

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de metano para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro - SP

Ariel Gontow

Prof. Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

ARIEL GONTOW

Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de  
metano para análise da viabilidade econômica do  
aproveitamento energético do biogás gerado no aterro  
municipal de Rio Claro - SP

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2016

333.79 Gontow, Ariel  
G641a Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de metano para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro - SP / Ariel Gontow. - Rio Claro, 2016  
89 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Resíduos sólidos. 3. Energia de biomassa. 4. Aterro sanitário. I. Título.

ARIEL GONTOW

Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de metano para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro - SP

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcos César Avezum Alves de Castro (orientador)

Prof. Dr. Valdir Schalch

Prof. Dr. Nelson Callegari Júnior

Rio Claro, 20 de janeiro de 2016.

---

Ariel Gontow

---

Marcus C. A. A. de Castro

*Dedico este trabalho a todos que tornaram possível a realização deste sonho, em especial dedico aos meus pais e a minha irmã por sempre me apoiarem.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, em especial aos meus pais Marcos e Marcelle, que sempre se dedicaram muito a mim, apoiando a minha formação como profissional e como homem. Todas as minhas realizações só foram possíveis com o apoio de vocês, eu amo vocês.

Gostaria de agradecer a minha irmã Mariana, que muito mais que uma irmã é minha melhor amiga, além disso sempre foi e sempre será um grande exemplo de pessoa para mim e me proporciona muito orgulho e alegrias, amo você.

Também gostaria de agradecer ao grande paparóca da família, meu vô Léo e a minha vó Maria, a minha vó materna Rosa, a minha tia Paula e ao meu tio Elie, a minha tia Silvia e ao meu tio Edu, ao meu primo Rafa e a minha prima Dani, e ao meus primos Renato e Marcelo. Todos vocês são de grande importância na minha vida e guardo as lembranças com vocês com um imenso carinho.

Todos vocês são um grande exemplo de família para mim.

Gostaria de realizar um agradecimento especial para a minha namorada Francielle, que não mediu esforços para me ajudar com as minhas dificuldades e tornou nossos momentos juntos muito especiais, obrigado por ser essa mulher maravilhosa e compartilhar a sua vida comigo, eu amo você.

Gostaria de agradecer a todos que passara na minha vida nesse momento tão especial da minha vida, a faculdade. Agradeço primeiramente aos meus amigos de sala que estiveram do meu lado desde 2011, em especial ao Carlo (Brown), Erik, Felipe, Pedro (Inri) e Roberto (Haduken). Agradeço aos meus professores que me formaram como profissional, em especial ao meu orientador Marcão, que é um ótimo professor e me orientou muito bem para a execução deste trabalho. Agradeço também ao time de basquete da Unesp Rio Claro que me proporcionou muitas alegrias nestes anos e também grandes amizades. Agradeço a Atlético Ayrton Senna e a todos os membros que trabalharam comigo e tornaram esse trabalho voluntário em algo prazeroso.

Por fim, agradeço a D'us por todas as oportunidades que colocou na minha vida, e por todas essas ótimas pessoas que se aproximaram de mim e estão fazendo da minha vida uma experiência extremamente prazerosa.

Obrigado a todos vocês!

## RESUMO

Um dos desafios para a utilização do biogás de aterro sanitário como fonte alternativa de energia elétrica, é o ajuste dos parâmetros de modelos matemáticos para previsão segura de geração de metano para as condições climáticas e de resíduos dos aterros brasileiros. Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da implantação de uma usina de 1 MW de potência para aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário municipal de Rio Claro – SP, a partir de dados de geração de metano obtidos em campo no período de 2012 a 2014 e calibração dos modelos matemáticos de *Scholl Canyon* e do *IPCC*. Os parâmetros dos modelos matemáticos foram ajustados para que os valores estimados de geração anuais de metano se aproximassem ao máximo das obtidas pelas medidas de vazão e concentração de metano no biogás do aterro de Rio Claro no período de 2012 a 2014. Para o modelo de *Scholl Canyon* os parâmetros foram adotados em  $L_0 = 201 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{RSU}}$  e  $k = 0,076/\text{ano}$ , gerando erros de 1,0% em 2012, 2,2% em 2013 e 0,1% em 2014. Para o modelo do *IPCC* os parâmetros foram adotado em  $L_0 = 121,75 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{RSU}}$  e  $k = 0,215/\text{ano}$ , gerando erros de 2,2% em 2012, 2,9% em 2013 e 2,4% em 2014. Ambos os modelos estimam o pico de geração em 2021 (ano de encerramento da vida útil do aterro), o modelo de *Scholl Canyon* estima geração máxima de 7.322.900,60  $\text{m}^3\text{CH}_4$ , enquanto que o modelo do *IPCC* estima a geração máxima de 5.825.989,70  $\text{m}^3\text{CH}_4$ . Apesar dos valores estimados pelos modelos serem parecidos entre si nos anos de 2012, 2013 e 2014, a previsão de geração de metano tem comportamentos diferentes para cada modelo: o modelo de *Scholl Canyon* estima um pico de geração maior e um decaimento mais lento, e o modelo do *IPCC* estima um pico menor e um decaimento mais acelerado. A análise econômica foi realizada pelo método do Valor Presente Líquido, que foi calculado em R\$2.490.316,01 para os valores de geração de metano estimado pelo modelo de *Scholl Canyon*, e em R\$648.937,02 para os valores estimado pelo modelo do *IPCC*, se mostrando viável para os dois cenários de geração de metano. Devido aos diferentes resultados obtidos pelos modelos para a previsão de geração de metano, recomenda-se que em análises da viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás gerado em aterro seja utilizado os valores estimados pelo modelo do IPCC, pois este gera valores de geração de metano mais conservadores, prezando pela segurança do projeto.

**Palavras-chaves:** Resíduos Sólidos. Fonte Alternativa de Energia. Energia de Biomassa. Aterro Sanitário.

## ABSTRACT

One of the challenges for the use of landfill biogas as an alternative source of electricity is adjusting the parameters of mathematical models for safe prediction of the methane generation to the climate and waste conditions of Brazilian landfills. Therefore, this study aims to analyze the economic feasibility of implementing a 1 MW power plant that use landfill gas to generated energy at the municipal landfill in Rio Claro - SP, from methane generation data obtained in the field in the period 2012-2014 and calibration of mathematical models of Scholl Canyon and IPCC. The mathematical model parameters were adjusted approaching the models estimated annual values of methane generation with the methane flow measures taken in Rio Claros's landfill in the period between 2012 and 2014. The parameters adopted for the Scholl Canyon model were  $L_0 = 201 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{MSW}}$  and  $k = 0.076/\text{year}$ , leading to errors of 1.0% in 2012, 2.2% in 2013 and 0.1% in 2014. The parameters adopted for the IPCC model were  $L_0 = 121.75 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{MSW}}$  and  $k = 0.215/\text{year}$ , leading to errors of 2.2% en 2012, 2.9% in 2013 and 2.4% in 2014. Both models estimate the peak generation in 2021 (the year of closure of the landfill), the Scholl Canyon model estimated maximum generation of 7,322,900.60  $\text{m}^3\text{CH}_4$ , while the IPCC model estimates the maximum generation of 5,825,989.70  $\text{m}^3\text{CH}_4$ . Despite the values estimated by the models were similar to each other in the years 2012, 2013 and 2014, the forecast of methane generation has different behaviors for each model: the Scholl Canyon model estimates a higher peak of generation and a slower decay, and the IPCC model estimates a lower peak and a faster decay. The economic analysis was conducted by the method of net present value, which was calculated R\$ 2,490,316.01 for the methane generation values estimated by the Scholl Canyon model, and R\$ 648,937.02 for the estimated values by the IPCC model, proving feasible for both scenarios of methane generation. Due to the different results obtained by the predicting methane generation models, it is recommended that in analysis of the economic viability of energy recovery landfill biogas is used the amounts estimated by the IPCC model, as it generates more conservative methane generation values, valuing project security.

**Keywords:** Municial Solid Waste. Alternative Source of Energy. Biomass Energy. Landfill.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACL – Ambiente de Contratação Livre

ACR – Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

COD – Carbono Orgânico Degradável

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

MCT – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEPLADEMA – Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente

VPL – Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CH}_4$  – metano

$\text{CO}_2$  – dióxido de carbono

GWh – gigawatt hora

$\text{H}_2$  – hidrogênio

k – constante de decaimento

kW – quilowatt

kWh – quilowatt hora

$L_0$  – potencial de geração de metano

$\text{m}^3$  – metro cúbico

MW – megawatt

$\text{N}_2$  – nitrogênio

$\text{O}_2$  – oxigênio

RSD – resíduo sólido domiciliar

RSU – resíduo sólido urbano

t – toneladas

## SUMÁRIO

|       |                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                                                   | 10 |
| 2     | OBJETIVOS.....                                                                     | 12 |
| 2.1   | Objetivo geral .....                                                               | 12 |
| 2.2   | Objetivos específicos .....                                                        | 12 |
| 3     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                         | 13 |
| 3.1   | Sistema energético brasileiro .....                                                | 13 |
| 3.1.1 | Ambientes de contratação .....                                                     | 16 |
| 3.1.2 | Leilões de energia elétrica.....                                                   | 16 |
| 3.2   | Aterro sanitário e resíduos sólidos .....                                          | 17 |
| 3.3   | Geração de biogás em aterro sanitário .....                                        | 20 |
| 3.3.1 | O processo biológico da produção de biogás .....                                   | 21 |
| 3.3.2 | Geração de metano em aterro sanitário .....                                        | 23 |
| 3.4   | Potencial de geração de energia em aterros sanitários.....                         | 25 |
| 3.5   | Modelos teóricos para estimar a geração de biogás em aterro sanitário.....         | 28 |
| 3.5.1 | Parâmetros usualmente utilizados nos modelos matemáticos.....                      | 30 |
| 3.5.2 | Scholl Canyon .....                                                                | 32 |
| 3.5.3 | IPCC .....                                                                         | 35 |
| 3.6   | Tecnologias para conversão do biogás de aterro em energia.....                     | 37 |
| 3.6.1 | Rede de coleta e bombas de sucção .....                                            | 37 |
| 3.6.2 | Filtro para material particulado .....                                             | 38 |
| 3.6.3 | Desumidificador .....                                                              | 38 |
| 3.6.4 | Sistema de queima em flares .....                                                  | 38 |
| 3.6.5 | Conversão de biogás em energia .....                                               | 39 |
| 3.7   | Caracterização da área de estudo .....                                             | 41 |
| 3.7.1 | Diagnóstico dos RSU de Rio Claro – SP .....                                        | 42 |
| 4     | METODOLOGIA .....                                                                  | 47 |
| 4.1   | Medidas de campo de vazão de biogás e metano .....                                 | 47 |
| 4.1.1 | Procedimento de coleta de dados de campo.....                                      | 49 |
| 4.1.2 | Estimativa de geração total de biogás e metano com base nas medidas de campo ..... | 51 |
| 4.2   | Estimativa de geração de metano a partir de modelos matemáticos.....               | 56 |
| 4.2.1 | Seleção dos modelos matemáticos .....                                              | 56 |
| 4.2.2 | Estimativa de resíduos disposto no aterro de Rio Claro .....                       | 57 |

|       |                                                                                             |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3 | Ajuste do modelo de Scholl Canyon .....                                                     | 58 |
| 4.2.4 | Ajuste do modelo do IPCC.....                                                               | 58 |
| 4.3   | Método para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás .....   | 59 |
| 4.3.1 | Energia gerada pelo biogás do aterro de Rio Claro – SP .....                                | 59 |
| 4.3.2 | Método para a venda da energia gerada .....                                                 | 60 |
| 4.3.3 | Análise econômica do aproveitamento energético do biogás gerado .....                       | 60 |
| 5     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                                | 62 |
| 5.1   | Análise dos dados de 2012, 2013 e 2014 .....                                                | 62 |
| 5.2   | Aplicação o modelo de Scholl Canyon .....                                                   | 65 |
| 5.3   | Aplicação do modelo do IPCC .....                                                           | 69 |
| 5.4   | Comparação dos ajustes dos modelos no período de 2012 a 2014 com os dados de campo.....     | 73 |
| 5.4   | Comparação das estimativas de geração de metano dos modelos de Scholl Canyon e do IPCC..... | 74 |
| 5.5   | Análise econômica .....                                                                     | 76 |
| 5.8.1 | Definição do potencial instalado no aterro de Rio Claro .....                               | 76 |
| 5.8.2 | Definição os custos de projeto .....                                                        | 77 |
| 5.8.3 | Análise econômica .....                                                                     | 79 |
| 6     | CONCLUSÃO .....                                                                             | 82 |
| 7     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                            | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

A energia, nas suas diversas formas, tornou-se indispensável à sobrevivência da espécie humana, sendo a eletricidade uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, tornando-se indispensável e estratégico para o desenvolvimento tanto econômico quanto social (ANEEL, 2002).

Atualmente, em torno de 65% da matriz de energia elétrica é composta pela fonte hidráulica (MME e EPE, 2015). A recente crise hídrica acarretou em diminuição da oferta de energia elétrica proveniente das hidrelétricas, ocasionando aumento do preço da energia elétrica. Exemplo disso é o aumento da tarifa residencial de eletricidade em Rio Claro – SP de R\$0,29/kWh em junho de 2013 para R\$0,31/kWh em julho de 2014 e depois para R\$0,51/kWh em junho de 2015.

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrica – ONS (2015), o nível médio anual dos reservatórios da região sudeste e centro-oeste (regiões responsáveis por abastecer a maior parcela de hidroeletricidade no Brasil) diminuíram de 60,5% em 2012, para 30,6% em 2014, reduzindo a produção de 1.068.425 GWh para 548.351 GWh para os respectivos anos.

Embora restrito, 7% da oferta interna de energia elétrica, o uso de biomassa para a geração de eletricidade tem sido objeto de vários estudos e aplicações devido a busca de fontes mais competitivas de geração e a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono (ANEEL, 2002). Assim sendo, o biogás gerado em aterro sanitário passa a ser visto como um fonte alternativa e renovável para gerar energia no Brasil e no mundo.

A matéria orgânica presente no resíduo disposto em aterro sanitário é degradado predominantemente em ambiente anaeróbio, resultando no processo, dentre outros subprodutos, biogás (BARROS et. al; 2013).

Segundo Pohland e Harper (1987) o biogás de aterro é composto por uma parcela que varia de 45 a 60 % de metano (CH<sub>4</sub>), o restante é principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) com pequenas parcelas de gás hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás oxigênio (O<sub>2</sub>), gás nitrogênio (N<sub>2</sub>), e traços de outros gases. Devido ao poder calorífico do metano, o biogás tem um potencial considerável de geração de energia.

Um estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - Abrelpe (2013) estimou que o potencial de geração de energia

elétrica a partir do biogás de aterro no Brasil é de 282 MW, sendo que apenas 78 MW são efetivamente aproveitados atualmente (ANEEL, 2015).

A recuperação do biogás para fins energéticos promove a sustentabilidade dos aterros sanitários (SILVA, 2010), mas para que esse isso ocorra, são necessários estudos acerca do potencial de geração de metano, que possibilita análises de viabilidade econômica fundamentais para a implantação deste tipo de projeto (CROVADOR, 2014).

São diversas as metodologias encontradas para estimar a previsão de geração de metano em aterros sanitários, podendo-se destacar as metodologias de Scholl Canyon, e do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) por serem as mais encontradas e utilizadas na bibliografia. Entretanto, para que seja possível uma análise a partir destes modelos, é necessário adotar valores para o potencial de geração de metano -  $L_0$  ( $m^3CH_4/t_{RSU}$ ) e constante de decaimento -  $k$  (1/ano) que representem as reais condições do resíduo e do aterro.

Atualmente, o valor adotado para estes parâmetros são baseados em estudos internacionais, o que gera diferenças notáveis para as condições brasileiras de geração de gases em aterro. Mesmo a literatura propondo uma ampla faixa de valores para os parâmetros, a carência de trabalhos de ajuste em escala real de tais modelos tem dificultado a aplicação segura desta ferramenta (MARQUES, 2012).

Dessa forma, para que seja consolidado a utilização do biogás de aterro para fins energéticos, é necessário estudos com o objetivo de calibrar estes modelos para aterros brasileiro, visando oferecer uma confiável previsão de geração de metano, e assim ser possível estudar a viabilidade econômica desta prática. Assim sendo, o presente trabalho estuda a viabilidade de implantação de uma usina de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro – SP a partir de dados de geração de metano obtidos em campo e ajuste dos modelos matemáticos de Scholl Canyon e do IPCC.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral da presente pesquisa é analisar a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário municipal (média de 6 t/mês de resíduos) de Rio Claro – SP, a partir de dados de geração de metano obtidos em campo.

### **2.2 Objetivos específicos**

Para que o objetivo geral seja atingido, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Calibrar os modelos de Scholl Canyon e do IPCC com base nas medidas de vazão e porcentagem volumétrica de metano do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro – SP, obtidas no período de 2012 a 2014.
- Aplicar os modelos calibrados para estimar a geração de metano entre os anos de 2001 (início de operação do aterro) e 2030.
- Avaliar a viabilidade financeira de uma usina de aproveitamento energético do biogás com potência instalada de 1MW, conforme o cenário atual do mercado de energia brasileiro.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

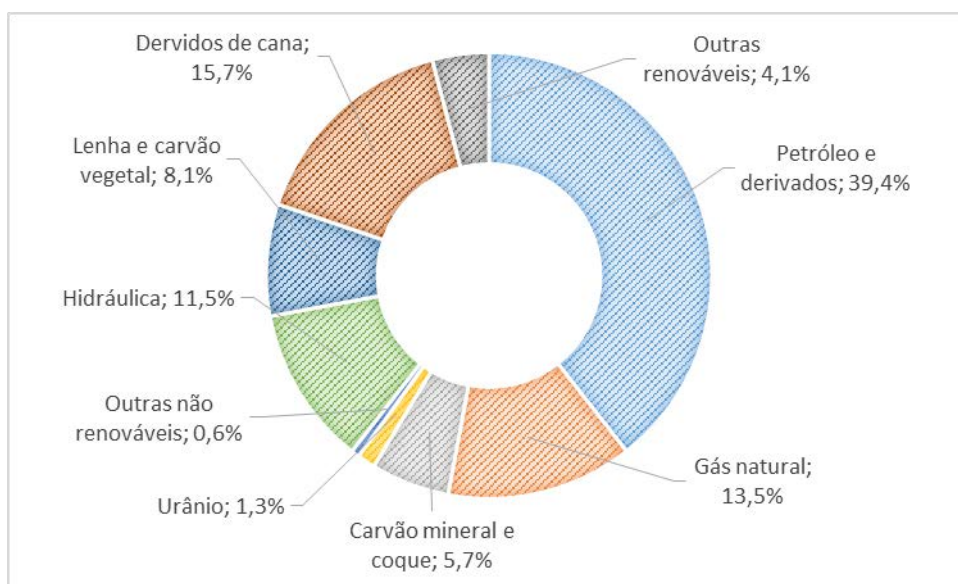
Na presente revisão bibliográfica são apresentados conceitos, definições e informações necessários para o entendimento da presente pesquisa. Na sequência, é apresentado o panorama do sistema energético brasileiro, seguido de definições e informações a respeito de aterros sanitários e resíduos sólidos no Brasil e no mundo. Em seguida são apresentados os conceitos da geração de biogás em aterro sanitário, seguido por informações a respeito do potencial de geração de energia em aterros sanitários, e os modelos teóricos para estimar a geração de biogás em aterro sanitário. Na sequência são apresentadas as tecnologias para a conversão do biogás de aterro em energia, e finalmente é realizada uma caracterização da área de estudo.

#### **3.1 Sistema energético brasileiro**

A energia, nas suas diversas formas, tornou-se indispensável à sobrevivência da espécie humana, além de sobreviver, o homem busca evoluir, descobrindo alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, escassez ou inconveniência de um recurso abre portas para o surgimento de outro. A energia elétrica se tornou uma das formas mais utilizadas de energia, tornando-se indispensável e estratégica para o desenvolvimento social e econômico (ANEEL, 2002).

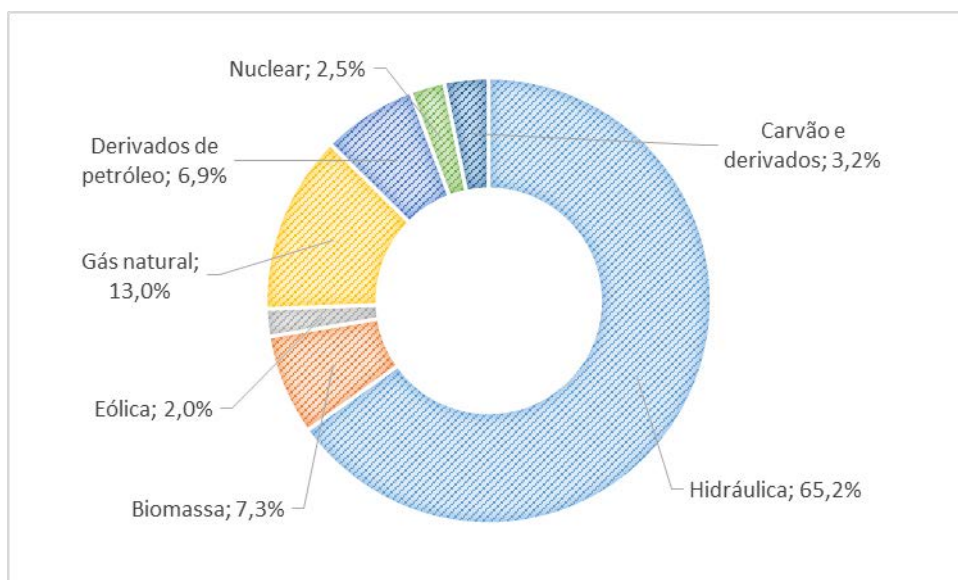
A eletricidade é gerada de várias formas, mas é sempre resultado da transformação de outros tipos de energia. Algumas formas de energias que consumimos são renováveis, nas quais se incluem a energia solar, eólica, hídrica e a da biomassa, ou não renováveis, como a energia dos combustíveis fósseis, que levam milhões de anos para se formarem. A utilização das energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis é uma opção vantajosa, pois, além de serem praticamente inesgotáveis, geram menores impactos ambientais, sem afetar o balanço térmico ou composição atmosférica do planeta (SANTOS et al; 2011).

Atualmente, em torno de 11% da matriz energética brasileira e cerca de 65% da matriz elétrica é composta pela fonte hidráulica (MME e EPE, 2015), como pode ser visto na Figura 1 e 2, respectivamente.



**Figura 1:** Oferta interna de energia por fonte no Brasil em 2014.

**Fonte:** MME e EPE (2015).



**Figura 2:** Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2014.

**Fonte:** MME e EPE (2015).

O sistema hidro energético fornece a maior parcela da eletricidade brasileira, no entanto, condições de variabilidade climáticas extremas ou inesperadas podem trazer riscos, afetando negativamente a geração de energia. A diminuição da geração elétrica pode provocar graves impactos sociais, econômicos e ecológicos quando as sociedades não são capazes de prever, adaptar, ou responder a essas condições (CEBDS, 2012).

A recente crise hídrica expôs o problema da dependência dessa fonte de geração, a Tabela 1 apresenta dados do nível médio dos reservatórios e a produção de eletricidade das hidrelétricas da região sudeste e centro-oeste (ONS, 2015).

| Dados dos reservatórios da região sudeste e centro-oeste |                               |                                   |                                                    |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| Ano                                                      | Nível médio dos reservatórios | Geração anual de energia elétrica | Parcela da geração anual total de energia elétrica |
| 2010                                                     | 64,60%                        | 1.094.143 GWh                     | 69,54%                                             |
| 2011                                                     | 73,03%                        | 1.282.870 GWh                     | 70,62%                                             |
| 2012                                                     | 60,49%                        | 1.068.425 GWh                     | 70,71%                                             |
| 2013                                                     | 51,72%                        | 925.010 GWh                       | 70,60%                                             |
| 2014                                                     | 30,64%                        | 548.351 GWh                       | 61,66%                                             |
| 2015 *                                                   | 30,31%                        | 452.451 GWh                       | 66,17%                                             |

\* Dados até outubro de 2015

**Tabela 1:** Dados entre 2010 e 2015 dos reservatórios hidrelétricas da região sudeste e centro-oeste do Brasil.

**Fonte:** ONS (2015), adaptado pelo autor.

Segundo o Ministério de Minas e Energia e a Empresa de Pesquisas Energéticas (2015), pelo terceiro ano consecutivo, devido às condições hidrológicas desfavoráveis observadas ao longo do período, ocorreu redução da oferta de energia hidráulica. Em 2014 o decréscimo foi de 5,6% em relação a 2013.

Segundo o Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos – DIEESE (2014), o baixo nível dos reservatórios das usinas fez com que a geração de energia das hidrelétricas ficasse abaixo da capacidade instalada, exigindo a ativação de usinas termoeletricas, fontes mais caras de geração, dessa forma, as tarifas de energia elétrica refletiram o aumento do custo da energia.

