



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

RAUL BATISTA ARAUJO DE SOUSA

**ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO EM  
CAMPINA GRANDE-PB**

CAMPINA GRANDE

2017

RAUL BATISTA ARAUJO DE SOUSA

**ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO EM  
CAMPINA GRANDE-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à Unidade Acadêmica de  
Engenharia Civil da Universidade Federal de  
Campina Grande como requisito parcial para a  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

**Área de Concentração:** Geotecnia Ambiental

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

**Coorientador:** Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

CAMPINA GRANDE

2017

**ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO EM  
CAMPINA GRANDE-PB**

RAUL BATISTA ARAUJO DE SOUSA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO À UNIDADE ACADÊMICA  
DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE,  
COMO REQUISITO A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Examinado por:

---

Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro  
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)

---

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo  
(Coorientador – Universidade Federal de Campina Grande)

---

Prof. Dr. Ricardo de Aragão  
(Examinador interno – Universidade Federal de Campina Grande)

---

Prof. Dr. William de Paiva  
(Examinador externo – Universidade Estadual da Paraíba)

---

Prof.<sup>ª</sup>. Msc. Maria Josicleide Felipe Guedes  
(Examinadora externa – Universidade Federal Rural do Semi-Árido)

CAMPINA GRANDE

2017

***DEDICATÓRIA***

*A minha mãe, um ser  
resiliente, e ao meu  
pai, um batalhador.*

*Amo vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abençoar minha trajetória em busca dos meus sonhos. Mesmo eu sendo tão falho, Ele quem me guiou até aqui, sendo meu refúgio em momentos de angústia e gratidão em momentos de alegria. Obrigado por fazer com que meus caminhos sempre me levem a Ti.

Aos meus pais, Abcemar e Natal, que desde cedo prezaram pela minha educação, fazendo o possível, e o impossível, para me ver realizar tantas conquistas até então. Ao meu irmão, Rubens, pela parceria diária. Aos meus familiares mais próximos, aqueles que sempre estão lá por mim, em especial meus avós maternos Antônia e Antônio, e minha tia Arenilda.

Aos meus queridos amigos de longa data, José Augusto, Alyne e Edson, pelos anos de amizade e apoio em todas as horas.

Aos amigos que a UFCG me deu, em especial, Rejane, Maiara, Roziane, Igor, Danilo, Hermerson e Anna Katarina. Obrigado por tornarem minha vida mais fácil aqui.

As amizades feitas no ambiente de pesquisa, Dani, Breno, Cláudio, Pablio, Raquel e Jisla, pelos momentos de descontração e companheirismo dentro e fora do laboratório.

Aos meus orientadores, Veruschka e Márcio, pelos ensinamentos, conselhos e pela amizade construída ao longo de 5 anos de orientação. Ao professor William e a Libânia, por todo o apoio em frente às adversidades encontradas para a defesa deste trabalho.

A todos que compõem o Grupo de Geotecnia Ambiental, antigos e novos, pela convivência e aprendizado. Gratidão, em especial, a Josi, Gleson e Kelly, que colaboraram imensamente nas minhas pesquisas.

Aos professores da UAEC/UFCG que me ajudaram nesse processo e que também são responsáveis pela minha formação, em especial, Selma, Izabelle, Lêda, Janiro, Andréa, Dayse, Iana e Ricardo.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente com esta conquista:

**MUITO OBRIGADO!**

## RESUMO

O biogás compreende um conjunto de gases produzido em larga escala em aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Por ser rico em metano, que tem alto poder calorífico, o aproveitamento energético do biogás pode ser uma fonte de energia alternativa. Contudo, para viabilizar projetos de aproveitamento energético do biogás, é necessário estimar a quantidade deste gás gerada no aterro. Para isso, existem modelos usados para quantificar teoricamente a geração de biogás para fins preliminares de avaliação do seu potencial produtivo e energético. Nesse contexto, o presente trabalho visa estimar a produção de biogás do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB (ASCG) através de uma comparação dos modelos teóricos existentes para este fim, e com isso, avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás. A metodologia é composta pelas etapas de determinação das variáveis básicas (população estimada e taxa de geração de RSU) para os modelos, aplicação dos modelos, escolha do modelo a ser melhor aplicado para o caso em estudo e determinação da energia elétrica disponível, que foi calculada para três cenários adotados levando em consideração a eficiência ( $E_f$ ) de coleta e tratamento do biogás. Os resultados das vazões de metano estimadas por cada modelo apresentaram divergências. No entanto, os valores estimados pelo modelo de decaimento de primeira ordem proposto pelo IPCC, por se basearem nas características do RSU do caso em estudo, foram os escolhidos para representar a geração de metano do ASCG, que pode chegar a  $12,6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , segundo este modelo. Com o aproveitamento do metano, as energias disponíveis para os cenários otimista ( $E_f=80\%$ ), moderado ( $E_f=60\%$ ) e pessimista ( $E_f=40\%$ ) atingem os valores de  $33 \times 10^3$ ,  $24,7 \times 10^3$  e  $16,4 \times 10^3 \text{ MWh} \cdot \text{ano}^{-1}$ , respectivamente. Concluiu-se que existe um potencial teórico favorável ao aproveitamento energético de metano no ASCG.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos. Metano. Modelos.

## ABSTRACT

Landfill gas (LFG) is a set of gases commonly produced in sanitary landfills filled with municipal solid waste (MSW). Since LFG is a methane-rich by product that has a high calorific value, LFG energy recovery can be an alternative energy source. However, in order to make LFG energy projects feasible, it is necessary to estimate the amount of LFG generated in the landfill. For this, there are models used to theoretically quantify LFG generation in order to evaluate its productive and energetic potential for preliminary purposes. In this context, the present work aims to estimate the LFG production in the Campina Grande Sanitary Landfill (CGSL) through a comparison between existing theoretical models for this purpose, and with that, to evaluate the potential of LFG energy recovery. The methodology is composed by the following steps: basic variables determination (estimated population and MSW generation rate) for the models, application of the models, choice of the model to be best applied for the case under study and determination of the available electric energy, which was calculated based on three adopted scenarios that took into account the efficiency ( $E_f$ ) of LFG collection and treatment. The results of the methane flow rates estimated by each model presented divergences. However, the values estimated by the first-order decay model proposed by IPCC, which are based on the characteristics of the MSW of the case under study, were chosen to represent the methane generation in the CGSL, which can reach  $12.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ , according to the refereed model. With the recovery of methane, the available energies for the optimistic ( $E_f=80\%$ ), moderate ( $E_f=60\%$ ) and pessimistic ( $E_f=40\%$ ) scenarios reach the values of  $33 \times 10^3$ ,  $24.7 \times 10^3$  and  $16.4 \times 10^3 \text{ MWh} \cdot \text{year}^{-1}$ , respectively. It was concluded that there is a theoretical potential favorable to the energetic recovery of methane in the CGSL.

**Keywords:** Municipal solid waste. Methane. Models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores intervenientes no processo de geração de biogás em aterros .....	12
Figura 2 - Modelo de usina de aproveitamento de biogás .....	13
Figura 3 - Aterro Sanitário de Campina Grande .....	16
Figura 4 – Estimativa da vazão de metano de cada modelo .....	21
Figura 5 – Energia disponível no aterro nos cenários otimista, moderado e pessimista ..	23
Figura A.1 – Composição gravimétrica dos resíduos de Campina Grande/PB .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos modelos aplicados .....	18
Tabela A.1 – População estimada dos municípios.....	29
Tabela A.2 – Estimativa da quantidade resíduos gerados nos municípios e dispostos no aterro sanitário .....	30
Tabela B.1 – Potência disponível anual para os cenários otimista, moderado e pessimista .....	31

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos .....	11
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	11
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	11
2.1 Geração de biogás em aterros sanitários.....	11
2.2 Aproveitamento energético do biogás .....	12
2.3 Modelos para estimativa da produção de metano em aterros sanitários .....	14
2.3.1 <i>Modelos de ordem zero</i> .....	15
2.3.2 <i>Modelos de primeira ordem</i> .....	15
2.3.3 <i>Modelos de segunda ordem</i> .....	15
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Área de estudo .....	16
3.2 Determinação das variáveis básicas .....	17
3.3 Aplicação dos modelos.....	17
3.4 Determinação da energia elétrica disponível .....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Estimativa de produção de metano .....	21
4.2 Estimativa do potencial energético .....	23
5 CONCLUSÕES .....	24
REFERÊNCIAS .....	25
APÊNDICE A.....	29
APÊNDICE B.....	31
ANEXO A .....	32

## 1 INTRODUÇÃO

A procura por fontes de energia alternativas que causem o mínimo de impacto no meio ambiente é, constantemente, um dos enfoques em discussões sobre o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, o aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário constitui umas das formas sustentáveis com potencial de substituir fontes fósseis de geração de energia por uma alternativa renovável.

