demonstram a viabilidade da implantação desse tipo de tecnologia (SANTOS *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2013; HNAIN *et al.*, 2011).

### 3.5. MODELOS DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

Modelos matemáticos são importantes ferramentas para se avaliar o potencial de geração de biogás e energia em aterros sanitários, pois permitem inferir informações de maneira rápida e econômica. Os mais utilizados são:

- LandGEM (Versão 3.2): O LandGem (Landfill Gas Emissions Model) é um modelo desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) que é utilizado para estimar a geração de gases em aterros sanitários a partir da equação de primeira ordem.
- Modelo IPCC: A partir de diretrizes do IPCC, o método estima a geração de gases em um aterro sanitário pelo método de decomposição de primeira ordem.
- Biogás 1.0: Desenvolvido pela CETESB, este software permite dimensionar a geração de biogás em aterros sanitários, biodigestores, além de possuir outras funções.

#### 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Visando o incentivo a consórcios intermunicipais para tratamento de resíduos sólidos, foram utilizados dados dos Censos Demográficos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) referentes aos municípios pertencentes a região 13 (Arapoti, Castro, Carambeí, Jaguariaíva, Palmeira, Piraí do Sul, Ponta Grossa, Porto Amazonas, São João do Triunfo e Sengés) proposta pelo PERS (PARANÁ, 2013) a fim de verificar a possibilidade de recuperação energética se um novo aterro fosse instalado.

Em seguida, aplicou-se o modelo de crescimento populacional logístico proposto por Von Sperling (2005) que utiliza dados de 3 Censos (1991, 2000 e 2010), como demonstrado nas equações 1, 2, 3 e 4:

$$PS = \frac{2 \cdot P0 \cdot P1 \cdot P2 - P1^2 \cdot (P0 + P2)}{P0 \cdot P2 - P1^2} \quad (1)$$

$$c = \frac{(PS - P0)}{P0} \quad (2)$$

$$K1 = \frac{1}{t2 - t1} \cdot \ln \left[ \frac{P0 \cdot (PS - P1)}{P1 \cdot (PS - P0)} \right] \quad (3)$$

$$Pt = \frac{Ps}{1 + c \cdot e^{K1 \cdot (t-t0)}} \quad (4)$$

Sendo:

PS: População de saturação

P0: População em t0

P1: População em t1

P2: População em t2

c, k1: coeficientes de crescimento populacional

t: ano t

t0: ano 1991

t1: ano 2000

t2: ano 2010

Pt: População estimada no tempo t

Utilizou-se uma projeção populacional para um tempo de 20 anos (SILVA, 2012), que seria o tempo de funcionamento do novo aterro sanitário a ser implantado e sediado em Ponta Grossa.

Foi considerada no estudo uma taxa de coleta de resíduos de 100% e o índice de geração *per capita* de resíduos sólidos de 0,8 kg/hab./dia baseado nos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) com acréscimo anual de 1% (BRASIL, 2018).

A geração de biogás, metano e dióxido de carbono foi estimada a partir do modelo matemático LandGEM, desenvolvido pela USEPA, que utiliza a equação de primeira ordem (5), adotando parâmetros que variam de acordo com o clima da região e com o tipo dos resíduos gerados (USEPA, 2005; AYDI, 2012; PIÑAS et al., 2016; SILVA, 2012).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_o \cdot \frac{M_i}{10} \cdot e^{-ktij} \quad (5)$$

Onde:

Q: metano produzido no ano (m<sup>3</sup>/ano);

i = 1: acréscimo de tempo (ano);

n: ano do cálculo (ano);

j = 0,1: acréscimo de tempo (ano);

k: constante de geração de metano (ano<sup>-1</sup>);

L<sub>o</sub>: potencial da geração de metano (m<sup>3</sup>/t);

M<sub>i</sub>: massa de resíduo depositada no ano em cada seção (t);

tij: idade da j-ésima seção da massa de resíduos depositada no ano (ano).