A tarifa residencial de energia elétrica do município de Rio Claro – SP aumentou de R\$0,29/kWh em junho de 2013 para R\$0,31/kWh em julho de 2014 e para R\$0,51/kWh em junho de 2015, ou seja, um aumento de 8,7% de junho de 2013 para julho de 2014, seguido de um aumento de 62,3% de julho de 2014 para junho de 2015.

Embora ainda muito restrito, apenas 7% da oferta interna de energia elétrica, o uso de biomassa para a geração de eletricidade tem sido objeto de vários estudos e aplicações devido a busca de fontes mais competitivas de geração e a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono. As reformas institucionais do setor elétrico têm proporcionado maior espaço para a geração descentralizada de energia elétrica, neste contexto, a biomassa apresenta-se técnica e economicamente competitiva, além de mais favorável ao meio ambiente (ANEEL, 2002).

A descentralização da geração de energia pode ser definida como geradores de energia em pequena escala, geralmente na faixa abaixo de 10MW, localizadas próximas aos locais onde a eletricidade é consumida, fornecendo uma alternativa ao sistema de energia elétrica tradicional.

### *3.1.1 Ambientes de contratação*

Os ambientes de contratação de energia elétrica no Brasil são divididos entre Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL).

No Ambiente de Contratação Regulada (ACR) o agente que visa comercializar a sua energia e as distribuidoras estabelecem contratos antecidos de licitação ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos (MME, 2015b).

No Ambiente de Contratação Livre (ACL) o agente que visa vender e o agente que visa comprar estabelecem entre si contratos bilaterais de compra e venda de energia com preços e quantidades livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos (MME, 2015b).

### *3.1.2 Leilões de energia elétrica*

Os leilões de energia elétrica são licitações realizadas com o objetivo de contratar a energia elétrica necessária para assegurar o atendimento da demanda futura do mercado das distribuidoras, no ACR (MME, 2015b). Os leilões são divididos entre leilões de horizonte de contratação, e leilões especiais.

Os leilões de horizonte de contratação são: Leilão A-5, que ocorre cinco anos antes do início do suprimento; Leilão A-3, que ocorre três anos antes do início do suprimento; Leilão A-1, que ocorre um ano antes do início do suprimento; e Leilão de Ajuste, que tem por objetivo completar a carga de eletricidade necessária ao atendimento do mercado consumidor dos agentes de distribuição (MME, 2015b).

Os leilões especiais são: Leilão de projeto estruturante, que ocorrem com interesse público para o planejamento de longo, médio e curto prazo do atendimento da demanda nacional de eletricidade; Leilão de Fontes Alternativas, que objetivam incentivar a diversificação da matriz de energia elétrica e introduzir uma maior parcela de fontes renováveis; Leilão de Energia de Reserva, que tem por objetivo aumentar a segurança do fornecimento de eletricidade no Brasil (MME, 2015b).

### 3.2 Aterro sanitário e resíduos sólidos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define na NBR 10.004:2004 resíduos sólidos como (ABNT, 2004):

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Outra definição é exposta pela Lei Federal 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que foi regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Segundo a lei, os resíduos sólidos são definidos por (BRASIL, 2010):

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a 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 cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

Os resíduos sólidos são classificados pela PNRS quanto a sua origem e quanto a sua periculosidade. As classificações quanto a origem são: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza pública, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos do serviço público de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrossilvopastoris, resíduos de serviços de transportes, resíduos de mineração (BRASIL, 2010). As classificações quanto a periculosidade são: resíduos perigosos e resíduos não perigosos. O resíduo é definido como perigoso quando este apresenta significativo risco à saúde pública e à qualidade ambiental (inflamabilidade, toxicidade, patogenicidade, entre outros), o resíduo é definido como não perigoso quando este não se apresenta as características de um resíduo perigoso (BRASIL 2010).

Conforme exposto na norma ABNT NBR 8.419:1992, os resíduos sólidos destinados em aterro sanitários são os classificados como resíduos sólidos urbanos (RSU),

ou seja, aqueles gerados num aglomerado urbano, excluindo os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos (ABNT, 1992).

Pelas classificações de resíduos sólidos expostas pela PNRS, os resíduos sólidos urbanos é a união dos resíduos sólidos domiciliares, que são aqueles resultantes de atividades domésticas em residências urbanas, e resíduos de limpeza pública, que são aqueles originários dos serviços de limpeza pública, como a varrição e a limpeza de vias públicas (BRASIL, 2010).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a parcela de resíduo sólido urbano destinada em lixões e vazadouros decaiu de 1989 até o ano de 2008, e a parcela destinada para aterros sanitários cresceu (IBGE, 2010) conforme apresentado na ~~Tabela X~~.

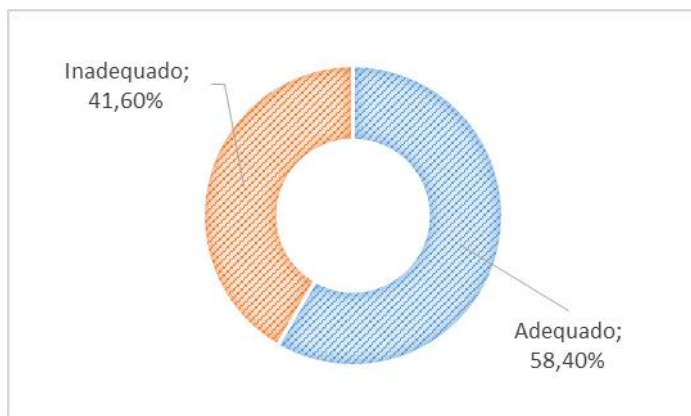
| Ano  | Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos (%) |                   |                  |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------|
|      | Vazadouro                                                                   | Aterro controlado | Aterro sanitário |
| 1989 | 88,2                                                                        | 9,6               | 1,1              |
| 2000 | 72,3                                                                        | 22,3              | 17,3             |
| 2008 | 50,8                                                                        | 22,5              | 27,7             |

**Tabela X:** Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos no Brasil, de 1989 a 2008.

**Fonte:** IBGE (2010), adaptado pelo autor.

O chamado aterro controlado já não é mais considerado como um método para a disposição final de resíduos, o termo é algumas vezes utilizado para nomear um local intermediário entre um aterro sanitário e um lixão. Este método é considerado inadequado, e gera impactos consideráveis ao meio ambiente. Assim sendo, das possibilidades de destino final para o resíduo sólido urbano apresentados pelo IBGE, apenas o aterro sanitário é adequado.

O Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil de 2014, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) apresenta a situação atual da destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (Figura 3).



**Figura 3:** Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2014.

**Fonte:** Abrelpe (2014).

Apesar da queda da parcela de resíduo destinada inadequadamente, ela ainda representa uma parcela significativa, expondo grandes problemas no manejo dos resíduos sólidos no Brasil, o que acarreta em problemas ambientais e sociais.

No Brasil, a maior parcela do resíduo sólido urbano é a matéria orgânica, que corresponde a 51,4% do total (IPEA, 2012), a Tabela 2 apresenta a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

| Materiais                 | Participação (%) |
|---------------------------|------------------|
| Material reciclável       | 31,9             |
| Metais                    | 2,9              |
| Papel, papelão e tetrapak | 13,1             |
| Pástico total             | 13,5             |
| Vidro                     | 2,4              |
| Matéria orgânica          | 51,4             |
| Outros                    | 16,7             |

**Tabela 2:** Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil

**Fonte:** IPEA (2012), adaptado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta a composição do resíduo para diferentes regiões do mundo comparando a parcela de matéria orgânica e a parcela de material reciclável.

| Região                          | Porcentagem de matéria orgânica no resíduos (%) | Material reciclável (%) |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
| Ásia Oriental                   | 26,2                                            | 38,9                    |
| Ásia Centro-Sul                 | 40,3                                            | 25                      |
| Sudeste da Ásia                 | 43,5                                            | 27,4                    |
| Ásia ocidental & Médio Oriental | 41,1                                            | 27,8                    |
| África Oriental                 | 53,9                                            | 17,3                    |
| África Central                  | 43,4                                            | 26,8                    |
| Norte da África                 | 51,1                                            | 26,5                    |
| Sul da África                   | 23                                              | -                       |
| África Ocidental                | 40,4                                            | 13,8                    |
| Europa Oriental                 | 30,1                                            | 41,6                    |
| Norte da Europa                 | 23,8                                            | 58,6                    |
| Sul da Europa                   | 36,9                                            | -                       |
| Europa Ocidental                | 24,2                                            | -                       |
| Austrália e Nova Zelândia       | 36                                              | -                       |
| Resto da Oceania                | 67,5                                            | -                       |
| América do Norte                | 33,9                                            | 42,8                    |
| América Central                 | 43,8                                            | 26,7                    |
| América do Sul                  | 44,9                                            | 34,1                    |
| Caribe                          | 46,9                                            | 37,6                    |

**Tabela 3:** Composição do resíduo sólido urbano para diferentes regiões do mundo.

**Fonte:** IPCC (2006a), adaptado pelo autor.

Como exposto na tabela anterior a partir de uma análise do IPCC para dados obtidos no ano de 2000 em diferentes países, é possível notar uma grande variação da composição do resíduo para diferentes localidades. Comparando com o resultado da composição gravimétrica do IPEA (2012), o Brasil apresenta uma grande parcela de matéria orgânica comparada com as outras regiões do mundo.

### 3.3 Geração de biogás em aterro sanitário

O biogás é o nome dado ao gás gerado a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica por micro-organismos. O metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são os gases com a maior parcela no biogás, sendo o metano importante pelo seu poder calorífico, assim sendo, o biogás passou a ser visto como uma possível fonte de energia.

Segundo a CETESB (2015), o biogás foi descoberto por Shirley, em 1667, observando que a decomposição da matéria orgânica em pântanos gerava um gás, que foi nomeado como gás do pântano e posteriormente foi identificado como biogás. Entretanto Shirley não tinha o conhecimento da composição do gás tão quanto a forma que ele era gerado. A descoberta da presença do metano no biogás foi realizada por Alessandro Volta, um século depois da descoberta de Shirley. Ulysses Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou no século XIX a fermentação anaeróbia de estrume e água, conseguindo obter biogás, além disso, Louis Pasteur apresentou para a Academia das Ciências o estudo e constatou que a fermentação anaeróbia poderia ser utilizada como fonte de energia para aquecimento e iluminação devido à presença de metano no gás (CETESB, 2015).

Segundo Pohland e Harper (1987) o biogás de aterro é gerado a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos, e é composto por uma parcela que varia de 45 a 60 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), o restante é principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) com pequenas parcelas de gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ), gás nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), e traços de outros gases.

### *3.3.1 O processo biológico da produção de biogás*

O processo biológico para a geração do biogás ocorre quando a degradação da matéria orgânica por micro organismos acontece na ausência de oxigênio, ou seja, quando ocorre a digestão anaeróbia de compostos orgânicos. O processo da digestão anaeróbia desenvolve-se em diferentes estágios de interação entre o substrato e diferentes grupos bacterianos, assim sendo, cada grupo bacteriano é denominado conforme suas características metabólicas, assim sendo, no processo de degradação anaeróbia atuam as bactérias hidrolíticas, acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas (MORAES, 2000).

Logo o processo pode ser dividido nas fases hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (PIEROTTI, 2007).

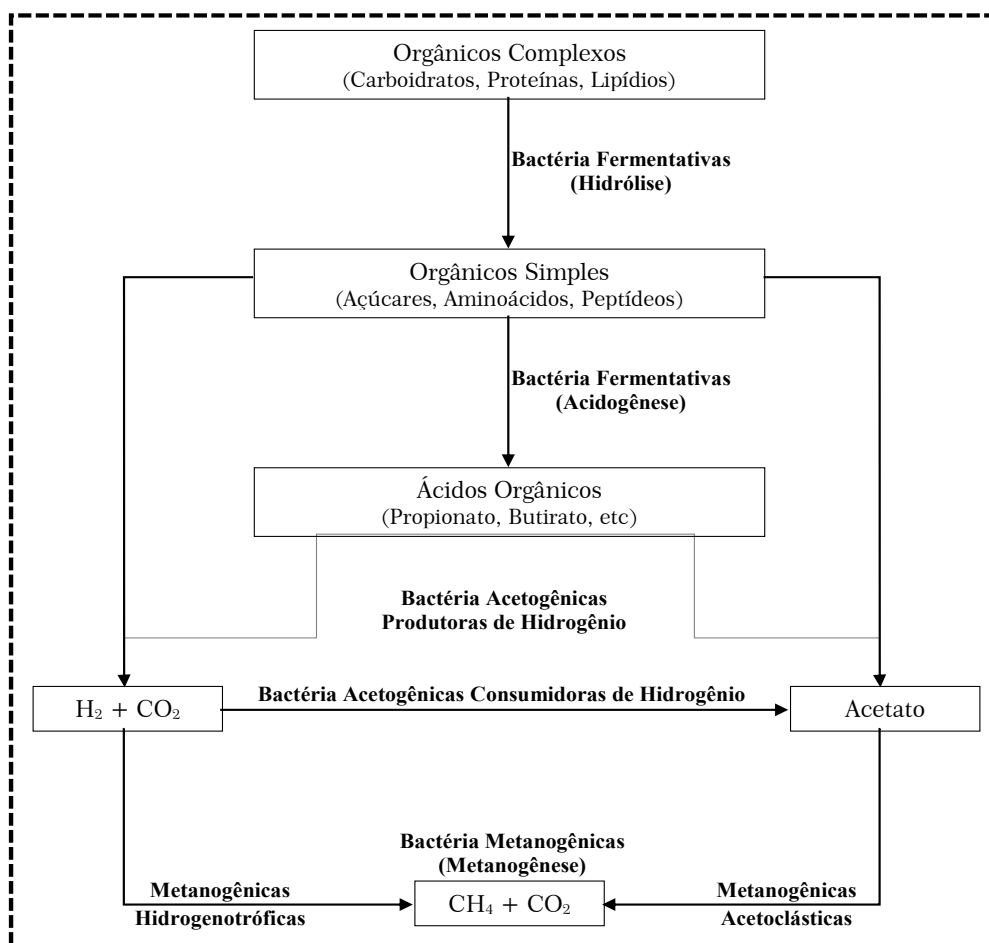
Hidrólise: fase inicial do processo, em que os compostos orgânicos particulados são convertidos pelas bactérias hidrolíticas em materiais dissolvidos mais simples. Para o processo, são necessários exoenzimas produzidas pelas bactérias fermentativas, que degradam proteínas, aminoácidos, carboidratos, lipídios, ácidos graxos de cadeia longa e glicerina. Esta fase costuma ter uma velocidade de reação menor que as demais fases (PIEROTTI, 2007).

Acidogênese: é quando os produtos solúveis gerados na fase de hidrólise são convertidos em compostos orgânicos simples (ácidos graxos voláteis de cadeia curta, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, entre outros). As bactérias acidogênicas são estritamente anaeróbias, entretanto, cerca de 1% são anaeróbias facultativas, sendo esta pequena parcela de grande importância pois consome o oxigênio do ambiente, impedindo que o ambiente se torne aeróbio (PIEROTTI, 2007).

Acetogênese: nesta fase, os resultantes da acidogênese são convertidos em substrato apropriado para a fase metanogênica, sendo o resultante o acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (PIEROTTI, 2007).

Metanogênese: é a etapa final do processo de degradação anaeróbia, sendo gerado os compostos finais que compõem a maior parcela do biogás, o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), produzidos pelas arqueobactérias metanogênicas, utilizando-se dos subprodutos gerados na fase anterior, a acetogênese. As bactérias da metanogênese são divididas entre metanogênicas acetoclásticas (que se utilizam do ácido acético e do metanol para a geração de metano) e as metanogênicas hidrogenotróficas (que se utilizam do hidrogênio e do dióxido de carbono para gerar metano) (PIEROTTI, 2007).

A Figura 3 explica de forma simplificada a digestão anaeróbia e suas fases.



**Figura 4:** Fluxograma das fases da digestão anaeróbia.

**Fonte:** ALVES (2008), adaptado pelo autor.

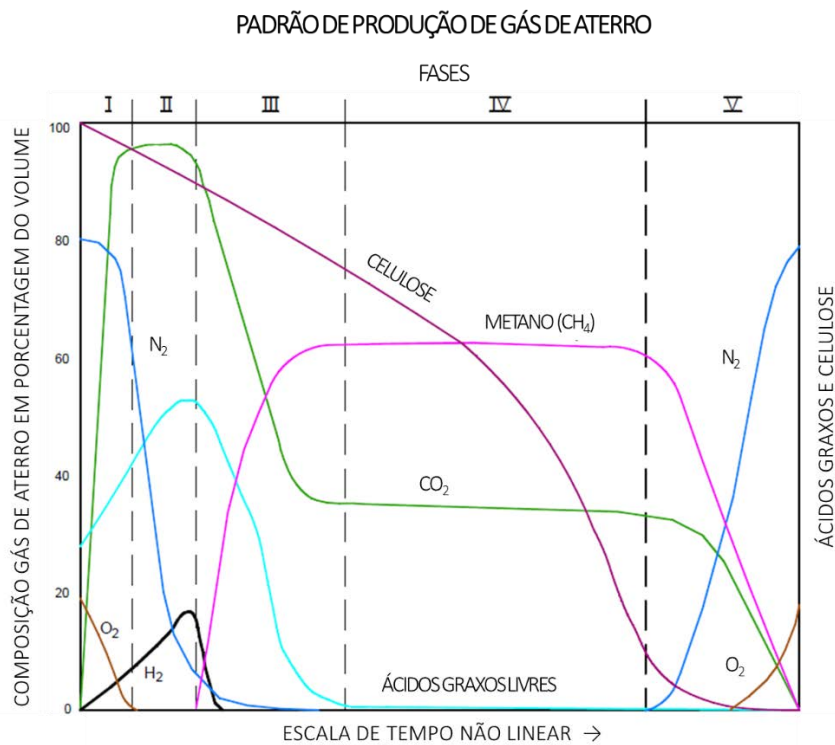
São diversos os fatores ambientais que influenciam a produção de biogás pela digestão anaeróbia (INOUE, 2008), sendo eles a temperatura (as bactérias não regulam sua temperatura interna, assim sendo, sua temperatura fica sob controle do meio ambiente), pH (valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 inibem a atividade das bactérias metanogênicas) e nutrientes (é de grande importância a presença de fósforo, nitrogênio, carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, potássio, cálcio e magnésio). Além disso, a presença de elementos tóxicos, como o cianeto, pode inibir o processo de digestão anaeróbia, uma vez que em certas concentrações passam a ter um efeito inibitório.

### 3.3.2 Geração de metano em aterro sanitário

A decomposição do resíduo gera subprodutos como o biogás, gerado pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no resíduos sólidos urbanos (CASTRO et. al; 2013). O ambiente de aterro sanitário é anaeróbico uma vez que o

aterramento do resíduo impede a circulação de ar, sendo assim, não ocorre a entrada de oxigênio nas camadas de resíduo.

A Figura 5 abaixo expõem como ocorre a geração de gases durante a biodegradação dos resíduos em aterro sanitário.



**Figura 5:** As cinco fases de formação do biogás em aterro sanitário.

**Fonte:** POHLAND e HARPER (1987), adaptado por WORLD BANK (2004).

O processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos passa por cinco fases. A fase I, também conhecida como ajuste inicial, ocorre predominantemente em ambiente aeróbico devido à presença de oxigênio na massa de resíduos durante a disposição e compactação. Na fase II, também conhecida como fase de transição, ocorre o consumo do oxigênio e a fase anaeróbia passa a ser dominante, iniciando assim a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Na fase III, também conhecida como fase ácida, as atividades microbiológicas iniciadas na fase II são aceleradas com a acelerada produção de ácidos orgânicos e uma quantidade menor de produção de gás hidrogênio ( $H_2$ ), além disso o principal gás gerado nesta fase é o dióxido de carbono. A fase IV, também conhecida como fase metanogênica, os microrganismos anaeróbios são a maior parcela, sendo a atividade metanogênica predominante, aumentando a produção de metano. Nesta fase a composição do gás gerado na biodegradação dos resíduos é estabelecida, permanecendo relativamente constante,

sendo o gás composto de grandes parcelas de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A passagem pra fase V, também conhecida como fase de maturação, é percebida pela redução na velocidade de decomposição e pela redução significativa na produção de gás, sendo estas atividades resultantes da degradação lenta dos substratos restantes, uma vez que os substratos de degradação rápida já foram consumidos (TCHOBANOGLIOUS et al; 1993; apud ENSINAS, 2005).

Estudos práticos expõem que a composição e vazão do biogás costuma variar de dreno para dreno, e com o passar do tempo de aterramento, sendo a média girando em torno do 55% para o gás metano e em torno de 40% para o dióxido de carbono (CASTRO et al; 2013; ENSINAS, 2003; SILVA e CAMPOS, 2008).

### 3.4 Potencial de geração de energia em aterros sanitários

O Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCT) realizou o estudo “Estimativa anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil” com o objetivo de acompanhar o cumprimento do compromisso nacional voluntário para a redução das emissões até o ano de 2020. A Tabela 4 apresenta os resultados das emissões de metano pelo tratamento de resíduos (resíduos sólidos e esgoto).

|                        | Gg $\text{CH}_4$ / ano |        |        |        |        |        |
|------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ANO                    | 1990                   | 1992   | 1994   | 1996   | 1998   | 2000   |
| TRATAMENTO DE RESÍDUOS | 1249,3                 | 1316,9 | 1389,6 | 1470,5 | 1554,1 | 1645,7 |
| Resíduos Sólidos       | 795,1                  | 851,6  | 906,7  | 959,8  | 1017,2 | 1076,6 |
| Efluentes              | 454,1                  | 465,3  | 482,9  | 510,7  | 536,9  | 569,0  |
| ANO                    | 2002                   | 2004   | 2006   | 2008   | 2010   | 2012   |
| TRATAMENTO DE RESÍDUOS | 1713,3                 | 1758,0 | 1831,3 | 1843,9 | 1968,0 | 2142,7 |
| Resíduos Sólidos       | 1143,3                 | 1157,8 | 1200,4 | 1175,2 | 1259,7 | 1397,3 |
| Efluentes              | 570,0                  | 600,2  | 630,8  | 668,7  | 708,3  | 745,4  |

**Tabela 4:** Emissão de metano no Brasil pelo tratamento de resíduos (resíduos sólidos e esgoto) de 1990 – 2012.

**Fonte:** MCT (2014), adaptado pelo autor.

Visto o poder calorífico do metano, e a grande quantidade de emissão deste gás devido ao tratamento dos resíduos sólido urbanos, estudos estão sendo realizados e

colocados em prática visando aproveitar a parcela de metano do biogás de aterro sanitário para fins energéticos.

O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD (2010) avaliou que o potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético do biogás gerado em aterro sanitário no ano de 2010 era de 311 MW, no estudo foram incluídos apenas aterros de municípios pertencentes a regiões metropolitanas ou aglomerados urbanos, com população superior a 200 mil habitantes, com volume de resíduo suficiente para gerar no mínimo 300 kWh de energia e potencial de produção de biogás por um período de dez a quinze anos, totalizando um total de 56 aterros brasileiros. O valor alcançado pelo estudo é suficiente para abastecer uma população de 5,6 milhões de habitantes.

Outro estudo realizado pela Abrelpe (2013) estimou que o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro no Brasil é de 282 MW, sendo a região que corresponde a maior parcela do potencial é a região sudeste, com um valor estimado de 170 MW, cerca de 60% do total estimado.

A possibilidade de aproveitamento energético do gás metano gerado nos aterros sanitários é uma alternativa para a novas fontes de energia. Para viabilizar a implantação de projetos de aproveitamento energético do biogás de aterro é necessária a utilização de modelos matemáticos, ferramenta capaz de avaliar não só a capacidade de produção, mas também quantificar o tempo de geração após o encerramento da vida útil do aterro sanitário (CASTRO et. al; 2013).

A elevada porcentagem de material orgânico do resíduo brasileiro, associada com a alta biodegradabilidade dos mesmos, proporciona condições favoráveis à geração de biogás. Por outro lado, essas características dificultam a aplicação segura de modelos matemáticos para a estimativa do potencial de geração de gás metano em aterro, pois os modelos utilizadas foram calibrados e ajustados nas condições de estudos internacionais, com características climáticas e de resíduos diferentes das brasileiras, o que dificulta a aplicação destes modelos para aterros no Brasil (CASTRO et. al; 2013).

Sistemas de conversão de biogás em eletricidade apresentam diferentes especificações, de maneira geral, estima-se que são necessários de 670 a 800 m<sup>3</sup>/h de biogás com uma concentração de 50% de CH<sub>4</sub> para garantir a instalação de 1 MW (ABRELPE, 2013). Estudos realizados em aterros indicaram uma produção entre 0,05 e 0,40 m<sup>3</sup> de biogás por quilograma de resíduo disposto em aterro (HAM, 1989 apud BANCO MUNDIAL, 2004).