O biogás é produzido em larga escala em aterros sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), em função da atividade microbiana presente no meio de decomposição da fração orgânica dos RSU. Por ser rico em metano, as emissões de biogás contribuem diretamente para o aumento do efeito estufa. Por outro lado, o seu aproveitamento energético gera renda e diversifica a matriz energética de um país (CETESB, 2006; MACIEL, 2009; NISKANEN et al., 2013).

Para viabilizar projetos para aproveitamento energético do biogás, é necessário estimar a quantidade gerada desse gás no aterro sanitário e avaliar o seu potencial de geração de energia (ABRELPE, 2013). Todavia, há uma grande incerteza na estimativa das emissões de biogás em aterros de RSU, devido especialmente à variedade dos processos que ocorrem dentro da massa de resíduos (DAS et al., 2016). A falta de monitoramento dos aterros faz com que os métodos existentes para o cálculo de estimativa das emissões sejam baseados em fórmulas empíricas, que podem conter poucos parâmetros representativos e confiáveis nas previsões de quantidades de metano (TARAZONA, 2010).

Ainda assim, é preciso fazer a quantificação teórica da geração de biogás em aterro sanitário para fins preliminares de avaliação do seu potencial produtivo. Dessa forma, a análise de métodos usados para estimativa de biogás deve ser realizada de maneira meticulosa para que a quantidade de metano estimada seja representativa para o caso em estudo. Do contrário, a real produção de biogás pode ser sub ou superestimada, trazendo complicações futuras na execução de projetos de aproveitamento energético.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estimar a produção de biogás do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar modelos teóricos de estimativa de geração de biogás e verificar o que melhor representa o caso em estudo.
- Determinar o potencial de aproveitamento energético do biogás do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Geração de biogás em aterros sanitários

O processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos RSU dispostos em aterros sanitários resulta na produção de biogás (SCHEUTZ; KJELDSEN, 2004; NISKANEN et al., 2013). De forma geral, o biogás é uma mistura de gases composta por 45-60% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 40-60% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de outros gases em menores proporções, tais como nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Segundo Sancic e Panarello (2012), a composição do biogás pode variar de uma célula de aterro sanitário para outra. Devido a isso, é possível encontrar quantidades variáveis de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e componentes de traço, além de nitrogênio e oxigênio derivados do ar que é encaminhado para o aterro sanitário.

Para a Agência Ambiental da Inglaterra (2004), os fatores que influenciam a composição e geração do biogás em aterro são: composição e propriedades físico-químicas do resíduo, forma e nível de atividade microbiológica, idade do resíduo, características hidráulicas do local e temperatura do aterro. Maciel (2009), por sua vez, divide os fatores que afetam a geração de biogás em 4 categorias: geometria e operação do aterro, características iniciais do resíduo, ambiente interno e ambiente externo (Figura 1). Ainda conforme o referido autor, as interações física, química e biológica de todos estes fatores ao longo do processo de degradação dos

resíduos são fundamentais para a definição do potencial de geração de biogás no maciço sanitário.

Figura 1 - Fatores intervenientes no processo de geração de biogás em aterros

Geometria e operação do aterro	Caract. iniciais dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensão do aterro;</li> <li>- impermeabilização do aterro;</li> <li>- Compactação do lixo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composição do lixo;</li> <li>- Umidade do lixo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade da massa na degradação;</li> <li>- pH nas células;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Disponibilidade de nutrientes/bactérias;</li> <li>- Presença de agentes inibidores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitação e infiltração;</li> <li>- Variação pressão atmosférica;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Evapotranspiração;</li> <li>- Umidade relativa do ar</li> </ul>

Fonte: Maciel (2009)

O metano, principal componente do biogás, é formado pela atividade dos microrganismos metanogênicos em condições anóxicas, seja através da clivagem direta do acetato em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  ou pela redução de  $\text{CO}_2$  com hidrogênio (SPOKAS et al., 2006). Themelis e Ulloa (2007) estimaram que, assumindo a completa síntese da matéria orgânica, 1 ton de RSU contendo 69,5% de biomassa geraria cerca de 208  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4$ . Estudos de Verma e Themelis (2004) reportam uma taxa de geração de biogás de 100-200  $\text{Nm}^3$  (54-108  $\text{Nm}^3$  de  $\text{CH}_4$ ) por tonelada de resíduo com 60% de materiais biodegradáveis.

As emissões de metano advindas de aterros sanitários tem sido uma questão de interesse público, uma vez que o metano, quando liberado para a atmosfera, absolve radiação terrestre e contribui para o efeito estufa (SCHEUTZ; KJELDSSEN, 2004). Estima-se que o gás metano seja aproximadamente 21 vezes mais nocivo para o aumento do efeito estufa do que o gás carbônico (IPCC, 2007).

## 2.2 Aproveitamento energético do biogás

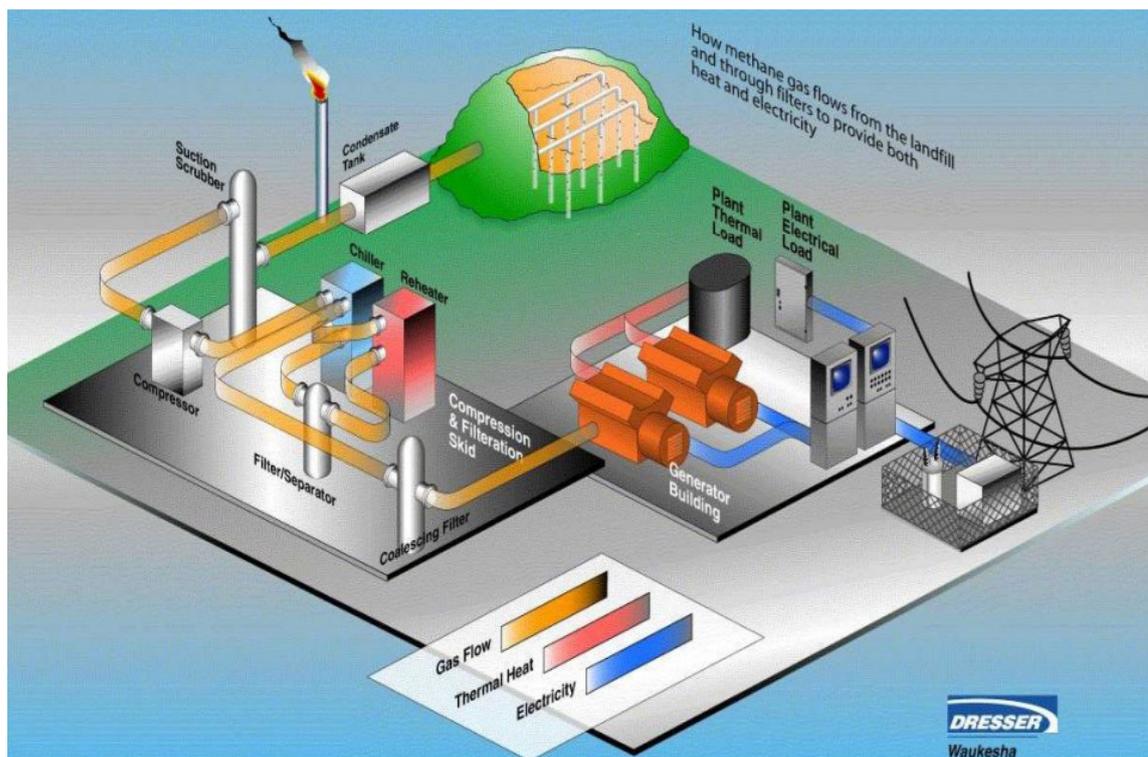
Em função do seu alto poder calorífico, o metano gerado em aterro pode ser potencialmente utilizável como fonte de energia renovável, através da sua captura e conversão em energia ou calor. Com o aproveitamento do biogás (metano), é possível reduzir a quantidade deste gás na atmosfera, mitigando assim o aquecimento global (VERA-ROMERO et al., 2014). De acordo com Spokas et al. (2006), a captura do biogás tem se tornado viável por dois motivos:

a geração de energia elétrica para consumo próprio do aterro, venda do excedente e obtenção de créditos de carbono, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), com a redução das emissões de  $\text{CH}_4$ .

