



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário**

*Autor: Tiago Felipe de Barros*

*Orientador: Nilson Romeu Marcilio*

Porto Alegre, Janeiro de 2013.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário**

**Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico**

*Autor: Tiago Felipe de Barros*

*Orientador: Nilson Romeu Marcilio*

Porto Alegre, Janeiro de 2013.

## Sumário

Sumário	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 O Biogás	3
2.2 Histórico do Biogás	3
2.3 Formação do Biogás	3
2.3.1 Aspectos Físico-Químicos	5
2.3.2 Fatores que Afetam a Formação de Gás	7
2.4 Aterro Sanitário	10
2.5 Tecnologias de Conversão do Biogás	14
2.5.1 Turbinas a Gás	14
2.5.2 Ciclo de ar-padrão ideal Brayton	15
2.5.3 Ciclo Brayton com Regeneração	16
2.5.4 Microturbinas	16
2.5.5 Motores de combustão Interna	17
2.6 Comparação Entre as Tecnologias de Conversão	19
3 Materiais e Métodos	21
3.1 Modelos para a Estimativa de Geração de Biogás	21
3.1.1 LandGEM (Versão 3.2)	21
3.1.2 Modelo Utilizado pelo Banco Mundial	22
3.1.3 Modelo Utilizado pelo IPCC	23
3.1.4 Determinação da Potência e Energia Disponíveis	24
4 Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico	25
5 Resultados e Discussão	26
5.1 Estudo de Viabilidade Técnica	26
5.2 Estudo de Viabilidade Econômica	30
5.2.1 Custo de Investimento	31
5.2.2 Custos de Manutenção e Operação	31
5.2.3 Avaliação Econômica do sistema a ser instalado	32
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	35
7 Anexo 1	37
8 Anexo 2	38
9 Referências	40

## **Agradecimentos**

A minha esposa Cristiane e minha filha Sofia pela compreensão de estar muitas vezes ausente e também pelo reconhecimento e apoio de que esta é uma luta por um ideal maior e que, com certeza, trará bons frutos à nossa família.

Minha mãe e meu irmão pelo incentivo e força para nunca desistir de nenhum de meus sonhos.

Amo muito todos vocês.

Ao meu orientador, Professor Nilson, pela dedicação e tempo que disponibiliza para com seus alunos.

Aos meus colegas, que me ajudaram muito ao longo desta caminhada. Não conseguimos nada sozinhos, precisamos nos apoiar uns nos outros.

## Resumo

A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas tem gerado um acelerado aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (lixo), tornando-se um grave problema para as administrações públicas. O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes núcleos urbanos dificultam as ações de manejo dos resíduos além de que, o uso de lixões nos grandes centros urbanos ainda é muito comum, o que acarreta problemas de saúde e ambientais. A decomposição da matéria orgânica promove a liberação do biogás, cujos principais constituintes são o gás carbônico e o metano, que correspondem a cerca de 50% e é um gás de efeito estufa, cuja emissão favorece o aquecimento global. Além disso, gera odores desagradáveis e oferece riscos de explosão.

Os aterros sanitários são considerados atualmente uma das alternativas mais interessantes para geração do biogás, visto que podem dispor de técnicas de captação dos gases liberados através de dutos de captação e queima posterior em *flares*, onde o metano, principal constituinte do biogás, será transformado em gás carbônico, que possui um potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor. Nestes aterros também existem dutos para captação do chorume, líquido proveniente da decomposição de resíduos orgânicos que se não for devidamente coletado, acarreta poluição dos recursos hídricos.

Além da oportunidade de reduzir os danos ambientais é possível utilizar o biogás como combustível, gerando energia elétrica. Portanto, neste estudo é avaliado o potencial de geração de biogás do aterro sanitário Central de Resíduos do Recreio localizado na cidade de Minas do Leão, RS, e verificada a viabilidade técnica e econômica de implantação de um projeto de geração de energia elétrica com o biogás proveniente do mesmo, por meio de um estudo de caso.

Este estudo demonstrou que a Central de Resíduos do Recreio tem um alto potencial de geração de energia elétrica, além disso, a instalação de um grupo motogerador de 230 KW se mostrou viável economicamente, podendo apresentar melhores resultados com a instalação de grupos motogeradores de maior porte.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Duração das fases variando com o tempo Fonte: EPA (1997) .....	4
<b>Figura 2.2:</b> Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano em volume. Fonte: ALVES, 2000.....	6
<b>Figura 2.3:</b> Corte esquemático de um aterro (Fonte: RECICLOTECA – 2007) .....	10
<b>Figura 2.4:</b> Impermeabilização do solo (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005). .....	10
<b>Figura 2.5:</b> Geomembrana em PEAD em aterro sanitário (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005). .....	11
<b>Figura 2.6:</b> Dreno (E) e tanque (D) de chorume. (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005). .....	11
<b>Figura 2.7:</b> Canalização de águas pluviais. (Fonte: CIAS, 2003). .....	11
<b>Figura 2.8:</b> Etapas de construção de aterro sanitário. (Fonte: RE, 2010). .....	12
<b>Figura 2.9:</b> Tubos de coleta de biogás. (Fonte: CENBIO, 2006).....	12
<b>Figura 2.10:</b> Compressores para Flare. (Fonte: CENBIO, 2006). .....	13
<b>Figura 2.11:</b> Flare. (Fonte: CENBIO, 2001).....	14
<b>Figura 2.12:</b> Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor. (Fonte: CASTRO, 2006). .....	15
<b>Figura 2.13:</b> Ciclo de ar-padrão ideal Brayton. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002). .....	15
<b>Figura 2.14:</b> (a) Ciclo de ar-padrão de turbina a gás regenerativa. (b) Diagrama T x s do sistema regenerativo. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002).....	16
<b>Figura 2.15:</b> Microturbina baseada no ciclo Brayton aberto. (Fonte: PIMENTA; CASTRO, 2003). .....	17
<b>Figura 2.16:</b> Funcionamento do motor Diesel. (Fonte: CASTRO, 2006).....	18
<b>Figura 2.17:</b> Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Diesel. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002). .....	18
<b>Figura 2.18:</b> Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto. (Fonte: PECORA, 2006). .....	19
<b>Figura 2.19:</b> Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Otto. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002). .....	19
<b>Figura 5.1:</b> Comportamento da vazão de metano captado. ....	28
<b>Figura 5.2:</b> (a) Curva de comportamento da potência. (b) Curva de comportamento da energia. ....	30
<b>Figura 5.3:</b> Payback de 4,1 anos .....	34