O aproveitamento do biogás de aterro para fins energéticos é uma prática bastante consolidada em países mais desenvolvidos como os Estados Unidos da América (EUA) e países da Europa, segundo a Associação Internacional de Resíduo Sólidos – ISWA (2012) 18 países da Europa somam junto 465 usinas de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro, e os EUA apresenta um número de 86 aterros com reaproveitamento energético, como apresentado na Tabela 5.

| <b>País</b>      | <b>Número de usinas</b> |
|------------------|-------------------------|
| Alemanha         | 79                      |
| Áustria          | 12                      |
| Bélgica          | 16                      |
| Dinamarca        | 29                      |
| Eslováquia       | 2                       |
| Espanha          | 11                      |
| Finlândia        | 6                       |
| França           | 127                     |
| Holanda          | 13                      |
| Hungria          | 1                       |
| Irlanda          | 1                       |
| Itália           | 52                      |
| Noruega          | 15                      |
| Portugal         | 3                       |
| Reino Unido      | 31                      |
| República Tcheca | 3                       |
| Suécia           | 34                      |
| Suiça            | 30                      |
| Estados Unidos   | 86                      |

**Tabela 5:** Número de usinas de geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro em diferentes países da Europa e dos Estados Unidos da América.

**Fonte:** ISWA (2012), adaptado pelo autor.

O Brasil conta atualmente com 12 usinas de biogás de aterro (ANEEL, 2015), como apresentado em mais detalhes pela Tabela 6.

| <b>Usina</b>       | <b>Data de início de operação</b> | <b>Potência (kW)</b>      | <b>Município</b>         |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Salvador           | 22/12/2010                        | 19.730,00                 | Salvador - BA            |
| São João Biogás    | 27/03/2008                        | 24.640,00                 | São Paulo - SP           |
| Energ-Biog         | 18/12/2002                        | 30,00                     | Barueri - SP             |
| Asja BH            | -                                 | 4.278,00                  | Belo Horizonte - MG      |
| Arrudas            | -                                 | 2.400,00                  | Belo Horizonte - MG      |
| Ambient            | -                                 | 1.500,00                  | Ribeirão Preto - SP      |
| Biotérmica Recreio | 24/06/2015                        | 8.556,00                  | Minas do Leão - RS       |
| Uberlândia         | 01/12/2011                        | 2.852,00                  | Uberlândia - MG          |
| CTR Juiz de Fora   | 01/08/2013                        | 4.278,00                  | Juiz de Fora - MG        |
| Itajaí Biogás      | 01/02/2013                        | 1.065,00                  | Itajaí - SC              |
| Bandeirantes       | 03/11/2014                        | 4.624,00                  | São Paulo - SP           |
| Tecipar            | 30/10/2015                        | 4.278,00                  | Santana da Parnaíba - SP |
| TOTAL: 12 Usinas   |                                   | POTÊNCIA TOTAL: 78.231 kW |                          |

**Tabela 6:** Usinas com aproveitamento energético do biogás de aterro no Brasil e suas respectivas características.

**Fonte:** ANEEL (2015), adaptado pelo autor.

O aproveitamento se encontra bastante abaixo dos estudos que analisam o potencial de geração de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários brasileiros, e abaixo de países europeus de menor tamanho e menor população, expondo uma defasagem em relação a estes países.

Para que projetos de usinas de biogás de aterro sejam viáveis, é necessário estimar a produção deste gás, que pode ser previsto por meio de modelos teóricos.

### **3.5 Modelos teóricos para estimar a geração de biogás em aterro sanitário**

Os modelos para estimar a geração de biogás em aterros sanitários são ferramentas úteis para estudar as emissões ao longo do tempo. Os modelos teóricos apresentam vantagens como baixo custo e resultados rapidamente observáveis (VOGT e AUGENSTEIN, 1997).

Dada a complexidade das interações físicas, químicas e biológicas que ocorrem dentro de um aterro, em função das particularidades locais, nem sempre o valor gerado por modelos correspondem à realidade (CROVADOR, 2014).

Na literatura correspondente, os modelos de produção de biogás mais simples e difundidos são os modelos empíricos de ordem zero e de primeira ordem, que consideram, respectivamente, degradação constante no tempo e cinética de primeira ordem (MACIEL, 2009).

Os modelos podem ser divididos conforme sua ordem, sendo assim, os modelos mais comumente utilizados são divididos em modelos de ordem zero, de primeira ordem, multifásico e de segunda ordem, como exposto na Tabela 7.

| ORDEM                     | CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modelos de ordem zero     | <p>Assumem que a geração de biogás para uma massa de resíduos é constante ao longo do tempo, dessa forma, estes modelos presumem que a geração de metano é independente da quantidade de substrato restante e o biogás já produzido.</p> <p>É utilizado para estimar emissões em grandes escalas como níveis nacionais e internacionais, assumindo que não há alteração significativa na composição de resíduos ou na quantidade de material aterrado.</p>   |
| Modelos de primeira ordem | <p>Incluem a idade do resíduo como uma variável na geração de biogás. Presume-se que a formação de gás de aterro a partir de um determinado montante de resíduos decaia exponencialmente com o passar do tempo.</p> <p>São os modelos mais comumente utilizados nos dias de hoje pelo fato de apresentar uma maior complexidade que os modelos de ordem zero, porém com variáveis de fácil acesso.</p>                                                       |
| Modelos multifásicos      | <p>São modelos que combinam diferentes modelos de primeira ordem para expressar a geração a partir de diferentes frações do resíduo, sendo assim são modelos que devem representar mais precisamente o que ocorre em um aterro.</p> <p>As frações de resíduos são definidas conforme o nível de degradabilidade de vários componentes neles encontrados, tais como prontamente degradáveis, moderadamente degradáveis, lentamente degradáveis e inertes.</p> |
| Modelos de segunda ordem  | <p>Estes modelos foram propostos para prever emissões de metano com base na química e na microbiologia complexas da decomposição dos resíduos sólidos urbanos e da geração do biogás de aterro. Como um grande número de reações estão envolvidos entre si, todos com diferentes taxas de reações, as cinéticas de segunda ordem são empregadas para prever a geração total de metano.</p>                                                                   |

**Tabela 7:** Modelos de diferentes ordens e suas características.

**Fonte:** ABRELPE (2013), adaptado pelo autor.

Oonk e Boon (1995) observaram que os erros relativos da aplicação de modelos teóricos em aterros na Holanda eram menores que 44%, os modelos de ordem zero apresentaram erro de até 44%, os de primeira ordem apresentaram erros máximos de 22% e os multifásicos de 18%.

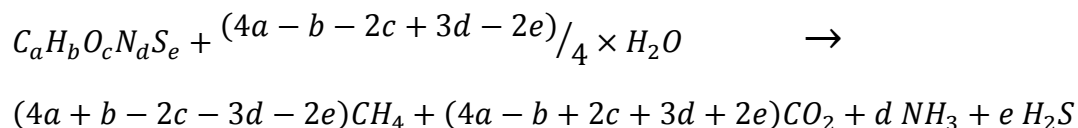
A seguir serão apresentados os parâmetros usualmente utilizados nos modelos teóricos de previsão de geração de biogás de aterro, e os modelos mais utilizados na literatura e em estudos práticos.

### 3.5.1 Parâmetros usualmente utilizados nos modelos matemáticos

#### a) Potencial de geração de metano - $L_0$ ( $m^3CH_4/t_{RSU}$ )

O potencial de geração de metano,  $L_0$ , é o fator que representa a quantidade de metano que uma massa de resíduo gera até atingir a bioestabilização.

O valor de  $L_0$  pode ser determinado teoricamente a partir da estequiometria: se uma quantidade de resíduos contiver carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre (representada por  $C_aH_bO_cN_dS_e$ ) sua decomposição em gás obedecerá a seguinte equação (MACHADO et. al, 2009):



Onde: C: carbono.

H: hidrogênio.

O: oxigênios.

N: nitrogênio.

S: enxofre.

$a$ : quantidade de átomos carbono presente no resíduo.

$b$ : quantidade de átomos hidrogênio presente no resíduo.

$c$ : quantidade de átomos oxigênio presente no resíduo.

$d$ : quantidade de átomos nitrogênio presente no resíduo.

$e$ : quantidade de átomos enxofre presente no resíduo.

O valor de  $L_0$  é diretamente proporcional a parcela de matéria orgânica presente no resíduos, o potencial de geração de metano se eleva à medida que aumenta o seu conteúdo. Se as condições do aterro forem desfavoráveis à atividade metanogênica, pode haver uma redução no valor teórico de  $L_0$ . O cálculo do valor de  $L_0$  para diferentes parcelas do resíduo sólido urbano é encontrado a partir de testes gerais de

biodegradabilidade nos resíduos sob as condições de temperatura, umidade, conteúdo de nutrientes e pH que provavelmente serão encontradas no aterro (ABRELPE, 2013).

b) Constante de decaimento –  $k$  (1/ano)

A constante de decaimento,  $k$ , é o fator que representa a velocidade da reação de produção de metano em uma massa de resíduo, sendo relativo a velocidade de degradação do resíduo. Quanto maior o valor de  $k$ , mais rápido o resíduo cessa a produção de metano. O valor de  $k$  é influenciado por fatores como temperatura, umidade, disponibilidade de nutrientes e pH (ABRELPE, 2013).

Tanto  $L_0$  quanto o  $k$  são fatores de grande influência no comportamento dos modelos teóricos de previsão de geração de biogás em aterros, e determinar corretamente os seus valores é uma etapa crucial para obter uma estimativa segura.

A Tabela 8 apresenta estudos em aterros brasileiros para estimar o potencial de geração de metano e a faixa de valores que  $L_0$  e  $k$  podem assumir.

| AUTOR                    | ATERRO                           | $k$<br>(1/ano)   | $L_0$<br>( $m^3CH_4/t_{RSD}$ ) | ANO DE<br>INÍCIO<br>(ano) | VOLUME DE<br>RESÍDUOS<br>( $t_{RSD}/dia$ ) | PRECIPITAÇÃO<br>(mm/ano) |
|--------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| Ensinas (2003)           | Delta (Campinas/SP)              | 0,0283           | 156,9                          | 1993                      | 765,2 (2002)                               | 1430                     |
| Mendes (2005)            | Experimental (Guaratinguetá/SP)  | 0,05             | 131,4                          | 2007                      | 136,8                                      | 1296,9                   |
| Percora et. al. (2009)   | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,08             | 99,69                          | -                         | -                                          | -                        |
| Fernandes (2009)         | Experimental (Belo Horizonte/MG) | 0,0283<br>0,0395 | 84,33                          | 2005                      | -                                          | -                        |
| Alves (2008)             | Muribeca (Pernambuco/RE)         | -                | 120,52                         | -                         | 3000                                       | -                        |
| Figueiredo (2011)        | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,077            | 109,301                        | 2002                      | 9445,5 (2010)                              | 1537,1                   |
| Crovador (2014)          | Municipal (Guarapuruva/PR)       | 0,4              | 48,32                          | 2008                      | 75,1 (2007)                                | -                        |
| Machado et. al (2009)    | Metropolitano (Salvador/BA)      | 0,21             | 66,62                          | -                         | -                                          | -                        |
| Santangelo et. al (2009) | Municipal (Timbó/SC)             | 0,075            | 150                            | 2003                      | -                                          | > 1000 mm                |
| Audibert (2011)          | Controlado (Londrina/PR)         | 0,05             | 170<br>85,91                   | 1970                      | 350                                        | 1606                     |
| USEPA (1997)             | Bandeirantes (São Paulo/SP)      | 0,125            | 124,91                         | 1979                      | 6000                                       | -                        |

**Tabela 8:** Diferentes valores de  $L_0$  e  $k$  adotados em estudos para estimar o potencial de geração de metano em aterro brasileiro.

Como exposto na tabela anterior, os valores de  $k$  e  $L_0$  apresentam valores diferentes de estudo para estudo. O valor da constante de decaimento variou de 0,0283 a

0,4 <sup>1</sup>/ano, enquanto que o potencial de geração de metano variou de 48,32 a 170 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/t<sub>RSU</sub>.

As metodologias para encontrar os valores dos parâmetro são diferentes para cada estudo. Alves (2008) e Crovador (2014) encontraram o valor de L<sub>0</sub> a partir de testes de laboratório. Os estudos de Ensinas (2003), Mendes (2005), Percora et. al (2009), Fernandes (2009), Figueiredo (2011), Machado et. al (2009) e Audibert (2011) encontraram o valor de L<sub>0</sub> a partir da metodologia apresentada pelo IPCC. Santangelo et. al (2009) e Audibert (2011) encontraram o valor de L<sub>0</sub> a partir das recomendações sugeridas pelos próprios criadores dos modelos teóricos de previsão de geração de biogás em aterro.

Para o valor de k, foram encontrados na literatura 3 métodos, o método iterativo, que fixa o valor de L<sub>0</sub> e altera o valor de k até que a geração estimada pelo modelo teórico se aproxime do valor obtido em campo, como realizado pelo estudo de Ensinas (2003). Outra forma de encontra o valor de k é seguindo sugestões dos criadores dos modelos teóricos e de outros autores, como utilizado nos estudos de Mendes (2005), Percora et. al (2009), Fernandes (2009), Santangelo et. al (2009) e Audibert (2011). O terceiro método é o utilizado por Figueiredo (2011), Crovador (2014) e Machado et. al (2009), que aplica da equação  $L_0(t)/L_0 = e^{-kt}$ .

Os modelos teóricos de Scholl Canyon e do IPCC de previsão de geração de metano em aterro sanitário são apresentados a seguir. Estes são os modelos mais encontrados e utilizados pela bibliografia em estudos em aterros brasileiros.

### 3.5.2 Scholl Canyon

O modelo de primeira ordem de Scholl Canyon é o método recomendado pelo Banco Mundial (2004) para estimar a geração de metano no aterro. Neste método é inserido a variação da produção de metano ao longo do tempo, tornando este método mais confiável. Este modelo está baseado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo (Banco Mundial, 2004).

$$Q_x = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:  $Q_x$ : Quantidade de metano gerado no ano. (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano)

$k$ : Constante de decaimento. (1/ano)

$R_x$ : Fluxo de resíduos sólidos domiciliares no aterro no ano. (t)

$L_0$ : Potencial de geração de metano por tonelada de resíduo. ( $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{t}$ )

$T$ : Ano de disposição do resíduo no aterro. (ano)

$x$ : Ano do estudo. (ano)

O resíduo disposto anualmente ( $R_x$ ) é variável e depende de fatores como a taxa de crescimento da população, taxa de resíduo sólido urbano produzido por habitante no ano e da porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro, a multiplicação de todos estes fatores originam o valor de  $R_x$  para cada ano.

Se os valores de  $L_0$  e  $k$  fossem conhecidos com um certo grau de confiança, a estimativa gerada por este modelo seria bastante confiável, entretanto, tais variáveis assumem uma ampla faixa de valores, e existe uma grande dificuldade em estimá-las corretamente (ABRELPE, 2013).

A faixa de valores que  $L_0$  pode assumir varia de 0 a  $312 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{RSD}} \times \text{ano}$ , e a faixa de valores que  $k$  pode variar de 0,003 a  $0,4 \text{ } ^1/\text{ano}$  (USEPA, 1996).

A soma das vazões de metano é dada pela equação a seguir, que representa a soma das vazões de metano correspondentes às quantidades de resíduo depositadas no aterro ano a ano.

$$\sum Q_x = k \cdot L_0 \cdot \sum R_x \cdot e^{-k(x-T)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $\sum Q_x$ : Soma das vazões de metano no ano considerado. ( $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$ )

Desta forma, esta estimativa é realizada ano a ano, compilando dados de resíduos dispostos no aterro de várias idades, obtendo-se assim a emissão de metano do aterro durante toda a sua vida útil e pelos anos seguintes após o seu fechamento. De acordo com esse modelo, a estimativa de geração de metano é feita para cada porção de resíduo depositada no aterro.

O modelo de decaimento de primeira ordem é recomendado pela CETESB e pela Secretaria do Meio Ambiente (2006), uma vez que o modelo apresentado é de simples aplicação, e com confiabilidade desejada nos resultados devido a sua ampla utilização e popularidade. Além disso, o modelo é recomendado pelo Banco Mundial (2004) para projetos de recuperação energética do biogás em aterros na América Latina e no Caribe.

Devido à dificuldade em adotar valores adequados para os parâmetros  $L_0$  e  $k$ , são sugeridos pelo Banco Mundial (2004) valores para os dois parâmetros segundo dados de precipitação e biodegradabilidade do resíduo, conforme apresentado pelas Tabelas 9 e 10.

| Precipitação anual  | Valores de $k$       |                          |                      |
|---------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
|                     | Relativamente inerte | Moderadamente degradável | Altamente degradável |
| Menos de 250 mm     | 0,01                 | 0,02                     | 0,03                 |
| Entre 250 e 500 mm  | 0,01                 | 0,03                     | 0,05                 |
| Entre 500 e 1000 mm | 0,02                 | 0,05                     | 0,08                 |
| Mais de 1000 mm     | 0,02                 | 0,06                     | 0,09                 |

**Tabela 9:** Valores sugeridos de  $k$  sugeridos pelo Banco Mundial.

**Fonte:** BANCO MUNDIAL (2004), adaptado pelo autor.

| Classificação do resíduo         | Valor mínimo de $L_0$ | Valor máximo de $L_0$ |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Resíduo relativamente inerte     | 5                     | 25                    |
| Resíduo moderadamente degradável | 140                   | 200                   |
| Resíduo altamente degradável     | 225                   | 300                   |

**Tabela 10:** Valores sugeridos de  $L_0$  sugeridos pelo Banco Mundial.

**Fonte:** BANCO MUNDIAL (2004), adaptado pelo autor.

Além das variáveis anteriormente apresentadas na equação, quando a utilização deste método visa estimar o potencial de geração de metano para aproveitamento energético, é necessário adicionar um fator referente as emissões fugitivas. O Banco Mundial (2004) recomenda assumir a eficiência do sistema de drenagem de biogás em 75%, a utilização de eficiências em torno de 50% são consideradas conservadoras. Segundo a USEPA (1996), a eficiência do sistema de coleta varia de 50 a 90%, dependendo da camada de cobertura. A CETESB (2006) recomenda que seja adotada o valor de 75% quando não há dados suficientes para realizar uma estimativa com maior precisão.

### 3.5.3 IPCC

Em IPCC (2006b) é apresentada outro modelo de primeira ordem para calcular a emissão de metano a partir de resíduos sólidos, o cálculo ocorre a partir da Equação 4 a seguir:

$$G_{CH_4} = \sum_x (A \cdot k \cdot RSU_t(x) \cdot RSU_f(x) \cdot L_0 \cdot e^{(-k(t-x))}) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:  $x$  = ano inicial até  $t$

$$A = 1 - e^{-k} / k$$

Onde:  $G_{CH_4}$ : Geração de metano. ( $t_{CH_4}$ /ano)

$RSU_t$ : Total de resíduos gerados no município no ano  $x$ . ( $t_{RSU}$ /ano)

$RSU_f$ : Fração de resíduos depositado no aterro no ano  $x$ . (%)

$L_0$ : Potencial de geração de metano. ( $m^3/t_{RSU}$ )

$A$ :  $(1 - e^{-k})/k$ ; fator de normalização para corrigir a soma.

$k$ : constante de decaimento. (1/ano)

O método admite que a taxa de produção de metano depende apenas da quantidade de carbono remanescente nos resíduos, como resultado emissões de metano a partir de resíduos depositados em um aterro são mais altas nos primeiros anos após a disposição, em seguida, diminui gradualmente conforme o carbono degradável no resíduo é consumido pelos microrganismos responsáveis (ABRELPE, 2013).

Para a utilização desta equação é necessário conhecer dados estatísticos do município do local do estudo e do resíduo da região. Segundo o IPCC (2006b), o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) tem uma equação para a sua valoração, apresentada a seguir.

$$L_0 = F_{CH_4} \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot 16/12 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:  $L_0$ : Potencial de geração de metano. ( $m^3/t_{RSU}$ )

$F_{CH_4}$ : Fator de correção de metano. (%)

$COD$ : Carbono orgânico degradável. ( $t_C / t_{RSU}$ )

$COD_f$ : Fração de carbono orgânico degradável dissociada. (%)

F: Fração em volume de metano no biogás. (%)

$^{16}/_{12}$ : Fator de conversão de carbono em metano ( $t_{CH_4}/t_C$ )

Em IPCC (2006b) o fator de correção de metano ( $F_{CH_4}$ ) é dado conforme a qualidade do aterramento do resíduo no aterro. Para resíduos aterrados adequadamente (aterro sanitário) o valor é de 1, quando o resíduo é aterrado inadequadamente porém em uma profundidade maior que 5 metros o valor é de 0,8, quando o resíduo é aterrado inadequadamente e em uma profundidade menor que 5 metros o valor é de 0,6 e quando não se sabe, o IPCC sugere o valor de 0,6. A fração em volume de metano no biogás é recomendada em 50% (IPCC, 2006b).

O cálculo do carbono orgânico degradável (COD) é baseado na composição do resíduo destinado ao aterro e na quantidade de carbono em cada componente do resíduo. A Tabela 11 a seguir expõem os valores de COD para cada componente do resíduo.

| Componente do resíduo                                       | Porcentagem COD (em massa) |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------|
| A. Papel e tecidos                                          | 40                         |
| B. Resíduos de parques e jardins                            | 17                         |
| C. Restos de comida                                         | 15                         |
| D. Madeira*                                                 | 30                         |
| * excluindo a fração de lignina que se decompõem lentamente |                            |

**Tabela 11:** Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo.

**Fonte:** BINGEMER e CRUTZEN (1987, apud IPCC 1996), adaptado pelo autor.

A equação para estimar o valor do carbono orgânico degradável é exposta a seguir.

$$COD = (40 \cdot A) + (17 \cdot B) + (15 \cdot C) + (30 \cdot D) \quad \text{Equação 5}$$

A fração de carbono orgânico degradável dissociada ( $COD_f$ ), segundo Bingemer e Crutzen (1987 apud IPCC, 1996), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela equação a seguir.

$$COD_f = 0,014T + 0,28 \quad \text{Equação 6}$$

Onde: T: Temperatura na zona anaeróbia. (°C)

O valor recomendado pelo IPCC (2006b) para o CODf é de 0,5 quando não há estudo mais específicos da temperatura do aterro na zona anaeróbia.

Para encontrar o valor de k, a Tabela 12 elaborada por IPCC (2006b), apresenta os intervalos que k pode assumir.

| Tipo de resíduo                         |                                                   | Zona Climática                                |             |                                |             |                                           |             |                                |              |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|
|                                         |                                                   | Clima temperado ( $\leq 20^{\circ}\text{C}$ ) |             |                                |             | Clima tropical ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) |             |                                |              |
|                                         |                                                   | Seco ( $< 1000\text{mm}$ )                    |             | Úmido ( $\geq 1000\text{mm}$ ) |             | Seco ( $< 1000\text{mm}$ )                |             | Úmido ( $\geq 1000\text{mm}$ ) |              |
|                                         |                                                   | Valor padrão                                  | Intervalo   | Valor padrão                   | Intervalo   | Valor padrão                              | Intervalo   | Valor padrão                   | Intervalo    |
| <b>Resíduo relativamente inerte</b>     | <i>Papel/tecido</i>                               | 0,04                                          | 0,03 - 0,05 | 0,06                           | 0,05 - 0,07 | 0,045                                     | 0,04 - 0,06 | 0,07                           | 0,06 - 0,085 |
|                                         | <i>Madeira</i>                                    | 0,02                                          | 0,01 - 0,03 | 0,03                           | 0,02 - 0,04 | 0,025                                     | 0,02 - 0,04 | 0,035                          | 0,03 - 0,05  |
| <b>Resíduo moderadamente degradável</b> | <i>Outros resíduos orgânicos não alimentícios</i> | 0,05                                          | 0,04 - 0,06 | 0,1                            | 0,06 - 0,1  | 0,065                                     | 0,05 - 0,08 | 0,17                           | 0,15 - 0,2   |
| <b>Resíduos altamente degradável</b>    | <i>Restos de comida e lodo de esgoto</i>          | 0,06                                          | 0,05 - 0,08 | 0,185                          | 0,1 - 0,2   | 0,085                                     | 0,07 - 0,1  | 0,4                            | 0,17 - 0,7   |
| <b>Massa de resíduos</b>                |                                                   | 0,05                                          | 0,04 - 0,06 | 0,09                           | 0,08 - 0,1  | 0,065                                     | 0,05 - 0,08 | 0,17                           | 0,15 - 0,2   |

**Tabela 12:** Valores recomendados de k para diferentes tipos de resíduos.

**Fonte:** IPCC (2006b), adaptado pelo autor.

Assim como o modelo Scholl Canyon, é necessário considerar a eficiência do sistema de drenagem de biogás do aterro. Os valores são os mesmo adotados pelo modelo anterior.

### 3.6 Tecnologias para conversão do biogás de aterro em energia

Para que o biogás de aterro seja transformado em energia elétrica, algumas tecnologias são necessárias para implementar o sistema de coleta a transformação energética do biogás. As tecnologias são apresentadas a seguir.