O meio de utilização mais comum do biogás de aterros sanitários é como combustível para a geração de energia elétrica, sendo seu uso vantajoso, pois produz valor agregado (CETESB, 2006). A conversão energética do biogás se dá por um processo de transformação da energia química de suas moléculas, por meio da combustão controlada, em energia mecânica, que por sua vez será convertida em energia elétrica (USEPA, 2017). Para isso, existem tecnologias convencionais, como motores de combustão interna, microturbinas e turbinas a gás (PECORA et al., 2008). Outras tecnologias incluem a caldeira/turbina a vapor e aplicações de ciclo combinado (USEPA, 2017).

De forma geral, o aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica compreende, as etapas de extração, tratamento e conversão do biogás em energia elétrica ou calor (MELLO; GRASSI, 2014). Na Figura 2 é apresentado um esquema de uma usina de aproveitamento energético do biogás.

Figura 2 – Modelo de usina de aproveitamento de biogás



Fonte: USEPA (2017)

Para Zanette (2009), o aproveitamento energético do biogás é viável em aterros sanitários que atendam a uma população superior a 200000 habitantes. Ainda conforme este autor, o biogás pode ser bastante competitivo em relação aos combustíveis mais comumente utilizados na indústria, como o gás natural, óleo combustível e GLP.

### **2.3 Modelos para estimativa da produção de metano em aterros sanitários**

A quantificação das emissões de biogás a partir de resíduos sólidos é um dos objetivos previstos no Protocolo de Quioto, o qual ressalta a importância de avaliar a contribuição dos aterros sanitários na produção de gases estufa e identificar medidas que devem ser adotadas para a redução desses gases emitidos (ATABI et al., 2014; DAS et al., 2016). Tal fato vem levando agências governamentais a propor modelos para estimativa teórica da produção de biogás em aterros sanitários (KAMALAN et al., 2011; SCHARFF; JACOBS, 2006).

Os modelos matemáticos são uma ferramenta útil e econômica para estimar o potencial de geração de biogás no aterro (WORLD BANK, 2004). Um modelo de geração de biogás tem a função de fornecer uma estimativa de metano gerado ou do volume total de biogás ao longo do tempo a partir de um volume de resíduos específico. O objetivo desses modelos é descrever, em termos simples, as alterações complexas verificadas durante a decomposição dos resíduos em um aterro, baseando-se no princípio da conservação da massa (ABRELPE, 2013).

Uma série de modelos tem sido utilizados para quantificar as emissões de CH<sub>4</sub> de aterros sanitários (IPCC, 1996; SCHARFF; JACOBS, 2006). Esses métodos variam amplamente, não apenas nos pressupostos que fazem, mas também na sua complexidade e na quantidade de dados que requerem (IPCC, 1996). Os resultados obtidos nestes modelos podem ser utilizados para avaliar o potencial de emissão e/ou migração perigosas de biogás, além de avaliar a viabilidade de projetos de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro (WORLD BANK, 2004).

Esses modelos podem ser adaptados a aterros específicos por meio de uma série de pressupostos sobre as condições do local. Todavia, em muitos países, especialmente naqueles em desenvolvimento, a falta de dados sobre o gerenciamento de resíduos no aterro pode gerar incertezas nas estimativas (KUMAR et al, 2004). De forma geral, os modelos existentes para estimativa de biogás dividem-se em três categorias: de ordem zero, de primeira ordem (monofásicos e multifásicos) e de segunda ordem (ABRELPE, 2013).

### *2.3.1 Modelos de ordem zero*

Esse tipo de modelo é o mais simples para a estimativa de biogás em aterros sanitários (KUMAR et al., 2004). Segundo Kamalan et al. (2011), nos modelos de ordem zero, assume-se que a geração do biogás em aterro a partir de um determinado montante de resíduos torna-se constante em relação ao tempo.

Um modelo de ordem zero indica que a taxa de geração de  $\text{CH}_4$  é independente da quantidade de substrato restante ou da quantidade de biogás já produzida (ATABI et al., 2014). Em outras palavras, esse método pressupõe que todo o  $\text{CH}_4$  seja produzido pelos resíduos no ano que estes são dispostos no aterro (IPCC, 1996). Estes modelos dependem, dentre outras variáveis, da estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente nos resíduos (TIKHE et al., 2015).

### *2.3.2 Modelos de primeira ordem*

Os modelos de decaimento de primeira ordem são os mais usados para previsão de biogás em aterros mundialmente (KAMALAN et al., 2011). Diferentemente dos modelos de ordem zero, os de primeira ordem consideram a hipótese de que a geração de biogás a partir de um determinado montante de resíduos decai exponencialmente com o tempo até o material se estabilizar (IPCC, 1996). Assim, estes modelos dispõem de uma constante de decaimento ( $k$ ), que, dependendo do modelo, pode variar em função da disponibilidade de nutrientes na massa de resíduos, pH, temperatura, umidade dos resíduos e precipitação pluviométrica da região (NECKER; ROSA, 2013).

Alguns modelos de primeira ordem são combinados para expressar a geração de metano a partir de diferentes frações de resíduos. Tais modelos são classificados como modelos multifásicos (COOPS et al., 1995).

### *2.3.3 Modelos de segunda ordem*

Assim como os modelos de primeira ordem, os de segunda ordem também foram propostos para estimar emissões de metano com base na química e na microbiologia da síntese do  $\text{CH}_4$  (ABRELPE, 2013). Entretanto, modelos de segunda ordem descrevem as reações que acontecem durante a degradação dos resíduos usando um grande número de reações de primeira ordem com diferentes taxas (KAMALAN et al., 2011).

De dessa forma, os modelos cinéticos de segunda ordem são usados em sistemas complexos, os quais consideram as muitas reações que estão envolvidas no processo de geração de  $\text{CH}_4$  (REINHART; FAOUR, 2004).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo compreendeu o Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), situado no município de Campina Grande - PB (coordenadas: Latitude  $7^{\circ}16'38''\text{S}$  e Longitude  $36^{\circ}0'51''\text{O}$ ). Este aterro ocupa uma área total de 64 ha, sendo 40 ha destinados à disposição de RSU, e recebe, atualmente, resíduos provenientes dos municípios de Campina Grande, Puxinanã, Montadas, Boa Vista e Lagoa Seca, totalizando assim, uma disposição de aproximadamente  $500 \text{ ton resíduos.dia}^{-1}$  (ECOSOLO, 2016; GUEDES et al., 2017).

Este empreendimento foi projetado para uma vida útil de 25 anos. Desde o início da operação do ASCG, em julho de 2015, foram encerradas 3 células de resíduos, de 22 previstas no projeto, com área de base de  $100 \times 100 \text{ m}$  e altura em torno de 20 m, escalonadas em platôs de 5 m de altura, com bermas de 6 m de comprimento (Figura 3). Cada célula de resíduos é composta por 9 drenos de gases (ECOSOLO, 2016).