O modelo matemático LandGEM fornece dois conjuntos de parâmetros para estimar a geração de metano nos aterros sanitários:

- a) AP42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors) – utiliza os parâmetros L<sub>o</sub> = 100m<sup>3</sup>/t e k = 0,02 ano<sup>-1</sup> (regiões com precipitação < 635 mm/ano) ou k = 0,05 ano<sup>-1</sup> (regiões com precipitação > 635 mm/ano).

- b) CAA (Clean Air Act) – utiliza os parâmetros de  $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{t}$  e  $k = 0,02 \text{ ano}^{-1}$  (regiões com precipitação  $< 635 \text{ mm/ano}$ ) ou  $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$  (regiões com precipitação  $> 635 \text{ mm/ano}$ ).

Como no Brasil a matéria orgânica constitui cerca da metade dos resíduos sólidos urbanos e a precipitação na região é maior que  $635 \text{ mm/ano}$ , o modelo recomenda os valores de  $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{t}$  e  $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$ .

Para estimar a potência disponível e a potência com motor de combustão interna, utilizou-se as fórmulas:

$$P_x = \frac{Q_x \cdot P_c(\text{metano})}{31536000} \cdot E_c \cdot \frac{k}{1000} \quad (6)$$

Em que:

$P_x$ : Potência disponível no ano (kW);

$Q_x$ : vazão de metano no ano ( $\text{m}^3/\text{ano}$ );

$P_c(\text{metano})$ : poder calorífico do metano ( $35,53 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ );

$E_c$ : eficiência de coleta de gases (75%);

315360000: número de segundos em um ano;

1/1000: transformação de unidades de J/s para kW;

K: 1000 (adimensional).

$$E = P \cdot R \cdot T \quad (7)$$

Onde:

$E$  = Energia disponível (kW);

$P$  = potência disponível por ano (Kw);

$R$  = rendimento do motor a combustão interna em porcentagem.

$T$  = tempo (720 horas)

#### 4.1. LOCAL DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada através de dados referentes a região do Paraná composta pelos seguintes municípios: municípios Arapoti, Castro, Carambeí, Curiúva, Jaguariaíva, Palmeira, Piraí do Sul, Ponta Grossa, Porto Amazonas, São João do Triunfo e Sengés.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. ESTIMATIVA POPULACIONAL

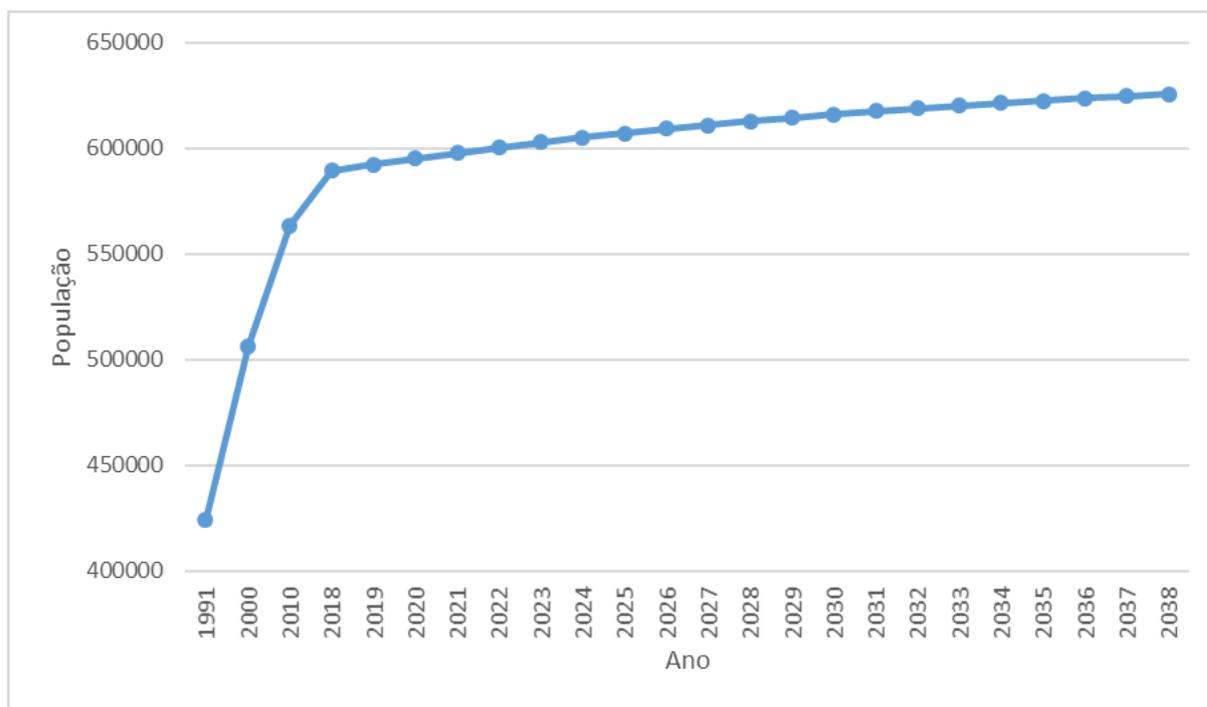
O cálculo de projeção populacional utilizou os dados dos censos de 1991, 2000 e 2010 do IBGE para os municípios da região 13 do Paraná, como mostra a Tabela 4. A partir destes dados pode-se obter o crescimento da população pelo método logístico nos anos em que o aterro será operado, conforme Tabela 5.