#### 3.6.1 Rede de coleta e bombas de sucção

A rede de coleta é o sistema que transporta o biogás drenado pelo sistema do aterro para a central de geração de eletricidade. A rede coletora de biogás normalmente é composta por tubos de polietileno de alta densidade e deve ser aterrada para evitar acidentes. São utilizadas bombas de sucção de gases para compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir uma vazão regular de biogás. Deve-se equilibrar a vazão da

bomba com a geração de gás para que seja evitada a infiltração de ar no e o risco de explosões (MENDES, 2005).

### *3.6.2 Filtro para material particulado*

A primeira etapa de tratamento do biogás extraído ocorrerá pela passagem do mesmo através de um filtro, para a remoção de material particulado eventualmente arrastado juntamente com o gás. A montante e a jusante deste filtro são instalados medidores de pressão (vacuômetros) que possibilitam o monitoramento do aumento da perda de carga e permitem identificar o momento da troca do elemento filtrante (ICLEI, 2009).

### *3.6.3 Desumidificador*

O sistema de desumidificação tem por finalidade remover a umidade do biogás. A desumidificação consiste em reduzir significativamente a velocidade do fluido nos separadores, permitindo a formação de gotículas, que se acumulam na parte inferior do tanque. Essa fase líquida deverá ser drenada para o sistema de coleta de chorume para ser tratado juntamente com o mesmo (ICLEI, 2009).

### *3.6.4 Sistema de queima em flares*

O sistema de queima em flares é um dispositivo simples para ignição e queima do biogás. O flare é importante para queimar o biogás em excesso que não será utilizado no sistema de reaproveitamento energético, e queimar o biogás em etapas de manutenção ou em falhas no sistema.

O sistema de queima pode ser realizados com:

- Flares abertos: do tipo mais simples e barato, porém menos controlado devido à instabilidade da chama e a possíveis combustões ineficientes (MENDES, 2005).
- Flares enclausurados: que são mais caros, porém preferíveis por obter eficiências de combustão maiores e reduzir incômodos de ruído e iluminação (MENDES, 2005).

### *3.6.5 Conversão de biogás em energia*

A conversão do biogás de energia consiste em transformar a energia química presente nas moléculas do biogás, por meio de uma combustão controlada, em energia mecânica (FIGUEIREDO, 2011). Para isso, três tecnologia são mais utilizadas, os motores de combustão interna, turbinas e microturbinas a gás e caldeiras a vapor.

#### *a) Motores de combustão interna – ciclo Otto*

Motores de combustão interna, também conhecidos como motores ciclo Otto, são os equipamentos mais utilizados para queima do biogás de aterro, devido ao seu maior rendimento na geração de energia e menor custo quando comparado às outras tecnologias. Para a queima de biogás em motores ciclo Otto, são necessárias apenas pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão (ICLEI, 2009).

Quando alimentado por biogás de aterro, os motores de combustão interna conseguem obter eficiências energéticas da ordem de 25 a 35%, Os motores de combustão interna adaptados para serem utilizados em aterros estão disponíveis em diversos tamanhos, e mais motores podem ser acrescentados à medida que a geração de biogás aumenta, os geradores comumente utilizados em aplicações em aterro se classificam entre 800 e 3.000 kW (ABRELPE, 2013).

Normalmente, os projetos de usina de geração de energia elétrica em aterro utilizam motores de 4 tempos de mistura pobre, ou seja, que funcionam com grandes parcelas de comburente. Esses motores queimam o biogás com grandes quantidades de ar para obter maior eficiência e menores emissões de  $\text{NO}_x$ . Para gerar energia, o motor é conectado a um virabrequim, que por sua vez aciona um gerador elétrico para produzir eletricidade (ABRELPE, 2013).

As vantagens dos motores de combustão interna são o baixo custo, a confiabilidade, menores exigências para processamento de combustível se comparados as turbinas, e adequação para aterros médio porte. As desvantagens estão nas maiores emissões de  $\text{NO}_x$  e custos de manutenção mais elevados em relação a outras tecnologias (ABRELPE, 2013).

#### *b) Turbinas e microturbinas a gás*

As turbinas a gás são usadas em diversos aterros de grande porte, geralmente aterros com fluxo maior que 5 milhões de toneladas anuais de resíduos e projetos que geram mais de 5 MW de eletricidade (ABRELPE, 2013). A economia na geração de energia e a eficiência do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto (MENDES, 2005).

O custo relativamente alto das turbinas, as exigências de pressão mais alta do combustível e a menor eficiência de geração de energia, tornam as turbinas a gás menos interessantes para aterros de pequeno e médio porte. As vantagens estão nas emissões de  $\text{NO}_x$  mais baixas que as dos motores ciclo Otto e nos custos de manutenção relativamente baixos (ABRELPE, 2013).

As microturbinas tem suas aplicações em projetos de pequeno porte com menos de 1 MW de potência, atendendo à demanda de eletricidade do próprio aterro e/ou de locais próximos. São equipamentos mais recentes e menos empregados no aproveitamento energético do biogás (MENDES, 2005).

As vantagens da utilização de microturbinas estão nos baixos níveis de ruídos e vibrações, dimensões reduzidas e simplicidade de instalação, baixas emissões de  $\text{NO}_x$  e na capacidade de funcionamento com o biogás com baixo conteúdo de metano. As desvantagens estão no investimento inicial elevado, menores eficiências que motores de combustão interna e outros tipos de turbinas, alto custo de operação e manutenção, e a necessidade de pré-tratamento mais elaborado do biogás de aterro (ABRELPE, 2013)

### c) Caldeiras a vapor

A adaptação desses equipamentos para uso do biogás de aterro pode ser realizada com pequenas modificações, buscando a adequação às características do novo combustível, os níveis de umidade devem ser controlados para impedir danos aos equipamentos e problemas na operação das caldeiras, a vazão deve ser aumentada com a uma vez que o biogás possui menor quantidade de metano que o gás natural, sendo necessária uma maior quantidade de gás (MENDES, 2005).

Segundo Figueiredo (2011), os fabricantes deste equipamento recomendam que as caldeiras operem entre 40 e 90% de sua capacidade para obter melhores eficiências, trabalhar abaixo destes valores reduz a eficiência da caldeira, e operar acima destes valores comprometem a sua vida útil. Ainda segunda a autora, as emissões provenientes

da queima do biogás em caldeiras resultam em menores emissões globais comparadas aos motores de combustão interna.

### 3.7 Caracterização da área de estudo

O município de Rio Claro se encontra no estado de São Paulo, a sudoeste da capital do estado, mais precisamente na latitude 22º 14'm, e longitude 47º 18'm. Segundo o IBGE (2015), o município compreende uma área de 498,422 km<sup>2</sup>.

Os dados climáticos do município de Rio Claro são apresentados pela Tabela 13.

| Mês | Temperatura média (°C) | Chuva (mm) |
|-----|------------------------|------------|
| Jan | 24,2                   | 234,1      |
| Fev | 24,3                   | 203,1      |
| Mar | 23,8                   | 153,8      |
| Abr | 21,6                   | 63,2       |
| Mai | 19,3                   | 62,4       |
| Jun | 18,1                   | 38,2       |
| Jul | 17,9                   | 26,9       |
| Ago | 19,7                   | 28,8       |
| Set | 21,2                   | 66,8       |
| Out | 22,3                   | 125,6      |
| Nov | 22,9                   | 147,2      |
| Dez | 23,5                   | 216,7      |
| Ano | 21,6                   | 1366,8     |

**Tabela 13:** Médias mensais de temperatura e precipitação do município de Rio Claro – SP.

**Fonte:** CEPAGRI (2015), adaptado pelo autor.

Rio Claro encontra-se na região de clima tropical, com verões quentes e úmidos, e invernos frios e secos, a temperatura média anual no município é de 21,6 °C, e a precipitação anual é de 1366,8 mm (CEPAGRI, 2015).

Segundo o IBGE (2015), o município de Rio Claro conta com uma população de 199.961 habitantes. A Tabela 14 apresenta o histórico de crescimento populacional no município de Rio Claro.

| <b>Ano</b> | <b>População Total</b> |
|------------|------------------------|
| 1995       | 150.945                |
| 1997       | 157.382                |
| 1999       | 164.414                |
| 2001       | 169.908                |
| 2003       | 173.455                |
| 2005       | 177.067                |
| 2007       | 180.672                |
| 2009       | 184.205                |
| 2011       | 187.667                |
| 2013       | 190.849                |

**Tabela 14:** Série histórica de crescimento populacional do município de Rio Claro (SP).

**Fonte:** SEPLADEMA (2014).

A Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente - Sepladema (2014) estima o crescimento populacional no município ocorrerá linearmente e de forma acentuada em virtude da perspectiva da demanda de novos loteamentos, com população total estimada para o ano de 2034 em 253.949. A Tabela 15 estima o crescimento populacional urbano no município de Rio Claro até o ano de 2025.

| <b>Ano</b> | <b>População Total</b> |
|------------|------------------------|
| 2016       | 202.910                |
| 2017       | 205.556                |
| 2018       | 208.202                |
| 2019       | 210.847                |
| 2020       | 213.493                |
| 2021       | 216.139                |
| 2022       | 218.784                |
| 2023       | 221.430                |
| 2024       | 224.076                |
| 2025       | 226.721                |

**Tabela 15:** Estimativa do crescimento populacional no município de Rio Claro (SP).

**Fonte:** SEPLADEMA (2014).

### *3.7.1 Diagnóstico dos RSU de Rio Claro – SP*

A resíduo sólido urbano de Rio Claro foi caracterizado qualitativamente pelo Sepladema (2014) seguindo os procedimento de amostragem com base na norma técnica

ABNT NBR 10.007 e na dissertação de mestrado de Frésca (2007). O resultado da análise gravimétrica do RSU do município é apresentada na Tabela 16.

| <b>Componente</b> | <b>Parcela (%)</b> |
|-------------------|--------------------|
| Material Orgânico | 50,83              |
| Papel             | 6,46               |
| Papelão           | 5,2                |
| Vidro             | 1,09               |
| Metais            | 1,27               |
| Tetrapack         | 2,23               |
| Tecido            | 9,87               |
| Plástico Duro     | 4,33               |
| Plástico Mole     | 7,35               |
| Outros            | 11,38              |

**Tabela 16:** Composição qualitativa do resíduo sólido urbano de Rio Claro (SP).

**Fonte:** SEPLADEMA (2014).

O município do estudo conta atualmente com um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, que iniciou as suas atividades no ano de 2001. A Tabela 17 apresenta o histórico de disposição no aterro sanitário municipal de Rio Claro.

| <b>Ano</b> | <b>Quantidade de RSU disposto<br/>(t/ano)</b> |
|------------|-----------------------------------------------|
| 2001       | 17.000,00                                     |
| 2002       | 22.000,00                                     |
| 2003       | 26.050,00                                     |
| 2004       | 31.900,00                                     |
| 2005       | 36.000,00                                     |
| 2006       | 42.120,00                                     |
| 2007       | 45.698,00                                     |
| 2008       | 47.128,00                                     |
| 2009       | 49.560,00                                     |
| 2010       | 56.264,00                                     |
| 2011       | 67.024,00                                     |
| 2012       | 71.263,00                                     |
| 2013       | 71.678,00                                     |
| 2014       | 68.968,00                                     |
| 2015       | 64.225,80                                     |

**Tabela 17:** Quantidade de resíduos sólidos urbanos disposto no aterro de Rio Claro desde seu ano de abertura ao ano de 2015.

**Fonte:** SEPLADEMA (2015).

Segundo o Sepladema, o elevado crescimento da quantidade de resíduos disposto no aterro desde do ano de sua abertura se deve a maior eficiência na coleta de resíduos, atualmente a coleta ocorre em 100% da área urbana e em alguns pontos da área rural de Rio Claro, além disso, foi implantado um trabalho de educação ambiental que resultou em maior consciência ambiental da população para o descarte corretor dos resíduos. Os chamados “Bolsões de lixo” foram proibidos pela CETESB e Secretaria do Meio Ambiente, assim sendo, todo o resíduos passaram a ser disposto no aterro.

A Tabela 18 apresenta a estimativa de geração de resíduos sólidos domiciliares em Rio Claro até o ano de 2025.

| Ano  | População | Porcentagem de atendimento (%) | Geração per capita ( $\text{kg}/\text{hab.dia}$ ) | Porcentagem de reciclados retirados na coleta seletiva (%) | Quantidade de resíduos sólidos domiciliares destinado ao aterro ( $\text{t}/\text{ano}$ ) |
|------|-----------|--------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2016 | 202.910   | 100                            | 0,715                                             | 25                                                         | 39.147,60                                                                                 |
| 2017 | 205.556   | 100                            | 0,730                                             | 25                                                         | 40.538,40                                                                                 |
| 2018 | 208.202   | 100                            | 0,746                                             | 25                                                         | 41.952,00                                                                                 |
| 2019 | 210.847   | 100                            | 0,762                                             | 25                                                         | 43.387,20                                                                                 |
| 2020 | 213.493   | 100                            | 0,778                                             | 25                                                         | 44.846,40                                                                                 |
| 2021 | 216.139   | 100                            | 0,794                                             | 25                                                         | 46.327,20                                                                                 |
| 2022 | 218.784   | 100                            | 0,809                                             | 25                                                         | 47.830,80                                                                                 |
| 2023 | 221.430   | 100                            | 0,825                                             | 25                                                         | 49.357,20                                                                                 |
| 2024 | 224.076   | 100                            | 0,841                                             | 25                                                         | 50.906,40                                                                                 |
| 2025 | 226.721   | 100                            | 0,857                                             | 25                                                         | 52.478,40                                                                                 |

**Tabela 18:** Estimativa de geração de resíduos sólidos domiciliares, até o ano de 2015, no município de Rio Claro – SP.

**Fonte:** SEPLADEMA (2014).

O estudo do Sepladema (2014) supõem uma porcentagem de reciclados coletados na coleta seletiva em 25%, um valor bastante alto para os padrões brasileiros, e considerando que em Rio Claro a porcentagem de reciclados coletados na coleta seletiva foi de apenas 2% em 2013.

O aterro sanitário do município de Rio Claro localiza-se entre as coordenadas 513.938,91 e 513.523,07 de latitude Norte e 234.592,79 e 234.300,20 de longitude Leste, em terreno com cerca de 14 ha de área total, situado no município de Rio Claro, Estado de São Paulo. O acesso se dá na estrada municipal que liga o município de Rio Claro ao distrito de Assistência, às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP-127), que liga o município de Rio Claro ao município de Piracicaba (SEPLADEMA, 2014). A área fica a aproximadamente 3,0 km do núcleo urbano do município, como exposto na Figura 6.



**Figura 6:** Localização do aterro sanitário de Rio Claro/SP

**Fonte:** SEPLADEMA (2014).

A área ocupada pelo aterros está situada em região considerada um alto topográfico, caracterizando-se um divisor das águas superficiais entre as sub-bacias do Córrego da Servidão e Ribeirão Rio Claro, na bacia do Rio Corumbataí (SEPLADEMA, 2014).

O aterro sanitário do município iniciou suas atividades em 2001 em uma área total de 141.637,68 m<sup>2</sup>. Destes, aproximadamente 98.000m<sup>2</sup> são destinados à disposição de resíduos. A área licenciada do aterro tem a sua vida útil até 2021, porém existe área anexa ao local de disposição de resíduo para ampliação (SEPLADEMA, 2014).

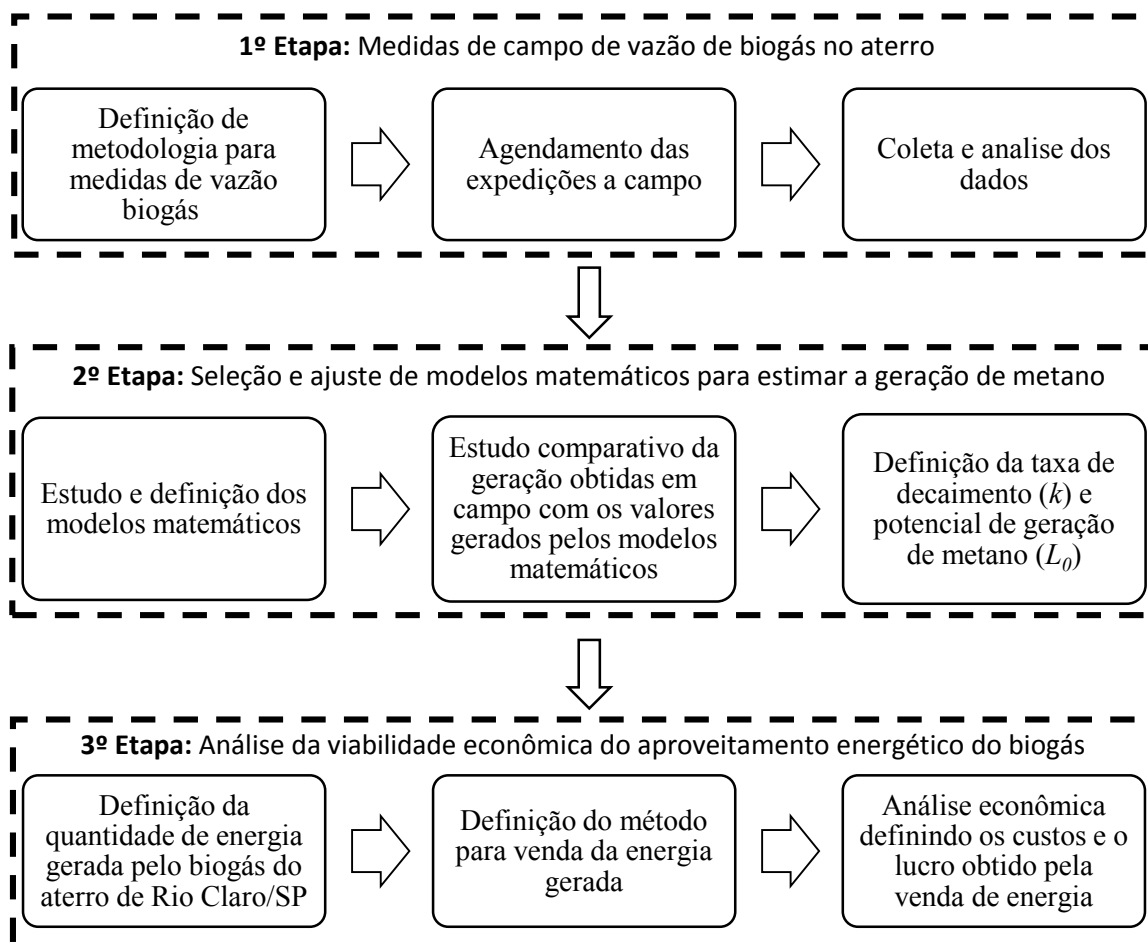
O aterro possui sistema de drenagem de líquido percolado em formato de espinha de peixe, sistema de impermeabilização composta por solo compactado e manta de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2mm de espessura, sistema de drenagem de líquidos percolados, sistema de cobertura da massa de resíduos realizada diariamente com solo compactado com espessura de 0,15 m, sistema de captação dos gases, sistema de drenagem pluvial, sistema de monitoramento de águas subterrâneas e sistema tratamento de efluentes, onde o lixiviado segue para lagoas de acumulação com aeradores, lagoas de decantação e lagoas de sedimentação, que seguem posteriormente para o tratamento com

membranas, entretanto, o efluente não atende o padrão de lançamento no corpo hídrico nas imediações, sendo assim, o líquido é coletado por caminhão pipa e encaminhado Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Conduta, onde cerca de 600 m<sup>3</sup>/mês de lixiviados são tratados (SEPLADEMA, 2014).

Segundo a CETESB (2014), o Índice de Qualidade de Aterro Sanitário (IQR) do aterro sanitário de Rio Claro é 8,6, sendo classificando como um aterro de condições adequadas para disposição de resíduos.

## 4 METODOLOGIA

Para a execução da pesquisa, o projeto foi dividido em três etapas: medidas de campo de vazão de biogás no aterro, seleção e ajuste de modelos matemáticos para estimar a geração de metano e a terceira e última etapa análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás. O fluxograma a seguir apresenta as etapas seguidas no trabalho de conclusão de curso (Figura 7).



**Figura 7:** Fluxograma das etapas do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

### 4.1 Medidas de campo de vazão de biogás e metano

As expedições a campo têm como objetivo obter dados de vazão e concentração de metano no biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro - SP. Para a coleta, foi criado uma tabela para preenchimento com os dados obtidos nas expedições a campo, sendo estes transferidos para uma planilha no programa Microsoft Excel.

Para melhor controle e organização dos dados, os drenos do aterro de Rio Claro foram georreferenciados com um sistema de posicionamento global (GPS) e identificados, como apresentado na Figura 8.



**Figura 8:** Georreferenciamento e identificação dos drenos do aterro de Rio Claro – SP.

A identificação dos drenos seguiu a sequência da identificação realizadas em estudos anteriores. Devido a dinâmica do aterro sanitário de Rio Claro, drenos de emissão de biogás surgem sem seguir um certo padrão, dessa forma, os drenos implantados em células de resíduos já estabelecidas receberam a nomenclatura do dreno mais próximo, seguido da letra “A”. São os casos dos drenos 5A, 8A, 9A, 10A, 17A e 22A.

Apesar de existir um dreno identificado como 6, este dreno está inativo, não emitindo biogás. A ausência do dreno identificado como 30 se deve a distração no momento da nomenclatura, todavia este erro não compromete a sequência do projeto.

Os drenos 5A, 8A, 9A, 10A, 17A e 22A foram criados no ano de 2014, não existindo nos anos anteriores, sendo os drenos 5A e 22A implantados em setembro de 2014. No ano de 2013 foram implantados os drenos 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37, e contava com um número de 36 drenos, uma vez que os drenos criados em 2014 ainda não existiam. No ano de 2012 o aterro funcionava com um total de 29 drenos.

Em seguida, as expedições a campo em 2014 foram agendadas a fim de incluir as estações do ano com suas variações climáticas de temperatura e precipitação e assim obter dados que melhor representem a realidade local.

As expedições foram intercaladas em coletas parciais e coletas totais. As coletas parciais obtiveram dados de vazão de biogás e metano de drenos selecionados, e totalizaram 13 coletas. As coletas totais obtiveram dados de vazão de biogás e metano de

todos os drenos do aterro de Rio Claro, e totalizaram 5 coletas, assim sendo, foram realizadas um total de 18 expedições a campo.

#### *4.1.1 Procedimento de coleta de dados de campo*

O procedimento de coleta inicia-se apagando a chama dos drenos acesos, com um pano encharcado de água para abafar o fogo e resfriar a temperatura do dreno, como apresenta a Figura 9.



**Figura 9:** Procedimento para apagar as chamas dos drenos do aterro sanitário de Rio Claro (SP).

**Fonte:** ANTONIO (2012).

A vazão do biogás do dreno foi calculada com o auxílio do equipamento termo anemômetro digital portátil da marca TESTO, modelo 405-V1 e com precisão de 5% (Figuras 10 e 11). O equipamento fornece a velocidade de saída do gás. As medidas foram realizadas com o auxílio de adaptadores de chapa galvanizada, semelhantes a “chaminés”, sendo estas adaptadas ao diâmetro dos drenos do aterro sanitário de Rio Claro (SP). O termo anemômetro é inserido no adaptador, perpendicularmente ao fluxo de gás, distante 96 cm da extremidade superior do tubo a fim de evitar que o regime de turbulência do escoamento do biogás e as condições atmosféricas (vento), as quais influenciem as medidas de velocidade.



**Figura 10:** Termo anemômetro digital portátil TESTO, modelo 405-V1 utilizado nas expedições a campo.  
**Fonte:** ANTONIO (2012).



**Figura 11:** Medição de velocidade de saída do biogás em dreno do aterro sanitário de Rio Claro (SP) com o auxílio do termo anemômetro digital portátil e a “chaminé”.

Em função da elevada sensibilidade do anemômetro, optou-se por realizar seis medidas de velocidade, obtidas a cada 10 segundos, e a partir delas calculada a média simples. Após o cálculo da média das velocidades, a vazão é obtida a partir da Equação 7. Na presente pesquisa não foi considerado as alterações devido à pressão e a temperatura uma vez que o biogás gerado no aterro será utilizado no mesmo ambiente, não alterando as condições iniciais do gás.

$$Q = v \cdot A$$

Equação 7

Onde: Q: Vazão de saída do biogás em m<sup>3</sup>/s.

v: Velocidade de saída do biogás em m/s.

A: Área de seção da “chaminé” em m<sup>2</sup>.

Em seguida, a composição do biogás do aterro de Rio Claro (SP) foi determinada a partir da utilização do instrumento portátil LANDTEC GEM-2000, com precisão de 3%, este instrumento informa a porcentagem do metano, gás carbônico e oxigênio presente no biogás, além de informar sua temperatura. Após a medida de velocidade de saída do biogás, o dreno é vedado com filme de PVC para que não ocorra a interferência com o ambiente externo. Após o tempo mínimo de uma hora, dados de temperatura e concentração (v/v) do  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  são obtidas com a perfuração da película plástica e inserção de sondas conectadas ao aparelho LANDTEC GEM-2000 (Figura 12).



**Figura 12:** Análise qualitativa do biogás do aterro de Rio Claro (SP) com a utilização do instrumento portátil LANDTEC GEM-2000.

O cálculo da vazão de metano foi realizado multiplicando a porcentagem de metano com a vazão de biogás de cada dreno.