Figura 3 – Aterro Sanitário em Campina Grande-PB



Fonte: Arquivo GGA/UFCG (2016)

### 3.2 Determinação das variáveis básicas

Para o estudo de estimativa de metano gerado no ASCG, foram necessários dados populacionais e de geração de RSU dos municípios atendidos pelo aterro. Esses dados constituem variáveis básicas para todos os modelos de estimativa usados nesse trabalho.

Assim, foi realizado um estudo de projeção populacional destes municípios até o ano 2050 com o intuito de abranger o período de operação do aterro (2015-2040) e um período pós-encerramento (2040-2050). Para isso, utilizou-se o método de projeção geométrica abordado por Von Sperling (2005), com base nos dados dos censos demográficos dos anos de 2000 e 2010 desses municípios, obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os valores da população estimada para os municípios em estudo estão contidos no Apêndice A.

Dentre os municípios em questão, apenas Campina Grande dispõe de dados sobre a geração anual de resíduos. Então, optou-se por utilizar os valores de taxa de geração *per capita* de RSU e eficiência de coleta dos RSU descritos no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos de Campina Grande (ECOSAM, 2014) que são  $0,2336 \text{ ton.}(\text{hab.ano})^{-1}$  e 95%, respectivamente. O Apêndice A apresenta a estimativa da quantidade resíduos gerados nos municípios e destinados para o aterro sanitário.

### 3.3 Aplicação dos modelos

Oito modelos diferentes foram aplicados na estimativa da produção de metano no ASCG, sendo dois modelos de ordem zero e seis de primeira ordem. Os modelos selecionados são utilizados em diversos países e podem diferir quanto às suas pressuposições, complexidade de cálculo e tipos de dados de entrada. Os valores adotados para as variáveis já foram previamente selecionados, sendo a sua maioria, valores padrões recomendados por cada modelo e que constam na literatura consultada.

Originalmente, alguns modelos expressam o resultado em termos de produção de biogás, e não de metano. Então, para calcular a geração de  $\text{CH}_4$ , o volume de biogás gerado foi multiplicado pela concentração típica de  $\text{CH}_4$  no biogás, que é 50%. Além disso, em alguns modelos, conversões foram feitas para expressar a taxa de geração de metano em  $\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$ . Na Tabela 1 são listados e descritos os modelos aplicados nesse estudo, bem como os valores adotados para as variáveis.

Tabela 1 – Descrição dos modelos aplicados

Modelo	Descrição	Equação	Variáveis e valores adotados	Literatura consultada <sup>1</sup>
Inventário IPCC	Modelo de ordem zero proposto pelo IPCC; potencial de geração de CH <sub>4</sub> baseia-se na composição do RSU.	$Q_{CH_4} = (\text{PopUrb} \times \text{TaxaRSU} \times \text{RSDf} \times L_0) \times (1 - \text{OX})$ $L_0 = \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{CODf} \times F \times 16/12$	<p>Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>: metano gerado (tonCH<sub>4</sub>.ano<sup>-1</sup>);  PopUrb: número de habitantes residentes;  TaxaRSU: taxa de geração de RSU <i>per capita</i> (tonRSU/hab.ano); RSDf: fração de RSU coletada e depositada no aterro (0,95);  OX: fator de oxidação (0);  L<sub>0</sub>: potencial de geração de metano (tonCH<sub>4</sub>.tonRSU<sup>-1</sup>);  FCM: fator de correção de CH<sub>4</sub> (1,0);  COD: carbono orgânico degradável (tonC.tonRSU<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>;  CODf: fração de COD dissociada (0,77);  F: fração do volume de CH<sub>4</sub> no biogás (0,5).</p>	IPCC (1996)  Necker e Rosa (2013)
EPER Alemão	Modelo de ordem zero usado na Alemanha.	$Me = M \times \text{BDC} \times \text{BDCf} \times F \times D \times C$	<p>Me: metano gerado (tonCH<sub>4</sub>.ano<sup>-1</sup>);  M: quantidade de RSU depositado por ano no aterro (tonRSU.ano<sup>-1</sup>);  BDC: proporção de carbono biodegradável (0,15);  BDCf: proporção de carbono biodegradável convertido (0,5);  F: Fator de cálculo de carbono convertido em CH<sub>4</sub> (1,33);  D: eficiência de coleta;  C: concentração de CH<sub>4</sub> (0,5).</p>	Scharff e Jacobs (2006)
DPO IPCC	Modelo de decaimento de primeira ordem proposto pelo IPCC; potencial de geração de CH <sub>4</sub> baseia-se na composição do RSU.	$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$	<p>Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>: metano gerado (tonCH<sub>4</sub>.ano<sup>-1</sup>);  L<sub>0</sub>: potencial de geração de metano (tonCH<sub>4</sub>.tonRSU<sup>-1</sup>)<sup>3</sup>;  R: quantidade acumulada de RSU depositada no aterro (tonRSU.ano<sup>-1</sup>);  k: constante de taxa de geração de metano (0,09 ano<sup>-1</sup>);  c: tempo decorrido desde o fechamento do aterro (ano)  t: tempo decorrido desde a abertura do aterro (ano).</p>	IPCC (1996)  Necker e Rosa (2013)

<sup>1</sup> Os autores abordados detêm os procedimentos detalhados para a obtenção dos valores de todas as variáveis requeridas em cada modelo, exceto as que requerem dados específicos do caso de estudo.

<sup>2</sup> O cálculo de COD é baseado na composição do RSU e na quantidade de carbono presente em cada componente da massa de RSU (IPCC, 1996). Para isso, foram usados os valores de composição gravimétrica dos RSU de Campina Grande obtida por Araújo Neto (2016), e mostrada no Anexo 1. Assim, encontrou-se um valor de COD = 0,157 tonC.tonRSU<sup>-1</sup>.

<sup>3</sup> O valor de L<sub>0</sub> neste modelo refere-se ao mesmo apresentado no modelo do Inventário do IPCC (IPCC, 1996).

Continuação da Tabela 1

Modelo	Descrição	Equação	Variáveis e valores adotados	Literatura consultada
México	Modelo de primeira ordem; baseado na composição dos RSU dos EUA; potencial de geração de CH <sub>4</sub> e taxa de decaimento baseiam-se na precipitação.	$Q = \sum_{i=u}^n .2.k.L_0.M_i.(e^{-kt})$	Q: metano gerado (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .ano <sup>-1</sup> ); k: taxa de decaimento (0,065 ano <sup>-1</sup> ); L <sub>0</sub> : potencial de geração de metano (84 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .tonRSU <sup>-1</sup> ); M <sub>i</sub> : quantidade acumulada de RSU depositada no aterro (tonRSU.ano <sup>-1</sup> ); t: tempo desde o depósito do RSU no aterro (ano).	Stege e Murray (2003) Kamalan et al. (2011)
TNO	Modelo de primeira ordem; calcula o volume de biogás gerado com base na quantidade de carbono orgânico.	$\alpha t = \zeta.1,87.A.C_0.k_1.e^{-k_1t}$	$\alpha t$ : biogás gerado (m <sup>3</sup> biogás.ano <sup>-1</sup> ); $\zeta$ : fator de dissimilação (0,58); 1,87: fator de conversão; A: quantidade acumulada de RSU depositada no aterro (tonRSU.ano <sup>-1</sup> ); C <sub>0</sub> : quantidade de carbono orgânico no RSU (130 kgC.tonRSU <sup>-1</sup> ); k: constante de taxa de degradação (0,094 ano <sup>-1</sup> ); t: tempo desde o depósito do RSU no aterro (ano).	Scharff e Jacobs (2006)
Afvalzorg	Modelo de primeira ordem do tipo multifásico; baseado nas características dos RSU da Holanda; classifica os resíduos em 3 categorias em termos de k.	$\alpha t = \zeta. \sum_{i=1}^3 .c.A.C_{0,i}.k_{1,i}.e^{-k_{1,i}t}$	$\alpha t$ : biogás gerado (m <sup>3</sup> biogás.ano <sup>-1</sup> ); $\zeta$ : fator de dissimilação (0,73); c: fator de conversão (0,72 m <sup>3</sup> biogás.kgMO <sup>-1</sup> ); A: quantidade acumulada de RSU depositada no aterro (tonRSU.ano <sup>-1</sup> ); C <sub>0</sub> : quantidade de matéria orgânica no RSU (300 kgMO.tonRSU <sup>-1</sup> ); k <sub>1,i</sub> : constante de taxa de degradação da fração i (0,10467 ano <sup>-1</sup> ); t: tempo desde o depósito do RSU no aterro (ano).	Scharff e Jacobs (2006)
LandGEM	Modelo de primeira ordem; cálculo feito através do software "LandGEM 3.02", desenvolvido pela USEPA (EUA).	$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 .k.L_0.\left(\frac{M_i}{10}\right).e^{-k_{ij}t}$	Q <sub>CH<sub>4</sub></sub> : metano gerado (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .ano <sup>-1</sup> ); k: constante de geração de metano (0,05 ano <sup>-1</sup> ); L <sub>0</sub> : potencial de geração de metano (170 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> .tonRSU <sup>-1</sup> ); M <sub>i</sub> : quantidade acumulada de RSU depositada no aterro (tonRSU.ano <sup>-1</sup> ); t: tempo desde o depósito do RSU no aterro (ano).	USEPA (2005)