**Tabela 4 - População estimada nos municípios da região nos censos de 1991, 2000 e 2010**

<b>Município</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
Arapoti	17104	23884	25855
Castro	49816	63581	67084
Carambeí	7783	14860	19163
Jaguariaíva	25149	30780	33606
Palmeira	29046	30847	32123
Piraí do Sul	19414	21647	23424
Ponta Grossa	233984	273616	311611
Porto Amazonas	3579	4236	4514
São João do Triunfo	12320	12418	13704
Sengés	14995	17778	18414
<b>TOTAL</b>	<b>413190</b>	<b>493647</b>	<b>549498</b>

Fonte: IBGE, 2018.

A Figura 1 mostra a curva de crescimento logístico da população para os 20 anos em que irá operar o aterro, estima-se que a população sofra um aumento de 6%, a partir do ano de 2018, tendendo a uma saturação em que o nível de crescimento segue constante.



**Figura 1 - Curva de crescimento logístico populacional – Fonte: Autor, 2018.**

## 5.2. ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS A SEREM DISPOSTOS NO ATERRO

A quantidade de resíduos gerados pela população na região 13 foi obtida a partir do número de habitantes e da taxa de geração per capita da região, segundo dados do SNIS (2018), com aumento de 1% ao ano (PIÑAS et al., 2016). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Estimativa da geração de resíduos**

<b>Ano</b>	<b>População (habitantes)</b>	<b>Taxa de geração de RS per capita, (kg/hab./dia)</b>	<b>Geração anual de resíduos (t/ano)</b>
<b>2018</b>	576009	0,83	174501,9
<b>2019</b>	578692	0,838	177067,8
<b>2020</b>	581756	0,846	179640,4
<b>2021</b>	584399	0,855	182376,3
<b>2022</b>	586898	0,863	184870,0
<b>2023</b>	589259	0,872	187549,3
<b>2024</b>	591489	0,881	190202,1
<b>2025</b>	593593	0,889	192612,0
<b>2026</b>	595579	0,898	195212,9
<b>2027</b>	597452	0,907	197789,8

<b>2028</b>	599218	0,916	200342,5
<b>2029</b>	600882	0,926	203092,1
<b>2030</b>	602449	0,935	205600,7
<b>2031</b>	603927	0,944	207878,9
<b>2032</b>	605317	0,954	210777,4
<b>2033</b>	606626	0,963	213226,0
<b>2034</b>	607857	0,973	215877,3
<b>2035</b>	609016	0,982	218289,6
<b>2036</b>	610105	0,992	220906,8
<b>2037</b>	611130	1,00	223062,4
<b>2038</b>	612043	1,01	225629,6

Fonte: Autor, 2018.

### 5.3. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO E ENERGIA ELÉTRICA

Para o cálculo de emissão de metano no modelo LandGEM, considerou-se o ano de abertura do aterro que é 2018 e a sua vida útil, 20 anos. Adotou-se uma taxa de geração de metano (k) igual a 0,05, potencial de geração de metano de 170 m<sup>3</sup>/mg e que 50% do biogás produzido no aterro é metano, recomendados pelo modelo. A Tabela 6 e a Figura 2 mostram as estimativas das emissões obtidas no modelo matemático.