#### *4.1.2 Estimativa de geração total de biogás e metano com base nas medidas de campo*

Com a finalidade de aumentar o período da análise, foram incorporados a presente pesquisa dados de geração de biogás e metano obtidos a partir dos estudos de ANTONIO (2012), MARQUES (2012) e GOTARDO (2013), pertencentes ao processo FAPESP 2011/20081-0-Regular, assim sendo, foi possível realizar o estudo com dados de 2012, 2013 e 2014.

Para o ano de 2014, foi utilizado apenas dados coletados na presente pesquisa. Para o cálculo das emissões dos gases no aterro de Rio Claro no ano de 2014, foi calculada

a média individual dos dados de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) de biogás e de metano resultante das coletas de cada dreno e extrapolado para todo o ano ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ). Em seguida, foi somado a vazão anual resultante de todos os drenos.

Os dados obtidos em campo em 2014 são apresentados na Tabela 19 a seguir.

| <b>2014</b>  |                      |                                                            |                                                    |                                                            |
|--------------|----------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Dreno</b> | <b>n° de coletas</b> | <b>Vazão biogás<br/>(<math>\text{m}^3/\text{h}</math>)</b> | <b>Parcela de<br/><math>\text{CH}_4</math> (%)</b> | <b>Vazão metano<br/>(<math>\text{m}^3/\text{h}</math>)</b> |
| 1            | 5                    | 18,3                                                       | 57,2                                               | 10,4                                                       |
| 2            | 5                    | 6,2                                                        | 45,9                                               | 2,8                                                        |
| 3            | 5                    | 1,4                                                        | 42,8                                               | 0,6                                                        |
| 4            | 5                    | 22,7                                                       | 21,8                                               | 4,9                                                        |
| 5            | 18                   | 19,3                                                       | 53,8                                               | 10,4                                                       |
| 5A           | 3                    | 25,1                                                       | 0,9                                                | 0,2                                                        |
| 7            | 17                   | 7,1                                                        | 29,3                                               | 2,1                                                        |
| 8            | 17                   | 16,8                                                       | 11,7                                               | 2,0                                                        |
| 8A           | 5                    | 16,4                                                       | 54,9                                               | 9,0                                                        |
| 9            | 5                    | 22,9                                                       | 58,0                                               | 13,3                                                       |
| 9A           | 5                    | 24,6                                                       | 16,4                                               | 4,0                                                        |
| 10           | 5                    | 12,7                                                       | 48,8                                               | 6,2                                                        |
| 10A          | 5                    | 17,8                                                       | 10,9                                               | 1,9                                                        |
| 11           | 5                    | 15,4                                                       | 56,8                                               | 8,8                                                        |
| 12           | 5                    | 32,1                                                       | 57,2                                               | 18,3                                                       |
| 13           | 5                    | 61,8                                                       | 55,7                                               | 34,4                                                       |
| 14           | 4                    | 41,3                                                       | 51,4                                               | 21,2                                                       |
| 15           | 5                    | 43,3                                                       | 54,3                                               | 23,5                                                       |
| 16           | 5                    | 56,7                                                       | 55,7                                               | 31,5                                                       |
| 17           | 5                    | 32,0                                                       | 51,2                                               | 16,4                                                       |
| 17A          | 5                    | 55,4                                                       | 48,7                                               | 27,0                                                       |
| 18           | 5                    | 36,3                                                       | 56,6                                               | 20,5                                                       |
| 19           | 17                   | 37,6                                                       | 57,2                                               | 21,5                                                       |
| 20           | 5                    | 72,7                                                       | 57,8                                               | 42,0                                                       |
| 21           | 5                    | 31,3                                                       | 57,0                                               | 17,8                                                       |
| 22           | 5                    | 23,9                                                       | 22,5                                               | 5,4                                                        |
| 22A          | 3                    | 27,0                                                       | 43,5                                               | 11,7                                                       |
| 23           | 5                    | 16,0                                                       | 21,2                                               | 3,4                                                        |
| 24           | 5                    | 25,0                                                       | 50,5                                               | 12,6                                                       |
| 25           | 18                   | 29,6                                                       | 55,4                                               | 16,4                                                       |
| 26           | 13                   | 47,6                                                       | 55,2                                               | 26,3                                                       |
| 27           | 11                   | 35,9                                                       | 56,8                                               | 20,4                                                       |
| 28           | 16                   | 28,3                                                       | 52,3                                               | 14,8                                                       |
| 29           | 7                    | 19,2                                                       | 52,0                                               | 10,0                                                       |
| 31           | 9                    | 33,7                                                       | 42,2                                               | 14,2                                                       |
| 32           | 17                   | 42,1                                                       | 47,8                                               | 20,1                                                       |
| 33           | 14                   | 56,5                                                       | 53,8                                               | 30,4                                                       |
| 34           | 5                    | 21,1                                                       | 24,7                                               | 5,2                                                        |
| 35           | 5                    | 25,2                                                       | 54,8                                               | 13,8                                                       |
| 36           | 5                    | 58,2                                                       | 56,2                                               | 32,7                                                       |
| 37           | 5                    | 42,0                                                       | 44,1                                               | 18,5                                                       |
| <b>MÉDIA</b> |                      | <b>30,7</b>                                                | <b>45,0</b>                                        | <b>14,8</b>                                                |

**Tabela 19:** Resultado das medidas de vazão de biogás e concentração de metano obtidas em campo no ano de 2014 no aterro de Rio Claro – SP.

Em função das coletas realizadas em 2012 e 2013 não abrangerem todos os drenos do aterro, a estimativa de geração de biogás e metano dos drenos sem registro foi realizada a partir da criação de um fator de correlação dos dados obtidos em 2014 para os anos de 2013 e 2012.

O fator de correlação para o ano de 2013 foi calculado a partir dos dados de geração dos drenos disponíveis em 2013 em comparação aos dados destes mesmos drenos em 2014. Os dados de 2013 obtidos em campo são apresentados na Tabela 20 a seguir.

| <b>2013</b>  |                      |                                |                                          |                                |
|--------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Dreno</b> | <b>nº de coletas</b> | <b>Vazão biogás<br/>(m³/h)</b> | <b>Parcela de<br/>CH<sub>4</sub> (%)</b> | <b>Vazão metano<br/>(m³/h)</b> |
| 1            | 12                   | 12,5                           | 57,2                                     | 7,2                            |
| 2            | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 3            | 12                   | 2,2                            | 53,8                                     | 1,2                            |
| 4            | 12                   | 23,5                           | 57,4                                     | 13,5                           |
| 5            | 26                   | 22,3                           | 57,7                                     | 12,9                           |
| 7            | 25                   | 8,9                            | 48,3                                     | 4,3                            |
| 8            | 24                   | 8,0                            | 44,9                                     | 3,6                            |
| 9            | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 10           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 11           | 12                   | 14,4                           | 55,7                                     | 8,0                            |
| 12           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 13           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 14           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 15           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 16           | 12                   | 31,9                           | 41,3                                     | 13,2                           |
| 17           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 18           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 19           | 25                   | 47,1                           | 56,6                                     | 26,7                           |
| 20           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 21           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 22           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 23           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 24           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 25           | 21                   | 34,5                           | 56,3                                     | 19,4                           |
| 26           | 21                   | 48,5                           | 54,3                                     | 26,4                           |
| 27           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 28           | 23                   | 35,2                           | 55,5                                     | 19,5                           |
| 29           | 12                   | 22,3                           | 54,2                                     | 12,1                           |
| 31           | 20                   | 25,4                           | 38,5                                     | 9,8                            |
| 32           | 20                   | 26,4                           | 36,5                                     | 9,6                            |
| 33           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 34           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 35           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 36           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| 37           | 0                    | -                              | -                                        | -                              |
| <b>MÉDIA</b> |                      | <b>24,2</b>                    | <b>51,2</b>                              | <b>12,5</b>                    |

**Tabela 20:** Resultado das medidas de vazão de biogás e concentração de metano obtidas em campo no ano de 2013 no aterro de Rio Claro – SP.

**Fonte:** GOTARDO e CASTRO (2013), adaptado pelo autor.

O cálculo do fator de correlação de 2013 foi realizado dividindo a média das vazões dos drenos com registro (drenos números 1, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 16, 19, 25, 26, 28, 29, 31 e 32) em 2013 com a média das vazões dos mesmos drenos em 2014. A Tabela 21 apresenta o cálculo do fator de correlação para 2013.

| Dreno                                   | Vazão de biogás<br>(m <sup>3</sup> /h) |             | Vazão de metano<br>(m <sup>3</sup> /h) |             |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------------|----------------------------------------|-------------|
|                                         | 2013                                   | 2014        | 2013                                   | 2014        |
| 1                                       | 12,5                                   | 18,3        | 7,2                                    | 10,4        |
| 3                                       | 2,2                                    | 1,4         | 1,2                                    | 0,6         |
| 4                                       | 23,5                                   | 22,7        | 13,5                                   | 4,9         |
| 5                                       | 22,3                                   | 19,3        | 12,9                                   | 10,4        |
| 7                                       | 8,9                                    | 7,1         | 4,3                                    | 2,1         |
| 8                                       | 8,0                                    | 16,8        | 3,6                                    | 2,0         |
| 11                                      | 14,4                                   | 15,4        | 8,0                                    | 8,8         |
| 16                                      | 31,9                                   | 56,7        | 13,2                                   | 31,5        |
| 19                                      | 47,1                                   | 37,6        | 26,7                                   | 21,5        |
| 25                                      | 34,5                                   | 29,6        | 19,4                                   | 16,4        |
| 26                                      | 48,5                                   | 47,6        | 26,4                                   | 26,3        |
| 28                                      | 35,2                                   | 35,9        | 19,5                                   | 14,8        |
| 29                                      | 22,3                                   | 19,2        | 12,1                                   | 10,0        |
| 31                                      | 25,4                                   | 33,7        | 9,8                                    | 14,2        |
| 32                                      | 26,4                                   | 42,1        | 9,6                                    | 20,1        |
| <b>Média</b>                            | <b>24,2</b>                            | <b>26,9</b> | <b>12,5</b>                            | <b>12,9</b> |
| <b>Fator de</b>                         | <b>0,9003</b>                          |             | <b>0,9653</b>                          |             |
| <b>Correlação</b>                       |                                        |             |                                        |             |
| (G <sub>2013</sub> /G <sub>2014</sub> ) | <i>Biogás</i>                          |             | <i>Metano</i>                          |             |

**Tabela 21:** Cálculo do fator de correlação utilizado para estimar a geração de biogás e metano dos drenos sem registros em 2013 a partir dos dados de 2014. Para o cálculo foram utilizados dados vazão de biogás e metano de GOTARDO (2013) e dados da presente pesquisa.

O fator de correlação para o ano de 2012 foi calculado a partir dos dados de geração dos drenos disponíveis em 2012 em comparação aos dados de destes mesmos drenos em 2014. Os dados obtidos em campo em 2012 são apresentado na Tabela 22 a seguir.

| 2012  |               |                        |                                   |                        |
|-------|---------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Dreno | nº de coletas | Vazão biogás<br>(m³/h) | Parcela de<br>CH <sub>4</sub> (%) | Vazão metano<br>(m³/h) |
| 1     | 16            | 13,8                   | 54,6                              | 7,5                    |
| 2     | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 3     | 16            | 5,5                    | 53,0                              | 2,9                    |
| 4     | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 5     | 16            | 18,4                   | 54,7                              | 10,0                   |
| 7     | 16            | 10,7                   | 48,5                              | 5,2                    |
| 8     | 16            | 9,8                    | 39,3                              | 3,9                    |
| 9     | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 10    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 11    | 16            | 22,7                   | 53,9                              | 12,2                   |
| 12    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 13    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 14    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 15    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 16    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 17    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 18    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 19    | 16            | 48,6                   | 53,1                              | 25,8                   |
| 20    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 21    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 22    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 23    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 24    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 25    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 26    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 27    | 0             | -                      | -                                 | -                      |
| 28    | 16            | 42,4                   | 51,1                              | 21,7                   |
| 29    | 16            | 16,9                   | 50,8                              | 8,6                    |
| MÉDIA |               | 21,0                   | 51,0                              | 24,2                   |

**Tabela 22:** Resultado das medidas de vazão de biogás e concentração de metano obtidas em campo no ano de 2012 no aterro de Rio Claro – SP.

**Fonte:** ANTONIO e CASTRO (2012) e MARQUES e CASTRO (2012), adaptado pelo autor.

O cálculo do fator de correlação de 2012 foi realizado dividindo a média das vazões destes drenos (drenos números 1, 3, 5, 7, 8, 11, 19, 28, e 29) em 2013 com a média das vazões dos mesmos drenos em 2014. A Tabela 23 apresenta o cálculo do fator de correlação para 2012.

| Dreno                                                                     | Vazão de biogás<br>(m <sup>3</sup> /h) |             | Vazão de metano<br>(m <sup>3</sup> /h) |            |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|----------------------------------------|------------|
|                                                                           | 2012                                   | 2014        | 2012                                   | 2014       |
| 1                                                                         | 13,8                                   | 18,3        | 7,5                                    | 10,4       |
| 3                                                                         | 5,5                                    | 1,4         | 2,9                                    | 0,6        |
| 5                                                                         | 18,4                                   | 19,3        | 10,0                                   | 10,4       |
| 7                                                                         | 10,7                                   | 7,1         | 5,2                                    | 2,1        |
| 8                                                                         | 9,8                                    | 16,8        | 3,9                                    | 2,0        |
| 11                                                                        | 22,7                                   | 15,4        | 12,2                                   | 8,8        |
| 19                                                                        | 48,6                                   | 37,6        | 25,8                                   | 21,5       |
| 28                                                                        | 42,4                                   | 28,3        | 21,7                                   | 14,8       |
| 29                                                                        | 16,9                                   | 19,2        | 8,6                                    | 10,0       |
| <b>Média</b>                                                              | <b>21,0</b>                            | <b>18,2</b> | <b>10,9</b>                            | <b>9,0</b> |
| <b>Fator de<br/>Correlação</b><br>(G <sub>2012</sub> /G <sub>2014</sub> ) | <b>1,1538</b><br><i>Biogás</i>         |             | <b>1,2111</b><br><i>Metano</i>         |            |

**Tabela 23:** Cálculo do fator de correlação utilizado para estimar a geração de biogás e metano dos drenos sem registros em 2012 a partir dos dados de 2014. Para o cálculo foram utilizados dados de vazão de biogás e metano de ANTONIO (2012), MARQUES (2012) e dados da presente pesquisa.

O cálculo da geração anual de biogás e metano dos drenos com registro de coletas nos anos de 2012 e 2013 seguiram a mesma metodologia utilizadas para os drenos em 2014. Já o cálculo da geração anual de biogás e metano dos drenos sem registro de coleta nos anos 2012 e 2013 foi realizado multiplicando o fator de correlação pela vazão calculada no ano de 2014.

O cálculo da geração total de biogás e metano nos anos de 2012 e 2013 foi realizado convertendo as vazões individuais de cada dreno para metro cúbico por ano (m<sup>3</sup>/ano) e somando-as.

## 4.2 Estimativa de geração de metano a partir de modelos matemáticos

### 4.2.1 Seleção dos modelos matemáticos

A seleção dos modelos matemáticos para previsão da geração de para a presente pesquisa iniciou-se com o estudo de diversos modelos matemáticos encontrados na literatura e com o objetivo de equacionar a geração de metano em aterros sanitários. Os modelos selecionados para o estudo foram o modelo Scholl Canyon, e o modelos proposto pelo IPCC.

Estes modelos foram selecionados por serem considerados mais completos e realistas, uma vez que considera a quantidade de carbono do resíduo que é transformada em metano pelo termo  $L_0$  e a velocidade de reação pelo termo  $k$ , e pelo fato de todos os

dados necessário para a aplicação destes modelos estarem disponíveis. Somado a estes fatores, os modelos de Scholl Canyon e do IPCC são os mais empregues em estudos de caso em aterros no Brasil, além de serem indicados pelo Banco Mundial, Cetesb, Secretária do Meio Ambiente e IPCC.

#### 4.2.2 Estimativa de resíduos disposto no aterro de Rio Claro

Para a aplicação dos modelos foi necessário conhecer a quantidade de resíduo disposto no aterro entre os anos de 2016 e 2021 (ano de encerramento do aterro). Para isso foi calculado uma relação entre o total de resíduos disposto no aterro e a parcela de resíduos provenientes dos domicílios de Rio Claro. Dados de 2013 fornecidos por Sepladema (2014) foram utilizados para este cálculo, sendo estes apresentados na Tabela 24.

| <b>Fonte do Resíduo Sólido Urbano</b> | <b>Quantidade média mensal em 2013 (t)</b> | <b>Representatividade em relação ao total destinado</b> |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Domiciliar                            | 3.904,96                                   | 66,12%                                                  |
| Outras fontes                         | 2.001,33                                   | 33,88%                                                  |
| <b>Total</b>                          | <b>5.906,29</b>                            | <b>100%</b>                                             |

**Tabela 24:** Média da quantidade de resíduo disposto no aterro sanitário de Rio Claro mensalmente em 2013, pelas diferentes fontes.

**Fonte:** SEPLADEMA (2014), adaptado pelo autor

O padrão observado em 2013 foi extrapolados para os anos compreendidos entre 2016 e 2021. Assim sendo, foi calculado um coeficiente que estima a quantidade total de resíduos sólidos a partir da quantidade de resíduos sólidos domiciliares. O coeficiente foi calculado dividindo a quantidade total média mensal em 2013 disposta no aterro de Rio Claro (5.906,29 toneladas) pela quantidade média mensal em 2013 dos resíduos sólidos domiciliares (3.904,96 toneladas), assim sendo o coeficiente assume o valor de 1,5125.

O coeficiente foi multiplicado pelo valor estimado pelo Sepladema (2014) de resíduos sólidos domiciliares gerados entre os anos de 2016 e 2021 (apresentado na revisão bibliográfica pela Tabela 18), obtendo assim a estimativa total de resíduos disposto no aterro municipal de Rio Claro – SP.

A estimativa da quantidade de resíduos sólidos urbanos destinados ao aterro é apresentado na Tabela 25 a seguir.

| Ano  | Quantidade de resíduos sólidos domiciliares destinado ao aterro ( $t_{ano}$ ) | Coefficiente ( $^{RSU}_{/RSD}$ )                   | Quantidade de resíduos sólidos urbanos destinado ao aterro ( $t_{ano}$ ) |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2016 | 39.147,60                                                                     | $\left( \frac{5906,29}{3904,96} \right)$<br>1,5125 | 59.210,75                                                                |
| 2017 | 40.538,40                                                                     |                                                    | 61.314,33                                                                |
| 2018 | 41.952,00                                                                     |                                                    | 63.452,40                                                                |
| 2019 | 43.387,20                                                                     |                                                    | 65.623,14                                                                |
| 2020 | 44.846,40                                                                     |                                                    | 67.830,18                                                                |
| 2021 | 46.327,20                                                                     |                                                    | 70.069,89                                                                |

**Tabela 25:** Cálculo da estimativa da quantidade de resíduos depositados no aterro de Rio Claro – SP nos anos de 2016 até o ano de seu encerramento, 2021.

#### 4.2.3 Ajuste do modelo de Scholl Canyon

Para aplicar o modelo de Scholl Canyon, foi necessário encontrar valores de  $L_0$  e  $k$ . Para isso, foi aplicado o método de múltiplas iterações para os parâmetros até que o valor da vazão anual total de metano encontrado pelo modelo seja o mais próximo dos valores alcançados pelas medidas de campo nos anos de 2012, 2013 e 2014.

Rio Claro apresenta uma precipitação anual média de 1366,8 mm, dessa forma o Banco Mundial (2004) sugere que em regiões com precipitações anuais maiores que 1000mm o valor de  $k$  varie de 0,02 para resíduos relativamente inertes, 0,06 para resíduos moderadamente degradáveis e 0,09 para resíduos altamente degradáveis. Já o valor de  $L_0$  deve variar de entre 5 e 25  $m^3_{CH_4}/t_{RSU}$  para resíduos relativamente inertes, 140 e 200  $m^3_{CH_4}/t_{RSU}$  para resíduos moderadamente degradáveis e 225 a 300  $m^3_{CH_4}/t_{RSU}$  para resíduos altamente degradáveis.

Como o resíduo do aterro de Rio Claro apresenta uma parcela significativa de matéria orgânica, acima de 50%, ele pode ser considerado entre moderadamente degradável e altamente degradável. Assim sendo os valores de  $k$  e  $L_0$  variaram entre as faixas de 0,06 e 0,09 e 140 e 300  $m^3_{CH_4}/t_{RSU}$  para cada variável respectivamente.

Para as múltiplas iterações, foi utilizado a ferramenta disponível pelo programa Microsoft Excel, o *Solver*.

A eficiência do sistema de coleta de biogás do aterro de Rio Claro foi utilizada em 75% (CETESB, 2006; BANCO MUNDIAL, 2004).

#### 4.2.4 Ajuste do modelo do IPCC

Assim como o método de Scholl Canyon, para aplicar o modelo do IPCC foi necessário encontrar os valores de  $L_0$  e  $k$ . O  $L_0$  foi calculado a partir da Equação 4. O carbono orgânico degradável (COD) foi calculado a partir da Equação 5 e a composição

gravimétrica do resíduo do aterro de Rio Claro apresentado pelo estudo de Sepladema (2014) (Tabela 16), e a fração de carbono orgânico degradável dissociada (COD<sub>f</sub>) foi calculada a partir da Equação 6.

O fator de correlação de metano ( $F_{CH_4}$ ) foi adotado em 1, como recomendado pelo IPCC (2006b) para aterros sanitários. A fração em volume de metano no biogás foi considerada em 50%, como recomendado pelo IPCC (2006b).

O cálculo do  $k$  foi realizado a partir de processo iterativo, com o conhecimento das demais variáveis e a adoção de diversos valores de  $k$  até que o resultado da vazão anual de metano calculado pelo modelo nos anos de 2012, 2013 e 2014 se aproxima-se ao máximo dos valores obtidos em campo para a geração de metano no aterro de Rio Claro nos anos do estudo. Os valores de  $k$  foram variados conforme os valores sugeridos pelo IPCC (2006b), dessa forma, foram variados entre 0,15 a 0,7/ano. As múltiplas iterações foram realizadas pelo programa Microsoft Excel, pela ferramenta *Solver*.

A parcela considerada como emissão fugitiva foi a mesma utilizada na aplicação do modelo Scholl Canyon, 75% (CETESB, 2006; BANCO MUNDIAL, 2004).

### 4.3 Método para análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás

#### 4.3.1 Energia gerada pelo biogás do aterro de Rio Claro – SP

Como a parcela do biogás com poder calorífico significativo é o metano ( $CH_4$ ), para o cálculo da energia gerada pelo biogás do aterro sanitário de Rio Claro foi considerado a vazão anual de metano estimado pelos modelos de Scholl Canyon, e do IPCC nos anos entre 2011 e 2030.

O cálculo da potência disponível por ano foi realizado a partir da Equação 8 (BARROS et. al, 2013; FIGUEIREDO, 2011; MENDES, 2005).

$$P_x = \frac{Q_x \cdot P_{c(\text{metano})} \cdot \eta}{31.536.000} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:  $P_x$ : Potência disponível por ano (kW).

$Q_x$ : Vazão de metano por ano ( $m^3CH_4$ /ano).

$P_{c(\text{metano})}$ : Poder calorífico do metano (35.530 kJ/ $m^3CH_4$ ).

$\eta$ : Eficiência do grupo motor gerador (%).

31.536.000: segundo em por ano (s/ano).

Após o cálculo da potência disponível no ano, o valor encontrado é multiplicado pelas tempo de funcionamento do grupo motor gerador em horas por ano, e dessa forma é encontrado a quantidade de kWh produzidos anualmente.

A quantidade de metano destinada para o grupo motor gerador é definido a partir da quantidade de energia que visa ser produzida, e a capacidade de geração do grupo motor gerador.

#### *4.3.2 Método para a venda da energia gerada*

No presente projeto foi definido que a energia elétrica gerada será comercializada nos leilões de fonte alternativa de energia elétrica, visto que a geração é suficiente para tornar o aterro autossuficiente, e ainda gera um excedente de energia elétrica para ser comercializado.

#### *4.3.3 Análise econômica do aproveitamento energético do biogás gerado*

Para realizar a análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro foram considerados o custos para a instalação da usina, e o lucro obtido pela venda de energia elétrica estimada pela aplicação do modelo de Scholl Canyon e do modelo do IPCC. A partir das despesas e do lucro, a análise econômica foi realizada utilizando o método do Valor Presente Líquido (VPL), que é calculado pela Equação 9.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + r)^t} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: *VPL*: Valor Presente Líquido (R\$).

*I*: Investimento inicial (R\$).

*FC*: Fluxo de caixa no período *t* (R\$).

*n*: Número de períodos *t* (ano).

*i*: Custo do capital ou taxa de juros (%).

O projeto é considerado viável financeiramente quando o VPL é positivo, e inviável financeiramente quando o VPL é negativo. Quanto maior o VPL, maior é a rentabilidade do projeto e maior é o retorno do investimento.