Continuação da Tabela 1

Modelo	Descrição	Equação	Variáveis e valores adotados	Literatura consultada
CETESB	Modelo de primeira ordem; cálculo feito através do software “Biogás, geração e uso energético – aterros, 1.0”, desenvolvido pela CETESB.	$Q = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)}$	Q: metano gerado no ano x pelo RSU depositado no ano T ( $m^3CH_4 \cdot ano^{-1}$ ); k: constante de decaimento ( $0,08 \text{ ano}^{-1}$ ); L <sub>0</sub> : potencial de geração de metano ( $0,154 \text{ m}^3CH_4 \cdot kgRSU^{-1}$ ); R <sub>x</sub> : fluxo de RSU no ano x ( $kgRSU$ ); T: ano de deposição do RSU no aterro (ano); x: ano atual (ano).	CETESB (2006)

A partir da comparação dos resultados gerados pelos modelos e análise das variáveis, selecionou-se o modelo que poderia melhor representar o caso em estudo.

### 3.4 Determinação da energia elétrica disponível

Os cálculos de geração de energia foram baseados nos valores de vazão de CH<sub>4</sub> obtidos pelo modelo selecionado. A estimativa da energia elétrica disponível, considerando o rendimento de um motor de combustão interna com operação ininterrupta ( $24h \cdot dia^{-1}$ ), foi feita por meio da Equação 1, adaptada de Piñas et al. (2016):

$$E = \frac{Q \cdot P_{cm} \cdot E_c}{31536000} \cdot \frac{k}{1000} \cdot Rend \cdot \Delta t \quad (1)$$

Onde:

E: energia disponível por ano ( $kWh \cdot ano^{-1}$ );

Q: vazão de metano ( $m^3CH_4 \cdot ano^{-1}$ );

E<sub>c</sub>: eficiência de coleta de gases (%);

31536000: número de segundos em um ano ( $s \cdot ano^{-1}$ );

1/1000: para transformação da unidade  $J \cdot s^{-1}$  para kW;

P<sub>cm</sub>: poder calorífico do metano ( $35,53 \times 10^3 \text{ J} \cdot m^{-3}CH_4$ );

k: 1000;

Rend: rendimento do motor operando a plena carga (33%);

Δt: tempo de operação do motor durante um ano (8760 h).

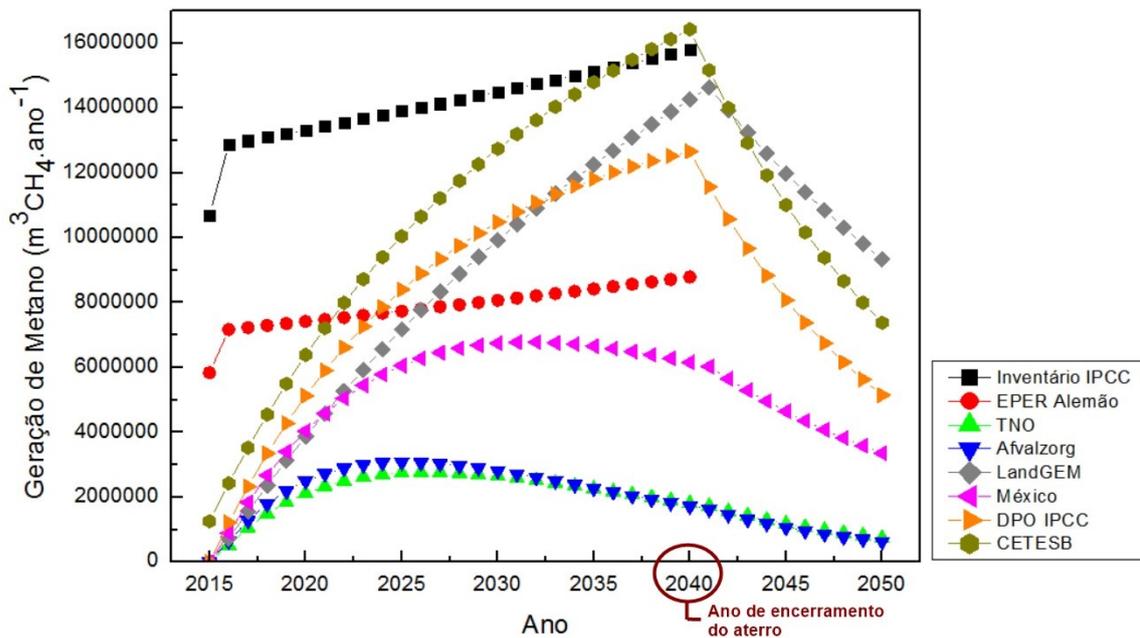
Foram delimitados três cenários de aproveitamento energético do biogás do aterro, denominados de otimista, moderado e pessimista, de acordo com a eficiência de captura e tratamento do biogás. Os valores de eficiência adotados foram 80%, 60% e 40%, para os cenários otimista, moderado e pessimista, respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estimativa de produção de metano

A Figura 4 mostra os resultados dos valores de vazão de  $\text{CH}_4$  estimados em cada modelo ao longo do período considerado.

Figura 4 – Estimativa da vazão de metano de cada modelo



No geral, os resultados obtidos pelos modelos apresentam grande divergência entre si, o que pode ser devido à variabilidade dos parâmetros de entrada exigidos por cada modelo. Isso reafirma a importância de verificar a aplicabilidade de modelos de estimativa antes de serem usados como base para projetos de aproveitamento energético do biogás. Fato semelhante foi constatado nos estudos de Das et al. (2016), quando compararam a aplicação dos modelos TNO, Afvalzorg, LandGEM e EPER Alemão na estimativa de geração de biogás em aterros na Índia.

Os resultados dos modelos Inventário IPCC e EPER Alemão apresentaram um comportamento típico dos modelos de ordem zero, uma vez que o crescimento das emissões de CH<sub>4</sub> durante todo o período foi diretamente proporcional ao aumento anual da quantidade de RSU depositado no aterro (Apêndice A). Para ambos os modelos, o ano de geração máxima de CH<sub>4</sub> será 2040, que corresponde ao final da vida útil do ASCG e também ao ano que ocorrerá maior disposição de RSU. Como esses modelos consideram que toda a produção de CH<sub>4</sub> de uma quantidade de resíduos depositados em um determinado ano é instantânea, ou seja, liberada nesse mesmo ano, não foram quantificadas vazões de CH<sub>4</sub> no período que não haverá disposição de RSU (período pós encerramento do aterro). Isso pode indicar falta de acurácia nos resultados (KAMALAN et al., 2011), além inviabilizar o uso desses modelos em projetos de aproveitamento de biogás (MENDES; MAGALHÃES SOBRINHO, 2005).