Tabela 6 - Estimativa das emissões geradas no aterro

<b>Ano</b>	<b>Biogás (toneladas/ano)</b>	<b>Metano (toneladas/ano)</b>	<b>Dióxido de Carbono (toneladas/ano)</b>
<b>2018</b>	0	0	0
<b>2019</b>	3622,60	967,63	2654,96
<b>2020</b>	7121,80	1902,31	5219,49
<b>2021</b>	10503,76	2805,66	7698,09
<b>2022</b>	13777,58	3680,13	10097,44
<b>2023</b>	16943,50	4525,79	12417,71
<b>2024</b>	20010,64	5345,05	14665,58
<b>2025</b>	22983,26	6139,07	16844,19
<b>2026</b>	25860,94	6907,73	18953,21
<b>2027</b>	28652,25	7653,32	20998,93
<b>2028</b>	31360,92	8376,83	22984,08
<b>2029</b>	33990,49	9079,22	24911,27
<b>2030</b>	33990,49	9762,60	26786,30
<b>2031</b>	39034,61	10426,56	28608,05
<b>2032</b>	41446,38	11070,77	30375,60

<b>2033</b>	43800,70	11699,64	32101,06
<b>2034</b>	46091,04	12311,41	33779,63
<b>2035</b>	48324,72	12908,05	35416,67
<b>2036</b>	50499,53	13488,97	37010,57
<b>2037</b>	52622,61	13488,97	37010,57
<b>2038</b>	53938,32	14407,50	39530,81

Fonte: Autor, 2018.

Nota-se a geração máxima de biogás próxima ao ano de encerramento das atividades do aterro sanitário, atingindo em 2038, um total de aproximadamente 53.938,32 toneladas.

