



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA**  
**CAMPUS DE JI-PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



**HELDER SUMECK NECKER**

**ESTIMATIVA TEÓRICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO  
QUE SERÁ CONSTRUÍDO NO MUNICÍPIO DE JI-PARANÁ - RO**

Ji-Paraná

2013

**HELDER SUMECK NECKER**

**ESTIMATIVA TEÓRICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO  
QUE SERÁ CONSTRUÍDO NO MUNICÍPIO DE JI-PARANÁ - RO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Federal de Rondônia, *Campus* de Ji-Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Ana Lucia Denardin da Rosa

Ji-Paraná

2013

Necker, Helder Sumeck

N366e      Estimativa teórica da geração de biogás do aterro sanitário que  
2013      será construído no município de Ji-Paraná - RO / Helder Sumeck  
Necker ; orientadora, Ana Lúcia Denardin da Rosa. -- Ji-Paraná, 2013

61 f. : 30cm

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Ambiental. –  
Universidade Federal de Rondônia, 2013

Inclui referências

1. Energias renováveis. 2. Biogás - Combustível. 3. Energia –  
Fontes alternativas. 4. Economia da energia. 5. Aterro sanitário –  
Rodônia. I. Rosa, Ana Lúcia Denardin da. II. Universidade Federal de  
Rondônia. III. Título

CDU 628.472.3 (811.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA  
CAMPUS DE JI-PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



**TITULO:** ESTIMATIVA TEÓRICA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS DO ATERRO  
SANITÁRIO QUE SERÁ CONSTRUÍDO NO MUNICÍPIO DE JI-PARANÁ - RO.

**AUTOR:** HELDER SUMECK NECKER.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi defendido como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovado pelo Departamento de Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Federal de Rondônia, *Campus* de Ji-Paraná, no dia 11 de setembro de 2013.

---

Profa. Me. Margarita Maria Dueñas Orozco.  
Universidade Federal de Rondônia

---

Eng. Ambiental Carina Stre Holanda  
CREA/RO 6624 D

---

Profa. Me. Ana Lucia Denardin da Rosa  
Universidade Federal De Rondônia

Ji-Paraná, 11 de setembro de 2013.

## RESUMO

A destinação dos resíduos sólidos urbanos ainda é um problema na maior parte do Brasil, notadamente nas regiões Norte e Nordeste. No município de Ji-Paraná – RO, a atual destinação dos resíduos não acontece de maneira adequada, sendo que o projeto de construção de um aterro sanitário para o município já existe e deve acontecer em breve. Além da mais adequada forma de destinação final dos resíduos sólidos urbanos, os aterros sanitários podem ser uma forma de se obter energia, devido à sua grande geração de biogás, que apresenta em sua composição o metano, um gás com elevado potencial energético. Portanto, o trabalho buscou estimar a geração de biogás no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná, com base em 4 metodologias: Método do Inventário; Método de Projeto; Programa *LandGEM*; e Programa Biogás Geração e Uso Energético. Foram encontrados valores muito próximos entre os métodos, valores que chegam a 5,8 milhões de m<sup>3</sup> de biogás gerado por ano. Outro resultado importante encontrado foi o potencial de geração de biogás dos resíduos sólidos urbanos de Ji-Paraná, que foi de aproximadamente 216 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduo. Nos anos iniciais de funcionamento, o potencial energético do aterro foi estimado em 144 MW por mês quantidade suficiente pra abastecer cerca de 930 residências, sendo que, à medida que o aterro vai recebendo mais resíduos, depois de um pouco mais de uma década de funcionamento, a energia gerada chegaria a 432 MW/mês e poderia abastecer cerca de 2.800 residências, mostrando que o aterro sanitário pode ser uma grande fonte de energia, mesmo para cidades consideradas de médio porte como Ji-Paraná. Também foi realizada uma estimativa da geração de chorume do futuro aterro, através do Método Suíço e foi verificado que os fatores com maior influencia na geração do chorume são a precipitação pluviométrica e o grau de compactação dos resíduos, sendo que em épocas chuvosas como os meses de dezembro e janeiro foram estimadas vazões em torno de 300 m<sup>3</sup>/dia, enquanto em meses secos como junho, julho e agosto as vazões encontradas foram em torno de 20 m<sup>3</sup>/dia.

Palavras-chave: biogás, chorume, aterro sanitário, potencial energético.

## ABSTRACT

The final destination of the urban solid waste stills a problem in the bigger part of Brazil, principally, in regions north and northeast. In the city of Ji-Paraná – RO, the current final destination of the solid waste don't happens in a correct way, and that the project of construction of a landfill for the city already exists and should starts soon. Further the most appropriate way of urban solid waste final destination, the landfills can be a way of obtain energy, because of the great generation of the landfill gas, that presents in their composition methane, one gas with a huge energetic potential. Therefore this work, search to estimate the generation of landfill gas in the landfill that will be built in Ji-Paraná, based on four methods: Inventory Method; Project Method; Software LandGEM; e Software Landfill Gas Generation and Energy Use. The values founded between the methods are closer to each other, this values get around 5,8 millions  $m^3$  of landfill gas in an year. Another important value founded is the landfill gas potential generation of the urban solid waste of Ji-Paraná that was nearly of 216  $m^3$  of landfill gas for ton of solid waste. In the firsts years of operation, the energetic potential of the landfill was estimated in 144 MW per month, a sufficient amount to provide electricity to 930 houses, and that more solid waste goes to the landfill, after a little bit more than a decade of operation, the energetic potential could reach 432 MW per month e could provide electricity for about of 2.800 houses, showing that the landfill could be a great energy source, even in a medium size city like Ji-Paraná. Also was realized a estimative of the leached generation in the future landfill, by the Swiss Method, and verified that the principal factor that influences in the leached generation is the rainfall and the compression rate of the solid waste, and that in the rainy months like December and January were estimated outputs around 300  $m^3$ /day, while in arid months like June, July and August the outputs founded were around 20  $m^3$ /day.

Keyword: landfill gas, leached, landfill, energetic potential.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>09</b>
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.2 Características dos Resíduos Sólidos Urbanos .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.3 Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 ATERRO SANITÁRIO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 BIOGÁS .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.1 Métodos de Coleta e Formas de Tratamento.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3.2 Formas de Aproveitamento Energético do Biogás.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....</b>	<b>26</b>
<b>1.5 CHORUME .....</b>	<b>27</b>
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 MODELOS PARA ESTIMATIVA DO BIOGÁS.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.1 Equação de Inventário Desenvolvida Pelo IPCC (1996) .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2 Método de Projeto .....</b>	<b>33</b>

2.2.3 <i>LandGEM – Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02</i> .....	35
2.2.4 Programa Biogás Geração e Uso Energético .....	36
2.3 EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA DO BIOGÁS.....	38
2.4 MODELO PARA ESTIMATIVA DO CHORUME – MÉTODO SUÍÇO .....	39
3 RESULTADOS E DISCUSÃO .....	41
3.1 GERAÇÃO DE METANO E EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA.....	41
3.1.1 Equação de Inventário Desenvolvida pelo IPCC (1996).....	41
3.1.2 Método de Projeto .....	45
3.1.3 <i>LandGEM – Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02</i> .....	51
3.1.4 Programa Biogás Geração e Uso Energético .....	52
3.1.5 Comparação entre os Resultados Obtidos .....	54
3.1.6 Equivalência Energética do Biogás .....	55
3.2 ESTIMATIVA DO CHORUME – MÉTODO SUÍÇO.....	58
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS .....	63



## INTRODUÇÃO

O potencial energético dos aterros sanitários é pouco explorado no Brasil, a própria instalação desses aterros, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país, ainda ocorre em poucos municípios, sendo que na maioria dos casos o resíduo é destinado a lixões a céu aberto ou para aterros que não estão de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos pela NBR 13.896 de 1997, que trata dos parâmetros de construção dos aterros sanitários para resíduos não-perigosos.

Segundo Ribeiro (2006), a humanidade vem selecionando seus sistemas energéticos ao longo da história em função de dois parâmetros fundamentais: disponibilidade técnica e viabilidade econômica, porém, recentemente outra variável que também condiciona o aval de qualquer sistema energético tem sido incorporada, são os impactos que seu uso possa ocasionar ao meio ambiente.

Dessa forma as energias renováveis, cada vez mais, vêm se tornando realidade, principalmente nos países desenvolvidos, onde muito se é investido em estudos e projetos que tornem esse tipo de energia designada como limpa, viável técnica e economicamente. De acordo com Pecora (2006), com a crise do petróleo, diversos países tiveram que buscar alternativas para sua substituição, o que deu grande impulso no investimento em recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio.

Dessa forma os aterros sanitários, além de uma alternativa adequada de destinação dos resíduos sólidos, também podem se tornar uma potencial fonte de energia, devido ao metano presente no biogás, que é liberado pela decomposição anaeróbia da parte orgânica presente nos resíduos, um gás de elevado potencial energético. Diversos estudos têm sido desenvolvidos para o aproveitamento energético do biogás, principalmente nos aterros de maior porte (ENSINAS 2003; MONTILHA, 2005; ABREU, 2007, VANZIN et al., 2008).

Na Europa a capacidade instalada em plantas de aproveitamento do biogás é superior a 2000 MW, concentrada principalmente na Alemanha e Reino Unido, enquanto nos Estados Unidos essa capacidade é de cerca de 1000 MW (IEA 2006).

No Brasil, um projeto do governo federal pretende extinguir os lixões até o ano de 2014, uma tarefa difícil. No município de Ji-Paraná, Rondônia há projeto de construção do aterro sanitário e visto que no Plano Municipal de Saneamento Básico (2012), uma das metas proposta, seria a análise da viabilidade técnica-operacional e financeira do aproveitamento do biogás do lixão de Ji-Paraná, o presente trabalho tem por objetivo evidenciar que um planejamento antecipado da recuperação do biogás gera um maior aproveitamento do potencial energético do mesmo.

O estudo teve o objetivo de estimar teoricamente a quantidade de biogás que será gerada no futuro aterro, desde que, o mesmo seja construído e manejado de forma adequada. Foram realizadas estimativas através de métodos empíricos já consagrados na literatura, sendo eles o Método do Inventário, o Método de Projeto, o Programa *LandGEM* e o Programa Biogás Geração e Uso Energético, dando assim à administração do município uma base para instigar estudos mais aprofundados sobre a viabilidade econômica do aproveitamento de biogás, sendo realizada uma comparação dos resultados obtidos para o aterro de Ji-Paraná, com os estimados em outras regiões através de metodologias iguais ou semelhantes.

Também foi estimada, através do Método Suíço, a vazão média diária de chorume no aterro que será construído, através desta estimativa é possível dimensionar o sistema de tratamento mais adequado para o volume de chorume que será gerado.

## **1. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS**

Segundo Ensinas (2003), a disposição final dos resíduos sólidos é um dos maiores problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos, problema este que tende a agravar-se com o aumento do consumo de bens descartáveis.

Aumentos desordenados na população e crescimento de núcleos urbanos sem qualquer planejamento, segundo Figueiredo (2007), dificultam as ações de manejo dos resíduos, que por falta de recursos, acabam sendo postergadas, causando problemas de saúde e ambientais.

Calderoni (1998) destaca que na linguagem usual o termo resíduo é sinônimo de lixo, sendo que o lixo é considerado todo tipo de material inútil e que sua existência no meio é nociva, devendo então ser descartado e colocado em local adequado. A composição do lixo urbano acompanha diretamente as modificações econômicas e as transformações tecnológicas, que vêm influenciando o modo de vida das populações nos centros urbanos em um ritmo cada vez mais acelerado, gerando conseqüentemente mais resíduos (ENSINAS, 2003).

Donha (2002) afirma que as questões referentes à geração e destinação final do lixo são tema recorrente em todo o mundo. O autor cita que na década de 50 a geração mundial de lixo era de 0,5 kg/hab.dia e em 2000 esse número chegou a 2,0 kg/hab.dia nos países desenvolvidos, sendo que no Brasil, há uma produção média de 0,7 kg/hab.dia, e nos grandes centros urbanos do país este número pode chegar a 1,0 kg/hab.dia

#### **1.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos**

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que provém de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São incluídos também nesta definição, os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, os lodos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, e também determinados líquidos cujas particularidades tornam seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos hídricos inviáveis, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente impraticáveis.

A NBR 10.004 também descreve a classificação dos resíduos sólidos pela ABNT, os resíduos são classificados em Classe I – Perigosos e Classe II – Não perigosos.

**Classe I – Perigosos:** apresentam periculosidade ou alguma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

Os resíduos da Classe II são divididos em 2 subgrupos, os Não inertes e os Inertes

**Classe II A – Não inertes:** aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade.

**Classe II B – Inertes:** aqueles que, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor,

Conforme a fonte geradora, alguns autores classificam os resíduos em três categorias: resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos especiais (IBAM, 2001; SCHALCH et al., 2002; TINÔCO, 2007).

### 1.1.2 Características dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) implicam em resíduos resultantes das residências, resíduos de serviços de saúde, resíduos de construção civil, resíduos de poda e capina, resíduos de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários e os resíduos de serviços, que abrangem os resíduos comerciais, os resíduos de limpeza de bocas de lobo e os resíduos de varrição, de feiras e outros (IBAM, 2001; SCHALCH et al., 2002).

Para a legislação brasileira, o lixo doméstico é de propriedade da prefeitura, cumprindo-lhe a missão de assegurar sua coleta e destinação final (CALDERONI, 1998). Diferentemente do lixo industrial que como diz Streb (2001), é de responsabilidade do gerador, pois apresenta grande diversidade e potencial risco a saúde pública.

Esses resíduos, quando acumulados no meio ambiente de forma inadequada, causam problemas de poluição e caracterizam também um desperdício da matéria originalmente utilizada (FIGUEIREDO, 2007).

De acordo com Donha (2002) as características dos resíduos gerados variam de acordo com a densidade demográfica e a renda de uma comunidade. Comunidades carentes apresentam parcelas maiores de matéria orgânica e uma menor quantidade de resíduo descartável, já nas populações de maior poder econômico ocorre o contrário.

Segundo o IBAM (2001) as características físicas mais importantes a serem analisadas nos estudos dos resíduos sólidos são:

**Geração *per capita*:** A geração *per capita* relaciona a quantidade de RSU gerada diariamente e o número de habitantes de uma determinada região (IBAM, 2001), segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2006), a geração de resíduos sólidos está relacionada diretamente com o nível socioeconômico da população e com o tamanho da cidade. Dados do IBGE (2001) mostram que no Brasil, os municípios de 20 mil a 50 mil habitantes, têm uma geração média *per capita* de 0,64 kg/hab/dia de resíduo urbano, enquanto municípios com mais de 1 milhão de habitantes geram em média 1,50 kg/hab/dia. Corroboram com essas pesquisas as informações publicadas em 2011 por Santos, que quantificou a geração *per capita* no município de Ji-Paraná - RO, que contém aproximadamente 116.000 habitantes, segundo IBGE 2010, e verificou uma produção de RSU de 0,684 kg/hab/dia. Cerqueira (2011) encontrou para Tarilândia, que é um distrito próximo a Ji-Paraná com cerca de 2.000 habitantes, uma geração *per capita* de 0,397 kg/hab/dia.

**Composição gravimétrica:** Traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de resíduo analisada. Indica a possibilidade de aproveitamento das frações recicláveis para comercialização e da matéria orgânica para a produção de composto orgânico (TINÔCO, 2007). IBAM (2001) afirma que o processo de urbanização parece ser a grande variável que interfere na mudança da composição dos resíduos sólidos urbanos, pois o teor de matéria orgânica diminui à medida que as cidades crescem, enquanto o teor de recicláveis aumenta. Tinôco (2007) apresentou que no Brasil, a composição gravimétrica média é a seguinte: matéria orgânica 64%, metais 1,5%, papel 8,5%, papelão 5%, plástico-filme 2,7%, vidro 1,5%, plástico rígido 2% e outros 14,8%. Já no município de Ji-Paraná, Santos (2011) apresenta uma composição de: matéria orgânica 61,6%; metais 2,1%; papel /papelão 15,9%; plástico-filme 4,4%; vidro 1,7%; plásticos 4,3% outros 10%. Nos países desenvolvidos, devido ao alto grau de industrialização, nota-se uma predominância de materiais como papel, metais, plásticos e vidros, característicos de produtos industrializados e suas respectivas embalagens (ENSINAS, 2003). Cerqueira analisou também em 2011 a composição gravimétrica dos resíduos do distrito de Tarilândia encontrando os seguintes resultados: 68,85% são resíduos orgânicos; 6,45% são papéis e papelões; 17,21% são plásticos; 1,03 são vidros; 4,3% metais e 2,15% outros. É possível comparar melhor a diferença da composição gravimétrica entre Brasil, Ji-Paraná e Tarilândia na tabela 1.