Os resultados gerados pelos modelos de primeira ordem (TNO, Afvalzorg, LandGEM, México, DPO IPCC e CETESB) também apresentaram o padrão típico desse tipo de modelo, que é caracterizado pelo aumento da produção de CH<sub>4</sub> ao longo dos anos, devido ao acúmulo de RSU disposto no aterro, até o alcance de um valor máximo seguido por um declínio nessa produção a partir de um determinado momento (DAS et al., 2016). No entanto, os modelos TNO, Afvalzorg e México apresentaram valores de vazões máximas de CH<sub>4</sub> durante a vida útil do aterro. Já os modelos DPO IPCC, LandGEM e CETESB indicaram que os picos de CH<sub>4</sub> ocorrerão no final da vida útil do aterro ou imediatamente após seu encerramento. Isso também foi verificado por Scharff e Jacobs (2006), quando compararam os resultados dos modelos TNO, Afvalzorg e LandGEM usados para estimar produção de biogás em aterros na Holanda.

Os resultados gerados pelos modelos TNO e Afvalzorg foram bem inferiores aos dos outros modelos de primeira ordem. Provavelmente, isso se deve ao fato de que os modelos TNO e Afvalzorg são baseados na quantidade de carbono degradada e quantidade de matéria orgânica dos RSU, respectivamente. Já os outros modelos se baseiam diretamente no potencial de geração de metano dos RSU, sem outras conversões. As vazões máximas de CH<sub>4</sub> geradas pelos modelos TNO e Afvalzorg foram  $2,8 \times 10^6$  e  $3,1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Tal proximidade de valores foi observada durante todo o período de tempo considerado, e também, nos estudos de Scharff e Jacobs (2006).

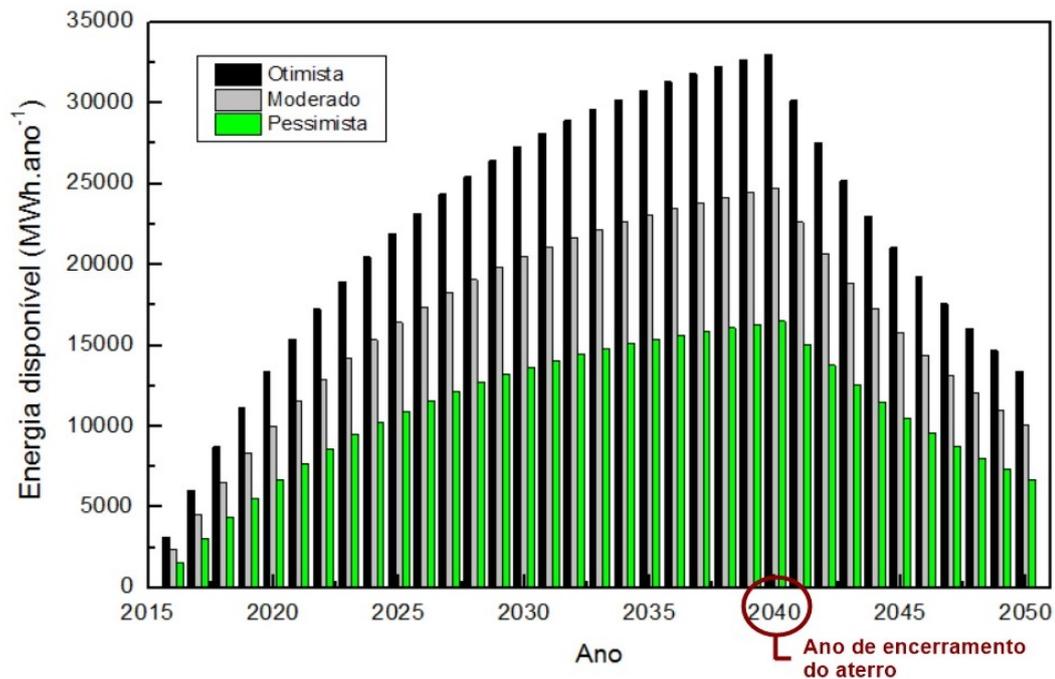
Os modelos LandGEM, CETESB e DPO IPCC apresentaram vazão máxima de CH<sub>4</sub> de  $14,6 \times 10^6$ ,  $16,4 \times 10^6$  e  $12,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Diferentemente dos modelos LandGEM e CETESB, que utilizam valores padrões para L<sub>0</sub>, o modelo de decaimento de primeira ordem proposto pelo IPCC considera o potencial de geração de CH<sub>4</sub> do RSU obtido por meio de cálculos que levam em conta a composição do RSU do caso em estudo. Por essa

razão, as vazões de CH<sub>4</sub> estimadas pelo modelo DPO IPCC foram as escolhidas para representar o potencial de geração de CH<sub>4</sub> do ASCG.

#### 4.2 Estimativa do potencial energético

Na Figura 5 é mostrada a quantidade anual de energia gerada com o aproveitamento do CH<sub>4</sub> por meio de motor de combustão interna a pistão para os três cenários considerados. A potência disponível anual para cada cenário pode ser conferida no Apêndice B.

Figura 5 – Energia disponível no aterro nos cenários otimista, moderado e pessimista



A estimativa de energia elétrica para os três cenários segue a mesma tendência, aumentando com o passar dos anos, até 2040, quando começa a declinar. Isso acontece porque a energia elétrica depende, dentre outros fatores, da geração anual de CH<sub>4</sub>, que tem esse mesmo comportamento. As energias disponíveis para os cenários otimista, moderado e pessimista atingem os valores de  $33 \times 10^3$ ,  $24,7 \times 10^3$  e  $16,4 \times 10^3$  MWh.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, para o investimento em uma usina de reaproveitamento energético, considera-se um valor constante de geração de energia ao longo do tempo e o gás excedente pode ser queimado para a obtenção de créditos de carbono (VANZIN, 2006), ou estocado para utilização na frota veicular do próprio aterro (TENORIO, 2015).

Partindo desse pressuposto, foi possível verificar a viabilidade, apenas em termos energéticos, da instalação de usinas com o potencial de geração de  $13 \times 10^3$ ,  $10 \times 10^3$ ,  $6 \times 10^3$  MWh.ano<sup>-1</sup> nos cenários otimista, moderado e pessimista, respectivamente. Em todos os cenários, a operação de suas respectivas usinas começaria em 2020, ano em que haveria potência disponível suficiente para gerar a quantidade de energia prevista (Apêndice B), e continuaria em pleno funcionamento até 2050, 10 anos após o encerramento do aterro.

Baseando-se no valor do consumo médio mensal de energia de uma residência no Brasil, que é 160 kWh.mês<sup>-1</sup> (EPE, 2017), foi possível verificar que a energia gerada pela usina no cenário otimista atenderia ao consumo de energia de aproximadamente 6770 habitações. Já o cenário moderado teria condições de suprir a demanda energética de 5200 casas. O cenário pessimista, por sua vez, atenderia cerca de 3120 residências.