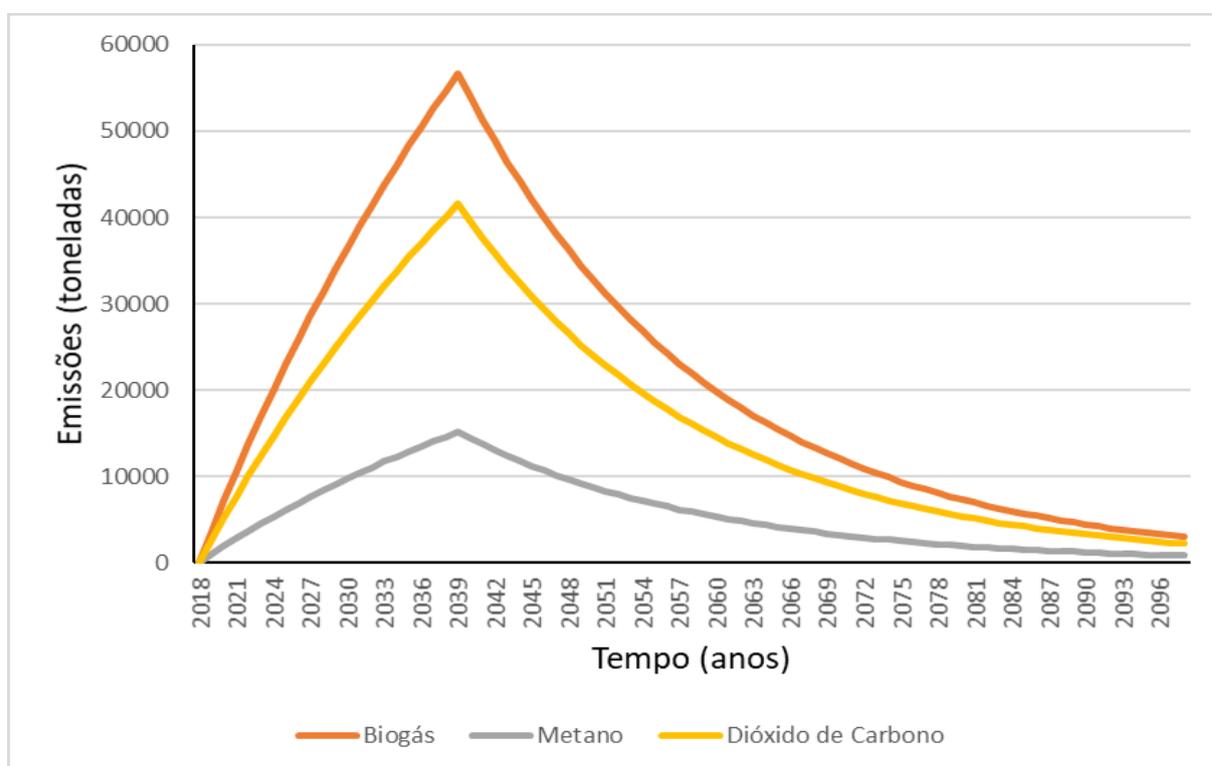
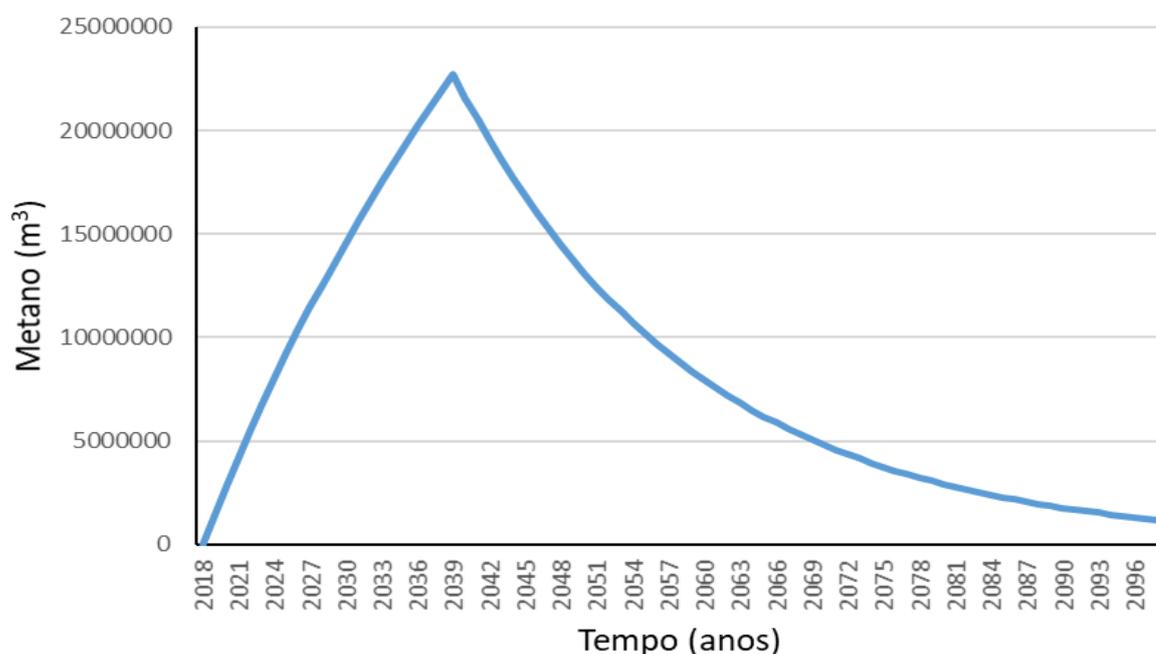


Figura 2 - Estimativas das emissões de gases no aterro - Fonte: Autor, 2018.

A Figura 3 mostra a geração de metano em metros cúbicos, que foi de aproximadamente 21.895.364 m<sup>3</sup>. Comprovando um modelo fiel ao comportamento dos aterros sanitários, uma vez que a curva, que é regida pela constante de decaimento  $k$ , (degradação da matéria orgânica ao longo do tempo) se comporta de maneira crescente durante o tempo de recebimento e maturação dos resíduos e decai a partir do tempo que se encerra o recebimento.