**Tabela 1.** Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, em Ji-Paraná e em Tarilândia.

<b>Componentes</b>	<b>Brasil</b>	<b>Ji-Paraná</b>	<b>Tarilândia</b>
Matéria orgânica	64,00%	61,60%	68,85%
Metais	1,50%	2,10%	4,30%
Papel/papelão	13,50%	15,90%	6,45%
Plástico	2,00%	4,30%	17,21%
Vidro	1,50%	1,70%	1,03%
Plástico-filme	2,70%	4,40%	-
Outros	14,80%	10,00%	2,15%

**Fonte:** Tinôco (2007), Santos (2011) e Cerqueira (2011).

**Peso específico aparente:** É o peso dos resíduos soltos, em função do volume ocupado livremente, sem qualquer compactação (IBAM, 2001). Na ausência de dados, podem-se utilizar para o peso específico no estado solto, os valores de 230 kg/m<sup>3</sup> para os resíduos domiciliares, de 280 kg/m<sup>3</sup> para os resíduos de serviço de saúde e de 1.300 kg/m<sup>3</sup> para os resíduos da construção civil (IBAM, 2001). Tinôco (2007) afirma que, o peso específico aparente é de fundamental importância para o correto dimensionamento da frota de coleta, assim como de contêineres e caçambas estacionárias. Santos (2011) encontrou valores de peso específico aparente médio para o município de Ji-paraná de 195 kg/m<sup>3</sup>.

**Teor de umidade:** É o percentual de água presente nos resíduos em relação ao seu peso. Têm influência direta sobre a velocidade de decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem, no poder calorífico dos resíduos, no peso específico aparente dos resíduos, e no cálculo da produção de lixiviado, além de ser importante para o correto dimensionamento do sistema de coleta de percolados (TINÔCO, 2007). O IBAM (2001) afirma que, o teor de umidade varia muito de acordo com a época do ano, e por isso na maioria dos casos é estimado. Os valores considerados para implantação de um aterro sanitário variam de 40 a 60% ao longo do ano.

**Compressividade:** Tinôco (2007) definiu compressividade como o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de resíduos pode sofrer quando compactado, deve ser levado em conta no dimensionamento de veículos coletores, estações de transferência com compactação e caçambas compactadoras estacionárias. Segundo o IBAM (2001), a compressividade dos RSU é estimada entre 1/3 e 1/4 do seu volume original.

### 1.1.3 Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

O conceito de solução ideal para o problema dos resíduos sólidos urbanos seria a adoção de medidas como a coleta seletiva, a reciclagem dos resíduos aptos a essa opção e a compostagem dos resíduos biodegradáveis e da matéria orgânica, sendo que, apenas uma pequena parcela dos resíduos gerados, comumente chamados de rejeitos, precisaria de disposição final.

Segundo Britto (2006) há três maneiras de disposição final dos resíduos, sendo elas, os lixões a céu aberto, os aterros controlados e os aterros sanitários. Ainda segundo a autora, a destinação mais adequada para estes resíduos é que os mesmos sejam aterrados, porém é necessária a definição de vários parâmetros técnicos que devem auxiliar na minimização dos impactos ambientais causados pela disposição dos resíduos no solo.

D'Almeida e Vilhena (2000) classificam as formas de destinação final dos resíduos da seguinte maneira:

**Lixões:** forma inadequada de disposição dos resíduos, que é caracterizada pela descarga sobre o solo, sem qualquer medida de proteção ao meio ambiente e à saúde pública.

**Aterros controlados:** forma de disposição dos resíduos que utiliza algumas técnicas de engenharia para o confinamento dos resíduos, cobrindo-os com camadas de material inerte quando cada jornada de trabalho é concluída, sendo que geralmente não dispõe de impermeabilização no solo e nem de sistemas que tratam o percolato e o gás gerado.

**Aterros sanitários:** técnica de disposição de resíduos no solo, que utiliza critérios de engenharia e normas de operação específica, de modo a evitar danos ou riscos a segurança e a saúde pública, minimizando os impactos ao meio ambiente.

De acordo com dados da ABRELPE (2007) é estimado que no Brasil sejam gerados 61,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por ano, destes, cerca de 10 milhões não são coletados. Segundo Tinôco (2007) é comum que a coleta seja eficiente apenas nos bairros mais nobres e nas principais ruas das cidades.

Um panorama apresentado pela ABRELPE (2010) mostrou que 29,5% dos municípios no Brasil ainda dispõem seus resíduos sólidos em lixões, 31,6% em aterros controlados e 38,9% em aterros sanitários. Portanto vemos que na maioria dos municípios os resíduos não têm a correta destinação final, sendo que as regiões menos desenvolvidas, como o Norte e o Nordeste apresentam as piores condições quanto à destinação final dos resíduos, ainda segundo a ABRELPE (2010) somente 18,9% dos municípios da região Norte destina seus RSU em aterros sanitários e no Nordeste o número é de 24,5%.

Segundo Santos (2011), a coleta dos resíduos sólidos em Ji-Paraná – RO atende 100% da população do município, a destinação final dos resíduos sólidos é feita em um lixão localizado a cerca de 10 km da cidade, sendo que os resíduos são enterrados sem qualquer tipo de controle técnico e segundo o autor a forma de disposição dos resíduos sólidos está em desacordo com a legislação vigente no País. Atualmente de acordo com informações da Prefeitura Municipal de Ji-Paraná há o projeto para construção de um aterro sanitário no município, sendo que faltam alguns processos para que a licitação seja aberta as empresas. Ainda segundo a prefeitura, a área mais provável em que seja instalado o aterro, será o terreno vizinho ao atual lixão, tendo este as mesmas dimensões e características de solo da área do lixão.

## 1.2 ATERRO SANITÁRIO

Os aterros sanitários são obras de engenharia que precisam atender a uma série de normas técnicas de construção, implantação e operação definidas pela ABNT, que possibilitem o uso do solo como local para destinação final dos resíduos sólidos, sendo primordial a impermeabilização do solo para evitar a infiltração de chorume e o controle dos gases gerados pela decomposição dos resíduos.

Segundo Figueiredo (2007) o aterro sanitário é uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo que visa o seu confinamento em camadas cobertas com terra e atende normas operacionais, com objetivo de evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança e diminuindo os impactos ambientais.

A Companhia de Tecnologia em Saneamento Ambiental – CETESB (2013) listou algumas das principais medidas de proteção ambiental dos aterros sanitários:

**Impermeabilização da base do aterro:** a fim de evitar o contato do chorume com as águas subterrâneas, pode ser feita com argila ou geomembranas sintéticas.

**Sistema de drenagem de gás:** canal de saída do gás do interior do aterro para o exterior, os drenos podem ser construídos de concreto ou de polietileno de baixa densidade (PEAD) e o biogás pode ser recolhido para aproveitamento energético através da ligação de todos os drenos verticais com um ramal central.

**Sistema de coleta e tratamento de chorume:** após coletado o chorume deve ser tratado antes de ser descartado em um corpo hídrico, o tratamento pode ser feito no local ou transportado até uma estação de tratamento de esgotos.



**Sistema de drenagem de águas pluviais:** o sistema visa a captação e drenagem de águas de chuva, para que a mesma escoe por locais apropriados, evitando a infiltração que gera o chorume.

De acordo com a United State Environmental Protection Agency – USEPA (1996, apud Ensinas, 2003), os aterros sanitários são a principal alternativa encontrada como forma de destinação final dos resíduos sólidos no Brasil e também na maioria dos outros países, sendo uma alternativa segura, pois recebem cuidados especiais na sua construção como preparo do solo, manta de impermeabilização, drenos para captação de chorume e sucção de gás.

Britto (2006) define o aterro sanitário como um equipamento utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, especificamente lixo domiciliar, que é fundamentado em critérios de engenharia e em normas operacionais específicas, permitindo a confinação segura nos termos do controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública. Na figura 1, podemos visualizar a membrana de impermeabilização do solo e os drenos de captação de biogás.



(a)

(b)

**Figura 1.** Membrana responsável pela impermeabilização do solo (a) e drenos para captação do biogás (b).

**Fonte:** Prefeitura Municipal de Toledo (a) e [www.consumocomatitude.com.br](http://www.consumocomatitude.com.br) (b).

### 1.3 BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa produzida a partir da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, composta primariamente de metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de ácido sulfídrico e amônia (ZANETTE, 2009). O biogás é gerado sempre que ocorre a decomposição anaeróbia de matéria orgânica, possui um grande potencial energético,

sua geração pode ocorrer em reatores anaeróbios, lagoas anaeróbias e nos lixões e aterros sanitários. Na tabela 2 é descrito a composição média do biogás.

**Tabela 2.** Composição média do biogás

<b>Composição</b>	<b>%</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 75 %
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40 %
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 a 3 %
Azoto (N <sub>2</sub> )	0.5 a 2.5 %
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0.1 a 1 %
Sulfureto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	0.1 a 0.5 %
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0.1 a 0.5 %
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1 %
Água (H <sub>2</sub> O)	variável

**Fonte:** Projeto Biogás (2004) apud Britto (2006)

O biogás é um gás incolor, geralmente inodoro (se não contiver demasiadas impurezas), insolúvel, leve e de baixa densidade (PROSAB, 2003). O biogás não é tóxico, mas atua sobre o organismo humano, diluindo o oxigênio e, como consequência, pode provocar a morte por asfixia (PECORA, 2006). Segundo Silva (2009) a formação do biogás é comum na natureza, sendo encontrado em pântanos, lamas escuras e locais onde a celulose sofre decomposição naturalmente.

Zanette (2009) diz que o processo de digestão anaeróbia vem sendo utilizada em diversas aplicações que demonstraram a sua capacidade de tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos constituídos em sua maior parte de matéria orgânica. A produção de biogás através da digestão anaeróbia da biomassa é considerada uma tecnologia que produz energia de forma renovável e eficiente após a remoção das suas impurezas (MARTINS, 2012).

A composição do biogás segundo Alves Filho (2003) irá depender basicamente do tipo de material que está sendo degradado e também da forma como essa degradação está ocorrendo. Dependendo da eficiência do processo de degradação dos resíduos, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006). Nos aterros sanitários segundo PERSSON et al. (2006) o percentual de metano em sua composição varia de 35 a 65 %, enquanto o de dióxido de carbono de 15 a 50 %.

A digestão anaeróbia tem sido aplicada com sucesso no tratamento de efluentes industriais e domésticos, estabilização de lodo de efluentes, manejo de aterros e reciclagem de resíduos biológicos e agrícolas como fertilizantes orgânicos (ZANETTE, 2009).

O gás metano tem um potencial de aquecimento aproximadamente 20 vezes maior que o do dióxido de carbono, sendo responsável por 25% do aquecimento global (USEPA, 2007). De acordo com o IPCC (1996) os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do metano que é liberado por fontes que tem em sua origem a atividade humana. Nesse sentido, ENSINAS (2003) diz que, nos aterros sanitários devem ser realizados projetos que visam à recuperação do biogás do aterro para geração de eletricidade, bem como por motivos de segurança, saúde pública e ambiental.

Os aterros sanitários, além de uma forma adequada de destinação dos resíduos sólidos, também pode se tornar uma potencial fonte de energia, devido ao metano presente no biogás, que é liberado pela decomposição anaeróbia da parte orgânica presente nos resíduos, um gás de grande potencial energético. Diversos estudos têm sido desenvolvidos para o aproveitamento energético do biogás, principalmente nos grandes aterros (ENSINAS 2003; MONTILHA, 2005; ABREU, 2007, VANZIN et al., 2008)

O potencial energético dos aterros sanitários é pouco explorado no Brasil, a própria instalação desses aterros, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país ainda ocorre em poucos municípios, sendo que a maioria dos resíduos dessas regiões são destinados a lixões a céu aberto ou para aterros que não estão de acordo com os parâmetros técnicos estabelecidos pela NBR 13.896 de 1997, que trata dos parâmetros de construção dos aterros sanitários para resíduos não-perigosos. Segundo Lima (1995), os resíduos urbanos ganharam *status* de fonte alternativa de energia, pois a sua conversão biológica com fins energéticos vem se tornando interessante, com custos de produção decrescentes e possibilidade de inserção no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com geração de créditos de carbono.

Como ressalta Vanzin (2006), o crescimento da população e das atividades industriais traz uma demanda cada vez maior de energia e também o aumento do descarte de resíduos sólidos, que por sua vez, vão ocasionar problemas ambientais e relativos à oferta e aos custos da energia. Cerca de 1000 aterros em todo o mundo realizam a recuperação do biogás, a maioria deles nos Estados Unidos e Europa (WILLUMSEN, 2003).

Segundo Landim et al. (2006), o Aterro Bandeirantes em São Paulo, um dos maiores da América Latina, que foi desativado em 2007 depois de 25 anos e cerca de 30 milhões de toneladas de resíduos depositados, em 2004 teve contrato assinado para exploração do biogás gerado no aterro. Foi originada então a Usina Termoelétrica Bandeirantes com capacidade de

produção de 20 MWh, o suficiente para abastecer uma cidade com 25 mil habitantes. Além da energia elétrica gerada, há também a possibilidade de renda através de créditos de carbono. Nos quase três anos de operação da termoelétrica, 1,6 milhões de toneladas de carbono deixaram de ser emitidas, gerando o mesmo número de créditos (LANDIM et al., 2006).

O biogás terá seu potencial energético variando de acordo com a sua composição, sendo que um grande percentual de metano e ausência de impurezas resultará em um gás com um bom potencial de energia. Silva (2009) diz que o poder calorífico do biogás varia de 5.000 a 7.000 kcal/m<sup>3</sup> em função da porcentagem que o metano participa de sua composição, sendo que esse valor pode chegar a 12.000 kcal/m<sup>3</sup> se o dióxido de carbono e outros contaminantes forem eliminados da mistura.

**Tabela 3.** Influência da composição química no poder calorífico do biogás

Metano (%)	Gás Carbônico (%)	Gases Restantes (%)	Poder Calorífico (kcal/m <sup>3</sup> )
60	30	10	5.374
50	40	10	4.613
45	45	10	4.094
40	50	10	3.333
35	55	10	3.240

**Fonte:** PRICE e CHEREMISINOFF, 1981 apud MAIA, 2011

Para utilização do biogás como fonte de energia é necessário que seja feita uma filtração para a retirada de impurezas. O nível de tratamento que o biogás terá que passar irá depender de seu uso final, usá-lo como combustível veicular, por exemplo, irá requerer níveis de tratamento e remoção de impurezas, mais complexos e caros, quando comparados ao seu uso como combustível em motores de geração de energia elétrica.

Existem três motivos principais para o tratamento do biogás: atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico do gás e padronizar o gás produzido (ZANETTE, 2009). Ainda segundo o autor, os principais parâmetros que requerem remoção nos sistemas de tratamento são H<sub>2</sub>S, água, CO<sub>2</sub> e compostos halogenados.

Visto que é uma fonte primária de energia, o biogás pode ser utilizado para iluminação de residências, aquecimento de água, além de aquecimento de caldeiras e fornos em usos industriais (FIGUEIREDO, 2007). Na tabela 4 pode-se comparar a equivalência do biogás com a de outras fontes de energia.

**Tabela 4.** Equivalência do biogás em relação a outros combustíveis

<b>Combustível</b>	<b>Quantidade que se equivale a 1 m<sup>3</sup> de biogás</b>
Carvão vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo diesel	0,55 l
Gasolina amarela	0,61 l
Eletricidade	1,43 kW h
Álcool carburante	0,74 kg

**Fonte:** CARDOSO FILHO 2001 apud FIGUEIREDO 2007.

As taxas de geração de biogás nos aterros sanitários variam de acordo com o tempo de deposição dos resíduos, que vão passar por fases distintas, as quais foram descritas por Vinil et al. (1993):

**Fase I – Ajuste Inicial:** a decomposição da matéria orgânica se dá principalmente em condições aeróbias, pois ainda há oxigênio no interior do aterro, sendo a principal fonte de microorganismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia a terra, usada como material de cobertura dos resíduos.

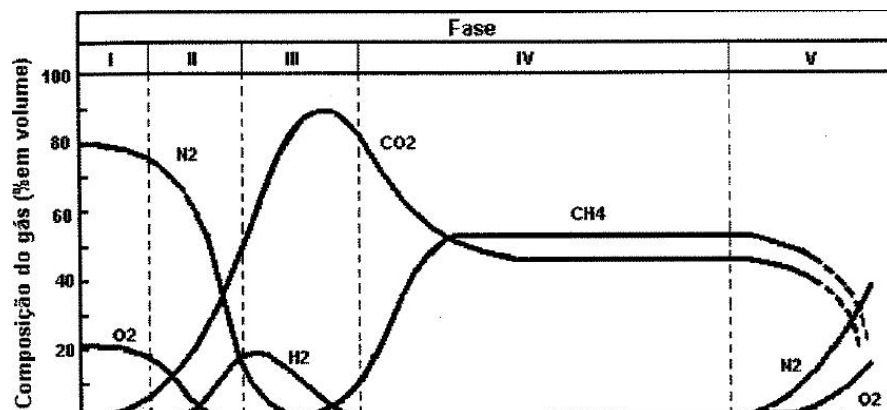
**Fase II – Transição:** a quantidade de oxigênio cai e então começam a se desenvolver as reações anaeróbias. Podem ser monitoradas as reações de redução, através da medição do potencial de óxido-redução do resíduo, que estarão ocorrendo entre -50 a -100 milivolts, sendo que a produção de metano ocorre com valores entre -150 a -300 milivolts. Devido à continuidade da queda do potencial de óxido-redução, os microorganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono, iniciam a conversão da matéria orgânica em produtos intermediários, que são os ácidos orgânicos. Nessa fase ocorre o decaimento do pH do chorume devido a presença dos ácidos formados e das elevadas concentrações de dióxido de carbono no interior do aterro.