A taxa de juros utilizada no VPL foi a taxa do Sistema Especial de Liquidações e de Custódia – Selic, que é também conhecida como a taxa básica de juros da economia brasileira e serve de referência para a economia do Brasil.

Para o cálculo dos custos do projeto, foram utilizados valores de projetos encontrados no estudo de caso para o Centro de Tratamento de Resíduo (CTR) São Mateus - ES (ABRELPE, 2013), e os cenários de venda foram obtidos a partir de dados atuais.

Os custos apresentado pelo estudo de caso do CTR São Mateus – ES (ABRELPE, 2013) são dados em dólar, dessa forma, para o presente estudo estes valores foram convertidos para real a partir da cotação do dólar em dezembro 2013 (ano do estudo no CTR São Mateus), que foi de R\$2,345 (ACRSP, 2016). Posteriormente a conversão, para a atualização dos valores de 2013 para 2015, foi aplicado o Índice Geral de Preços do Mercado (IGPM) (ADVFN, 2016), que foi de 3,67% em 2014 e 10,54% em 2015.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análise dos dados de 2012, 2013 e 2014**

A vazão de biogás e metano para os drenos sem registro de medidas de campo foram calculadas a partir do fator de correlação. Em 2013 o fator de correlação para o biogás foi calculado em 0,9003 e o fator de correlação para o metano foi calculado em 0,9653. Estes valores indicam que a produção individual de cada dreno no ano de 2013 foi menor que a produção individual dos drenos em 2014. Entre os fatores que contribuíram para este comportamento foi o início da operação de uma nova célula, em que estão localizados os drenos de números 31 ao 37, e neste início a produção de biogás e de metano são menores. O fator de correlação menor que um e o número menor de drenos resultou em uma produção anual dos gases no ano de 2013 menor que a produção anual em 2014.

Para o ano de 2012, o fator de correlação foi calculado em 1,1538 para o biogás e 1,2111 para o metano. Estes valores indicam que a produção individual de gases nos drenos em 2012 foi maior que a produção individual dos drenos em 2014, isso se deve principalmente pelo envelhecimento do resíduo, o que ocasiona em uma menor geração de biogás. Apesar do fator de correlação de produção de biogás e metano para os drenos aumentar a produção individual dos drenos, como em 2012 havia uma quantidade menor de drenos, a produção total no aterro de biogás e de metano é menor em 2012 em relação a 2013 e 2014.

A Tabela 26 apresenta as vazões de biogás obtidas em campo dos drenos do aterro de Rio Claro nos anos de 2012, 2013 e 2014, e as respectivas gerações totais anuais.

| Dreno                                             | 2012                                |                                       | 2013                                |                                       | 2014                                |                                       |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                   | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /ano) | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /ano) | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão biogás<br>(m <sup>3</sup> /ano) |
| 1                                                 | 13,8                                | 120650,3                              | 12,5                                | 109660,8                              | 18,3                                | 160027,7                              |
| 2                                                 | 26,2 *                              | 229091,8                              | 5,5 *                               | 48597,4                               | 6,2                                 | 53979,1                               |
| 3                                                 | 5,5                                 | 48223,7                               | 2,2                                 | 19074,5                               | 1,4                                 | 12439,2                               |
| 4                                                 | 22,7 *                              | 198554,2                              | 23,5                                | 205969,5                              | 22,7                                | 198554,2                              |
| 5                                                 | 18,4                                | 160968,2                              | 22,3                                | 195724,8                              | 19,3                                | 169292,7                              |
| 5A                                                | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 25,1                                | 220051,2                              |
| 7                                                 | 10,7                                | 93794,3                               | 8,9                                 | 77659,1                               | 7,1                                 | 62184,1                               |
| 8                                                 | 9,8                                 | 85783,1                               | 8,0                                 | 69979,9                               | 16,8                                | 147566,1                              |
| 8A                                                | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 16,4                                | 143839,2                              |
| 9                                                 | 26,4 *                              | 231558,0                              | 20,6 *                              | 180682,6                              | 22,9                                | 200691,6                              |
| 9A                                                | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 24,6                                | 215093,0                              |
| 10                                                | 14,6 *                              | 127978,5                              | 11,4 *                              | 99860,5                               | 12,7                                | 110919,1                              |
| 10A                                               | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 17,8                                | 155525,0                              |
| 11                                                | 22,7                                | 198721,2                              | 14,4                                | 126463,7                              | 15,4                                | 135201,8                              |
| 12                                                | 37,0 *                              | 324221,6                              | 28,9 *                              | 252987,3                              | 32,1                                | 281003,3                              |
| 13                                                | 71,3 *                              | 624549,5                              | 55,6 *                              | 487330,5                              | 61,8                                | 541297,9                              |
| 14                                                | 47,6 *                              | 417355,2                              | 37,2 *                              | 325658,6                              | 41,3                                | 361722,3                              |
| 15                                                | 49,9 *                              | 437180,6                              | 38,9 *                              | 341128,2                              | 43,3                                | 378905,0                              |
| 16                                                | 65,4 *                              | 572739,6                              | 31,9                                | 279631,6                              | 56,7                                | 496394,2                              |
| 17                                                | 36,9 *                              | 322948,1                              | 28,8 *                              | 251993,5                              | 32,0                                | 279899,5                              |
| 17A                                               | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 55,4                                | 485058,7                              |
| 18                                                | 41,9 *                              | 366732,8                              | 32,7 *                              | 286158,4                              | 36,3                                | 317847,8                              |
| 19                                                | 48,6                                | 426080,1                              | 47,1                                | 412441,9                              | 37,6                                | 329435,7                              |
| 20                                                | 83,9 *                              | 735042,4                              | 65,5 *                              | 573547,1                              | 72,7                                | 637062,2                              |
| 21                                                | 36,1 *                              | 316054,9                              | 28,2 *                              | 246614,9                              | 31,3                                | 273925,2                              |
| 22                                                | 27,6 *                              | 241544,0                              | 21,5 *                              | 188474,6                              | 23,9                                | 209346,5                              |
| 22A                                               | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 27,0                                | 236607,6                              |
| 23                                                | 18,5 *                              | 161817,7                              | 14,4 *                              | 126264,9                              | 16,0                                | 140247,6                              |
| 24                                                | 28,8 *                              | 252540,7                              | 22,5 *                              | 197055,3                              | 25,0                                | 218877,4                              |
| 25                                                | 34,1 *                              | 299153,8                              | 34,5                                | 301881,8                              | 29,6                                | 259277,0                              |
| 26                                                | 54,9 *                              | 480794,9                              | 48,5                                | 425018,6                              | 47,6                                | 416705,6                              |
| 27                                                | 41,5 *                              | 363211,8                              | 32,4 *                              | 283410,9                              | 35,9                                | 314796,1                              |
| 28                                                | 42,4                                | 371314,7                              | 35,2                                | 308454,4                              | 28,3                                | 247624,4                              |
| 29                                                | 16,9                                | 148102,7                              | 22,3                                | 195461,2                              | 19,2                                | 168374,5                              |
| 31                                                | x                                   | x                                     | 25,4                                | 222266,0                              | 33,7                                | 294881,8                              |
| 32                                                | x                                   | x                                     | 26,4                                | 231681,9                              | 42,1                                | 368712,4                              |
| 33                                                | x                                   | x                                     | 50,9 *                              | 445619,4                              | 56,5                                | 494967,7                              |
| 34                                                | x                                   | x                                     | 19,0 *                              | 166076,6                              | 21,1                                | 184468,1                              |
| 35                                                | x                                   | x                                     | 22,7 *                              | 198948,1                              | 25,2                                | 220979,8                              |
| 36                                                | x                                   | x                                     | 52,4 *                              | 458891,3                              | 58,2                                | 509709,4                              |
| 37                                                | x                                   | x                                     | 37,8 *                              | 331112,2                              | 42,0                                | 367779,8                              |
| <b>Geração total anual (m<sup>3</sup> biogás)</b> | <b>8.356.708,33</b>                 |                                       | <b>8.671.782,20</b>                 |                                       | <b>11.021.271,52</b>                |                                       |

\* Valores estimados a partir do fator de correlação

x : dreno inexistente no ano do estudo

**Tabela 26:** Vazões de biogás obtidas em campo dos drenos do aterro municipal de Rio Claro – SP, nos anos de 2012, 2013 e 2014, e as respectivas gerações anuais de biogás.

A Tabela 27 apresenta as vazões de metano nos drenos do aterro de Rio Claro nos anos de 2012, 2013 e 2014, e as respectivas gerações totais anuais.

| Dreno                                                 | 2012                                |                                       | 2013                                |                                       | 2014                                |                                       |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                       | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /ano) | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /ano) | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /h) | Vazão metano<br>(m <sup>3</sup> /ano) |
| 1                                                     | 7,5                                 | 65917,2                               | 7,2                                 | 62709,1                               | 10,4                                | 91471,8                               |
| 2                                                     | 3,4 *                               | 30006,7                               | 2,8 *                               | 24776,4                               | 2,8                                 | 24776,4                               |
| 3                                                     | 2,9                                 | 25576,1                               | 1,2                                 | 10259,1                               | 0,6                                 | 5319,0                                |
| 4                                                     | 6,0 *                               | 52374,1                               | 13,5                                | 118258,2                              | 4,9                                 | 43245,1                               |
| 5                                                     | 10,0                                | 88005,6                               | 12,9                                | 112948,3                              | 10,4                                | 91131,0                               |
| 5A                                                    | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 0,2                                 | 1980,5                                |
| 7                                                     | 5,2                                 | 45500,0                               | 4,3                                 | 37524,3                               | 2,1                                 | 18197,3                               |
| 8                                                     | 3,9                                 | 33740,1                               | 3,6                                 | 31449,0                               | 2,0                                 | 17245,1                               |
| 8A                                                    | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 9,0                                 | 78941,6                               |
| 9                                                     | 16,1 *                              | 140876,2                              | 13,3 *                              | 116320,9                              | 13,3                                | 116320,9                              |
| 9A                                                    | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 4,0                                 | 35275,3                               |
| 10                                                    | 7,5 *                               | 65608,8                               | 6,2 *                               | 54172,9                               | 6,2                                 | 54172,9                               |
| 10A                                                   | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 1,9                                 | 16983,3                               |
| 11                                                    | 12,2                                | 107019,2                              | 8,0                                 | 70450,0                               | 8,8                                 | 76767,6                               |
| 12                                                    | 22,2 *                              | 194528,7                              | 18,3 *                              | 160621,5                              | 18,3                                | 160621,5                              |
| 13                                                    | 41,7 *                              | 365150,2                              | 34,4 *                              | 301502,9                              | 34,4                                | 301502,9                              |
| 14                                                    | 25,7 *                              | 225174,1                              | 21,2 *                              | 185925,3                              | 21,2                                | 185925,3                              |
| 15                                                    | 28,5 *                              | 249361,9                              | 23,5 *                              | 205897,0                              | 23,5                                | 205897,0                              |
| 16                                                    | 38,2                                | 334618,4                              | 13,2                                | 115616,9                              | 31,5                                | 276293,0                              |
| 17                                                    | 19,8 *                              | 173696,6                              | 16,4 *                              | 143420,5                              | 16,4                                | 143420,5                              |
| 17A                                                   | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 27,0                                | 236417,6                              |
| 18                                                    | 24,9 *                              | 217725,2                              | 20,5 *                              | 179774,7                              | 20,5                                | 179774,7                              |
| 19                                                    | 25,8                                | 226140,3                              | 26,7                                | 233600,7                              | 21,5                                | 188437,2                              |
| 20                                                    | 50,9 *                              | 445799,3                              | 42,0 *                              | 368094,6                              | 42,0                                | 368094,6                              |
| 21                                                    | 21,5 *                              | 189098,0                              | 17,8 *                              | 156137,4                              | 17,8                                | 156137,4                              |
| 22                                                    | 6,5 *                               | 57147,8                               | 5,4 *                               | 47186,7                               | 5,4                                 | 47186,7                               |
| 22A                                                   | x                                   | x                                     | x                                   | x                                     | 11,7                                | 102924,3                              |
| 23                                                    | 4,1 *                               | 35941,1                               | 3,4 *                               | 29676,4                               | 3,4                                 | 29676,4                               |
| 24                                                    | 15,3 *                              | 133919,6                              | 12,6 *                              | 110576,8                              | 12,6                                | 110576,8                              |
| 25                                                    | 19,9 *                              | 173893,5                              | 19,4                                | 170012,0                              | 16,4                                | 143583,1                              |
| 26                                                    | 31,8 *                              | 278622,9                              | 26,4                                | 230933,0                              | 26,3                                | 230057,7                              |
| 27                                                    | 24,7 *                              | 216716,6                              | 20,4 *                              | 178941,9                              | 20,4                                | 178941,9                              |
| 28                                                    | 21,7                                | 189806,4                              | 19,5                                | 171068,8                              | 14,8                                | 129601,9                              |
| 29                                                    | 8,6                                 | 75263,3                               | 12,1                                | 105849,8                              | 10,0                                | 87512,6                               |
| 31                                                    | x                                   | x                                     | 9,8                                 | 85532,0                               | 14,2                                | 124524,4                              |
| 32                                                    | x                                   | x                                     | 9,6                                 | 84532,3                               | 20,1                                | 176311,6                              |
| 33                                                    | x                                   | x                                     | 30,4 *                              | 266422,9                              | 30,4                                | 266422,9                              |
| 34                                                    | x                                   | x                                     | 5,2 *                               | 45637,4                               | 5,2                                 | 45637,4                               |
| 35                                                    | x                                   | x                                     | 13,8 *                              | 121052,7                              | 13,8                                | 121052,7                              |
| 36                                                    | x                                   | x                                     | 32,7 *                              | 286660,5                              | 32,7                                | 286660,5                              |
| 37                                                    | x                                   | x                                     | 18,5 *                              | 162190,9                              | 18,5                                | 162190,9                              |
| <b>Geração total anual<br/>(m<sup>3</sup> metano)</b> | <b>4.437.227,68</b>                 |                                       | <b>4.785.733,72</b>                 |                                       | <b>5.317.211,30</b>                 |                                       |

\* Valores estimados a partir do fator de correlação

x : dreno inexistente no ano do estudo

**Tabela 27:** Vazões de metano obtidas em campo dos drenos do aterro municipal de Rio Claro – SP, nos anos de 2012, 2013 e 2014, e as respectivas gerações anuais de metano.

Conforme apresentado nas Tabelas 26 e 27, para o estudo realizado entre os anos de 2012 a 2014 a geração total de biogás e metano no aterro de Rio Claro foi maior em 2014 e menor em 2012. Entre os fatores que contribuíram para este comportamento,

temos a maior quantidade de resíduo acumulado e o maior número de drenos no aterro em 2014 do que nos anos de 2012 e 2013.

## 5.2 Aplicação o modelo de Scholl Canyon

A partir dos processos iterativos do Solver, os valores dos parâmetros do modelo de Scholl Canyon que melhor o ajustou aos valores obtidos em campo em 2012, 2013 e 2014 são apresentados na Tabela 28 a seguir.

| <i>MODELO DE SCHOLL CANYON</i>            |                                                        |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Parâmetro</b>                          | <b>Valor</b>                                           |
| k                                         | 0,076/ano                                              |
| $L_0$                                     | $201 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{t}_{\text{RSU}}$  |
| Eficiência do sistema de coleta de biogás | 75%                                                    |
| Fluxo de resíduos                         | Calculados e apresentados no item 4.2.2 da metodologia |

**Tabela 28:** Valores adotados para a constante de decaimento (k) e o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) na aplicação do modelo de Scholl Canyon que melhor o ajustou aos dados obtidos em campo nos anos de 2012 a 2014, no aterro de Rio Claro – SP.

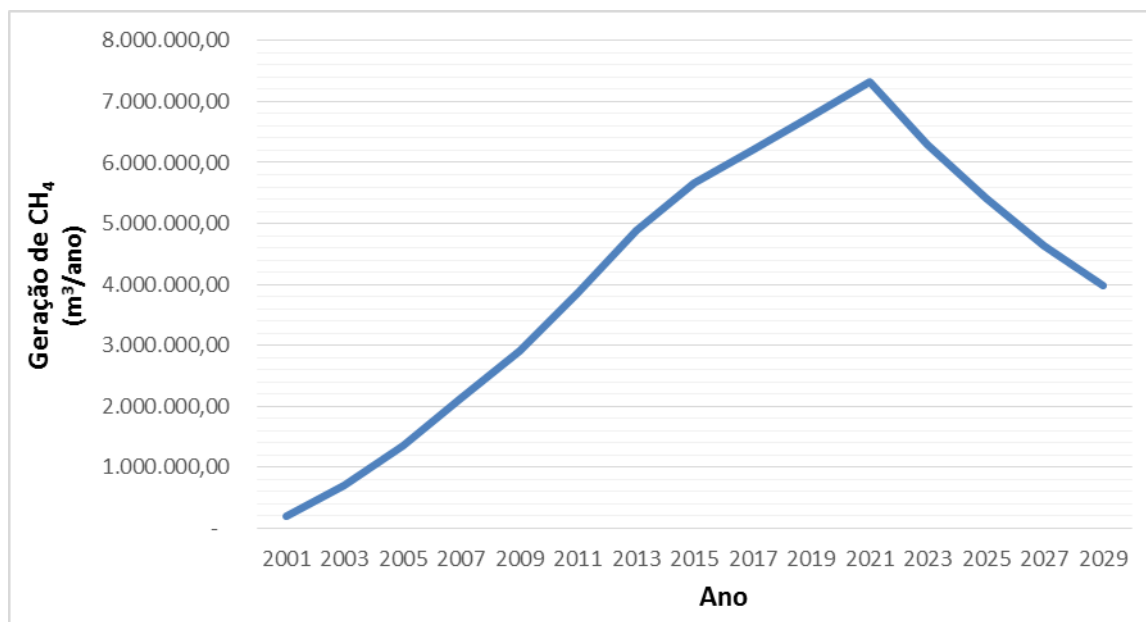
A Tabela 29 e a Figura 13 apresentam a geração de metano estimado pelo modelo de Scholl Canyon nos anos compreendidos entre 2001 (ano de início de operação do aterro) e 2030 (nove anos após o encerramento da vida útil do aterro).

**GERAÇÃO DE METANO NO ATERRO DE RIO CLARO SEGUNDO O MODELO DE SCHOOL CANYON**

$$k = 0,076 / L_0 = 201 / \text{Eficiência} = 75\%$$

| Ano  | Quantidade de resíduos disposto no ano (t) | Geração de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> ) | Ano  | Quantidade de resíduos disposto no ano (t) | Geração de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> ) |
|------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2001 | 17.000,00                                  | 194.769,00                                   | 2016 | 59.210,75                                  | 5.932.392,63                                 |
| 2002 | 22.000,00                                  | 432.569,07                                   | 2017 | 61.314,33                                  | 6.200.715,91                                 |
| 2003 | 26.050,00                                  | 699.366,87                                   | 2018 | 63.452,40                                  | 6.473.898,15                                 |
| 2004 | 31.900,00                                  | 1.013.662,85                                 | 2019 | 65.623,14                                  | 6.751.958,04                                 |
| 2005 | 36.000,00                                  | 1.351.931,16                                 | 2020 | 67.830,18                                  | 7.034.954,51                                 |
| 2006 | 42.120,00                                  | 1.735.560,55                                 | 2021 | 70.069,89                                  | 7.322.900,58                                 |
| 2007 | 45.698,00                                  | 2.132.107,63                                 | 2022 | -                                          | 6.786.982,93                                 |
| 2008 | 47.128,00                                  | 2.516.017,40                                 | 2023 | -                                          | 6.290.285,78                                 |
| 2009 | 49.560,00                                  | 2.899.694,62                                 | 2024 | -                                          | 5.829.938,80                                 |
| 2010 | 56.264,00                                  | 3.332.100,62                                 | 2025 | -                                          | 5.403.281,77                                 |
| 2011 | 67.024,00                                  | 3.856.138,82                                 | 2026 | -                                          | 5.007.849,11                                 |
| 2012 | 71.263,00                                  | 4.390.392,15                                 | 2027 | -                                          | 4.641.355,71                                 |
| 2013 | 71.678,00                                  | 4.890.301,44                                 | 2028 | -                                          | 4.301.683,70                                 |
| 2014 | 68.968,00                                  | 5.322.577,01                                 | 2029 | -                                          | 3.986.870,17                                 |
| 2015 | 64.225,80                                  | 5.668.885,62                                 | 2030 | -                                          | 3.695.095,88                                 |

**Tabela 29:** Geração de metano estimado pelo modelo de Scholl Canyon para o aterro municipal de Rio Claro – SP, para os anos de 2001 a 2030.



**Figura 13:** Curva de geração de gás metano para o aterro municipal de Rio Claro – SP a partir dos valores estimados pelo modelo de Scholl Canyon.

A Tabela 30 compara os valores obtidos a partir das expedições a campo no ano de 2012, 2013 e 2014 com os valores gerados pelo modelo de Scholl Canyon.

| <b>GERAÇÃO ESTIMADA NO MODELO SCHOLL CANYON (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)</b> |              |             |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------|
| <i>2012</i>                                                                   | <i>2013</i>  | <i>2014</i> |
| 4.390.392,1                                                                   | 4.890.301,4  | 5.322.577,0 |
| <b>GERAÇÃO OBTIDA EM CAMPO (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)</b>                  |              |             |
| <i>2012</i>                                                                   | <i>2013</i>  | <i>2014</i> |
| 4.437.227,68                                                                  | 4.785.733,72 | 5.317.211,3 |
| <b>MÓDULO DA DIFERENÇA (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)</b>                      |              |             |
| <i>2012</i>                                                                   | <i>2013</i>  | <i>2014</i> |
| 46.835,5                                                                      | 104.567,7    | 5.365,7     |
| <b>DIFERENÇA TOTAL (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)</b>                          |              |             |
| 156.769,0                                                                     |              |             |

**Tabela 30:** Comparativo entre os valores de geração de metano gerados pelo modelo de Scholl Canyon e obtidas em campo nos anos de 2012, 2013 e 2014 para o aterro sanitário de Rio Claro.

A partir da análise comparativa entre a geração estimada pelo modelo e a geração obtida em campo no período de 2012 a 2014, nota-se que os valores se encontram bastante próximos. O erro do modelo em relação ao estimado foi de 0,1 % para 2014, 2,2 % para 2013 e 1% para 2012, sinalizando para um bom ajuste do modelo de Scholl Canyon para o período do estudo.

A Tabela 31 apresenta um comparativo dos valores adotados para  $L_0$  e  $k$  pela presente pesquisa para o modelo de Scholl Canyon com valores adotados por outros autores e a faixa recomendada pelo Banco Mundial (2004).

| <b>AUTOR</b>                                                  | <b>ATERRO</b>                    | <b>k</b><br>(1/ano) | <b>L<sub>0</sub></b><br>(m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t <sub>RSD</sub> ) |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ensinas (2003)                                                | Delta (Campinas/SP)              | 0,0283              | 156,9                                                                       |
| Mendes (2005)                                                 | Experimental (Guaratinguetá/SP)  | 0,05                | 131,4                                                                       |
| Percora et. al. (2009)                                        | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,08                | 99,69                                                                       |
| Fernandes (2009)                                              | Experimental (Belo Horizonte/MG) | 0,0283<br>0,0395    | 84,33                                                                       |
| Alves (2008)                                                  | Muribeca (Pernambuco/RE)         | -                   | 120,52                                                                      |
| Figueiredo (2011)                                             | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,077               | 109,301                                                                     |
| Crovador (2014)                                               | Municipal (Guarapurava/PR)       | 0,4                 | 48,32                                                                       |
| Machado et. al (2009)                                         | Metropolitano (Salvador/BA)      | 0,21                | 66,62                                                                       |
| Santangelo et. al (2009)                                      | Municipal (Timbó/SC)             | 0,075               | 150                                                                         |
| Audibert (2011)                                               | Controlado (Londrina/PR)         | 0,05                | 170<br>85,91                                                                |
| USEPA (1997)                                                  | Bandeirantes (São Paulo/SP)      | 0,125               | 124,91                                                                      |
| <i>Faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial (2004)</i> |                                  | <i>0,02 - 0,09</i>  | <i>5 - 300</i>                                                              |
| <b>Presente pesquisa<br/>Scholl Canyon</b>                    | <b>Municipal (Rio Claro/SP)</b>  | <b>0,076</b>        | <b>201</b>                                                                  |

**Tabela 31:** Comparativo dos valores de L<sub>0</sub> e k adotado na presente pesquisa para o modelo de Scholl Canyon no aterro municipal de Rio Claro – SP, com valores adotados por outros autores e a faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial (2004).

Os valores dos parâmetro de k e L<sub>0</sub> se encontram dentro da faixa de valores recomendada pelo Banco Mundial (2004). Comparando com os valores assumidos por outros autores, o valor de k se encontra bastante próximo dos valores adotados para o aterro municipal de Timbó/SC (SANTANGELO et. al, 2009 e para o aterro Essencis de Caieiras/SP (PERCORA, et. al, 2009; FIGUEIREDO, 2011).