**Figura 3 - Geração de metano em m³ no aterro - Fonte: Autor, 2018.**

Piñas e colaboradores (2016), realizaram um estudo utilizando o mesmo modelo matemático para um aterro sanitário no município de Três Corações – MG, no qual estimaram uma geração máxima de metano de 1.708 toneladas no ano de encerramento do aterro, no entanto, a população estimada é de 82.603 habitantes, consideravelmente menor que no presente trabalho.

A partir dos resultados obtidos em relação a geração do metano, calculou-se a potência disponível utilizando motor a combustão interna com rendimento de 30%, operando 24 horas por dia, conforme ilustrado na Tabela 7 e na Figura 4.

**Tabela 7 - Potência e energia disponível em função da geração de metano no aterro**

Ano	CH <sub>4</sub> (m³/ano)	Potência disponível (kW)	Energia disponível (MWh/mês)	Energia disponível (MWh/ano)
2018	0	0	0	0
2019	1450407	490,22	264,72	3176,64
2020	2851406	963,74	520,42	6245,07
2021	4205462	1421,40	767,55	9210,69
2022	5516222	1864,42	1006,79	12081,49
2023	6783784	2292,85	1238,14	14857,68
2024	8011794	2707,90	1462,26	17547,23
2025	9201965	3110,17	1679,49	20153,91

2026	10354121	3499,58	1889,77	22677,34
2027	11471696	3877,31	2093,75	25125,02
2028	12556186	4243,86	2291,68	27500,25
2029	13609005	4599,70	2483,84	29806,11
2030	14633334	4945,92	2670,79	32049,57
2031	15628553	5282,29	2852,43	34229,27
2032	16594168	5608,66	3028,67	36344,13
2033	17536785	5927,25	3200,71	38408,63
2034	18453785	6237,19	3368,08	40417,02
2035	19348097	6539,46	3531,31	42375,72
2036	20218842	6833,76	3690,23	44282,81
2037	21068871	7121,06	3845,37	46144,52
2038	21895364	7400,41	3996,22	47954,68

Fonte: Autor, 2018.

Nota-se na Figura 4 que a curva referente à energia gerada comporta-se igualmente à de geração de biogás no aterro, regidas pela constante de decaimento  $k$  (degradação da matéria orgânica no tempo).

Santana (2016), da mesma forma, estimou uma geração total de energia elétrica de 543.353.100 kW durante o período de funcionamento de um aterro sanitário em Arapiraca – AL.