**Fase III – Ácida:** as reações da fase anterior são aceleradas com a produção significativa de ácidos orgânicos e quantidades menores de hidrogênio. Então começa uma etapa chamada hidrólise, que envolve a transformação enzimática dos compostos de maior massa molecular em compostos mais apropriados ao uso como fonte de energia pelos microorganismos. Outra etapa, a acidogênese envolve a conversão feita pelos microorganismos dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários de menor massa molecular e pequenas concentrações de ácidos mais complexos. Os

microorganismos envolvidos nessa fase são os não-metanogênicos, que são bactérias anaeróbias estritas e facultativas, sendo o principal gás gerado nessa fase o dióxido de carbono. O chorume tem DBO, DQO e condutividade aumentadas significativamente nessa fase, devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. Metais pesados também serão solubilizados, devido ao baixo pH.

**Fase IV – Metanogênica:** nessa fase predomina a atuação dos microorganismos metanogênicos, que são estritamente anaeróbios e convertem ácido acético e hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A formação de metano e de ácidos acontece de forma simultânea, porém a taxa de formação dos ácidos é bastante reduzida. O pH do chorume começa a aumentar, ficando na faixa de 6,8 a 8,0.

**Fase V – Maturação:** fase que ocorre depois que grande parte do material orgânico já foi degradado e convertido em metano e gás carbônico durante a fase metanogênica. A taxa de geração de biogás diminui consideravelmente, já que, a maioria dos nutrientes foi consumida nas fases anteriores, restando somente substratos de decomposição lenta.



**Figura 2.** Fases de formação do biogás nos aterros sanitários.

**Fonte:** Britto (2006).

De acordo com Vinil et al. (1993) a duração de cada fase de produção de gás do aterros vai depender de fatores como, a distribuição da matéria orgânica pelo aterro, teor de umidade do lixo, disponibilidade de nutrientes e grau de compactação dos resíduos. USEPA (1996) diz que, diversos fatores têm influencia na produção do biogás, dentre os quais se destacam:

**Composição do resíduo:** quanto mais matéria biodegradável presente no resíduo, maior será seu potencial de geração de biogás, sendo que o resíduo pode ter uma composição que varia ao longo do ano de acordo com o clima e com os hábitos da população.

**Umidade do resíduo:** umidades em torno de 60 a 90 % e uma base seca podem aumentar a geração de biogás. Aterros com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume, mantém a umidade do lixo baixa, prejudicando a formação de biogás. Nesses casos a recirculação do chorume pode ser uma atividade efetiva.

**Idade do resíduo:** a geração de biogás segue as fases de decomposição que foram descritas anteriormente, sendo que, a duração de cada fase e o tempo de produção de biogás, irão depender das condições específicas de cada aterro.

**Temperatura da massa de resíduos:** a temperatura afeta a produção de metano. Temperaturas ideais para digestão anaeróbias ficam entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para bactérias termofílicas, sendo que abaixo dos 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do biogás

**pH da massa de resíduos:** o pH ótimo para a produção de metano está entre 7,0 e 7,2. Nos primeiros anos de funcionamento, os aterros apresentam um pH ácido, que vai se aproximando da neutralidade a partir da fase metanogênica.

**Tabela 5.** Período médio de duração das fases de biodegradação dos resíduos sólidos nos aterros sanitários.

Fase	Condição	Período típico de duração
I	Aeróbia	Algumas horas a 1 semana
II	Anóxica	1 a 6 meses
III	Anaeróbia, metanogênica instável	3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica estável	8 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica declinante	1 ano a mais de 40 anos

**Fonte:** BANCO MUNDIAL (2003) apud AUDIBERT (2011).

### 1.3.1 Métodos de Coleta e Formas de Tratamento do Biogás

Em um trabalho realizado em 2003, Tolmasquim afirma que, um sistema padrão para a coleta de biogás, usualmente composto de 50% de CH<sub>4</sub>, 45% de CO<sub>2</sub> e 5% de H<sub>2</sub>S e outros gases, deve apresentar os principais componentes, que são, tubos de coleta, compressor e *flares*.

Na norma que define os padrões de construção dos aterros sanitários (NBR 13.896) já está previsto a instalação dos tubos de coleta de gás. Tolmasquim (2003) diz que normalmente a coleta de gás se inicia após o fechamento da célula do aterro, onde será formado um poço de

gás. O sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás necessário (LANDIM et al., 2006). Ainda segundo o autor existem duas configurações de sistemas para realização da coleta, podendo ser usados poços verticais ou trincheiras horizontais, porém independentemente do tipo usado, o sistema terá que ser conectado a uma tubulação lateral com objetivo de transportar o gás para um coletor principal.

Um compressor, de acordo com Muylaert (2000), é necessário para trazer o gás dos poços de coleta e também poderia ser usado na compressão do gás antes do mesmo entrar no sistema de recuperação de energia. O tamanho, o tipo e o número de compressores necessários dependerão da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão, que tipicamente, é determinado pelo equipamento de conversão energética (LANDIM et al., 2006).

Os *flares*, segundo Muylaert (2000), são dispositivos simples responsáveis pela ignição e queima do biogás. Existem *flares* abertos e também enclausurados que diminuem incômodos relacionados ao ruído e a iluminação. Estes são mais caros, mas podem ser preferíveis (ou requeridos) porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiência de combustão ligeiramente alta (LANDIM et al., 2006).



**Figura 3.** Flare aberto realizando a queima de biogás.

**Fonte:** Feam, 2007.

Os sistemas de tratamento de biogás são basicamente mecanismos que viabilizam a passagem do biogás por uma solução aquosa que retém a maior parte das impurezas, aumentando a concentração do metano. Existem diferentes tipos de soluções que fazem essa filtração do biogás, sendo que podem ser mais ou menos eficientes, o que irá definir o custo de instalação e de manutenção do sistema de tratamento do biogás, sendo que o tipo de tratamento a ser utilizado irá variar com a finalidade de uso do gás.



### 1.3.2 Formas de Aproveitamento Energético do Biogás

Existem diversos meios de utilização do biogás que é gerado nos aterros, o Manual de Aproveitamento de Biogás – Aterros Sanitários (2009) expõe algumas dessas principais formas:

**Geração de energia elétrica:** se dá pela utilização de motores que vão utilizar o biogás como combustível para a geração de energia, esses motores podem ser motores Ciclo Otto ou por micro turbinas a gás. Um exemplo de onde essa tecnologia é aplicada é no Aterro Sanitário Municipal de Bandeirantes em São Paulo, onde foram implementados 24 grupos geradores, motores ciclo Otto importados que foram acoplados a geradores, estes possuem uma capacidade de geração de 22 MW, sendo considerado o maior projeto de geração de energia elétrica, exclusivamente a biogás, do mundo. De acordo com representantes da empresa responsável pela termoeletrica do aterro, cerca de 8 milhões de toneladas de gás deixarão de ser lançados na atmosfera num período de 15 anos. Também há outra central térmica instalada no Aterro Sanitário de São José, São Paulo, que também possui uma capacidade geração de cerca de 22 MW, assim como a do aterro Bandeirantes. Segundo Hamilton (2003), existe em Los Angeles a maior instalação de micro turbinas do mundo, com 50 delas, com capacidade de 30 KW cada, alimentadas com biogás operando em paralelo.

**Geração de energia térmica:** nesse tipo de utilização do biogás é queimado em uma caldeira para a geração de calor, que promove o aquecimento de água gerando vapor, que é utilizado em processos industriais ou gera energia elétrica através do acionamento de turbinas a vapor acopladas a um gerador. Para essa utilização é necessário que as unidades cogeneradoras estejam próximas, pois o calor em forma de vapor da água não é transportado a grandes distâncias. Um exemplo de utilização ocorre na Alemanha, onde um aterro tem seu calor gerado pela queima do biogás transportado até uma indústria de papel e celulose que fica nas mediações do aterro sanitário. Também é possível a utilização do calor gerado pela queima do biogás como forma de tratamento do chorume que é gerado no aterro através da evaporação. Como no aterro sanitário de Tremembé – São Paulo, onde o chorume é armazenado em tanques e depois enviados a um sistema de tratamento do aterro, com a utilização do biogás o aterro teve uma economia de 42% em relação aos gastos com tratamento e transporte do chorume antes encaminhado a SABESP.

**Produção de combustível veicular:** Apesar de o biogás poder ser utilizado em qualquer aplicação destinada ao gás natural, para seu uso veicular existe a necessidade de remoção de alguns de seus componentes, tais como umidade, ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), dióxido

de carbono (CO<sub>2</sub>) e partículas (ADNETT, 2000). Para utilização do gás de aterro como combustível veicular é necessário um tratamento mais eficiente e conseqüentemente com um maior custo, com objetivo de deixar o biogás com características próximas as do gás natural veicular, que segundo a Agencia Nacional do Petróleo – ANP (2013), a percentagem mínima de metano deve ser de 86% e a máxima de gás carbônico de 5%. Na Alemanha o abastecimento de frota veicular com o biogás é bem comum. No Brasil em 1985, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana – Comlurb, no Rio de Janeiro, iniciou a utilização do biogás como combustível para seus veículos e chegou a possuir uma frota de 150 veículos abastecidos com biogás, além de abastecer táxis, o projeto durou cerca de 5 anos.

**Iluminação a gás:** através da queima direta do biogás é feita a iluminação do local. Há um sistema de iluminação a biogás que se encontra implementado no aterro sanitário em Caieiras – São Paulo, porém, ainda em fase de testes, portanto não há dados disponíveis em relação ao funcionamento do sistema.

Além da utilização do biogás como fonte de energia alternativa, há também a possibilidade da venda do mesmo através do mecanismo de crédito de carbono. O crédito de carbono deve ser visto como uma das fontes de recursos que pode contribuir para viabilizar empreendimentos de saneamento ambiental em aterros, com aproveitamento energético do biogás (Manual de Aproveitamento de Biogás, 2009). Ainda segundo o manual, os negócios oriundos do mercado de carbono apresentam vantagens econômicas, ambientais e sociais para todo o planeta, sendo os recursos financeiros obtidos por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), captados apenas por projetos com enfoque sustentável, adoção de medidas preventivas a poluição e contribuição ao desenvolvimento social do local foco do projeto.

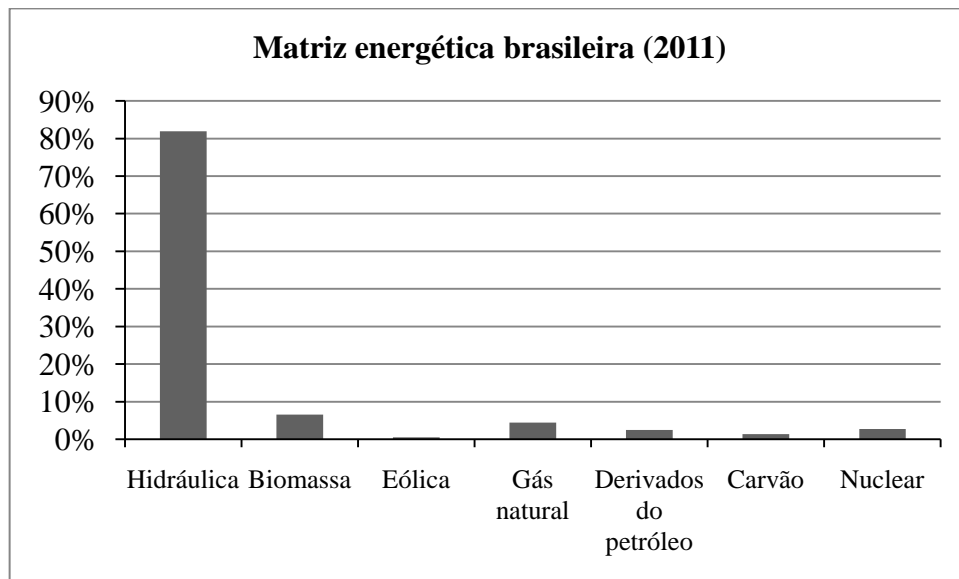
#### **1.4 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

No Brasil há uma disponibilidade hídrica muito grande, fator esse, que de certa forma contribui, para que os investimentos em energias alternativas sejam menores aqui em comparação a outros países, já que a energia a partir de hidroelétricas é uma energia que possui uma maior viabilidade econômica e se encontra de forma abundante em nosso país.

Países que não possuem recursos hídricos como o Brasil, investem em fontes alternativas, principalmente na solar, eólica e de biomassa. De acordo com Willumsen (2001), os países que mais exploram o potencial energético dos aterros sanitários são Estados Unidos,

com 325 projetos de recuperação e Alemanha, com 150, sendo que o Brasil aparece com apenas 6 projetos de recuperação.

Em 2012 a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) divulgou o Balanço Energético Nacional com base no ano de 2011 e através deste Balanço pode-se verificar a grande dependência brasileira da energia hidráulica, sendo esta responsável por mais de 80% da energia elétrica gerada no país, como é possível verificar na figura 4.



**Figura 4.** Matriz energética brasileira no ano de 2011.

**Fonte:** EPE (2012).

A biomassa foi responsável por apenas 6,6% da energia elétrica total gerada em 2011, muito pouco se comparada à energia gerada pelas hidroelétricas. Portanto com o plano brasileiro de se extinguir os lixões e implantar os aterros sanitários em todo o território nacional, a exploração energética do biogás gerado nesses aterros seria importante para diminuir essa grande dependência brasileira das hidroelétricas.

## 1.5 CHORUME

A constante lixiviação do resíduo pelas águas da chuva, assim como a sua decomposição, resultam na formação de um líquido de cor acentuada e odor desagradável, de elevado potencial poluidor, comumente denominado de chorume (BRITTO, 2006).

Os aterros sanitários devem impedir que o chorume gerado se infiltre no solo, podendo atingir o lençol freático. Portanto, segundo Zanette (2009), o principal objetivo dos aterros sanitários é isolar os resíduos sólidos do ambiente em um invólucro de solo compactado e

plástico, sendo esta cobertura plástica feita geralmente por uma camada fina de polietileno de alta densidade combinada com o solo.

Segundo Serafim et al. (2003) o chorume é originado de 3 diferentes formas, sendo elas: da umidade natural do lixo, que aumenta em períodos chuvosos; da água de constituição da matéria orgânica, que escorre durante os processos de decomposição; e das bactérias existentes no lixo, que expõem enzimas e estas dissolvem a matéria orgânica com formação de líquido.

De acordo com Silva (2005), o volume de chorume produzido nos aterros sanitários varia sazonalmente em função das condições climáticas da região e do sistema de drenagem local, além da influência da temperatura, índices de precipitação pluviométrica, evapotranspiração, existência de material de cobertura nas células do aterro e outros fatores, porém segundo um estudo realizado pelo autor, o principal fator que influencia na produção do chorume é a precipitação pluviométrica.

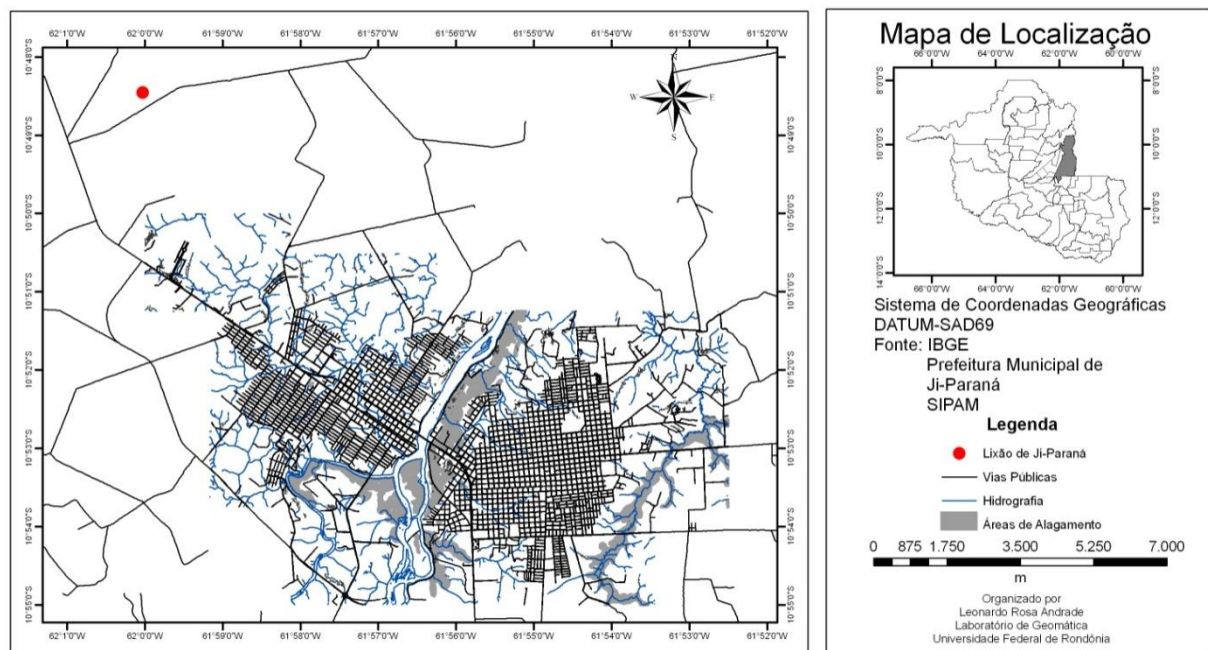
O chorume que é coletado nos aterros sanitários, apresenta segundo Tchobanoglou et al. (1993) DBO<sub>5</sub> típica de 10.000 mg/l, sendo portanto um líquido com uma carga orgânica extremamente elevada. Durante a fase ácida o chorume tende a apresentar segundo Hamada (2003), pH ácido e elevados índices de DBO, DQO e metais pesados, sendo que na fase metanogênica o pH varia entre 6,5 e 7,5, e os valores de DBO e DQO são significativamente menores.