Já o valor de L<sub>0</sub> que melhor se ajustou ao aterro de Rio Claro se encontra acima do adotado em outros estudos, apesar de se encontrar dentro do recomendado pelo Banco Mundial (2004). O Banco Mundial (2004) recomenda a adoção de L<sub>0</sub> em 170 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/t<sub>RSU</sub> para projetos em que não é feito nenhum estudo a respeito do potencial de geração de metano, sendo este valor próximo ao adotado na presente pesquisa.

Assim sendo, o fato do valor encontrado no presente estudo estar dentro dos valores recomendados pelo Banco Mundial (2004) e próximo dos valores utilizados por

outros autores, sugere que os parâmetros adotados no ajuste do modelo de Scholl Canyon para as gerações obtidas em campo em 2012, 2013 e 2014 no aterro de Rio Claro estão alinhados com os valores apresentados na bibliografia.

### 5.3 Aplicação do modelo do IPCC

Para aplicar o modelo do IPCC, assim como o modelo de Scholl Canyon, é necessário conhecer os valores dos parâmetros  $L_0$ ,  $k$  e fluxo de resíduos.

Para calcular o  $L_0$  segundo a metodologia do IPCC (2006b), é necessário saber informações como o fator de correção do metano, fração de carbono orgânico degradável, fração de carbono orgânico degradável dissociada e a fração em volume de metano no biogás. A Tabela 32 apresenta os valores adotados para cada parâmetro, e a metodologia utilizada.

| Parâmetro                                                                                                                               | Valor adotado                                                           | Metodologia                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Fator de correção do metano ( $F_{CH_4}$ )                                                                                              | 1                                                                       | Valor recomendado para aterros sanitário (IPCC, 2006)             |
| Carbono orgânico degradável (COD)                                                                                                       | 0,171405 t <sub>C</sub> /t <sub>RSU</sub>                               | $COD = (40 \cdot A) + (17 \cdot B) + (15 \cdot C) + (30 \cdot D)$ |
| Fração de carbono orgânica degradável dissociada ( $COD_f$ )                                                                            | 76,37%                                                                  | $COD_f = 0,014T + 0,28$                                           |
| Fração em volume de metano no biogás (F)                                                                                                | 50%                                                                     | Valor recomendado (IPCC, 2006)                                    |
| Potencial de geração de metano ( $L_0$ )                                                                                                | 0,0873 kg <sub>CH<sub>4</sub></sub> /kg <sub>RSU</sub>                  | $L_0 = F_{CH_4} \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot 16/12$        |
| Fator de conversão kg <sub>CH<sub>4</sub></sub> /kg <sub>RSU</sub> para m <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /t <sub>RSU</sub> (Fc) | 0,0007168                                                               | Percora et. al (2009)                                             |
| <b>Potencial de geração de metano (<math>L_0</math>)</b>                                                                                | <b>121,74665 m<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/t<sub>RSU</sub></b> | $L_0(m^3_{CH_4}/t_{RSU}) = Fc \cdot L_0(kg_{CH_4}/kg_{RSU})$      |

**Tabela 32:** Valores adotados para o cálculo do potencial de geração de metano ( $L_0$ ) para ao aterro de Rio Claro – SP, por meio da metodologia do IPCC (2006b).

Aplicando os valores apresentados acima no cálculo do potencial de geração do metano para o aterro de Rio Claro, o valor obtido é de 121,75 m<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/t<sub>RSU</sub>. Para o cálculo da fração de carbono orgânica degradável dissociada ( $COD_f$ ), o valor utilizado para a temperatura na zona anaeróbia (T) foi de 34,55 °C, valor obtido no estudo de Franceschi (2013).

A Tabela 33 apresenta os valores adotados para os parâmetros no ajuste do modelo do IPCC para os dados obtidos em campo no período de 2012 a 2014 no aterro de Rio Claro.

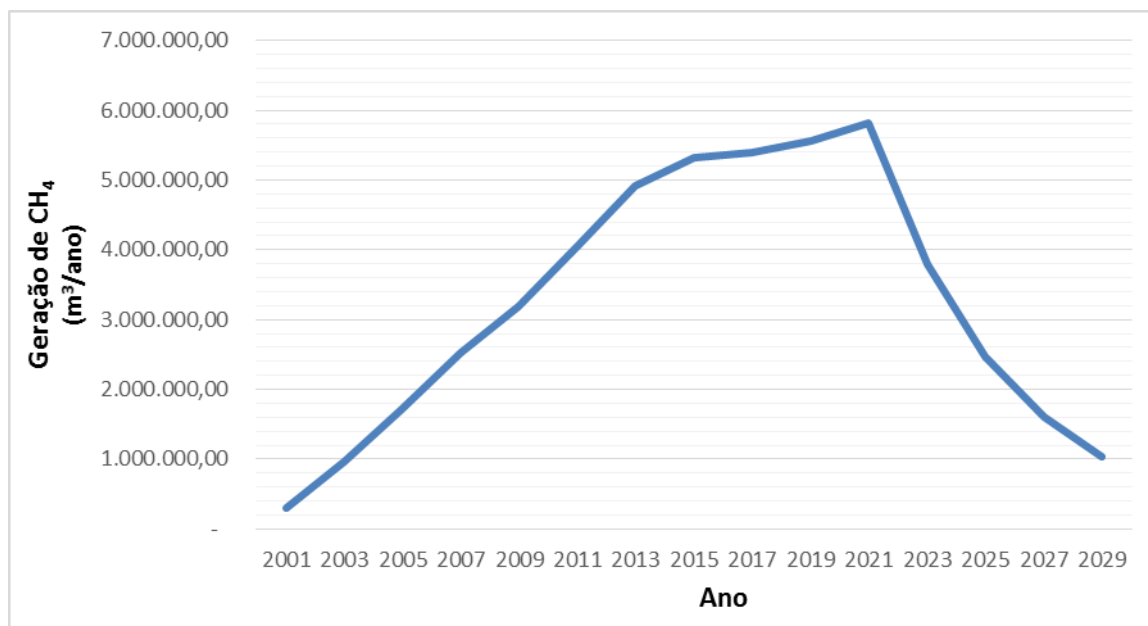
| <i>MODELO DO IPCC</i>                     |                                                          |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Parâmetro                                 | Valor                                                    |
| k                                         | 0,215/ano                                                |
| $L_0$                                     | 121,7467 m <sup>3</sup> <sub>CH4</sub> /t <sub>RSU</sub> |
| Eficiência do sistema de coleta de biogás | 75%                                                      |
| Fluxo de resíduos                         | Calculados e apresentados no item 4.2.2 da metodologia   |

**Tabela 33:** Valores adotados dos parâmetro necessários na aplicação do modelo do IPCC, no aterro de Rio Claro – SP.

A Tabela 34 e a Figura 14 apresentam a geração de metano estimado pelo modelo do IPCC nos anos compreendidos entre 2001 (ano de início de operação do aterro) e 2030 (nove anos após o encerramento da vida útil do aterro).

| <b>GERAÇÃO DE METANO NO ATERRO DE RIO CLARO SEGUNDO O MODELO DO IPCC</b> |                                            |                     |      |                                            |                     |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|------|--------------------------------------------|---------------------|
| <i>k = 0,215 / <math>L_0</math> = 121,7467 / Eficiência = 75%</i>        |                                            |                     |      |                                            |                     |
| Ano                                                                      | Quantidade de resíduos disposto no ano (t) | Geração de CH4 (m3) | Ano  | Quantidade de resíduos disposto no ano (t) | Geração de CH4 (m3) |
| 2001                                                                     | 17.000,00                                  | 300.299,88          | 2016 | 59.210,75                                  | 5.336.531,29        |
| 2002                                                                     | 22.000,00                                  | 630.827,67          | 2017 | 61.314,33                                  | 5.387.232,80        |
| 2003                                                                     | 26.050,00                                  | 968.954,06          | 2018 | 63.452,40                                  | 5.465.894,03        |
| 2004                                                                     | 31.900,00                                  | 1.345.005,49        | 2019 | 65.623,14                                  | 5.567.683,04        |
| 2005                                                                     | 36.000,00                                  | 1.720.731,82        | 2020 | 67.830,18                                  | 5.688.766,79        |
| 2006                                                                     | 42.120,00                                  | 2.131.878,63        | 2021 | 70.069,89                                  | 5.825.989,66        |
| 2007                                                                     | 45.698,00                                  | 2.526.689,86        | 2022 | -                                          | 4.698.902,09        |
| 2008                                                                     | 47.128,00                                  | 2.870.382,00        | 2023 | -                                          | 3.789.859,26        |
| 2009                                                                     | 49.560,00                                  | 3.190.544,50        | 2024 | -                                          | 3.056.678,54        |
| 2010                                                                     | 56.264,00                                  | 3.567.192,97        | 2025 | -                                          | 2.465.337,92        |
| 2011                                                                     | 67.024,00                                  | 4.061.047,72        | 2026 | -                                          | 1.988.397,19        |
| 2012                                                                     | 71.263,00                                  | 4.534.242,71        | 2027 | -                                          | 1.603.724,74        |
| 2013                                                                     | 71.678,00                                  | 4.923.224,92        | 2028 | -                                          | 1.293.470,46        |
| 2014                                                                     | 68.968,00                                  | 5.189.083,86        | 2029 | -                                          | 1.043.237,53        |
| 2015                                                                     | 64.225,80                                  | 5.319.740,58        | 2030 | -                                          | 841.414,30          |

**Tabela 34:** Geração de metano estimado pelo modelo do IPCC para o aterro municipal de Rio Claro – SP, para os anos de 2001 a 2030.



**Figura 13:** Curva de geração de gás metano para o aterro municipal de Rio Claro – SP a partir dos valores estimados pelo modelo do IPCC.

A Tabela 35 compara os valores obtidos a partir das expedições a campo no ano de 2012, 2013 e 2014 com os valores gerados pelo modelo do IPCC.

| GERAÇÃO ESTIMADA NO MODELO DO IPCC (m³CH <sub>4</sub> ) |              |             |
|---------------------------------------------------------|--------------|-------------|
| 2012                                                    | 2013         | 2014        |
| 4.534.242,7                                             | 4.923.224,9  | 5.189.083,9 |
| GERAÇÃO OBTIDA EM CAMPO (m³CH <sub>4</sub> )            |              |             |
| 2012                                                    | 2013         | 2014        |
| 4.437.227,68                                            | 4.785.733,72 | 5.317.211,3 |
| MÓDULO DA DIFERENÇA (m³CH <sub>4</sub> )                |              |             |
| 2012                                                    | 2013         | 2014        |
| 97.015,0                                                | 137.491,2    | 128.127,4   |
| DIFERENÇA TOTAL (m³CH <sub>4</sub> )                    |              |             |
| 362.633,7                                               |              |             |

**Tabela 35:** Comparativo entre os valores de geração de metano gerados pelo modelo Do IPCC e obtidas em campo nos ano de 2012, 2013 e 2014 para o aterro sanitário de Rio Claro.

A partir da análise comparativa entre a geração estimada pelo modelo e a geração obtida em campo, nota-se que os valores se encontram bastante próximos. O erro do modelo em relação ao obtido em campo foi de 2,4% para 2014, 2,9% para 2013 e 2,2%

para 2012, o que sinaliza para um bom ajuste do modelo do IPCC para o período do estudo.

A Tabela 36 apresenta um comparativo dos valores adotados para  $L_0$  e  $k$  pela presente pesquisa para o modelo do IPCC com valores adotados por outros atores e a faixa recomendada pelo IPCC (2006b).

| <b>AUTOR</b>                                         | <b>ATERRO</b>                    | <b><math>k</math></b><br>(1/ano) | <b><math>L_0</math></b><br>( $m^3CH_4/t_{RSD}$ ) |
|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Ensinas (2003)                                       | Delta (Campinas/SP)              | 0,0283                           | 156,9                                            |
| Mendes (2005)                                        | Experimental (Guaratinguetá/SP)  | 0,05                             | 131,4                                            |
| Percora et. al. (2009)                               | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,08                             | 99,69                                            |
| Fernandes (2009)                                     | Experimental (Belo Horizonte/MG) | 0,0283<br>0,0395                 | 84,33                                            |
| Alves (2008)                                         | Muribeca (Pernambuco/RE)         | -                                | 120,52                                           |
| Figueiredo (2011)                                    | Essencis (Caieiras/SP)           | 0,077                            | 109,301                                          |
| Crovador (2014)                                      | Municipal (Guarapurava/PR)       | 0,4                              | 48,32                                            |
| Machado et. al (2009)                                | Metropolitano (Salvador/BA)      | 0,21                             | 66,62                                            |
| Santangelo et. al (2009)                             | Municipal (Timbó/SC)             | 0,075                            | 150                                              |
| Audibert (2011)                                      | Controlado (Londrina/PR)         | 0,05                             | 170<br>85,91                                     |
| USEPA (1997)                                         | Bandeirantes (São Paulo/SP)      | 0,125                            | 124,91                                           |
| <i>Faixa de valores recomendada pelo IPCC (2006)</i> |                                  | <i>0,035 - 0,4</i>               | -                                                |
| <b>Presente pesquisa<br/>IPCC</b>                    | <b>Municipal (Rio Claro/SP)</b>  | <b>0,215</b>                     | <b>121,7467</b>                                  |

**Tabela 36:** Comparativo dos valores de  $L_0$  e  $k$  adotado na presente pesquisa para o modelo do IPCC no aterro municipal de Rio Claro – SP, com valores adotados por outros atores e a faixa de valores recomendada pelo IPCC (2006b).

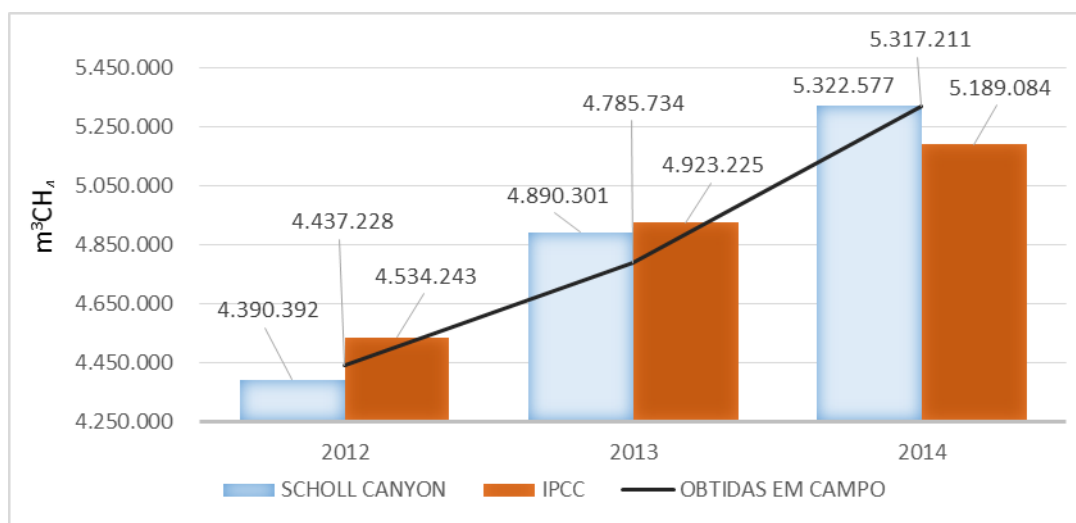
O valor adotado para a constante de decaimento ( $k$ ) se encontra dentro da faixa de valores que o IPCC sugere para a aplicação do modelo. Visto que o IPCC (2006b) recomenda a adoção de  $k$  em 0,4/ano para restos de alimentos, e que o resíduo destinado ao aterro de Rio Claro contém uma parcela de 51% deste tipo de resíduo, o valor de  $k$  adotado para o aterro de Rio Claro deve se encontrar próximo a faixa de 0,2/ano, e isso ocorreu, uma vez que o valor encontrado para  $k$  foi de 0,215/ano.

Comparando os valores de  $k$  e  $L_0$  adotados na aplicação da metodologia do IPCC com os valores adotados por outros estudos, tem-se que o valor estimado para o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) se encontra próximo aos estudo de Mendes (2005), Alves (2008), Figueiredo (2011) e pela USEPA (1997). Em relação a constante de decaimento ( $k$ ), o valor adotado pelo presente de estudo se encontra bastante próximo ao adotado para o aterro metropolitano de Salvador/BA (MACHADO et. al, 2009).

Assim sendo, os valores dos parâmetros adotados na presente para o ajuste do modelo do IPCC para as gerações obtidas em campo em 2012, 2013 e 2014 no aterro de Rio Claro estão alinhados com os valores apresentados na bibliografia e com os valores recomendados pelo IPCC (2006b).

#### 5.4 Comparação dos ajustes dos modelos no período de 2012 a 2014 com os dados de campo

A Figura 15 apresenta o comparativo entre os valores de geração de metano obtidos em campo nos anos de 2012, 2013 e 2014, e os valores gerados pelos modelos matemáticos de Scholl Canyon e do IPCC no mesmo período.



**Figura 15:** Gráfico comparativo entre a geração de metano obtida com dados de campo, com os valores gerados pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC, para o aterro sanitário de Rio claro nos anos de 2012 a 2014.

Conforme o gráfico apresentado, os dos valores obtidos em campo no período do estudo está próximo dos valores gerados pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC. A Tabela 37 apresenta os erros relativos do modelo de Scholl Canyon e do IPCC em relação a geração obtida com dados de campo no aterro sanitário de Rio Claro, nos anos de 2012, 2013 e 2014.

| Ano  | Diferença entre a geração de metano estimada pelo modelo de Scholl Canyon e a geração obtida em campo | Diferença entre a geração de metano estimada pelo modelo do IPCC e a geração obtida em campo |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2012 | 1,00%                                                                                                 | 2,20%                                                                                        |
| 2013 | 2,20%                                                                                                 | 2,90%                                                                                        |
| 2014 | 0,10%                                                                                                 | 2,40%                                                                                        |

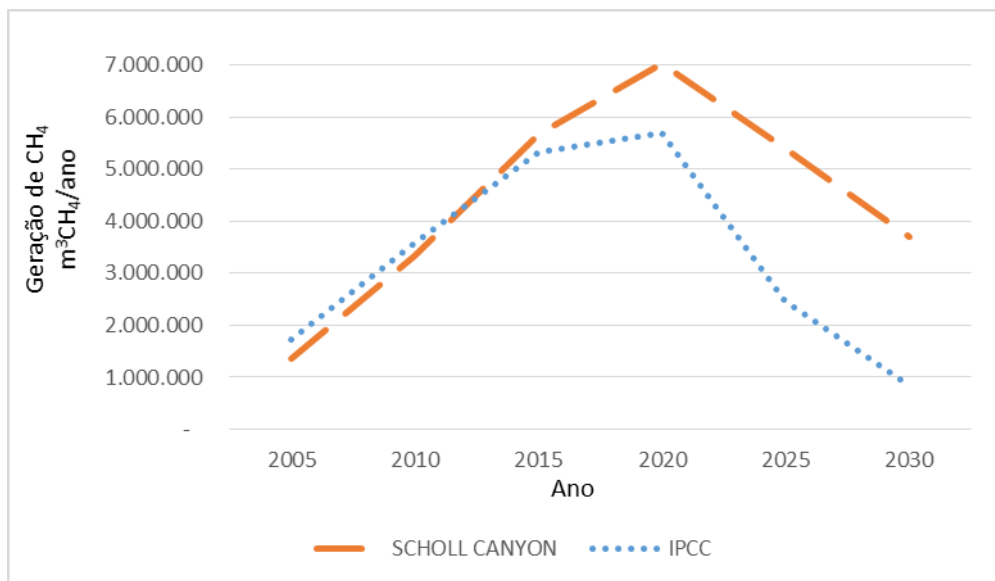
**Tabela 37:** Diferença entre os valores de geração de metano estimado pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC, com os valores de geração obtidos com dados de campo no período de 2012 a 2014 no aterro municipal de Rio Claro – SP.

Conforme os dados apresentado na tabela anterior, nota-se uma proximidade das vazões de metano estimadas pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC com as obtidas em campo no período de 2012 a 2014, o que sinaliza para um bom ajuste. Entretanto, a proximidade de valores estimados pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC não se mantém nos anos seguintes a 2014, gerando diferenças significativas nos valores estimados de geração de metano entre o modelo de Scholl Canyon e do IPCC com o passar dos anos.

Não é possível afirmar qual dos dois modelos melhor se ajustou aos dados de geração de metano obtidos em campo no período de 2012 a 2014 devido à proximidade de valores estimados pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC. Para que seja possível uma afirmação a respeito do modelo que melhor se ajusta as condições do aterro de Rio Claro, deve-se dar continuidade as expedições a campo a fim de aumentar o período da análise.

#### **5.4 Comparação das estimativas de geração de metano dos modelos de Scholl Canyon e do IPCC**

A Figura 16 apresentada a seguir compara os valores de geração de metano estimados pela aplicação dos modelos de Scholl Canyon e do IPCC.



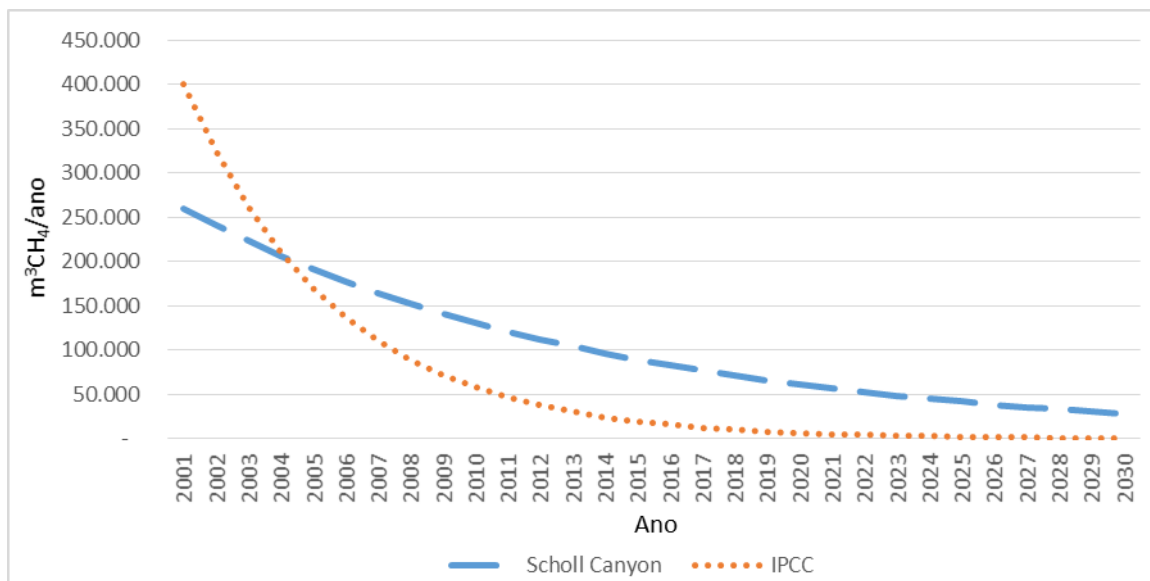
**Figura 16:** Gráfico comparativo entre as estimativas de geração de metano do modelo de Scholl Canyon e do modelo do IPCC para o aterro municipal de Rio Claro – SP.

A partir do gráfico, observa-se que tanto o modelo de Scholl Canyon quanto o modelo do IPCC estimam o pico geração de metano em 2021 (ano de encerramento da vida útil do aterro de Rio Claro). Entretanto o valor estimado máximo é bastante diferente quando comparados entre si, enquanto que o modelo de Scholl Canyon estima uma produção de 7.322.900,6 m³CH₄, o modelo do IPCC estima uma produção de 5.825.989,7 m³CH₄.

Apesar dos parâmetros  $k$  e  $L_0$  terem a mesma função nos dois modelos, os valores adotados são bastante diferentes. Enquanto que no modelo de Scholl Canyon o valor estimado para o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) foi de 201 m³CH₄/t<sub>RSU</sub>, o valor estimado no modelo do IPCC foi de 121,7 m³CH₄/t<sub>RSU</sub>.

Todavia a maior diferença está no valor adotado pela constante de decaimento ( $k$ ), enquanto que para o modelo de Scholl Canyon foi adotado o valor de 0,076/ano, para o modelo do IPCC foi adotado o valor de 0,215/ano. Esta diferença já era prevista, uma vez que a faixa de valores de  $k$  para o modelo de Scholl Canyon é recomendado em 0,01 a 0,09/ano (BANCO MUNDIAL, 2004), e para o modelo do IPCC é recomendado valores entre 0,04 e 0,4/ano (IPCC, 2006b).

A Figura 17 apresenta o comportamento da curva de geração metano que a massa de resíduo disposta em 2001 têm para os modelos de Scholl Canyon e do IPCC, com os parâmetros adotados na presente pesquisa.



**Figura 17:** Comportamento da curva de geração de metano para a massa de resíduo disposta em 2001, para os modelos de Scholl Canyon e do IPCC, com os parâmetros adotados para o aterro de Rio Claro.

Os diferentes comportamentos para a mesma massa de resíduo explica a diferença da previsão de geração de metano para os modelos de Scholl Canyon e do IPCC. O modelo de Scholl Canyon estima uma produção com um pico de geração menor, porém com um decaimento mais lento, já o modelo do IPCC estima um pico de geração maior, com um rápido decaimento.