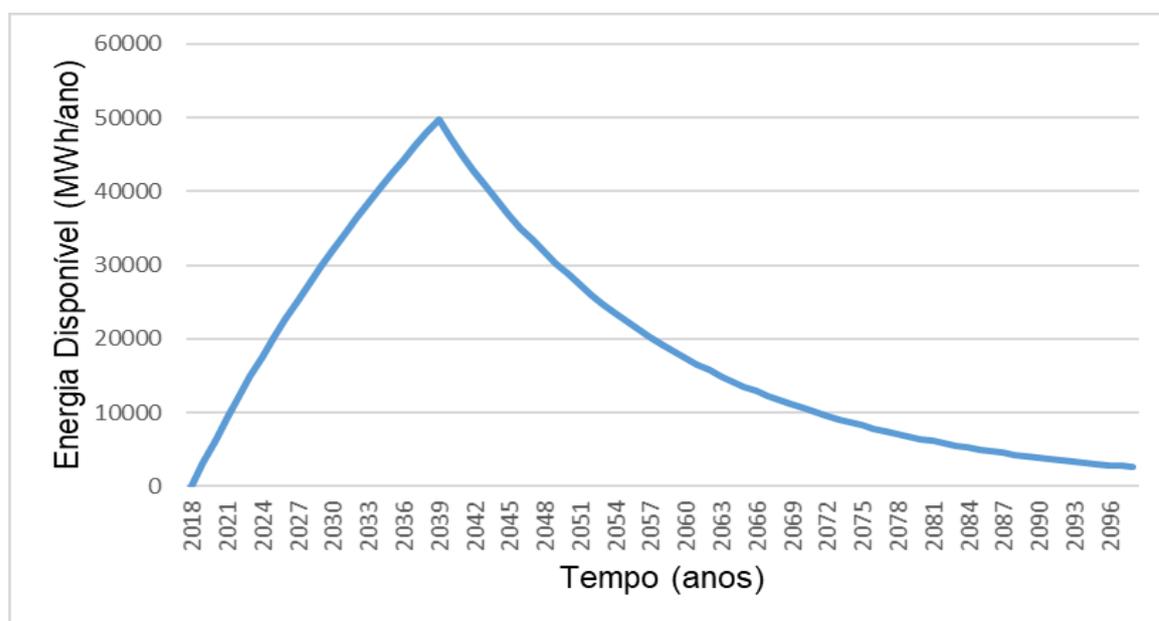


Figura 4 - Energia disponível (MWh/ano) - Fonte: Autor, 2018.

De acordo com os dados obtidos no Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2017), cada habitante do estado do Paraná consome em média 2.537 kWh/ano.

Baseado nessa projeção, a Tabela 8 mostra uma estimativa da população que seria atendida se o metano gerado no aterro fosse convertido em energia elétrica, durante os 20 anos de sua vida útil, totalizando 566.081.834 kW de energia disponível neste tempo e atendendo 233.584 habitantes.

**Tabela 8 - Estimativa da população atendida pela energia elétrica gerada no aterro**

Ano	Energia Disponível (kW/ano)	População atendida
2018	0	0
2019	3176646	1.347
2020	6245078	2.649
2021	9210699	3.907
2022	12081492	5.125
2023	14857676	6.303
2024	17547233	7.444
2025	20153915	8.550
2026	22677339	9.621
2027	25125025	10.659
2028	27500248	11.667
2029	29806105	12.645
2030	32049566	13.597
2031	36344134	14.522
2032	38408631	15.419
2033	40417023	16.295
2034	42375723	17.147
2035	44282805	17.978
2036	46144518	18.787
2037	47954683	19.577
2038	49723295	20.345

Fonte: Autor, 2018.

## 6. CONCLUSÃO

A sociedade tem a gestão de resíduos sólidos como um grande desafio, uma vez que sua produção teve um aumento exponencial devido a intensificação das atividades humanas nos últimos anos. Essa situação dificulta cada vez mais o tratamento adequado dos resíduos sólidos urbanos e demanda ainda mais recursos para a execução de ações.

Considerando que o trabalho teve como objetivo principal demonstrar o potencial energético de um aterro sanitário recebendo resíduos sólidos da região de Ponta Grossa-PR, a região demonstrou uma grande capacidade de produzir metano, podendo gerar cerca de 119.583.894 m<sup>3</sup> de metano durante sua vida útil de 20 anos.

Com a necessidade de obtenção de energia limpa, faz-se totalmente necessária a exploração desse tipo de energia. Outro aspecto que deve ser mencionado é a falta de áreas adequadas para instalação de aterros sanitários e o alto investimento que demanda esse tipo de empreendimento, fazendo dos consórcios intermunicipais importantes ferramentas a serem implantadas no país.

De acordo com as análises, a energia disponível seria de 566.081.834 kW durante a vida útil do aterro e atenderia 233.584 habitantes nestes 20 anos, minimizando a emissão de gases do efeito estufa e impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8.419/1992: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro. ABNT.

AL SEADI, T; HOLM-NIELSEN, J.B.; B OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization, **Bioresource Technology**, Volume 100, Issue 22, November 2009, Pages 5478-5484

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL H, KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S. Biogas handbook. Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg; 2008. p. 10–42.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.896: aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro. ABNT.

BARROS, R.M.; FILHO, G.L.T.; SILVA, T.R. The electric energy potential of landfill biogás in Brazil. **Energy Policy**. V. 65, p. 150-164. 2015.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, ago., 2010.

BOND, T; TEMPLETON, M.R. History and future of domestic biogas plants in the developing world, **Energy for Sustainable Development**, Volume 15, Issue 4, December 2011, Pages 347-354

CHIODO, V; MAISANO, S; ZAFARANA, G; URBANI, F; Effect of pollutants on biogas steam reforming, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 3, 2017, p. 1622-1628, ISSN 0360-3199

COELHO, S. T; VELÁZQUEZ, S. M. S. G; SILVA, O. C. da; ABREU, F. C. de. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18 kW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5., 2006. Brasília. **Anais**. São Paulo: Informação Verbal, 2006. p. 1-12.