Esse percolato gerado pela decomposição do lixo precisa ser captado e tratado. Segundo a CETESB (2013) o tratamento pode ser feito no próprio local ou então transportado para um local apropriado, geralmente uma estação de tratamento de esgotos. Os tipos de tratamento mais convencionais são de acordo com a CETESB, o tratamento biológico através de lagoas anaeróbias, aeróbias e lagoas de estabilização, o tratamento por oxidação através da evaporação e queima do chorume e o tratamento químico através da adição de substâncias químicas ao chorume.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido para estimativa do biogás que será produzido no futuro aterro sanitário do município de Ji-Paraná, que será localizado, ao lado do atual lixão do município, conforme demonstra a Figura 5.

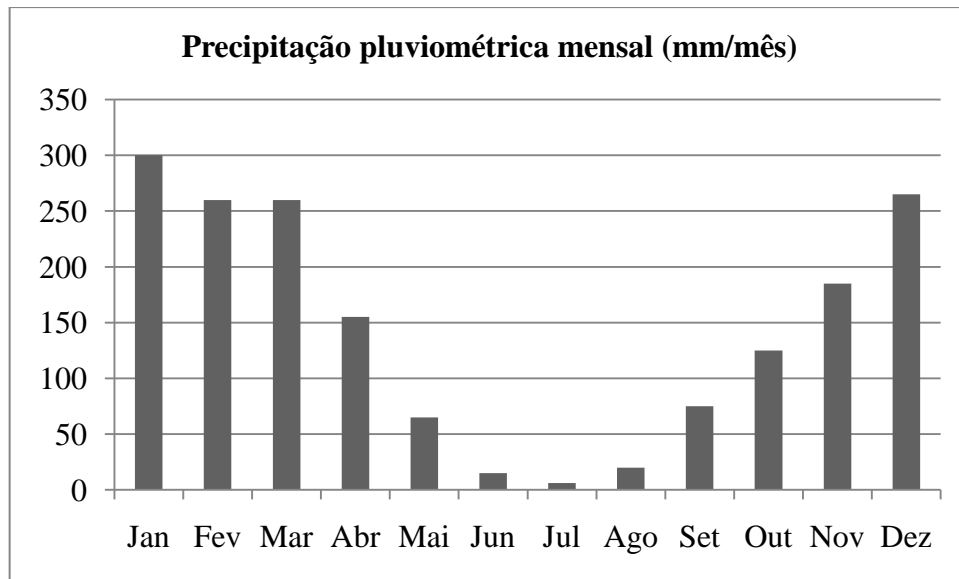


**Figura 5.** Mapa de localização do município de Ji-Paraná e do lixão do município. Ji-Paraná, Rondônia. Setembro de 2011.

**Fonte:** Santos (2011).

O futuro aterro sanitário de Ji-Paraná deverá se localizar no terreno ao lado do atual lixão, a área do futuro aterro terá 45 ha e segundo informações obtidas junto a Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Município de Ji-Paraná – AGERJI (2013) atualmente depende de liberação da SEDAM, a previsão é de que o aterro sanitário tenha uma vida útil de 20 anos.

A precipitação anual no município, segundo a série histórica de 21 anos (1976 a 1996), disponível no Sistema de Informações Hidrológicas, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas – ANA, variou de 680 a 2650 mm/ano, apresentando uma média em todo o período de 1740 mm/ano. A região apresenta uma estação chuvosa e uma estação seca, que são bem definidas, como pode ser verificado através do gráfico a seguir com a variação da precipitação pluviométrica ao longo dos meses.



**Figura 6.** Gráfico com a precipitação pluviométrica média mensal em um período de 21 anos (1976 a 1996), Ji-Paraná – RO.

## 2.2 MODELOS PARA ESTIMATIVA DO BIOGÁS

### 2.2.1 Equação de inventário desenvolvida pelo IPCC (1996)

Esse método que foi apresentado pelo IPCC em 1996 é um método simples para estimativa de emissão de metano em aterros sanitários, Britto (2006) explica que esse método envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável que está presente no resíduo, assim, a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo é calculada. O método utiliza dados estatísticos da população e características dos resíduos sólidos urbanos.

A equação utilizada pelo método é a seguinte:

$$CH_4 = (\text{PopUrb} \times \text{Taxa RSU} \times \text{RSDf} \times L_0 - R) \times (1 - \text{OX}) \quad (1)$$

Sendo que:

$CH_4$ : quantidade de gás metano emitido em toneladas de  $CH_4$ /ano;

PopUrb: número de habitantes residentes na área urbana;

Taxa RSU: quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados por ano, dado em toneladas de RSU/habitante x ano;

RSDf: fração dos resíduos que é coletada e depositada no aterro sanitário;

$L_0$ : potencial de geração de metano dos resíduos em toneladas de  $CH_4$ /toneladas de resíduo;

R: metano que é captado e aproveitado em toneladas de CH<sub>4</sub>/ano;

OX: fator de oxidação do metano na superfície do aterro sanitário.

O fator de oxidação do metano (OX) representa a quantidade de metano que é oxidada, seja na camada de resíduos ou na superfície do aterro (GRACINO, 2010). De acordo com o IPCC (1996), esse fator ainda vem sendo estudado e enquanto novos dados não são apresentados utiliza-se o valor de OX como sendo zero. Miller et al. (2009) utilizaram em seu trabalho o fator de oxidação como sendo 0,1 para aterros bem manejados.

O potencial de geração de metano dos resíduos (L<sub>0</sub>) é um dado de muita importância, além de ser utilizado na própria metodologia desenvolvida pelo IPCC, também pode ser utilizado em outras metodologias e até mesmo em *softwares* desenvolvidos para estimativa de metano gerado em aterros sanitários. O L<sub>0</sub> é calculado através da seguinte fórmula:

$$L_0 = FCM \times COD \times CODf \times F \times (4/3) \quad (2)$$

Sendo:

L<sub>0</sub>: o potencial de geração de metano dos resíduos em toneladas de CH<sub>4</sub>/tonelada de resíduo;

FCM: fator de correção de metano;

COD: carbono orgânico degradável, dado em tonelada de C/tonelada de resíduo;

CODf: fração de COD dissociada;

F: fração do metano presente no biogás em volume;

(4/3): fator de conversão do carbono em metano, dado em tonelada de CH<sub>4</sub>/tonelada de C.

O fator de correção do metano (FCM) varia de acordo com a qualidade da compactação dos resíduos, pois considera que a maneira como os resíduos são depositados influencia na geração de metano do aterro sanitário. O FCM pode ser de: 0,4 para lugares de deposição inadequados e com profundidades de lixo menores que 5 metros; de 0,8 para lugares de deposição inadequados, porém com profundidades de lixo maiores que 5 metros; e 1 para locais adequados, com deposição controlada de lixo, material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno. O valor de F, que representa a fração de metano que está presente no biogás pode variar, nos aterros sanitários segundo Persson et al. (2006) o percentual de metano em sua composição varia de 35 a 65 %.

Outra variável de extrema importância é a quantidade de carbono degradável presente nos resíduos (COD), que leva em conta a composição gravimétrica dos resíduos sólidos

urbanos e a quantidade de carbono presente em cada componente do lixo, o que pode ter grandes variações de um local para outro.

**Tabela 6.** Teor de carbono orgânico degradável em cada componente dos resíduos.

<b>Componente</b>	<b>Porcentagem de COD (em massa)</b>
A – papel e papelão	40
B – resíduos de parques e jardins	17
C – restos de alimentos	15
D – tecidos	40
E – madeira*	30

\* excluindo a fração de lignina por se decompor muito lentamente.

O COD é calculado da seguinte forma:

$$\text{COD} = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E) \quad (3)$$

Sendo:

- A: fração de papel e papelão dos resíduos;
- B: fração de detritos de parques e jardins dos resíduos;
- C: fração de restos de alimentos dos resíduos;
- D: fração de tecidos dos resíduos;
- E: fração de madeira dos resíduos.

Há ainda a fração dissociada de carbono orgânico degradável (COD<sub>f</sub>), que segundo Birgemer e Crutzen (1987) é a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica e varia em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário. Assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos (LDRS) permanece constante por volta dos 35°C não obstante da temperatura ambiente (BIRGEMER E CRUTZEN, 1987). Sendo calculada pela seguinte fórmula:

$$\text{COD}_f = 0,014 T + 0,28 \quad (4)$$

Não há previsão do ano em que o aterro esteja pronto e em funcionamento, portanto, adotou-se o ano de 2015 de uma maneira representativa, pois se acredita que de acordo com a situação atual, o aterro não entre em funcionamento antes desta data, sendo que, caso inicie



suas operações em anos posteriores a 2015 não haverá influência significativa na geração de metano, pois o único dado que irá se alterar será o do número de habitantes, que será maior.

O método adotado para estimar o crescimento populacional do município foi o de Projeção Geométrica, que calcula o crescimento populacional em função da população existente a cada instante. Esse método foi escolhido, pois foi o mesmo utilizado na elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico de Ji-Paraná (2012). O cálculo é feito através das seguintes equações:

**Tabela 7.** Fórmulas matemáticas utilizadas para projeção populacional geométrica.

Método	Taxa de Crescimento	Fórmula da Projeção	Coefficientes
Projeção Geométrica	$dP/dt = Kg \times P$	$P_t = P_0 (1 + i)^{(t-t_0)}$	$i = e^{Kg} - 1$

Sendo que:

$dP/dt$  = taxa de crescimento da população em função do tempo;

$P_0$  = população no ano  $t_0$ ;

$P_t$  = população estimada no ano  $t$  (hab);

$Kg$  = coeficiente

Foi utilizado o modelo de progressão geométrica com uma taxa anual de crescimento de 0,93%, considerando além da taxa de crescimento, uma taxa de urbanização do município, com a tendência de que a população urbana cresça mais que a população rural. Esta metodologia foi escolhida, pois foi a mesma adotada na elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico do município de Ji-Paraná, sendo que o valor de 0,93% é uma média das taxas de crescimento encontradas nos censos de 2000 e 2010. As taxas de urbanização consideradas também foram as utilizadas no plano citado anteriormente, sendo que esta se encontra atualmente na faixa de 88% e conforme o Plano Municipal estima, passa a 90% em 2020 e chega aos 95% a partir de 2031.

Essa metodologia desenvolvida pelo IPCC é importante, pois os valores de COD e de  $L_0$  que são encontrados através dela são bastante utilizados também em outras metodologias, das quais algumas serão apresentadas.

### 2.2.2 Método de Projeto

Há uma metodologia desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos que é recomendada para aterros sanitários que ainda não estão em funcionamento, se

encontrando apenas em fase de projeto, a CETESB/SMA (2003) explica que esse método é dividido em duas etapas, uma enquanto o aterro ainda está em operação e outra que é após o seu fechamento, portanto existem duas equações a ser utilizadas:

$$\text{Durante a vida útil do aterro: } Q = F \times R \times L_0 \times (1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

$$\text{Após o fechamento do aterro: } Q = F \times R \times L_0 \times (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (6)$$

Sendo que:

Q: metano gerado em m<sup>3</sup>/ano;

F: fração de metano presente no biogás;

R: quantidade média de resíduos que serão depositados durante a vida útil do aterro em kg RSU/ano;

L<sub>0</sub>: potencial de geração de biogás em m<sup>3</sup> de biogás/kg resíduo;

k: constante de decaimento;

c: tempo decorrido em anos desde que o aterro foi fechado;

t: tempo decorrido em anos desde que o aterro foi aberto.

Nesse método há a utilização da constante de decaimento (k), que varia em função da disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade e precipitação pluviométrica da região, estes valores variam de 0,01 ano<sup>-1</sup> a 0,09 ano<sup>-1</sup> segundo a Tabela 8.

**Tabela 8.** Valores sugeridos para a constante de decaimento (k).

Precipitação Anual	Valores para k (ano <sup>-1</sup> )		
	Relativamente inerte	Decomposição moderada	Decomposição alta
Até 250 mm	0,01	0,02	0,03
De 250 a 500 mm	0,01	0,03	0,05
De 500 a 1000 mm	0,02	0,05	0,08
Maior que 1000 mm	0,02	0,06	0,09

**Fonte:** World Bank (2003).

Existe também outra maneira para que seja definido o valor da constante de decaimento do metano (k) que é através da seguinte fórmula:

$$k = \ln(2)/t_{1/2} \quad (7)$$

Sendo que, o valor de  $t_{1/2}$  é o tempo médio para que 50% da decomposição dos resíduos ocorra, segundo o IPCC (1996) para os resíduos sólidos urbanos esse tempo varia entre 4 e 10 anos. Os valores encontrados na literatura encontram-se dentro de uma faixa de 0,003 a  $0,21 \text{ ano}^{-1}$  (USEPA, 1991 apud BRITO FILHO, 2005).

Nota-se que nesse método é utilizado o potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), que é estimado da mesma maneira como foi apresentado pelo IPCC (1996), através da equação (2).

### 2.2.3 LandGEM – Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02

O *LandGEM* é uma planilha desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos que busca estimar as emissões de biogás especificamente para aterros sanitários. O programa é baseado em dados empíricos obtidos nos Estados Unidos, o que pode prejudicar as estimativas para aterros sanitários instalados em outras partes do mundo. Está disponível no site da Agencia de Proteção Ambiental Americana, através do endereço [www.epa.gov](http://www.epa.gov).

O *software* consiste em uma planilha no ambiente *Microsoft Office Excel*, onde o usuário insere os dados de seu projeto, são eles: os anos de abertura e fechamento do aterro, parâmetros de índice de geração de metano, capacidade de geração de metano do resíduo, percentual de metano em relação ao volume de biogás e o total de resíduo depositado no aterro a cada ano de funcionamento.

Inicialmente na tela de inserção de dados pelo usuário, denominada “*Users Input*” é necessário que sejam inseridos os seguintes dados:

- Anos de inicio e de encerramento de operação do aterro sanitário;
- O índice de geração de metano ( $k$ ), que pode ser calculado e especificado pelo usuário através da tabela 8 ou pela equação (7) ou então pode ser escolhido o valor sugerido pelo programa, que varia de 0,02 a  $0,7 \text{ ano}^{-1}$ , dependendo dos índices de umidade do aterro sanitário;
- O potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), sendo que, este pode ser calculado através da equação (2) seguindo toda a metodologia apresentada pelo IPCC ou então, pode ser adotado um dos valores sugeridos pelo programa que variam de 96 a  $170 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ /tonelada de resíduo;

- A concentração de compostos orgânicos não-metanos, que são segundo Aquino (2006) os compostos oxigenados, os halogenados e os hidrocarbonetos, e a segunda classe na qual o metano faz parte. Quando conhecido, este valor pode ser introduzido pelo usuário e caso contrário há a opção para quando essa concentração é desconhecida.
- A fração de metano presente no biogás gerado, que caso conhecida pode ser inserida pelo usuário ou então se pode adotar o valor padrão de 50%;
- A quantidade de resíduos sólidos depositadas no aterro sanitário em cada ano em que o mesmo se encontra em funcionamento.

Ao final da simulação, o programa fornece tabelas com as quantidades anuais geradas de biogás, metano, dióxido de carbono, além de outros componentes que são emitidos em quantidades muito pequenas, como o butano, monóxido de carbono, etanol, sulfeto de hidrogênio, mercúrio e outros que tem suas emissões estimadas em partes por milhão por volume. O programa também gera um gráfico onde podem ser verificadas as emissões do biogás ao longo dos anos em que o aterro sanitário se encontra em funcionamento e também nos anos posteriores ao seu fechamento.

#### **2.2.4 Programa Biogás Geração e Uso Energético**

O programa Biogás Geração e Uso Energético foi desenvolvido em 2001, resultado de convênio firmado entre o Governo do Estado de São Paulo, a Secretaria de Estado do Meio Ambiente, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e o Ministério da Ciência e Tecnologia. O programa estima a quantidade de biogás gerado nos aterros sanitários através de dados inseridos pelo usuário, é necessário para o cálculo, o valor da constante de decaimento ( $k$ ), do potencial de geração de biogás dos resíduos ( $L_0$ ) e da quantidade resíduos que é depositada no aterro.