Dessa forma, o pico de geração previsto pelo modelo do IPCC é menor uma vez que, segundo o modelo, os resíduos mais antigos estão produzindo poucas quantidades de biogás, enquanto que para o modelo de Scholl Canyon, o processo de decomposição dos resíduos é mais lento, assim sendo produzem quantidades significativas de biogás por um período maior de tempo. Isso resulta em um pico de geração maior para o modelo de Scholl Canyon pois em 2021 há a produção de biogás de uma quantidade maior de resíduos.

## 5.5 Análise econômica

### 5.8.1 Definição do potencial instalado no aterro de Rio Claro

A Tabela 38 apresenta o potencial de energia elétrica a cada ano para os modelos de Scholl Canyon e do IPCC. A eficiência do grupo motor gerador foi utilizada em 28%, como visto em projetos encontrados na bibliografia (FIGUEIREDO, 2011).

| Ano  | SCHOOL CANYON                                            |                                     | IPCC                                                     |                                     |
|------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|      | Vazão de metano<br>(m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano) | Potência disponível por<br>ano (kW) | Vazão de metano<br>(m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /ano) | Potência disponível por<br>ano (kW) |
| 2011 | 3.856.138,82                                             | 1.216,46                            | 4.061.047,72                                             | 1.281,10                            |
| 2012 | 4.390.392,15                                             | 1.385,00                            | 4.534.242,71                                             | 1.430,38                            |
| 2013 | 4.890.301,44                                             | 1.542,70                            | 4.923.224,92                                             | 1.553,09                            |
| 2014 | 5.322.577,01                                             | 1.679,07                            | 5.189.083,86                                             | 1.636,96                            |
| 2015 | 5.668.885,62                                             | 1.788,32                            | 5.319.740,58                                             | 1.678,17                            |
| 2016 | 5.932.392,60                                             | 1.871,44                            | 5.336.531,29                                             | 1.683,47                            |
| 2017 | 6.200.715,90                                             | 1.956,09                            | 5.387.232,80                                             | 1.699,47                            |
| 2018 | 6.473.898,10                                             | 2.042,27                            | 5.465.894,03                                             | 1.724,28                            |
| 2019 | 6.751.958,00                                             | 2.129,98                            | 5.567.683,04                                             | 1.756,39                            |
| 2020 | 7.034.954,50                                             | 2.219,26                            | 5.688.766,79                                             | 1.794,59                            |
| 2021 | 7.322.900,60                                             | 2.310,09                            | 5.825.989,66                                             | 1.837,88                            |
| 2022 | 6.786.982,90                                             | 2.141,03                            | 4.698.902,09                                             | 1.482,32                            |
| 2023 | 6.290.285,80                                             | 1.984,34                            | 3.789.859,26                                             | 1.195,56                            |
| 2024 | 5.829.938,80                                             | 1.839,12                            | 3.056.678,54                                             | 964,26                              |
| 2025 | 5.403.281,80                                             | 1.704,53                            | 2.465.337,92                                             | 777,72                              |
| 2026 | 5.007.849,10                                             | 1.579,78                            | 1.988.397,19                                             | 627,26                              |
| 2027 | 4.641.355,70                                             | 1.464,17                            | 1.603.724,74                                             | 505,91                              |
| 2028 | 4.301.683,70                                             | 1.357,02                            | 1.293.470,46                                             | 408,04                              |
| 2029 | 3.986.870,20                                             | 1.257,70                            | 1.043.237,53                                             | 329,10                              |
| 2030 | 3.695.095,90                                             | 1.165,66                            | 841.414,30                                               | 265,43                              |

**Tabela 38:** Potencial de geração de energia elétrica nos anos de 2011 a 2030, a partir dos dados obtidos pelo ajuste dos modelos de Scholl Canyon e do IPCC para o aterro de Rio Claro.

A potência instalada na usina de aproveitamento energético do biogás do aterro de Rio Claro foi definida em 1MW com o objetivo de aproveitar o máximo de energia gerada pelo aterro. Assim sendo, os anos considerados viáveis para gerar metano suficiente para alimentar a usina foram aqueles em que a potência disponível foi calculada maior que 1MW.

Dessa forma, para os valores estimado pelo modelo de Scholl Canyon a usina operaria nos anos de 2016 a 2030. Para os valores estimados pelo modelo do IPCC a usina operaria entre os anos de 2016 e 2023.

### 5.8.2 Definição os custos de projeto

A Tabela 39 apresenta os custos devido ao investimento inicial adaptados do estudo de caso do CTR São Mateus – ES (ABRELPE, 2013), ou seja, com o valor convertido em real e com a aplicação do IGPM.

| INVESTIMENTO INICIAL                           |                                                                                                           |       |              |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|
| Rede de captação                               |                                                                                                           |       |              |
| ITEM                                           | BASE                                                                                                      | CUSTO |              |
| Dutos principais                               | 1.800 m de dutos 110mm a US\$32/m                                                                         | R\$   | 94.600,95    |
| Dutos auxiliares                               | 910m de dutos de 160mm a US\$55/m                                                                         | R\$   | 154.801,55   |
| Drenos de condensado                           | 6 drenos a US\$2.000/dreno                                                                                | R\$   | 32.250,32    |
| Contigência                                    | 10% do subtotal                                                                                           | R\$   | 28.165,28    |
| TOTAL                                          |                                                                                                           | R\$   | 309.818,11   |
| Estação de queima                              |                                                                                                           |       |              |
| ITEM                                           | BASE                                                                                                      | CUSTO |              |
| Flare, sopradores e equipamentos auxiliares    | Proporcional ao valor encontrado de 600 mil para um flare alimentado por 5.000 m³/h                       | R\$   | 643.477,26   |
| Instrumentação                                 | Estimativa                                                                                                | R\$   | 215.002,16   |
| Obras civis                                    | Estimativa                                                                                                | R\$   | 295.627,96   |
| Contigência                                    | 5% do subtotal                                                                                            | R\$   | 57.706,58    |
| TOTAL                                          |                                                                                                           | R\$   | 1.211.813,96 |
| Usina termoeletrica                            |                                                                                                           |       |              |
| ITEM                                           | CUSTO                                                                                                     |       |              |
| Equipamentos principais                        | R\$                                                                                                       |       | 2.096.271,01 |
| Mão de obra de instalação mecânica             | R\$                                                                                                       |       | 483.754,85   |
| Istrumentação e monitoramento                  | R\$                                                                                                       |       | 215.002,16   |
| Custo de engenharia civil & conexões elétricas | R\$                                                                                                       |       | 322.503,23   |
| Contigências (5%)                              | R\$                                                                                                       |       | 155.876,56   |
| TOTAL                                          |                                                                                                           | R\$   | 3.273.407,81 |
| Custo estimado de serviços                     |                                                                                                           |       |              |
| ITEM                                           | BASE                                                                                                      | CUSTO |              |
| Licenças e estudos                             | Aprovação da licença                                                                                      | R\$   | 80.625,81    |
| Engenharia e gerenciamento do projeto          | Custo estimado do projeto detalhado, suporte, acompanhamento da construção, treinamento e comissionamento | R\$   | 215.002,16   |
| TOTAL                                          |                                                                                                           | R\$   | 295.627,96   |
| INVESTIMENTO INICIAL TOTAL                     |                                                                                                           | R\$   | 5.090.667,84 |

**Tabela 39:** Custos do investimento inicial para implementação da usina de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro – SP, para um potência instalada de 1 MW.

**Fonte:** Abrelpe (2013), adaptado pelo autor.

A Tabela 40 apresenta os custos anuais de manutenção e operação adaptados do estudo de caso do CTR São Mateus – ES (ABRELPE, 2013), ou seja, com o valor convertido em real e com a aplicação do IGPM.

| CUSTOS ANUAIS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO |                                                              |       |            |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|------------|
| ITEM                                   | BASE                                                         | CUSTO |            |
| Mão de obra                            | 1 líder de operação e um ajudante                            | R\$   | 215.002,16 |
| Eletricidade                           | 6kW para sopradores e 2kW para outras aplicações             | R\$   | 86.653,66  |
| Manutenção dos equipamentos            | 3% dos custos do flares                                      | R\$   | 9.583,00   |
| Manutenção da rede                     | 5% dos custos da rede de captação                            | R\$   | 15.490,91  |
| Laboratório, testes e calibração       | Estimativa                                                   | R\$   | 21.500,22  |
| Seguro                                 | Estimado em US\$4.000, mais 1% do custo da estação de queima | R\$   | 22.868,17  |
| Segurança                              | Estimativa                                                   | R\$   | 40.312,90  |
| TOTAL                                  |                                                              | R\$   | 411.411,01 |

**Tabela 40:** Custos de operação e manutenção anuais da usina de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro – SP, para um potência instalada de 1 MW.

**Fonte:** Abrelpe (2013), adaptado pelo autor.

### 5.8.3 Análise econômica

Para a análise econômica, os preços de venda da energia elétrica gerada foi definido em R\$ 209,91 por MWh (MME, 2015a), valor alcançado para as usinas termoeletrica movidas a biomassa no Leilão de Energia de Fontes Alternativas 2015, realizado pela Aneel em 27 de abril de 2015.

Além disso, foi considerado que o tempo de operação da usina é de 7884 horas anuais (328,5 dias), o que corresponde a 90% das horas totais do ano, pois assim é considerado períodos para eventuais pausas, seja para realizar a manutenção, seja por imprevistos.

Assim sendo, anualmente a receita gerada anualmente pela usina de aproveitamento energético do biogás do aterro de Rio Claro é:

$$1_{MW} \cdot 7884_{h/ano} \cdot 209,91_{R\$/MWh} = R\$ 1.654.930,44$$

O custo do capital, ou taxa de juros, para que seja possível aplicar o VPL foi definida em 14,15 %, que foi taxa Selic anual de dezembro de 2015.

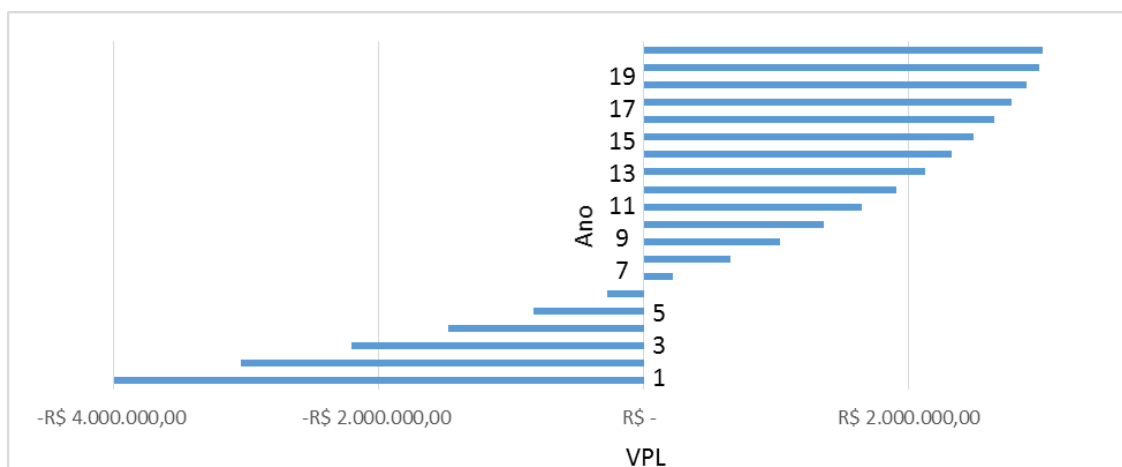
A análise financeira para os diferentes modelos de previsão de geração de metano é apresentado na Tabela 41.

| Modelo        | Investimento inicial |              | Fluxo de caixa |              | Nº de anos do projeto | Valor Presente Líquido |
|---------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Scholl Canyon | R\$                  | 5.090.667,84 | R\$            | 1.243.519,43 | 15                    | R\$ 2.490.316,01       |
| IPCC          | R\$                  | 5.090.667,84 | R\$            | 1.243.519,43 | 8                     | R\$ 648.937,02         |

**Tabela 41:** Análise da viabilidade econômica para os dados de previsão de geração de metano dos modelos de Scholl Canyon e do IPCC, a partir do valor presente líquido (VPL), para usina de 1 MW com aproveitamento energético do biogás do aterro municipal de Rio Claro – SP.

Conforme a tabela anterior, temos que a implantação de uma usina de aproveitamento energético é viável economicamente para os dados estimados de geração de metano de ambos os modelos. Entretanto o VPL calculado a partir dos dados de geração de metano estimados pelo modelo de Scholl Canyon (R\$2.490.316,01) é significativamente maior que o VPL calculado para os dados estimados pelo modelo do IPCC (R\$648.937,02).

O principal fator que gera essa diferença de resultado entre os modelos é o tempo de projeto, enquanto que os dados estimado pelo modelo de Scholl Canyon possibilitam que a usina opere por 15 anos, os dados estimados modelo do IPCC possibilitam que a usina opere por 8 anos. A Figura 18 apresenta a relação tempo de projeto com o VPL.



**Figura 18:** Curva para análise econômica do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário de Rio Claro em uma usina de 1 MW de potência, relacionando tempo de projeto com o Valor Presente Líquido (VPL).

A partir da curva, é possível perceber que um projeto de 1MW de potência instalada aplicado ao aterro sanitário de Rio Claro só é viável quando este apresenta uma duração de 7 anos ou mais, sendo o VPL diretamente proporcional ao tempo de projeto, ou seja, quanto maior o tempo de duração do projeto, maior o VPL e consequentemente maior é o retorno financeiro.

Visto que o modelo do IPCC estima um decaimento mais acelerado da geração de metano, o aterro deixa de gerar metano suficiente para alimentar a usina com potência de 1 MW a partir do ano de 2024, o que ocasiona em um menor período de operação da usina (8 anos). Todavia, o modelo de Scholl Canyon estima um decaimento lento, dessa forma prevê que haverá geração de metano suficiente em 2030 para alimentar a usina com potência de 1 MW, fazendo com que a usina opere por um período maior de tempo (15 anos).

Os resultados sinalizam que as estimativas geradas pelo modelo de Scholl Canyon são otimistas, pois preveem elevadas gerações de metano por um período maior de tempo, enquanto que as estimativas geradas pelo modelo do IPCC são conservadores, pois preveem menores gerações de metano e uma desaceleração mais acentuada da produção.

Assim sendo, o presente estudo sugere que é viável economicamente o aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal de Rio Claro – SP.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A partir das medidas em campo de vazão de metano gerado no aterro sanitário de Rio Claro, foram obtidas geração anuais de 4.437.227,68 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> em 2012, 4.785.733,72 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> em 2013 e 5.317.211,3 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> em 2014.
- Os valores adotados para potencial de geração de metano ( $L_0$ ) e constante de decaimento ( $k$ ) que melhor ajustaram o modelo de Scholl Canyon aos valores obtidos em campo foram  $L_0 = 201 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{RSU}}$  e  $k = 0,076/\text{ano}$ .
- Os valores para o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) e constante de decaimento ( $k$ ) que melhor ajustaram o modelo IPCC para os valores obtidos em campo foram de  $L_0 = 121,75 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{t}_{\text{RSU}}$  e  $k = 0,215/\text{ano}$ .
- Os erros da calibração do modelo de Scholl Canyon para as gerações obtidas em campo nos anos de 2012, 2013 e 2014, foram de 1,1%, 2,2% e 0,1% respectivamente, sinalizando para um bom ajuste do modelo no período da análise (2012 a 2014).
- Os erros da calibração do modelo do IPCC para as gerações obtidas em campo nos anos de 2012, 2013 e 2014, foram de 2,2%, 2,9% e 2,4% respectivamente, sinalizando para um bom ajuste do modelo no período da análise (2012 a 2014).
- Tanto o modelo de Scholl Canyon quanto o modelo do IPCC estimam o pico de geração de metano em 2021 (ano de encerramento da vida útil do aterro). Entretanto a geração máxima de metano estimada pelo modelo de Scholl Canyon foi de 7.322.900,60 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>, enquanto que o modelo do IPCC estima a geração máxima em 5.825.989,70 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>. Estes resultados indicam que, apesar dos valores estimados pelos modelos serem parecidos entre si nos anos de 2012, 2013 e 2014, a previsão de geração de metano tem comportamentos diferentes para cada modelo: o modelo de Scholl Canyon estima um pico de geração maior e um decaimento mais lento, enquanto que o modelo do IPCC estima um pico menor e um decaimento mais acelerado.
- A partir dos valores de geração de metano estimados pelo modelo de Scholl Canyon, é viável a implantação de uma usina com 1 MW de potência nos anos compreendidos entre 2016 e 2030, sendo o Valor Presente Líquido (VPL) calculado em R\$ 2.490.316,01 ao final do projeto.

- A partir dos valores de geração de metano estimados pelo modelo do IPCC, é viável a implantação de uma usina com 1 MW de potência nos anos compreendidos entre 2016 e 2023, sendo o Valor Presente Líquido (VPL) calculado em R\$ 648.937,02 ao final do projeto.
- Os resultados da presente pesquisa sinalizam que o modelo de Scholl Canyon estima valores otimistas para previsão de geração de metano, e consequentemente um melhor cenário econômico para o aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro. Já o modelo do IPCC estima valores conservadores para previsão de geração de metano, e consequentemente um pior cenário econômico para o aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro.
- Devido aos diferentes resultados obtidos pelos modelos de Scholl Canyon e do IPCC para previsão de geração de metano, recomenda-se que em análises da viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás gerado em aterro seja utilizado os valores estimados pelo modelo do IPCC, pois este gera valores de geração de metano mais conservadores, prezando pela segurança do projeto.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADVFN BRASIL. **Indicadores econômicos:** IGPM. Disponível em <<http://br.advfn.com/indicadores/igpm>>. Acesso em 05 de janeiro de 2016. 2016.

ADVFN BRASIL. **Taxa Selic:** Valor anual e mensal. Disponível em <<http://br.advfn.com/indicadores/taxaselic>>. Acesso em 05 de janeiro de 2016. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2002. 153p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de informações de geração:** Usinas do tipo UTE em operação. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelListaUsinas.asp?classe=Biomassa&combustivel=19&fase=3>>. Acesso em 16 de novembro de 2015.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos.** 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ANTONIO, S. M; CASTRO, M. C. A. A; MARQUES, N. P; ZANATTA, B. G. D. **Avaliação da vazão e concentração do biogás no aterro sanitário de Rio Claro - SP.** In: XXIV Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2012, Rio Claro. Anais do XXIV Congresso de Iniciação Científica da UNESP, 2012. v. 1. p. 123-129.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE; MGM INNOVA. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos.** São Paulo: ABRELPE, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** São Paulo: ABRELPE, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO COMERCIAL DE SÃO PAULO – ACSP. **Média mensal da cotação do dólar comercial para venda.** Disponível em <[http://economia.acspservicos.com.br/indicadores\\_iegv/iegv\\_dolar.html](http://economia.acspservicos.com.br/indicadores_iegv/iegv_dolar.html)>. Acesso em 05 de janeiro de 2016. 2016

AUDIBERT J.L. **Avaliação qualitativa e Quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2011.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v.65, p.150–164, 2014.

BRASIL. **Decreto no 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. 2010.

BRASIL. **Lei Federal nº 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. Brasília, 2010.

CASTRO, M. C. A. A.; ANTONIO, S. M; MARQUES, N. P; MOREIR, C. A; CALLEGARI, N. **Estudo comparativo da geração de gás metano estimado por modelagem matemática com dados reais medidos em campo no aterro sanitário de Rio Claro SP**. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia. Anais 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2013. v. 1. p. 1-9.

CEPAGRI Meteorologia UNICAMP. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em <[http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_494.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_494.html)>. 2015.

CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0.65** p, 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE – SMA. **Biogás geração e uso energético: Manual do usuário do programa de computador**. 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Definição: biogás**. Disponível em <<http://biogas.cetesb.sp.gov.br/biogas/definicao/>>. Acesso em 29 de julho de 2015. 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Índice de qualidade de aterros de resíduos: município de Rio Claro**. 2014.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – CEBDS. **Estudo sobre adaptação e vulnerabilidade à mudança climática: o caso do setor elétrico brasileiro**. 2012.

CROVADOR, Maria Isabel Coltro. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. 2014. 103f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste. Guarapuava, 2014.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS – DIEESE. **Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil**. 2014.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso**. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

FRANCESCHI, F. R. A. **Avaliação do comportamento da temperatura na massa de resíduo com diferentes tempos de disposição no aterro sanitário de Rio Claro – SP**. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista campus de Rio Claro, Rio Claro. 2013.

GOTARDO, O. C; CASTRO, M. C. A. A; FRANCESCHI, F. R. A. **Análise comparativa da porcentagem de metano presente no biogás de duas células de resíduos em um aterro sanitário**. In: XXV Congresso de Iniciação Científica, 2013, Rio Claro. Anais do XXV Congresso de Iniciação Científica, 2013.

INOUE, K. R. A. **Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira**. 76 f. Dissertação (Magister Scientiae), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades | São Paulo | Rio Claro**. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=354390>>. Acesso em 19 de novembro de 2015. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010a.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**: relatório de pesquisa. Brasília. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual - Revised**. v. 3, cap.6, 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual**. v.3, cap. 2, 2006a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual**. v.3, cap. 3, 2006b.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR LOCAL ENVIRONMENTAL INITIATIVES (ICLEI). **Manual para aproveitamento do biogás: aterros sanitários**. v. 1. São Paulo:

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil, 2009. 80 p.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION – ISWA. **Waste-to-energy state-of-the-art-report**. Dinamarca. 2012.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; GOURC, J. P.; VILAR, O. M.; NASCIMENTO, J. C. F. Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, n. 01, p.153–161, 2009.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 333 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MARQUES, N. P; CASTRO, M. C. A. A; ZANATTA, B. G. D; ANTONIO, S. M; MOREIRA, C. A. **Análise da biodegradabilidade do lixiviado gerado no aterro sanitário do município de Rio Claro SP**. In: XXIV Congresso de Iniciação Científica, 2012, Rio Claro. Anais do XXIV Congresso de Iniciação Científica, 2012. v. 1. p. 134.

MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 2005. p. 179. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de transmissão e conversão de energia – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá - SP. 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCT. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Leilão FA 2015 negocia energia de 11 usinas com deságio de 1,96%**. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Fontes%20Alternativas%202015/Leil%C3%A3oFA2015negociaenergiade11usinascomdes%C3%A1giode1,96.aspx>>. Acesso em 30 de novembro de 2015. 2015a.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Leilões de energia**. Disponível em <[http://www.mme.gov.br/programas/leiloes\\_de\\_energia/menu/inicio.html](http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html)>. Acesso em 30 de novembro de 2015. 2015b.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME; EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE. **Balanco energético nacional: ano base 2014**. 2015.

MORAES, L. M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de dejetos oriundos de atividades zootécnicas**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.

OONK, J; BOOM, A. **Landfill gas formation, recovery and emissions**. Dutch national research programme on global air pollution and climate change. 1995.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICA – ONS. **Energia armazenada.** Disponível em <[http://www.ons.org.br/historico/energia\\_armazenada.aspx](http://www.ons.org.br/historico/energia_armazenada.aspx)>. Acesso em 30 de novembro de 2015. 2015.

PERCORA, V. FIGUEIREDO, N. J. V; VELÁZQUEZ, S. M. S. G; COELHO, S. T. **Aproveitamento energético do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás.** In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas - MG, 2008.

PIEROTTI, S. M. **Avaliação da partida de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

POHLAND, F. G; HARPER, S. R. **Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills.** EPA/600/S2-86/073, U.S. EPA, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, 1987.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA DESENVOLVIMENTO – PNUD. **Estudo sobre o potencial de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável.** São Paulo. 2010.

**Projetos de Energia na América Latina e Caribe.** 2004.

SANTANGELO, V. S; OLIVEIRA, D. M; DIAS, V. C. F; CASTILHOS JUNIOR, A. B. **Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC.** In: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. 2009.

SANTOS, D. S. S; COSTA, I. M; PEREIRA, M, G. **A utilização do biogás como fonte descentralizada de energia alternativa.** In: XIV Congresso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica – ALTEC. Peru, Lima. 2011.

SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE DE RIO CLARO – SEPLADEMA. **Plano municipal de saneamento básico do município de Rio Claro.** Rio Claro. 2014.

SILVA, T. N; CAMPOS, L. M. S. **Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos bandeirantes- SP.** Eng. Sanit. Ambient. vol. 13, p. 88-96. 2008.

SILVA, W. R. **Biogás:** potencialidade dos aterros sanitários do Estado do Paraná. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Tecnologia - PRODETEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)/Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2010.

THE WORLD BANK. **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean.** Janeiro de 2004.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Feasibility assessment for gas-to-energy at selected landfills in Sao Paulo, Brazil.** 1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Turning a liability into an asset:** a landfill gas-to-energy project development handbook. 1996.

VOGT, W. G.; AUGENSTEIN, D. **Final report:** comparison of models for predicting landfill methane recovery. SCS Engineers and Institute for Environmental Management (IEM). 1997. 102p.