## 5 CONCLUSÕES

- O modelo DPO IPCC foi escolhido para representar a geração de CH<sub>4</sub> do caso em estudo, uma vez que é um modelo de primeira ordem que leva em consideração as características dos RSU depositados no aterro em questão.
- A estimativa de produção de metano no ASCG entre os anos 2015 e 2050 foi, em média,  $8,31 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, com vazão máxima de  $12,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> no ano de 2040.
- Mediante os resultados de geração de energia obtidos para os cenários simulados, existe um potencial teórico favorável ao aproveitamento energético de metano no ASCG, o que se constitui em um indicativo inicial para a elaboração de um projeto de usina de biogás.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos*, 2013.
- ARAÚJO NETO, C. L. *Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- ATABI, F.; EHYAEI, M. A.; AHMADI, M. H. *Calculation of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Emission Rate in Kahrizak Landfill Site with Land GEM Mathematical Model*. In: The 4<sup>th</sup> World Sustainability Forum 2014 – Conference Proceedings Paper, 2014.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros- versão 1.0*. São Paulo: SMA: CETESB: MCT, 2006.
- COOPS, O.; LUNING, L.; OONK, H.; WEENK, A. *Validation of landfill gas formation models*. In: Fifth international landfill symposium, Sardinia, Itália, 1995.
- DAS, D.; MAJHI, B. K.; PAL, S.; JASH, T. *Estimation of land-fill gas generation from municipal solid waste in Indian Cities*. Energy Procedia, v. 90, p. 50-56, 2016.
- ECOSAM – Consultoria em Saneamento Ambiental Ltda. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Campina Grande-PB*. João Pessoa: ECOSAM, 2014.
- ECOSOLO – Gestão Ambiental de Resíduos Ltda. *Dados do monitoramento do Aterro Sanitário de Campina Grande*. 2016.
- ENVIRONMENT AGENCY. *Guidance on monitoring landfill gas surface emissions*. Bistol, 2004.
- EPE - Empresa Brasileira Energética. *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica – junho de 2017*. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- GUEDES, M. J. F.; MOREIRA, F. G. S.; AIRE, K. O.; CURI, R. C.; MONTEIRO, V. E. D. *Simulação do potencial de geração de biogás para o Aterro Sanitário em Campina Grande – PB*. In: II Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, Campina Grande, Brasil, 2017.
- HEGDE, U.; CHANG, T.; YANG, S. *Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan*. Chemosphere, v. 52, p. 1275–1285, 2003.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change*, 2007. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual*, 1996.

KAMALAN, H.; SABOUR, M.; SHARIATMADARI, N. *A Review on Available Landfill Gas Models*. Journal of Environmental Science and Technology, v. 4, n. 2, p. 79-92, 2011.

KUMAR. S.; GAIKWAD, S. A.; SHEKDAR, A. V.; KSHIRSAGAR, P. S.; SINGH, R. N. *Estimation method for national methane emission from solid waste landfills*. Atmospheric Environment, v. 38, p. 3481–3487, 2004.

MACIEL, F. J. *Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MELLO, A. R.; GRASSI, R. *Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2014.

MENDES, L. G. G.; MAGALHÃES SOBRINHO, P. *Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário*. Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 71-76, 2005.

MOREIRA, C.; CASTRO, M.; GONSALEZ, A.; CAVALLARI, F.; MUNHOS, T.; PEREIRA, A. *Comparative Analysis between Biogas Flow in Landfill and Electrical Resistivity Tomography in Rio Claro City, Brazil*. Journal of Geological Research, v. 2014, p. 1-7, 2014.

NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. *Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná – RO*. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas – UFSM, v. 17, n. 17, p. 3416- 3424, 2013.

NISKANEN, A.; VÄRRI, H.; HAVUKAINEN, J.; UUSITALO, V.; HORTTANAINEN, M. *Enhancing landfill gas recovery*. Journal of Cleaner Production, v. 55, p. 67-71, 2013.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. *Conversão Energética do Biogás: Estudo de Caso em São Paulo*. In: Simpósio Brasileiro de Agroenergia, Botucatu, 2008.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; OLIVEIRA, M. A.; ROALCABA, O. D. C. *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. 75-188, 2016.

REINHART, R.; FAOUR, A. *First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills*. University of Central Florida, EUA. 2004.

SANCI, R.; PANARELLO, H. O. *CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Flux Measurements from Landfills - A Case Study: Gualaguaychú Municipal Landfill, Entre Ríos Province, Argentina*. Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management, Dr Guoxiang Liu (Ed.), InTech, p. 255-272, 2012.

SCHARFF, H.; JACOBS, J. *Applying guidance for methane emission estimation for landfills*. Waste Management, v. 26, p. 417–429, 2006.

SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P. *Environmental Factors Influencing Attenuation of Methane and Hydrochlorofluorocarbons in Landfill Cover Soils*. Journal of Environmental Quality, v. 33, p.72-79, 2004.

SPOKAS, K.; BOGNER, J.; CHANTON, J. P.; MORCET, M. ARAN, C. GRAFF, C. GOLVA, M.; HEBE, I. *Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?* Waste Management, v. 26, p. 516-525, 2006.

STEGE, A. C.; MURRAY, D. L. *User's Manual Mexico Landfill Gas Model*. Washington: EPA, 2003.

TARAZONA, C. F. *Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management*. Engineering principles and management issues. New York: McGraw-Hill, 1993.

TENORIO, R. O. *Estudo para aproveitamento energético de biogás de resíduos sólidos urbanos em Campo Grande/MS*. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2015.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. *Methane generation in landfills*. Renewable Energy, v. 32, p. 1243–1257, 2007.

TIKHE, K. S.; BALAPGOL, B. S.; MALI, S. T. *Review of Different Landfill Gas Estimation Models*. Journal of Mechanical and Civil Engineering, p. 71-79, 2015.

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

USEPA - United States Environmental Protection Agency. *LFG Energy Project Development Handbook*. Landfill Methane Outreach Program, 2017.

VANZIN, E. *Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro Santa tecla*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VERA-ROMERO, I. V.; REYES, J. M.; BARAGÁN, C. C. E.; JARAMILLO, M. E.; SORIANO, A. O.; OROZCO, L. E. M. *Biogas Estimation as a Basis for the Implementation of an Intermunicipal Landfill: Michoacan, Mexico*. Journal of Environmental Protection, v.5, p. 577-582, 2014.

VERMA, S.; THEMELIS, N. J. *Anaerobic digestion of organic waste in MSW*. Waste management world, v. 20, n. 4, 2004.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 3ª ed, 2005.

WORLD BANK. *Handbook for the Preparation of Landfill Gas for Energy Projects in Latin America and the Caribbean*. Waterloo: Conestoga-Rovers & Associates, 2004.

ZANETTE, A. L. *Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

## APÊNDICE A

Tabelas referentes à determinação das variáveis básicas

Tabela A.1 – População estimada dos municípios

Ano	População (hab.)					Total
	CG	Puxinana	Montadas	Boa Vista	Lagoa Seca	
2015	401.055,47	13.421,69	5.595,79	6.962,45	26.820,06	453.855,46
2016	404.305,08	13.523,68	5.725,41	7.119,46	27.007,92	457.681,55
2017	407.581,03	13.626,44	5.858,03	7.280,01	27.197,09	461.542,60
2018	410.883,51	13.729,98	5.993,73	7.444,18	27.387,59	465.439,00
2019	414.212,76	13.834,31	6.132,57	7.612,05	27.579,42	469.371,12
2020	417.568,98	13.939,44	6.274,63	7.783,70	27.772,60	473.339,35
2021	420.952,39	14.045,36	6.419,97	7.959,23	27.967,13	477.344,09
2022	424.363,22	14.152,09	6.568,69	8.138,71	28.163,03	481.385,74
2023	427.801,69	14.259,62	6.720,85	8.322,25	28.360,29	485.464,70
2024	431.268,02	14.367,98	6.876,53	8.509,92	28.558,94	489.581,38
2025	434.762,43	14.477,16	7.035,82	8.701,82	28.758,98	493.736,21
2026	438.285,16	14.587,17	7.198,80	8.898,05	28.960,42	497.929,59
2027	441.836,43	14.698,01	7.365,55	9.098,71	29.163,27	502.161,97
2028	445.416,48	14.809,70	7.536,17	9.303,89	29.367,54	506.433,77
2029	449.025,53	14.922,23	7.710,74	9.513,69	29.573,24	510.745,44
2030	452.663,83	15.035,62	7.889,35	9.728,23	29.780,39	515.097,42
2031	456.331,61	15.149,87	8.072,10	9.947,61	29.988,98	519.490,17
2032	460.029,10	15.264,99	8.259,09	10.171,93	30.199,04	523.924,15
2033	463.756,56	15.380,99	8.450,40	10.401,31	30.410,56	528.399,82
2034	467.514,21	15.497,86	8.646,15	10.635,87	30.623,57	532.917,66
2035	471.302,32	15.615,63	8.846,43	10.875,71	30.838,07	537.478,16
2036	475.121,11	15.734,28	9.051,35	11.120,97	31.054,07	542.081,79
2037	478.970,85	15.853,85	9.261,02	11.371,75	31.271,59	546.729,06
2038	482.851,79	15.974,31	9.475,54	11.628,19	31.490,63	551.420,46
2039	486.764,17	16.095,70	9.695,04	11.890,41	31.711,20	556.156,51
2040	490.708,25	16.218,01	9.919,62	12.158,54	31.933,32	560.937,73
2041	494.684,28	16.341,24	10.149,40	12.432,73	32.156,99	565.764,64
2042	498.692,54	16.465,41	10.384,50	12.713,09	32.382,24	570.637,78
2043	502.733,27	16.590,53	10.625,05	12.999,78	32.609,05	575.557,68
2044	506.806,74	16.716,60	10.871,17	13.292,93	32.837,46	580.524,90
2045	510.913,22	16.843,62	11.122,99	13.592,69	33.067,47	585.539,99
2046	515.052,97	16.971,61	11.380,65	13.899,21	33.299,09	590.603,53
2047	519.226,26	17.100,57	11.644,27	14.212,65	33.532,33	595.716,08
2048	523.433,37	17.230,52	11.914,00	14.533,15	33.767,20	600.878,24
2049	527.674,57	17.361,45	12.189,98	14.860,88	34.003,72	606.090,60
2050	531.950,13	17.493,37	12.472,35	15.196,00	34.241,90	611.353,75