A simulação tem início na parte das “características do aterro”, onde é preciso inserir dados básicos, como o nome do aterro sanitário, o estado e o município onde este se encontra, além de dados referentes a estabelecimentos próximos e forma de gerenciamento do aterro sanitário, porém, estes são dados que não influenciam no cálculo da estimativa de biogás gerado, servindo apenas como informações complementares. Para que a simulação possa ser feita, é necessário pelo menos a inserção do nome do aterro sanitário e o município onde se localiza.

Feito isso o usuário pode iniciar a simulação no programa, em que as informações utilizadas nas estimativas são:

- A constante de decaimento (k) que pode ser definida com base na tabela 8 ou pela equação (7), ou então, adotado um valor sugerido pelo programa, valor este que é igual a  $0,08 \text{ ano}^{-1}$ ;
- O potencial de geração de biogás dos resíduos ( $L_0$ ) que pode ser calculado através da equação (2) apresentada pelo IPCC, ou caso não haja dados, o programa sugere o valor de  $0,12 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4/\text{kg}$  de resíduo;
- O fluxo de resíduos em toneladas/ano no aterro sanitário, sendo que quando selecionado esta opção para preenchimento é aberta uma nova janela onde o usuário deverá inserir:
  - ✓ Os anos de abertura e de fechamento do aterro sanitário;
  - ✓ A população do município onde o aterro está instalado;
  - ✓ A taxa de crescimento populacional;
  - ✓ Taxa de geração de resíduos por habitante;
  - ✓ Índice de coleta dos resíduos.

O programa também considera os valores de linha de base do projeto, Segundo Shirmer et al. (2010), a linha de base de um projeto de um mecanismo de desenvolvimento limpo pode ser definida, como as emissões de gases de efeito estufa anteriores a implantação deste projeto. Para os cálculos da linha de base do projeto, deve-se, inserir dados como o de linha de base da queima, energia elétrica evitada de ser gasta, eficiência de coleta do biogás e eficiência da queima do biogás. Esses valores em situações não conhecidas pelo usuário, pode-se adotar os valores sugeridos pelo programa, sendo eles:

- Linha de base de queima = 20%;
- Energia elétrica evitada ( $\text{tCO}_2/\text{MWhevit}$ ) = 0,2782;
- Eficiência de coleta de biogás = 75%;
- Eficiência da queima de biogás = 95%.

Inserido os dados, o programa apresentará um gráfico com a vazão de metano ao longo dos anos e outro com a potência (kW) energética estimada que poderá ser gerada com o biogás proveniente do aterro sanitário.

Também é apresentada em forma de tabelas, além da vazão de metano, a população estimada ao longo dos anos, o lixo que será gerado em cada ano e a quantidade de lixo que vai sendo acumulada no aterro sanitário ao longo dos anos.

### 2.3 EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA DO BIOGÁS

Para a conversão de biogás em energia, é importante verificar a forma de tratamento que o biogás receberá e a fração de biogás que será recuperada e utilizada para conversão energética. De forma a verificar o potencial energético do aterro que será construído em Ji-Paraná foi feito o cálculo da energia elétrica que seria gerada com a utilização de um motogerador de mesmo modelo instalado na planta de biogás do aterro Essencis – CTR Caieiras, o motogerador LANDSET, que foi objeto de estudo de Figueiredo (2007).

O motogerador LANDSET é desenvolvido pela empresa Basmetano e segundo a fabricante (BRASMETANO, 2007 apud Figueiredo, 2007), é capaz de gerar energia elétrica a partir do biogás, com potência nominal de 230 kW, sendo fabricados no Brasil e fornecidos prontos para instalação, possuindo vida útil de 40 a 80 mil horas. Figueiredo (2007) cita que o calor rejeitado pelos motores pode ser utilizado no tratamento do chorume através da sua evaporação.



**Figura 7.** Motogerador LANDSET.

**Fonte:** Figueiredo (2007).

Segundo o fabricante o motor LANDSET possui uma eficiência elétrica de 28%, sendo possível estimar a vazão de biogás necessária para a alimentação do motor para gerar uma potência de 200 kW através da equação 8.

$$\text{Pot} = (\text{Q} \times \text{PCI} \times \text{n})/860 \quad (8)$$

Sendo que:

PCI: poder calorífero do biogás;

Pot: potência gerada;

n: eficiência elétrica do motor;

860: conversão kcal para kW;

Q: vazão de biogás em m<sup>3</sup>/h

## 2.4 MODELO PARA ESTIMATIVA DO CHORUME – MÉTODO SUÍÇO

De acordo com OLIVEIRA (1997) apud SOBRINHO (2000) as relações entre precipitação pluviométrica e escoamento de líquidos percolados, foram estudadas para vários aterros por Hans Jurgen Eling. Com base neste estudo, na Suíça, uma sistemática empírica para determinação das descargas de percolados, denominado de Método Suíço (SOBRINHO, 2000).

É ressaltado por Melo (2000) que a possibilidade de conhecer a faixa de produção de chorume tem importância para a avaliação de um sistema de coleta e tratamento do mesmo, pois este sistema deve atender ao volume de chorume produzido no aterro a fim de garantir a preservação das águas superficiais e lençóis freáticos.

Os principais fatores levados em conta pelo método são: a precipitação pluviométrica e o grau de compactação dos resíduos depositados no aterro, sendo este um método bastante simplificado já que, segundo Sobrinho (2000), não considera o tipo de solo de cobertura e a declividade dessa camada.

A equação utilizada para calcular a vazão de chorume através desse método é a seguinte:

$$\text{Q} = (1/t) \times \text{P} \times \text{A} \times \text{k} \quad (9)$$

Sendo que:

Q: vazão média em l/s;

P: precipitação média mensal em mm;

A: área do aterro sanitário em m<sup>2</sup>;

t: número de segundos em um mês;

k: coeficiente que varia com o grau de compactação do lixo.

O coeficiente  $k$  varia da seguinte forma segundo Sobrinho (2000):

- 0,25 a 0,5 para resíduos com peso específico entre 0,4 e 0,7 t/m<sup>3</sup>
- 0,15 a 0,25 para resíduos com peso específico maior que 0,7 t/m<sup>3</sup>

Portanto vemos que um resíduo bem compactado no aterro sanitário acarretará numa menor vazão de chorume. Segundo Carmo Junior (2008), resíduos urbanos compactados apresentam valores de peso específico que variam entre 0,6 e 0,8 t/m<sup>3</sup>.

Para cálculo da vazão de chorume no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná, foi necessário também, estimar a área que será ocupada pela deposição dos resíduos no futuro aterro ao final dos 20 anos de atividade prevista para o mesmo. Para tal estimativa foi utilizado como base o trabalho Resíduos Sólidos Urbanos: Coleta e Destinação Final (2006), realizado pela ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Seção Ceará.

Para o cálculo foi considerado que o aterro que será construído adote o Método de Trincheira, que é o método utilizado no atual lixão de Ji-Paraná e também o utilizado pela ABES (2006), que consiste na escavação de trincheiras com dimensões pré-estabelecidas, sendo que, as que foram utilizadas pela ABES (2006) foram 50 m x 70 m e 8 m de profundidade.

Dessa forma através da estimativa dos resíduos sólidos que serão gerados e depositados no aterro sanitário ao longo de sua vida útil é possível calcular o volume ocupado pelos resíduos, o número de trincheiras necessárias e a área ocupada por essas trincheiras.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 GERAÇÃO DE METANO E EQUIVALENCIA ENERGÉTICA

##### 3.1.1 Equação de Inventário Desenvolvida Pelo IPCC (1996)

###### a) cálculo do carbono degradável (COD)

Para o cálculo do carbono degradável dos resíduos foi utilizado o estudo de Santos (2011), que realizou a análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de Ji-Paraná – RO, os resíduos quantificados por ele foram divididos em matéria orgânica, papel/papelão, plástico filme, plásticos, metais, vidro e outros. Desses materiais os papeis e papelões se enquadram segundo a tabela 6 como o componente A e a matéria orgânica foi considerada como o componente C. Os outros componentes não tiveram representação, devido ao estudo realizado por Santos (2011) não dividir os resíduos entre os componentes específicos para a o método de estimativa apresentado pelo IPCC, portanto, através da equação (3) o COD encontrado foi o seguinte:

$$\text{COD} = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E) \quad (3)$$

$$\text{COD} = (0,4 \times 0,159) + (0,15 \times 0,616)$$

$$\text{COD} = 0,1554 \text{ t de C/t de resíduo}$$

###### b) cálculo da fração do carbono degradável dissociada (CODf)

Para o cálculo da fração do carbono degradável dissociada, que segundo Birgerner e Crutzen (1987) é a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica e varia em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário, foi considerado esta temperatura como sendo 35°C, já que ainda segundo o autor assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos permanece por volta dos 35°C. Portanto, devido ao aterro sanitário estar apenas em fase de projeto e não ser possível a medição da temperatura na zona anaeróbia, foi considerado no cálculo essa temperatura como sendo 35°C, substituindo os valores na equação (4), o CODf encontrado foi:

$$\text{CODf} = (0,014 \times 35) + 0,28 \quad (4)$$

$$\text{CODf} = 0,77$$

### c) cálculo do potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ )

No cálculo do potencial de geração de metano dos resíduos, importantes considerações foram feitas. O fator de correção de metano (FCM) varia de acordo com a qualidade do aterramento dos resíduos, pois considera que a maneira como os resíduos são depositados influencia na geração de metano do aterro sanitário. O FCM pode ser de: 0,4 para lugares de deposição inadequados e com profundidades de lixo menores que 5 metros; de 0,8 para lugares de deposição inadequados, porém com profundidades de lixo maiores que 5 metros; e 1 para locais adequados, com deposição controlada de lixo, material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno.

Para o cálculo foi considerado que o aterro que será construído será bem manejado, logo o FCM foi considerado como sendo igual a 1. O valor de F, que representa a fração de metano que está presente no biogás pode variar, nos aterros sanitários segundo Persson et al. (2006) o percentual de metano em sua composição varia de 35 a 65 %. Para o cálculo foi considerado um valor médio entre os definidos por Persson et al. (2006), portanto o valor de F foi considerado como 50%. Assim o valor encontrado através da equação (2) do potencial de geração de metano dos resíduos foi de:

$$L_0 = \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{CODf} \times F \times (4/3) \quad (2)$$

$$L_0 = 1 \times 0,1554 \times 0,77 \times 0,5 \times (4/3)$$

$$L_0 = 0,07977 \text{ t de CH}_4/\text{t de resíduo}$$

### d) cálculo da quantidade metano gerado ( $\text{CH}_4$ )

Para calcular as quantidades de metano geradas a cada ano foi preciso fazer uma estimativa do crescimento da população no município de Ji-Paraná, também foi considerado que o aterro comece a receber resíduos no ano de 2015 e seja fechado no ano de 2035, totalizando um tempo de vida de 20 anos, que é também o tempo estimado pela AGERJI.

A taxa de geração de resíduos sólidos usada no cálculo foi a encontrada por Santos (2011), de 0,684 kg/hab/dia. Como o próprio autor cita essa taxa pode variar em épocas como de exposição agropecuária, carnavais e festas de fim de ano, sendo necessário também se atentar ao crescimento demográfico e econômico da cidade, pois estes fatores influenciam diretamente na quantidade de resíduos da cidade. A estimativa da taxa de geração de resíduos por habitante é uma variável difícil de ser calculada, pois dependerá de vários fatores, como os hábitos que a população deverá adquirir e o crescimento econômico do município. A CETESB realizou em 1998 o Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de

Resíduos para os anos de 1990 a 1994, usando em suas estimativas a taxa de 0,5 kg/hab/dia para todos os anos. Portanto devido a esses fatores, optou-se por utilizar o valor de 0,684 kg/hab/dia para as estimativas em Ji-Paraná.

Atualmente a taxa da população urbana atendida pela coleta pública dos resíduos, segundo a empresa responsável pela coleta é de 100%, assim esse valor foi considerado para utilização do modelo para os próximos 20 anos. O valor de R é considerado como sendo zero, pois ele representa a quantidade de metano que é captada no aterro e o valor de oxidação do metano (OX) foi considerado como sendo 0,1 já que Miller et al. (2009) utilizaram em seus trabalhos o fator de oxidação como sendo 0,1 para aterros bem manejados. Sendo assim, com a equação (1), para o ano de 2015 a quantidade de metano gerada no aterro sanitário seria de:

$$CH_4 = (\text{PopUrb} \times \text{TaxaRSU} \times \text{RSDf} \times L_0 - R) \times (1 - \text{OX}) \quad (1)$$

$$CH_4 = (107.479 \times 0,250 \times 1 \times 0,07977 - 0) \times (1 - 0,1)$$

$$CH_4 = 2.609.897,7 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Refazendo o cálculo anterior substituindo a população urbana de 2015 pelas populações estimadas dos anos subsequentes pode-se obter a tabela 9.

**Tabela 9.** Valores de emissão de metano.

Ano	População estimada	Quantidade de metano gerada (m <sup>3</sup> )
2015	107.479	2.609.897,7
2020	115.130	2.788.680,4
2025	120.586	2.920.835,7
2030	126.299	3.059.216,0
2035	139.633	3.382.192,4

**Fonte:** Plano Municipal de Saneamento Básico de Ji-Paraná (2012).

Silva (2010) realizou a estimativa teórica de produção de metano nos aterros sanitários de vários municípios do estado do Paraná. Ele utilizou para isso o método apresentado pelo IPCC, porém devido à falta de informações mais detalhadas sobre os resíduos dos municípios em que as estimativas foram realizadas, o autor utilizou dados mais generalistas, com o objetivo de obter um estudo inicial do potencial energético dos aterros sanitários de alguns dos principais municípios do Paraná.

Dentre os municípios escolhidos por Silva (2010), os mais próximos no quesito populacional de Ji-Paraná – RO, foram Francisco Beltrão e Umuarama, com uma estimativa de população atendida pela coleta pública no ano de realização da pesquisa em 2010 de 85.000 e 120.000 habitantes respectivamente. Importante ressaltar que os aterros sanitários dos respectivos municípios encontram-se em funcionamento a um período já considerável, diferentemente da situação de Ji-Paraná, onde o aterro sanitário ainda está em fase de projeto. Os dados utilizados e a quantidade de metano encontrada por Silva (2010) na realização de sua estimativa pelo método apresentado pelo IPCC são apresentados na tabela 10.

**Tabela 10.** Parâmetros utilizados e estimativa encontrada por Silva (2010) e parâmetros utilizados e estimativa encontrada para o aterro que será construído em Ji-Paraná.

<b>Município</b>	<b>Francisco Beltrão</b>	<b>Umuarama</b>	<b>Ji-Paraná</b>
<b>Ano</b>	<b>(2010)</b>	<b>(2010)</b>	<b>(2025)</b>
População atendida pela coleta	85.000	120.000	120.586
Ano de Abertura do aterro	1999	2005	2015
Taxa geração de RSU (kg/hab.dia)	0,500	0,500	0,684
Fração dos resíduos que é coletada	1	1	1
Potencial de geração de metano dos resíduos (kgCH <sub>4</sub> /kgResíduo)	0,1258	0,1258	0,0798
Fração de metano presente no biogás	0,5	0,5	0,5
Volume de metano gerado (m <sup>3</sup> )	2.637.125	3.723.000	2.920.836

**Fonte:** Silva (2010).

Em Ji-Paraná, considerando a abertura do aterro em 2015, para o ano de 2025 com uma população estimada atendida pela coleta pública de 120.586 habitantes foi estimada uma geração de metano de 2.920.836 m<sup>3</sup>, um valor próximo dos encontrados por Silva (2010). Foi escolhido para comparação o ano de 2025 em Ji-Paraná, pois este será um ano em que o aterro já estará em funcionamento a 10 anos, portanto, com uma idade próxima aos que os aterros dos municípios de Francisco Beltrão e Umuarama se encontravam em 2010. Lembrando que, Silva (2010) considerou em seus cálculos valores padrões recomendados pelo IPCC, enquanto para o município de Ji-Paraná foi calculado o potencial de geração de metano dos resíduos com base na análise da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município, realizada por Santos (2011).

Essa metodologia apresentada pelo IPCC (1996) não considera as fases apresentadas por Vinil et al. (1993), em que se encontra o aterro sanitário, estimando assim que logo no primeiro ano já ocorra um grande volume de metano gerado, o que na realidade não acontece. Portanto esse método é mais adequado para estimar o metano que será gerado em aterros que já se encontram em funcionamento a algum tempo ou foram fechados a pouco tempo, visto que esse método também não considera que a taxa de geração de metano vai diminuindo a medida que os resíduos deixam de ser depositados no aterro sanitário com o seu fechamento.

Este modelo apresentado pelo IPCC, portanto, é indicado apenas para estimativas anuais de geração de biogás, não sendo eficiente e preciso para previsões como a que se propôs de ser realizada para um aterro sanitário que ainda está em fase de projeto, como no município de Ji-Paraná, porém a importância deste método se encontra na maneira de estimar o potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), valor este que é calculado e adotado em outras metodologias mais adequadas para casos de aterros em fase de projeto.

### 3.1.2 Método de Projeto

Para a estimativa de metano gerado através dessa metodologia, foram utilizados os mesmos valores do Método do Inventário, para que a comparação entre os valores estimados pelas duas metodologias pudesse se realizada de melhor forma.