FELICORI, T.C.; MARQUES, E.A.G.; SILVA, T.Q.; PORTO, B.B.; BRAVIN, T.C.; SANTOS, K.M.C. Identificação de áreas adequadas para a construção de aterros sanitários e usinas de triagem e compostagem na mesorregião da Zona da Mata, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.** V. 21, n. 3, 2016.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. van; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 2, p. 29-52.

GANZOURY, M. A.; ALLAM, N. K. Impact of nanotechnology on biogas production: A mini-review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, 2015, p. 1392-1404

GOUVEIA, N. Resíduos Sólidos Urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**. V. 17, n. 6, p. 1503-1510, 2012.

HNAIN, A.K.; COCKBURN, L.N.; LEFBRVE, D.D. Microbiological processes for waste conversion to bioenergy products: Approaches and directions. **Environ. Rev.** v. 19, p. 214-237. 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 1991. Rio de Janeiro, 1992

\_\_\_\_\_. Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro, 2011.

KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. *The biogas handbook Science, Production and applications* (pp. 378 - 403).

KUMAR, A.; SMADDER, S.R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**. n. 69, p. 407-422. 2017

MONTEIRO, J.H.P et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Secretaria Especial do Desenvolvimento Urbano da Presidência da República. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

OLIVEIRA, T.B.; GALVÃO JÚNIOR, A.C. Planejamento municipal na gestão dos resíduos sólidos urbanos e na organização da coleta seletiva. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 21, n.1, p. 55-64, 2016.

PARANÁ. Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Plano de Regionalização da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado do Paraná. Curitiba, 2013. Disponível em: <[http://www.residuossolidos.sema.pr.gov.br/modules/documentos/get\\_file.php?curent\\_file=1050&curent\\_dir=832](http://www.residuossolidos.sema.pr.gov.br/modules/documentos/get_file.php?curent_file=1050&curent_dir=832)> Acesso em 25 jan. 2018.

PIÑAS, J.A.V.; VENTURINI, O.J; LORA, E.E.S.; OLIVEIRA, M.A.; ROALCABA, O.D.C. Aterros Sanitários para geração de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (CETESB). R. bras. Est. Pop. Rio de Janeiro, v.33, n.1, p.175-188 jan/abr. 2016.

POMPERMAYER, R.S.; JUNIOR, D.R.P. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2000.

RAMACHANDRA, T.V.; BHARATH, H.A.; KULKARNI, G.; HAN, S.S. Municipal Solid Waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 82, p. 1122-1136. 2018.

SÁ, L. R. V.; CAMMAROTA, M. C.; FERREIRA-LEITAO, V. S. *Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia - aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros*. **Quím. Nova, São Paulo**, v. 37, n. 5, p. 857-867, 2014.

SANTANA, M. S. A. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Arapiraca – AL. Dissertação de Mestrado (Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas. 97 f. 2016.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir de diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa & Energia**, v.2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SHARMA, V. K.; LASTELLA, G.; TESTA, C.; CORNACCHIA, G.; NOTORNICOLA, M.; VOLTASIO, F. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. **Energy Conversion & Management**, V. 43, p.63-75, 2000.

SURENDRA, K.C.; TAKARA, D.; HASHIMOTO, A.G.; KHANAL, S.K. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V.31, p.846-859, 2014

SANTOS, I.F.S.; BARROS, R.M.; FILHO, G.L.T. Electricity generation from biogas of anaerobic treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production**. n. 126, p. 504-514. 2016

SOARES, F.R.; MIYAMARU, E.S.; MARTINS, G. Desempenho Ambiental da destinação e tratamento de resíduos do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. **Eng Sanit Ambient**. v. 22 n. 5, p. 993-1003. 2017.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. Landfill Gas Emissions Model. (LandGEM). Version 3.02 User's Guide. USEPA, May 2005. EPA-600/R-05/047.

ZHANG, Q; JIANJUN H., DUU-JONG L. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates, **Renewable Energy**, Volume 98, December 2016, Pages 108-119