**Tabela A.2** – Estimativa da quantidade resíduos gerados nos municípios e dispostos no aterro sanitário

<b>Ano</b>	<b>População</b>	<b>Qt. RSU gerado (ton.ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Qt. RSU coletado (ton.ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Qt. RSU acumulado (ton)</b>
2015	-	87.000,00	87.000,00	0,00
2016	457.681,55	106.914,41	104.776,12	87.000,00
2017	461.542,60	107.816,35	105.660,02	191.776,12
2018	465.439,00	108.726,55	106.552,02	297.436,15
2019	469.371,12	109.645,09	107.452,19	403.988,16
2020	473.339,35	110.572,07	108.360,63	511.440,35
2021	477.344,09	111.507,58	109.277,43	619.800,99
2022	481.385,74	112.451,71	110.202,67	729.078,41
2023	485.464,70	113.404,55	111.136,46	839.281,09
2024	489.581,38	114.366,21	112.078,89	950.417,55
2025	493.736,21	115.336,78	113.030,04	1.062.496,44
2026	497.929,59	116.316,35	113.990,03	1.175.526,48
2027	502.161,97	117.305,04	114.958,94	1.289.516,51
2028	506.433,77	118.302,93	115.936,87	1.404.475,44
2029	510.745,44	119.310,13	116.923,93	1.520.412,31
2030	515.097,42	120.326,76	117.920,22	1.637.336,24
2031	519.490,17	121.352,90	118.925,85	1.755.256,46
2032	523.924,15	122.388,68	119.940,91	1.874.182,31
2033	528.399,82	123.434,20	120.965,51	1.994.123,22
2034	532.917,66	124.489,57	121.999,77	2.115.088,73
2035	537.478,16	125.554,90	123.043,80	2.237.088,51
2036	542.081,79	126.630,31	124.097,70	2.360.132,31
2037	546.729,06	127.715,91	125.161,59	2.484.230,01
2038	551.420,46	128.811,82	126.235,58	2.609.391,60
2039	556.156,51	129.918,16	127.319,80	2.735.627,18
2040	560.937,73	131.035,05	128.414,35	2.862.946,98
2041	565.764,64	132.162,62	0,00	2.991.361,33
2042	570.637,78	133.300,98	0,00	2.991.361,33
2043	575.557,68	134.450,27	0,00	2.991.361,33
2044	580.524,90	135.610,62	0,00	2.991.361,33
2045	585.539,99	136.782,14	0,00	2.991.361,33
2046	590.603,53	137.964,98	0,00	2.991.361,33
2047	595.716,08	139.159,28	0,00	2.991.361,33
2048	600.878,24	140.365,16	0,00	2.991.361,33
2049	606.090,60	141.582,76	0,00	2.991.361,33
2050	611.353,75	142.812,24	0,00	2.991.361,33

## APÊNDICE B

Tabela referente à potência disponível para cada cenário simulado

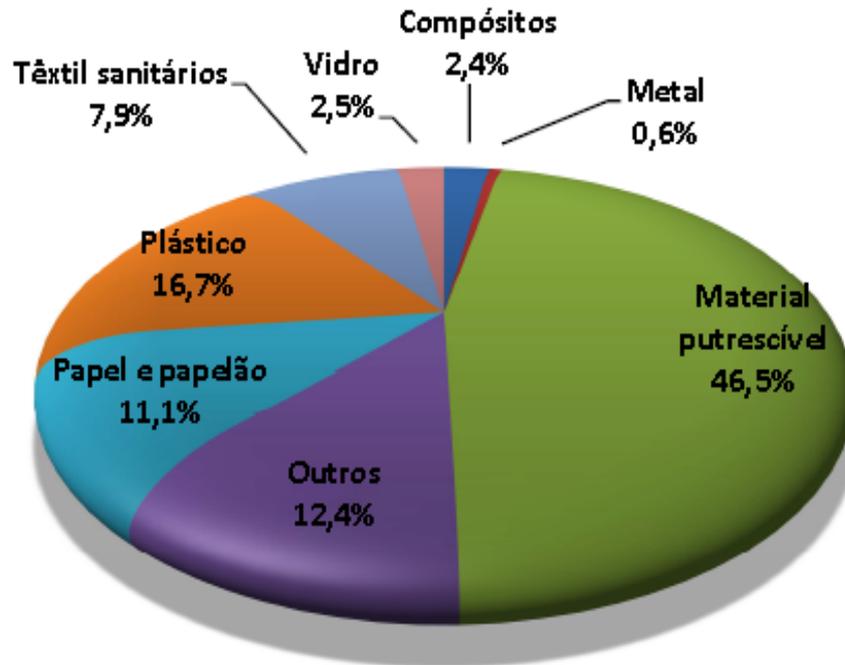
**Tabela B.1** – Potência disponível anual para os cenários otimista, moderado e pessimista

Ano	Cenário		
	Otimista	Moderado	Pessimista
	Potência disponível (MW)	Potência disponível (MW)	Potência disponível (MW)
2015	0	0	0
2016	1,10	0,82	0,55
2017	2,10	1,58	1,05
2018	3,02	2,26	1,51
2019	3,86	2,89	1,93
2020	4,62	3,47	2,31
2021	5,32	3,99	2,66
2022	5,96	4,47	2,98
2023	6,55	4,91	3,27
2024	7,08	5,31	3,54
2025	7,57	5,68	3,79
2026	8,02	6,01	4,01
2027	8,42	6,32	4,21
2028	8,80	6,60	4,40
2029	9,14	6,85	4,57
2030	9,45	7,09	4,72
2031	9,73	7,30	4,87
2032	9,99	7,50	5,00
2033	10,23	7,67	5,12
2034	10,45	7,84	5,22
2035	10,65	7,99	5,32
2036	10,83	8,12	5,41
2037	11,00	8,25	5,50
2038	11,15	8,36	5,57
2039	11,29	8,46	5,64
2040	11,41	8,56	5,71
2041	10,43	7,82	5,22
2042	9,53	7,15	4,77
2043	8,71	6,53	4,36
2044	7,96	5,97	3,98
2045	7,28	5,46	3,64
2046	6,65	4,99	3,33
2047	6,08	4,56	3,04
2048	5,55	4,17	2,78
2049	5,08	3,81	2,54
2050	4,64	3,48	2,32

## ANEXO A

Dados da composição gravimetria dos resíduos de Campina Grande/PB

Figura A.1 – Composição gravimétrica dos resíduos de Campina Grande/PB



Fonte: ARAÚJO NETO, 2016