Os dados a serem considerados nesta metodologia foram os seguintes:

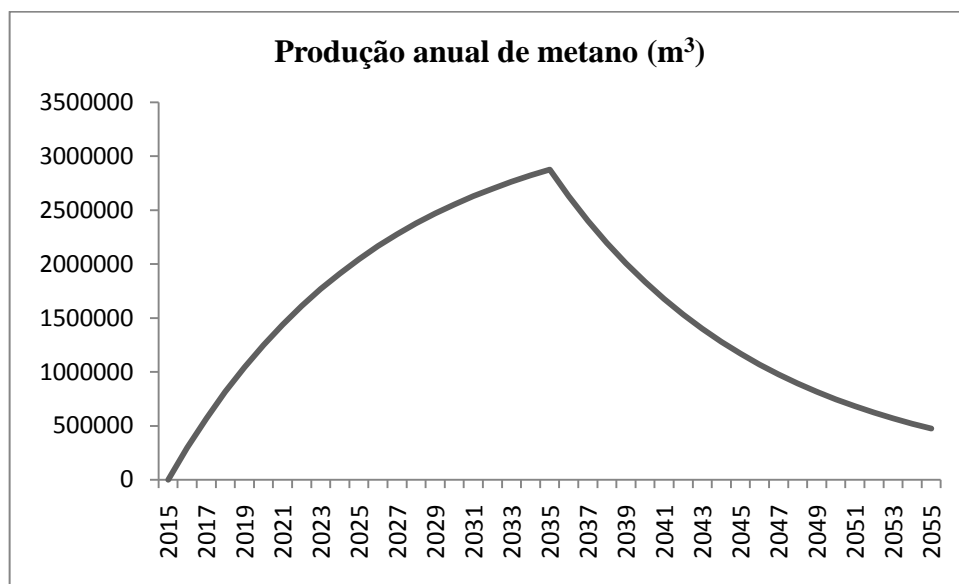
- Potencial de geração de biogás dos resíduos ( $L_0$ ) = **0,2156 m<sup>3</sup> de biogás/kg de resíduo**. Foi utilizado o valor encontrado pela equação (2), e considerado para conversão o peso específico do metano como sendo 0,740 kg/m<sup>3</sup> (CEGAS, 2005). Para transformar o valor encontrado pela equação (2) para a unidade utilizada no Método de Projeto, o valor foi dividido pelo peso específico do metano para que a unidade fosse o volume e depois dividida pela fração de metano considerada nas estimativas, 50%:  $(0,07977 \text{ kg CH}_4/\text{kg de R}) / (0,74 \text{ kg/m}^3) / (0,5) = \mathbf{0,2156 \text{ m}^3 \text{ de biogás/kg de R}}$
- Fração de metano presente no biogás (**F**) = **0,5** (este valor só pode ser conhecido ao certo quando o aterro já se encontrar em funcionamento e com uma análise dos gases emitidos, como isso não é possível, foi adotado o valor médio da fração de metano no biogás segundo Persson *et al.* (2006) que varia de 35 a 65 %)
- Constante de decaimento (**k**) = **0,09** (foi definido com base na tabela 8, visto que a precipitação média no município varia segundo o Sistema de Informações

Hidrográficas da ANA de 680 a 2650 mm/ano, foi considerado então a média anual de precipitação de 1.740 mm/ano e considerado os resíduos da região como de alta decomposição);

- Quantidade média de resíduos depositados no aterro durante sua vida útil (**R**) = **31.955.331,56 kg de RSU/ano** (este valor foi calculado com base no crescimento populacional geométrico assim como no método anterior e como no Plano Municipal de Saneamento Básico (2012) de Ji-Paraná e considerando que o aterro receba resíduos de 2015 a 2035, assim como para o cálculo anterior do método do inventário).

Foram realizados cálculos de geração de metano pelo aterro para os anos de 2015 até 2055, que é onde as emissões já acontecem em uma menor quantidade.

O método prevê o uso de duas equações, uma para o período em que o aterro estará recebendo resíduos e outra para quando este já tenha sido fechado. Com os resultados encontrados foi produzido um gráfico, mostrando o comportamento do aterro e de suas emissões com o passar dos anos:



**Figura 8.** Gráfico com as estimativas de emissão de metano para os anos de 2015 até 2055 no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná.

O pico de produção do aterro sanitário ocorre no último ano em que o mesmo ainda recebe resíduo, no ano de 2035, a geração de metano nesse ano chega a 2.875.365,6 m<sup>3</sup>.

$$Q_{2035} = 0,5 \times 31.955,56 \times 0,2156 \times (1 - e^{-0,09 \times 20}) \quad (5)$$

$$Q_{2035} = 2.875.365,6 \text{ m}^3$$

Em 2008 a Prefeitura de Porto Alegre – RS realizou a elaboração de um projeto básico, com intenção de estabelecer diretrizes para a orientação das empresas interessadas no direito de uso do biogás produzido no Aterro Sanitário de Extrema, localizado na região sul de Porto Alegre. Segundo o projeto básico o aterro entrou em operação em 1997 e teve suas operações encerradas em 2002 tendo recebido nesse período resíduos domésticos, industriais, comerciais e públicos, totalizando ao longo de seus 6 anos de funcionamento cerca de 825.000 toneladas, uma média de 137.500 toneladas de resíduo por ano.

No projeto básico foi realizada a estimativa teórica da produção de metano do Aterro Sanitário de Extrema durante o período de concessão que, se inicia em 2009 tendo tempo de duração de 12 anos, através do Método de Decaimento de Primeira Ordem criado pela EPA (*Environmental Protection Agency*). Este método difere do Método de Projeto apenas em uma variável: enquanto o primeiro utiliza a exata quantidade de resíduos depositada no ano para a estimativa, o segundo utiliza uma média dessa quantidade ao longo de todos os anos em que o aterro esteve ou estará em operação.

Para cálculo da taxa de geração de metano dos resíduos ( $k$ ) foi utilizada a equação (7) e um  $t_{1/2}$  de 6 anos, sendo que, o valor de  $t_{1/2}$  é o tempo médio para que 50% da decomposição dos resíduos ocorra, segundo o IPCC (1996) para os resíduos sólidos urbanos esse tempo varia entre 4 e 10 anos. O valor de  $k$  encontrado foi de 0,1155 para o Aterro Sanitário de Extrema, enquanto para a estimativa para o município de Ji-Paraná, foi considerado o valor de  $k = 0,09$ . Outro dado importante calculado foi o potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), valor que depende basicamente da composição dos resíduos e da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário. No aterro sanitário de Extrema o  $L_0$  encontrado e usado nas estimativas foi de  $114,36 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ /tonelada de resíduo, enquanto o  $L_0$  encontrado para as estimativas em Ji-Paraná foi de  $108 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ /tonelada de resíduo.

As estimativas realizadas para o Aterro Sanitário de Extrema foram para os anos de 2009 a 2018, sendo que o aterro teve suas atividades encerradas em 2002, assim teve uma vida útil de apenas 6 anos e uma quantidade média de resíduos depositados de 137.500 toneladas/ano. Já para Ji-Paraná foi previsto uma vida útil de 20 anos e uma quantidade média de resíduos depositados no aterro ao longo dos anos de cerca de 32.000 toneladas. Sendo assim a quantidade total de resíduos depositados no aterro de Ji-Paraná - RO seria de 640.000 toneladas enquanto no aterro de Porto Alegre - RS essa quantidade chegou a 825.000 toneladas. Foram comparados os valores estimados de produção de metano do aterro que será

construído em Ji-Paraná através do método de projeto, do sétimo ano após o seu fechamento em diante, assim como no caso do Aterro Sanitário de Extrema.

**Tabela 11.** Quantidade de metano gerado nos aterros sanitário de Porto Alegre e Ji-Paraná.

Anos após o fechamento do aterro sanitário	Quantidade de metano gerado (kg)	
	Aterro Sanitário de Extrema em Porto Alegre - RS	Aterro Sanitário ainda em fase de projeto em Ji-Paraná-RO
7	2.536.420	1.133.233
8	2.259.750	1.035.697
9	2.013.260	946.556
10	1.793.650	865.087
11	1.598.000	790.630
12	1.423.690	722.581
13	1.268.400	660.390
14	1.130.040	603.551
15	1.006.780	551.604
16	896.960	504.128

**Fonte:** Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre (2008) e Dados obtidos através de cálculo pelo Método de Projeto.

Através da comparação verificada pode-se perceber que a quantidade de metano estimada no aterro de Extrema é bem maior que a estimada para o aterro que será construído em Ji-Paraná, isso se explica devido à maior quantidade de resíduos que o aterro de Extrema recebe. Também se pode perceber que os valores estimados para o aterro de Extrema decaem a uma taxa maior em relação ao aterro de Ji-Paraná, já que o primeiro possui um tempo de funcionamento de 6 anos, menor que o previsto para o aterro de Ji-Paraná, de 20 anos, portanto o aterro de Extrema encontra-se com os resíduos de forma mais uniforme, com tempos de maturação mais próximos entre si.

Brito Filho (2005) fez uma estimativa da produção de metano no Aterro de Terra Brava, localizado no município do Rio de Janeiro, o aterro recebe em média 500 toneladas de resíduos por dia. O método utilizado por Brito Filho foi o *School Canyon*, este método é semelhante ao Método de Projeto apresentado, dependendo basicamente do potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), da taxa de produção de metano ( $k$ ) e da massa de resíduos depositados por ano no aterro. Assim como no Método do Projeto os valores são



calculados anualmente, sendo possível montar ao final um gráfico com as emissões anuais de metano pelo aterro sanitário.

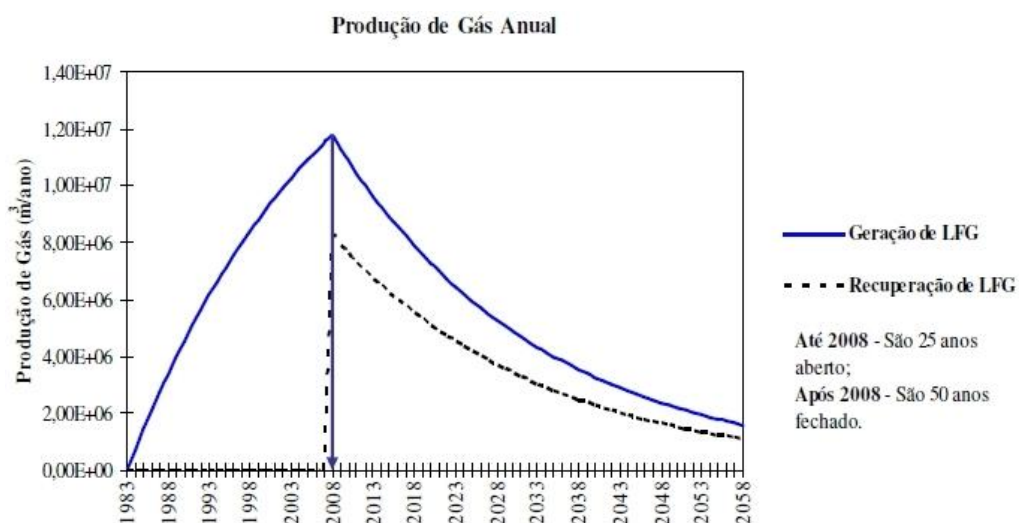
Brito Filho (2005) utilizou os seguintes parâmetros para estimativa de metano gerado no aterro de Terra Brava no Rio de Janeiro:

**Tabela 12.** Valores utilizados por Brito Filho para estimativa no aterro de Terra Brava e valores utilizados na estimativa do aterro que será construído em Ji-Paraná.

Parâmetros	Aterro Terra Brava	Aterro que será construído em Ji-Paraná
Quantidade de resíduos (t/ano)	182.500	32.000
Taxa de produção de metano (ano <sup>-1</sup> )	0,04	0,09
Potencial de geração de metano dos resíduos (m <sup>3</sup> /t)	100	108
Ano de abertura do aterro	1983	2015
Ano de fechamento do aterro	2008	2025

**Fonte:** Brito Filho (2005), Santos (2011) e valores encontrados através de cálculos.

A quantidade de resíduos depositada no aterro de Terra Brava é cerca de 6 vezes maior que o estimado a ser depositado no aterro que será construído em Ji-Paraná, porém, comparando os resultados encontrados por Brito Filho (2005), com os encontrados para Ji-Paraná, pode-se verificar o comportamento dos gráficos formados em ambos os estudos.



**Figura 9.** Gráfico com as estimativas de produção anuais encontradas para o aterro de Terra Brava no Rio de Janeiro.

**Fonte:** Brito Filho (2005).

Percebe-se que o gráfico com as quantidades estimadas de biogás (representado na figura 9 pela sigla em inglês LFG – *Landfill gas*) para o aterro de Terra Brava se comporta de forma parecida com o gráfico do método utilizado na estimativa para o aterro que será construído em Ji-Paraná, o método de projeto. Devido à quantidade de resíduos que é depositada no aterro de Terra Brava que é significativamente maior que a quantidade estimada para o aterro de Ji-Paraná, encontrou-se um volume muito maior de metano gerado no aterro do Rio de Janeiro, chegando a um pico de 11.768.463,3 m<sup>3</sup> no ano do seu fechamento em 2008, enquanto para Ji-Paraná estimam-se picos de cerca de 2.900.000 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.

**Tabela 13.** Comparação das vazões de metano entre os aterros de Terra Brava – Rio de Janeiro e o que será construído em Ji-Paraná – RO.

Ano	Aterro Terra Brava –	Aterro Ji-Paraná –
Terra Brava/Ji-Paraná	QCH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /ano)	QCH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /ano)
1983/2015	0	0
1984/2016	730.000,0	296489,4
1985/2017	1431376,3	567.458,6
1986/2018	2105251,2	815.106,8
1987/2019	2752013,1	1.041.440,0
1988/2020	3374768,1	1.248.293,0
1989/2021	3972441,6	1.437.342,4
1990/2022	4.546.679,9	1.610.120,6
1991/2023	5.098.402,0	1.768.028,0
1992/2024	5.628.490,8	1.912.344,4
1993/2025	6.137.794,5	2.044.239,8
1994/2026	6.627.128,2	2.164.783,0
1995/2027	7.097.274,8	2.274.951,2
1996/2028	7.548.986,6	2.375.637,4
1997/2029	7.982.986,6	2.467.657,6
1998/2030	8.399.969,3	2.551.757,8
1999/2031	8.800.601,7	2.628.619,6
2000/2032	9.185.525,2	2.698.866,0
2001/2033	9.555.355,6	2.763.066,4
2002/2034	9.910.684,8	2.821.741,0
2003/2035	10.252.081,3	2.875.365,6

2004/2036	10.580.091,4	2.627.886,4
2005/2037	10.895.240,1	2.401.707,2
2006/2038	11.198.031,6	2.194.995,2
2007/2039	11.488.950,5	2.006.074,6
2008/2040	11.768.462,3	1.833.414,0
2009/2041	11.307.014,3	1.675.614,4
2010/2042	10.863.659,9	1.531.396,2
2011/2043	10.437.689,7	1.399.590,8

**Fonte:** Brito Filho (2005).

Esses modelos são mais fiéis ao real comportamento dos aterros, pois consideram que a geração de metano vai crescendo com o tempo de maturação e com o acúmulo de resíduos no aterro sanitário e também estimam a geração de metano nos anos posteriores ao fechamento do aterro, através deste modelo podemos verificar que as emissões continuam por longos períodos de tempo.

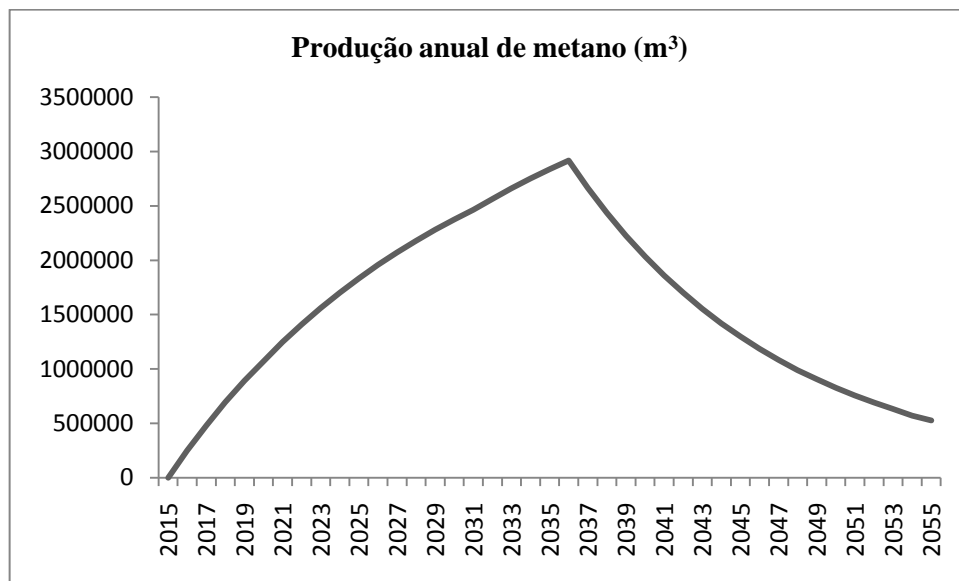
### 3.1.3 Landgem – Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02

Os dados de entrada no programa *LandGEM – Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02* para a estimativa da geração de metano foram os mesmos utilizados nas metodologias anteriores, sendo eles os seguintes:

- Foi considerado que o aterro sanitário começará a receber os resíduos em 2015 e será fechado em 2035, totalizando 20 anos de vida útil;
- O índice de geração de metano (k) foi considerado como no método anterior, igual a **0,09 ano<sup>-1</sup>**;
- O potencial de geração de metano dos resíduos ( $L_0$ ), assim como no método anterior foi obtido através da equação (2), sendo necessária a conversão para a unidade que o programa utiliza, o valor foi dividido pelo peso específico do metano para que o valor fosse dado em volume e depois multiplicado por mil (1.000 kg = 1 tonelada):  $(0,07977 \text{ kg CH}_4/\text{kg de R}) / (0,74 \text{ kg/m}^3) \times (1000 \text{ kg}) = \mathbf{108 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4/\text{tonelada de resíduo}$ ;
- A fração de metano presente no volume do biogás foi adotada assim como anteriormente em **50%**;
- O crescimento populacional adotado para estimar a quantidade lixo depositada no aterro sanitário em seus anos de funcionamento foi o **crescimento geométrico**, o

mesmo utilizado nas metodologias anteriores e utilizado no Plano Municipal de Saneamento Básico de Ji-Paraná, foi considerado que a taxa de geração de resíduos por habitante se manteve a mesma, sendo esta igual a **0,684 kg/hab x dia**. Sendo necessária, a inserção no programa, da quantidade estimada de resíduos (tonelada) que será depositada no aterro sanitário em cada ano de operação do mesmo.

O gráfico formado pelas emissões de metano ao longo dos anos ficou da seguinte maneira:



**Figura 10.** Gráfico com as estimativas de emissão de metano para os anos de 2015 a 2055 no aterro que será construído em Ji-Paraná.

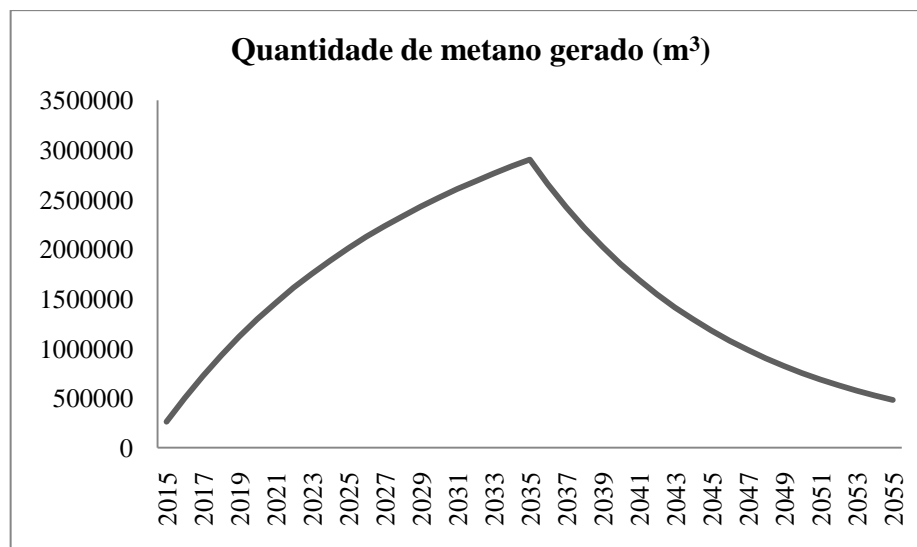
O gráfico estimado pelo *LandGEM* ficou muito semelhante ao formado pelo método de projeto. O pico de geração de metano por esse método aconteceu no ano de 2036, no primeiro ano após o fechamento do aterro sanitário, as emissões nesse ano foram de 2.917.000 m<sup>3</sup> de metano. O *software*, assim como o método de projeto, leva em conta na estimativa, as fases em que se encontra o aterro sanitário, as emissões vão crescendo ao longo do tempo com a maturação e a acumulação dos resíduos no aterro, atingem o pico no período próximo ao seu fechamento e começam a decair, continuando por longo período.

### 3.1.4 Programa Biogás Geração e Uso Energético

Os dados utilizados para a estimativa realizada no Programa Biogás Geração e Uso Energético foram os mesmos utilizados nos dois modelos anteriores:

- Foi considerado que o aterro sanitário começará a receber resíduos em 2015 e será fechado em 2035, totalizando 20 anos de vida útil;
- O índice de geração de metano (k) foi considerado assim como nos métodos anteriores igual a **0,09 ano<sup>-1</sup>**;
- O potencial de geração de biogás dos resíduos ( $L_0$ ), assim como nos métodos anteriores foi obtido através da equação (2) e precisou ser convertido para a unidade que o programa utiliza, sendo este dividido pelo peso específico do metano e em seguida dividido pela fração de metano presente no biogás:  $(0,07977 \text{ kg de CH}_4/\text{kg de R}) / (0,74 \text{ kg/m}^3) / (0,5) = \mathbf{0,2156 \text{ m}^3 \text{ de biogás/kg de resíduo}}$ ;
- A fração de metano presente no volume do biogás foi adotada assim como anteriormente em **50%**;
- O crescimento populacional foi estimado pelo próprio programa, foi necessária a inserção da população inicial e da taxa de crescimento populacional de 0,93% ao ano, utilizada nos modelos anteriores e também no Plano Municipal de Saneamento Básico de Ji-Paraná, essa estimativa de crescimento é necessária para a estimativa da quantidade de resíduos que seriam depositados no aterro ao longo dos anos, foi considerado que a taxa de geração de resíduos por habitante se manteve a mesma, sendo esta igual a **0,684 kg/hab x dia**

O gráfico resultado das emissões de metano no aterro sanitário ao longo dos anos pode ser visualizado na figura 11.



**Figura 11.** Gráfico com as estimativas de emissão de metano para os anos de 2015 a 2055 no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná.

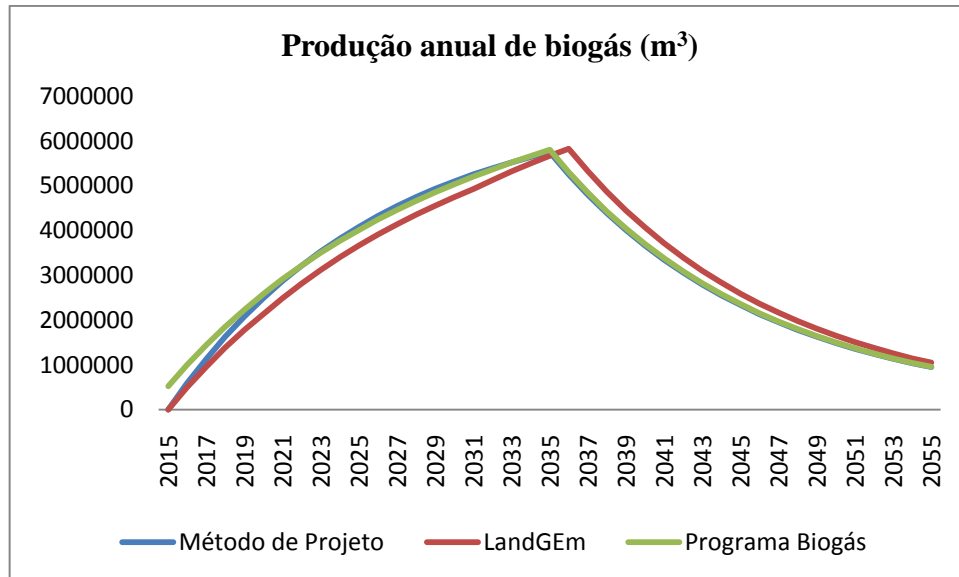
O Programa Biogás Geração e Uso Energético, mostrou resultados muito semelhantes aos do Método de Projeto e do *LandGEM*. O pico de geração de metano ocorrido no aterro sanitário foi em 2035 com uma emissão de 2.903.000 m<sup>3</sup>. Assim como nas metodologias anteriores é possível observar que as emissões aumentam com o acúmulo e com o tempo de maturação dos resíduos, sendo que depois de atingir o pico no ano do fechamento do aterro sanitário, as emissões vão diminuindo gradativamente, porém continuam ocorrendo por um longo período.

### 3.1.5 Comparação Entre os Resultados Obtidos

Foram utilizadas quatro metodologias para a estimativa teórica da produção de metano no aterro que se encontra ainda em fase de projeto no município de Ji-Paraná. A metodologia apresentada pelo IPCC, conhecida como Método do Inventário, foi a que se mostrou menos viável para a situação, pois esta é recomendada para estimativas anuais em aterros que já se encontram em funcionamento a algum tempo ou que foi fechado a pouco tempo. O Método do Inventário não considera que o aterro sanitário passa pelas fases apresentadas por Vinil et al. (1993), onde a quantidade de metano gerado varia de acordo com o tempo de deposição dos resíduos no aterro. O Método de Projeto, o programa *LandGEM* e o programa Biogás Geração e Uso Energético apresentaram estimativas muito próximas. Os valores apresentados pelos mesmos traduzem melhor a situação real que acontece nos aterros sanitários, considerando as fases de maturação dos resíduos, o acúmulo dos resíduos no aterro, o índice de geração ou taxa de decaimento do metano e que após o seu fechamento as emissões de metano ainda continuam por longos períodos. Os picos de geração de metano ocorreram nos períodos próximos ao de fechamento do aterro, como podemos verificar na tabela 14.

**Tabela 14.** Comparação entre os métodos utilizados na estimativa teórica.

<b>Método Utilizado</b>	<b>Ano de pico de geração de metano</b>	<b>Quantidade de metano gerado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Quantidade de biogás gerado (m<sup>3</sup>)</b>
Método de Inventário	2035	3.382.192,4	6.764.384,8
Método de Projeto	2035	2.835.365,6	5.750.731,2
<i>LandGEM</i>	2036	2.917.000,0	5.834.000,0
Programa Biogás	2035	2.903.000,0	5.805.000,0



**Figura 12.** Gráfico com a comparação das estimativas de biogás gerado para os anos de 2015 a 2055 entre as três metodologias utilizadas.

Segundo Brito Filho (2005) é normal presumir que o biogás gerado consista em 50% de metano e 50% de dióxido de carbono, para que o biogás total gerado seja igual a duas vezes o volume de metano encontrado nas estimativas, portanto o volume de biogás gerado é exatamente o dobro do volume de metano, pois a fração de metano presente no biogás considerada para cálculo foi de 0,5. Os gráficos formados pelos valores anuais estimados dos três métodos são muito semelhantes, o Método de Projeto e o programa *LandGEM* foram elaborados pela Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos com base em dados e parâmetros observados nos aterros sanitários do país, já o Programa Biogás Geração e Uso Energético foi elaborado pela CETESB e seria portanto melhor recomendado para os aterros sanitários brasileiros, porém percebe-se que os dois métodos americanos, devido aos resultados semelhantes apresentados, também podem ser utilizados para estimativas de geração de metano em aterros sanitários brasileiros sem grandes diferenças.

### 3.1.6 Equivalência Energética do Biogás

Através da equação (8) apresentada anteriormente, substituindo os valores na fórmula e sabendo que segundo o fabricante o motor LANDSET possui uma eficiência elétrica de 28%, é possível estimar a vazão de biogás necessária para a alimentação do motor para gerar uma potencia de 200 kW:

$$\text{Pot} = (Q \times \text{PCI} \times n) / 860 \quad (8)$$

Sendo que:

Pot: potência gerada = 200 kW;

Q: vazão de biogás em m<sup>3</sup>/h;

PCI: poder calorífero do biogás = 4.613 kcal/m<sup>3</sup>, obtido através da tabela 3 para biogás com uma fração de 50% de metano;

n: eficiência elétrica do motor = 0,28;

860: conversão kcal para kW.

O resultado estimado foi igual a aproximadamente 135 m<sup>3</sup>/h, sendo esta portanto, a vazão necessária para abastecer o gerador com potencia de 200 kW.

Através da vazão anual do biogás podemos estimar a potencia e energia que estará disponível no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná. Também há de se considerar que dificilmente é implantado um sistema que possibilite que 100% do biogás seja coletado, sendo que valores comuns da chamada eficiência de coleta do biogás chegam a 75%, como o Programa Biogás Geração e Uso Energético sugere e também Figueiredo (2007) considera em seu trabalho. Portanto com estas considerações obtemos a tabela 15 com as vazões de biogás (m<sup>3</sup>/h), considerando uma eficiência de coleta de 75%, encontradas pelo Método de Projeto, já que este é recomendado para aterros sanitários em fase de projeto e como se viu, as três metodologias utilizadas apresentaram resultados muito próximos.

**Tabela 15.** Vazão de biogás, potência e energia que poderá ser gerado no aterro sanitário que será construído em Ji-Paraná.

Ano	Vazão Biogás (m <sup>3</sup> /ano)	Vazão Biogás (m <sup>3</sup> /hora) (75%)
2016	592978,8	50,8
2017	1134917,2	97,2
2018	1630213,6	139,6
2019	2082880,0	178,3
2020	2496586,0	213,7
2021	2874684,8	246,1
2022	3220241,2	275,7
2023	3536056,0	302,7
2024	3824688,8	327,5
2025	4088479,6	350,0



2026	4329566,0	370,7
2027	4549902,4	389,5
2028	4751274,8	406,8
2029	4935315,2	422,5
2030	5103515,6	436,9
2031	5257239,2	450,1
2032	5397732,0	462,1
2033	5526132,8	473,1
2034	5643482,0	483,2
2035	5750731,2	492,4
2036	5255772,8	450,0
2037	4803414,4	411,3
2038	4389990,4	375,9
2039	4012149,2	343,5
2040	3666828,0	313,9
2041	3351228,8	286,9
2042	3062792,4	262,2
2043	2799181,6	239,7
2044	2558259,2	219,0
2045	2338072,8	200,2
2046	2136837,6	182,9
2047	1952922,8	167,2
2048	1784836,8	152,8
2049	1631218,0	139,7
2050	1490821,2	127,6
2051	1362508,0	116,7
2052	1245238,4	106,6
2053	1138062,4	97,4
2054	1040110,4	89,1
2055	950589,6	81,4

A partir do quarto ano de funcionamento do aterro (2018) já há vazão suficiente (139,6 m<sup>3</sup>/h) para alimentação de um motor LANDSET, sendo possível gerar 144 MW de energia

por mês, considerando que a vazão de biogás é constante o motor pode funcionar 24 horas por dia, todos os dias. Sendo assim  $200 \text{ kW} \times 24\text{h} \times 30 \text{ dias} = 144 \text{ MW}$ .

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2011), o consumo médio de energia de uma residência foi 154 kWh/mês no ano de 2010 no Brasil, e a energia gerada pelo aterro sanitário em 2018 foi 144 MW por mês, sendo assim possível para abastecer cerca de 930 residências por igual período de tempo. No ano de 2028 o aterro já teria vazão suficiente para abastecer 3 conjuntos geradores com potencia de 200 kW, gerando 432 MW por mês, suficiente para abastecer cerca de 2.800 residências.

### 3.2 ESTIMATIVA DO CHORUME – MÉTODO SUÍÇO

Para cálculo da vazão do chorume que será gerado no aterro, primeiramente foi preciso estimar a área que será ocupada pelos resíduos sólidos urbanos gerados ao longo dos 20 anos em que o aterro estará em funcionamento.

Para cálculo do volume de resíduos gerados ao longo dos 20 anos foi adotado como peso específico dos resíduos compactados o valor de  $0,7 \text{ t/m}^3$ , valor dentro da faixa que é citada por Carmo Junior (2008). Foi estimado anteriormente que a média de produção anual de resíduos sólidos no município de Ji-Paraná ao longo dos 20 anos de atividade do aterro seria em torno de 32.000 toneladas.

Sendo assim, podemos realizar os seguintes cálculos:

- $32.000 \text{ toneladas/ano} \times 20 \text{ anos} = 640.000 \text{ toneladas}$ ;
- $640.000 \text{ toneladas} / 0,7 \text{ t/m}^3 = 914.285,7$ , aproximando,  $915.000 \text{ m}^3$  de resíduos.
- Soma-se a esses valores o volume do material de recobrimento dos resíduos, utilizado pela ABES (2006) o valor de 20% do total de resíduos =  $183.000 + 915.000 = 1.098.000 \text{ m}^3$

O volume que cada trincheira pode receber pode ser calculado através da multiplicação de suas dimensões:  $70 \times 50 \times 8 = 28.000 \text{ m}^3$ . Assim, dividindo o total de resíduos gerados ao longo dos 20 anos, pelo volume de cada trincheira é possível saber quantas trincheiras seriam necessárias para armazenar todo o resíduo.

- $1.098.000 \text{ m}^3 / 28.000 \text{ m}^3 = 39,2$ , aproximando para 40 trincheiras.

Cada trincheira ocupa uma área igual a:  $50 \text{ m} \times 70 \text{ m} = 3.500 \text{ m}^2 = 0,35 \text{ ha}$ . Sendo assim a área total ocupada pelos resíduos no aterro sanitário seria de **0,35 ha x 40 trincheiras = 14 ha**. Vimos anteriormente que a área prevista para construção do novo aterro consta com

45 ha, sendo então suficiente para receber os resíduos do município pelos 20 anos, adotando o método de deposição por Trincheiras.

Os índices pluviométricos utilizados foram os disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológicas pelo site da ANA. Foi utilizada uma série histórica de 21 anos, e calculado a média das precipitações referentes a cada mês do ano, a fim de se estimar as vazões de chorume do aterro sanitário a cada mês:

**Tabela 16.** Média dos índices mensais de precipitação no município de Ji-Paraná – RO. Utilizando série histórica de 21 anos (1976 a 1996).

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação média (mm)	300	260	260	155	65	15	6	20	75	125	185	265

**Fonte:** Sistema de Informações Hidrológicas – ANA (2013).

Portanto, agora resta aplicar os valores encontrados na equação (9) do Método Suíço:

$$Q = (1/t) \times P \times A \times k \quad (9)$$

Temos que:

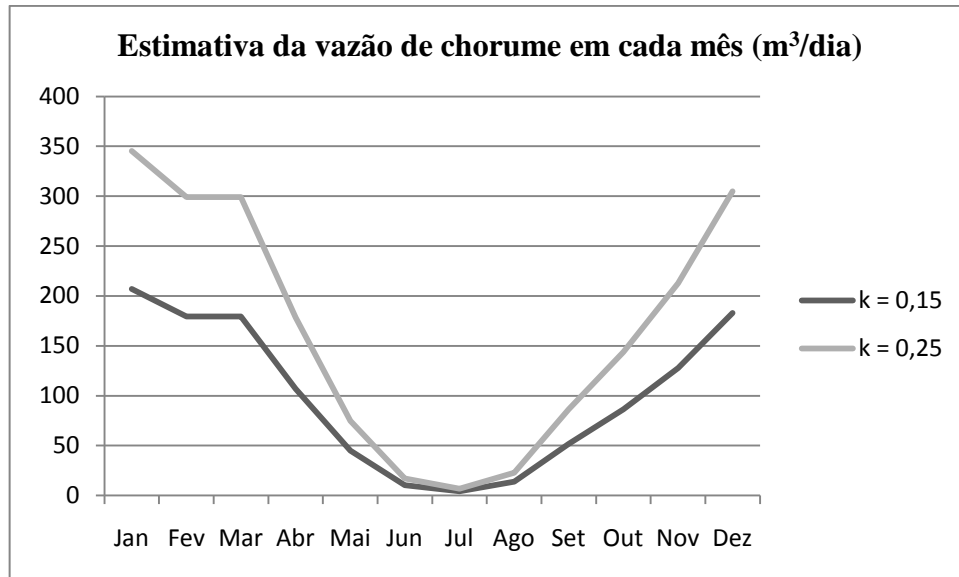
t: tempo de segundo no mês = 2.628.000 s;

P: precipitação mensal = referente a cada mês de acordo com a Tabela 16;

A: área do aterro sanitário = 140.000 m<sup>2</sup>;

k: coeficiente que varia com o grau de compactação de lixo = 0,15 e 0,25 (como o grau de compactação do lixo foi considerado como sendo 0,7 t/m<sup>3</sup> foi realizado a estimativa usando os dois valores, considerando os valores exibidos por SOBRINHO, 2000).

A estimativa através do Método Suíço foi feita considerando a área ocupada pelos resíduos sólidos ao final de 20 anos de utilização, portanto nos anos precedentes ao encerramento das atividades do aterro sanitário em que as áreas ocupadas pelos resíduos são menores a tendência é que a vazão de chorume também seja menor.



**Figura 13.** Gráfico com as vazões de chorume, no aterro que será construído em Ji-Paraná. Eixo y representa a vazão média do mês em (m<sup>3</sup>/dia).

É possível notar uma grande variação entre os meses mais chuvosos e os meses secos de nossa região, que apresenta duas estações bem definidas, influenciando diretamente na vazão do chorume. Outro fator que chama atenção é a variação com o coeficiente k, o que mostra que aterros com os resíduos bem compactados apresentam uma vazão menor, lembrando que quanto mais compactado estiverem os resíduos, menor será o coeficiente k.

Silva (2005) realizou no aterro sanitário de Aparecida de Goiânia um trabalho onde fez a medição da vazão de chorume do aterro através de um medidor Thompson e aplicou o método suíço com intuito de comparar os resultados e verificar a proximidade dos valores encontrados. Os valores utilizados por Silva (2005) para estimativa através do método empírico foram os seguintes:

- Área do aterro sanitário de Aparecida de Goiânia = 40.500 m<sup>2</sup>;
- Precipitação média anual em Goiânia = 1.535 mm;
- Coeficiente k de compactação dos resíduos = 0,25, visto que o peso específico dos resíduos compactados foi considerado em 0,6 t/m<sup>3</sup>.

Através do método Suíço, Silva (2005), encontrou uma vazão média anual de 45,6 m<sup>3</sup>/dia, enquanto a vazão média medida foi igual a 16,3 m<sup>3</sup>/dia, sendo que o aterro foi dimensionado para uma vazão de 37,15 m<sup>3</sup>/dia. Silva (2005) concluiu que o método Suíço apresentou um resultado aproximado dos valores reais que foram medidos no aterro, ficando evidenciado que a produção de chorume é diretamente ligada aos índices de precipitação pluviométrica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos métodos de estimativa utilizados, percebe-se que Ji-Paraná teria uma grande geração de biogás em seu futuro aterro sanitário, chegando a gerar quase 6 milhões de m<sup>3</sup> de biogás anualmente e um total ao longo de 40 anos de exploração de cerca de 130 milhões de m<sup>3</sup> de biogás. Toda essa quantidade seria equivalente segundo Cardoso Filho (2001) a 71,5 milhões de litros de óleo diesel ou 104 mil toneladas de carvão vegetal e quando convertido em energia elétrica, o biogás gerado nos períodos de maior produção do aterro sanitário, seria suficiente para abastecer cerca de 2.800 residências.

O método do Inventário apresentado pelo IPCC é um modelo mais simples de estimativa, considerando basicamente a composição e a quantidade dos resíduos sólidos depositados e a temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário, apresentando assim valores menos condizentes com os que ocorrem de fato, principalmente nos primeiros anos de funcionamento do aterro. O Método de Projeto, o programa *LandGEM* e o Programa Biogás Geração e Uso Energético apresentaram valores estimados semelhantes entre si, considerando em suas estimativas, além dos fatores considerados pelo IPCC, a idade do aterro sanitário, as fases de formação de biogás do aterro e índices de precipitação pluviométricas da região, o que traduz de maneira mais realista o comportamento dos aterros sanitários ao longo dos anos.

A composição gravimétrica dos resíduos de Ji-Paraná por Santos (2011) mostrou um potencial de geração de metano destes resíduos de 108 m<sup>3</sup>/tonelada, sendo que segundo USEPA (1991) o valor encontrado nas literaturas varia entre 6,2 e 270 m<sup>3</sup>/tonelada nos aterros americanos. Esse potencial de geração de metano pode ser elevado caso seja realizada a reciclagem de resíduos como plásticos, vidros e metais, aumentando assim a proporção de matéria orgânica, papéis e papelões nos resíduos, já que estes são fontes de carbono, fator que influencia diretamente na geração de metano, aumentando assim a produção de metano por tonelada de resíduo.

A estimativa realizada para o aterro sanitário que será construído serve como um estudo inicial do potencial do município no quesito aproveitamento de biogás. O Plano Municipal de Saneamento Básico elaborado para Ji-Paraná traz como uma de suas metas a análise de viabilidade técnica e econômica da exploração do biogás gerado no atual lixão, o que pode ser realizado em estudos futuros, porém, no caso do aterro sanitário que será construído, seria interessante um estudo preliminar à construção do aterro, para otimizar a geração e captação do biogás que será gerado.

Foi realizada também uma estimativa da vazão de chorume no aterro sanitário que será construído, através do Método Suíço, um método simples, porém, como foi analisado por Silva (2005) apresenta resultados que são próximos aos valores reais. A vazão de chorume irá depender diretamente da precipitação pluviométrica e do grau de compactação dos resíduos no aterro, sendo que para o aterro que será construído em Ji-Paraná foram encontrados valores que chegam a 345 m<sup>3</sup>/dia no mês de Janeiro e que caem para menos de 10 m<sup>3</sup>/dia em Julho.

Com o estudo realizado se viu que há um grande potencial energético nos resíduos sólidos urbanos e Ji-Paraná apresenta porte para se investir nesse potencial. É necessário agora um estudo técnico voltado aos custos de instalação e operação necessários para a exploração desse potencial.

## REFERÊNCIAS

- ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – Seção Ceará. **Resíduos Sólidos Urbanos: Coleta e Destino Final**. Ceará, 2006.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.896 - Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**, 1997.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004 - Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.
- ABREU, W. S. de. **Estudo de viabilidade técnica financeira da geração de energia elétrica a partir do aterro sanitário da cidade de Taubaté**. Taubaté, SP: UNITAU, 2007.
- AD-NETT. **Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Wastes: Information Networks. Technical Summary on Gas Treatment**. Netherlands, 2000. 31p.
- ALVES FILHO, M. **Tese mostra potencial energético do biogás: Jornal da Unicamp**, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.ibps.com.br>>. Acesso em: 10 jul. 2013.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de Informações Hidrológicas, 2012**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoeshidrologicas/redehidro.aspx>>. Acesso em: 15 Agosto 2013.
- AQUINO, C. A. B. **Identificação de compostos orgânicos voláteis (COVs) Emitidos por Florestas na Região Amazônica**. Cuiabá, Mato Grosso; UFMT, 2006.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2006**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/panorama>>. Acessado em: 28 jul. 2013.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2007**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/panorama>>. Acessado em: 02 ago. 2013.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2010**. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_envio.cfm?ano=2010](http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2010)>. Acessado em 20 ago. 2013
- AUDIBERT, J. L. **Avaliação Qualitativa e Quantitativa do Biogás do Aterro Controlado de Londrina**. Londrina – PR. Universidade Estadual de Londrina, 2011.
- BIRGEMER, H. G. e CRUTZEN, P. J. **The production of metano from solid waste**. Journal of geophysical research, v. 92, n. D2, p 2181 – 2187. 1987.
- BRITO FILHO, L. F. de. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2005. 218 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRITTO, M. L. C. P. S. **Taxa de Emissão de Biogás e Parâmetros de Biodegradação de Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Metropolitano Centro**. Tese de Mestrado, Salvador, Bahia, 2006.

CALDERONI, M. F. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 2 ed. São Paulo: Ed. Humanitas FFLCH/Universidade de São Paulo, 1998. 343p.

CARMO JUNIOR, G. N. R. **Resíduos Sólidos – Origem, Formação, Classificação, Características e Impactos – Aula 1**. 2008.

CEGAS – Companhia de Gás do Ceará. Site: < [www.cegas.com.br/gasna](http://www.cegas.com.br/gasna)>. Acesso em: 10/08/2013.

CERQUEIRA, M. C. **Diagnóstico do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos no Distrito de Tarilândia – Jarú/RO**. Trabalho de Conclusão de Curso, Ji-Paraná, Rondônia, 2011. UNIR.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos**. Relatório Final, Julho de 1998.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. Site: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: 15/08/2013.

CETESB/SMA – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA SP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 – aterros**. São Paulo: 2003.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2.ed. São Paulo, IPT/Cempre, 2000.

DONHA, M. S. **Conhecimento e Participação da Comunidade no Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: O Caso de Marechal Cândido Rondon – PR**. Dissertação (Mestrado) – Florianópolis, 2002. 130p.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP**. Campinas, SP: UNICAMP, 2003.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional, 2012**. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Site: < <http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 16/08/2013.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os municípios**. 2007.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso**. São Paulo, SP. 2007.



GRACINO, M. C. S. **Caracterização dos Aterros Sanitários de Araçatuba e Região e o Potencial do Aterro Sanitário da Cidade de Araçatuba para Produção de Biogás.** Faculdade de Tecnologia de Araçatuba. Araçatuba, São Paulo, 2010.

HAMADA, J. **Estimativas de Geração e Caracterização do Chorume em Aterros Sanitários.** 2003. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. K. **Energia e meio ambiente.** 3.ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

ICLEI- BRASIL. **Manual para Aproveitamento de Biogás Volume 1 – Aterros Sanitários.** Coordenação geral: Laura Vicente de Macedo. Brasil.

IEA, 2006. **Renewables Information 2006.** Paris, IEA.

INÁCIO, C. T.; BETTIO, D. B.; MILLER, P. R. M. **Potencial de Mitigação de Emissões de Metano via Projetos de Compostagem de Pequena Escala.** Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos. Vitória, Espírito Santo, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL - IBAM. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p. Disponível em: <<http://www.ibam.org.br/estudos>>. Acessado em: 03 ago. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2001.** Rio de Janeiro. IBGE 2001. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Rio de Janeiro. IBGE 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, **Guidelines for Greenhouse Gas inventory:** reference Manual, revised – Chapter 6 – Waste, 1996.

LANDGEM (Landfill Gas Emissions Model), Version 3.01 – User’s Guide, EPA – Environmental Research Group (2005) in **Estudo do potencial da geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil,** Convenio FEALQ – Ministério do Meio Ambiente, 2004.

LANDIM, A, L, P, F.. **O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável.** Trabalho de Conclusão de Curso, 2006.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação.** 3.ed. São Paulo: Hemus Editora, 1995.

MAIA, D. C. S. **Remoção de H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> de Biogás para Utilização Energética.** Dissertação de Mestrado, Maringá, Paraná, 2011.

MARTINS, V. F. B. **Purificação de Biogás Usando Líquidos Iônicos como Absorvente.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2012.

MELO, V. L. A. **Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos.** Recife, 2000. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco.

MONTILHA, F. **Biogás – Energia Renovável.** São Paulo: Univ. Anhembi Morumbi, 2005.

MUYLAERT, M. S. (coord.). **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Caso.** Rio de Janeiro: Editora da Coppe, 2000.

PECORA, V., **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de Caso.** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A., 2006. **Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection.** IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE JI-PARANÁ. **Plano Municipal de Saneamento Básico: Plano Setorial de Limpeza Urbana, Manejo e Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Ji-Paraná.** Relatório Final, Ji-paraná, 2012.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás.** Coordenador: Sérgio Túlio Cassini. Rede Cooperativa de Pesquisas. Instituições Participantes: UFES, UEPB, SANEPAR, UFMG, UFSC, UNICAMP. Vitória – ES, 2003.

REVITA, E. A. S. A. **Projeto com gás de aterro da CPTR Marituba.** Marituba – PA. 2012.

RIBEIRO, Suzana. Apresentação feita em sala de aula, MBE Coppe/ UFRJ, turma 14. 2006.

SANTOS, L. R. **Caracterização Física Dos Resíduos Sólidos Urbanos Do Município De Ji-Paraná – Rondônia.** Trabalho de Conclusão de Curso, Ji-Paraná, Rondônia, 2011. UNIR.

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; JUNIOR, J. L. F.; CASTRO, M. C. A. A. **Apostila Gestão e Gerenciamento dos Resíduos Sólidos.** São Carlos-SP: Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos, 2002. 40 p.

SERAFIM, A.C., GUSSAKOV, K.C *et al.* **Chorume, impactos ambientais e possibilidades de tratamentos.** FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3. São Paulo: UNICAMP, 2003.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e Purificação de Biogás.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2009.

SILVA, R. P. **Aterro Sanitário de Aparecida de Goiânia, Medição da Vazão de Chorume.** Goiânia, Goiás, 2005.

SILVA, W. R. **Biogás: Potencialidade dos Aterros Sanitários do Estado do Paraná.** Curitiba, Paraná, 2010.

SOBRINHO, N. L. C. **Uma análise do balanço hídrico do aterro sanitário de Presidente Prudente**. Viçosa, 2000. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora.

SOUZA, R. M., SERRA, J. C. V., JUNIOR, J. C. Z., SANTOS, D. R. R. **Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração de Energia Elétrica**. Palmas, Tocantins.

STREB, C. S. **A Coleta Informal de Lixo no Município de Campinas – SP: Uma análise na perspectiva das questões energéticas e da qualidade de vida**. 2001. 85p. Dissertação (Mestrado) – Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TCHOBANOGLIOU, G.; THEISEN, H.; VINIL, S. **Integrated Solid Waste Management. Engineering principles and management issues**. Irwin MacGraw – Hill. 1993. 978p.

TINÔCO, P. N. **Gestão de Resíduos Sólidos em Municípios de Pequeno Porte**. I FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Porto Alegre – RS. 17-19 mai. 2007.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003.

USEPA, 2007. **Opportunities for and Benefits of Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities**. Disponível em:  
<[www.epa.gov/CHP/markets/wastewater.html](http://www.epa.gov/CHP/markets/wastewater.html)> Acesso em julho de 2013.

VANZIN, E. et al. **Análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro metropolitano Santa Tecla**. Fortaleza, CE: XXVI ENEGEP, 2008.

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

WILLUMSEN, H. C. **“Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide”**. LG Consultant, 2001.

WILLUMSEN H., 2003, **“Experience with landfill gas recovery plants”**. Renewable Energy.

WORLD BANK. **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean**. 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA: World Bank, 2003.125p.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.