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Propriedades físico-químicas do metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico.	6
<b>Tabela 2.2:</b> Equivalência de 1 Nm <sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis. ....	7
<b>Tabela 2.3:</b> Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão. ....	20
<b>Tabela 3.2:</b> Valores L0 em função da degradabilidade do resíduo. ....	23
<b>Tabela 5.1:</b> Previsão da quantidade de resíduos a ser depositado .....	26
<b>Tabela 5.2:</b> Geração anual de metano e volume de metano captado.....	27
<b>Tabela 5.3:</b> Potência e energia disponíveis em função da vazão de metano .....	29
<b>Tabela 5.4:</b> Custos dos equipamentos, materiais e serviços do sistema de geração de energia elétrica.....	31
<b>Tabela 5.5:</b> Fluxo de caixa do projeto .....	33
<b>Tabela 5.6:</b> Valor Presente Líquido (R\$).....	34

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRELPE Associação Brasileira de empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- BEN Balanço Energético Nacional
- CAGECE Companhia de Água e Esgoto do Ceará
- CENBIO Centro Nacional de Referência em Biomassa
- CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CIAS Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário
- CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CTR Centro de Tratamento de Resíduos
- DCP Documento de Concepção e Projeto
- GLP Gás Liquefeito de Petróleo
- EPA Environmental Protection Agency
- ESTRE Empresa de Saneamento e Tratamento de Resíduos
- EVTE Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico
- GEE Gases de Efeito Estufa
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
- MDL Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- MME Ministério de Minas e Energia
- PEAD Polietileno de Alta Densidade
- PIB Produto Interno Bruto
- PNSB Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
- PDD Project Design Document
- PNSB Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
- RCE Redução Certificada de Emissões
- SIN Sistema Interligado Nacional



TIR Taxa Interna de Retorno

VPL Valor Presente Líquido



## 1 Introdução

O desenvolvimento econômico e o estilo de vida da sociedade moderna, a partir da revolução industrial, geraram a necessidade de um abastecimento adequado e confiável de energia. Contudo, a preocupação com meio ambiente, instigado por questões relacionadas às mudanças climáticas, cria uma situação no cenário atual de busca de fontes alternativas de geração de energia (LIMING, 2006; MARTINOT et al., 2007; SAGAR & KARTHA, 2007; PEIDONG et al., 2007; MARTINOT et al., 2008).

Neste contexto, uma das alternativas de geração de energia é o aproveitamento do metano que os aterros sanitários liberam no processo de degradação da matéria orgânica. Deve-se ressaltar que o processo de urbanização gerou grande concentração populacional em algumas cidades, e aliada ao consumo de produtos menos duráveis, origina-se um aumento significativo da quantidade e da diversidade desses resíduos.

Aliado aos fatos anteriormente mencionados, a ausência de áreas adequadas para a disposição final dos resíduos e a escassez de energia elétrica constituem dois dos problemas graves que o país enfrenta.

Embora exista potencial de aumento na geração de energia de fonte hidráulica, principal fonte do país, torna-se imprescindível os investimentos em alternativas que atendam aos padrões internacionais de desenvolvimento sustentável, viabilizando o crescimento socioeconômico.

Portanto, deve-se ressaltar a importância do aproveitamento da geração de energia a partir dos resíduos sólidos, pois além de se aproveitar um resíduo que não teria mais valor agregado, estar-se-ia gerando energia nas proximidades das cidades com as maiores demanda de energia.

Os aterros sanitários que têm como principal função o armazenamento correto do lixo, poder-se-ia aliar a possibilidade do aproveitamento adequado do biogás gerado ao longo do tempo, possibilitando desta forma uma maior eficiência na produção e captação do metano na massa de resíduos (além do fato de contribuir na redução das emissões de gases de efeito estufa).

Vários autores têm trabalhado com esta temática, desde a análise energética dos resíduos, passando por levantamentos de campo, estudos sobre adaptações de motores de combustão para melhor aproveitamento do metano de resíduos, entre várias outras abordagens (FILHO & BADR, 2003; OLIVEIRA et al., 2006; THEMELIS ET al., 2006; IGONI et al., 2007; FEHR, 2007; KARANI & JEWASIKIEWITZ, 2007; MACHADO et al., 2008; IM et al., 2008; BATOOL & CHUADHRY, 2008; MANFREDI & CHRISTENSEN, 2008; GAAST et al., 2009).

Na linha de incentivo à implantação de mecanismos que reduzam a emissão de gases de efeito estufa, tem-se os projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que disponibiliza recursos para a viabilidade de projetos que habitualmente não seriam implantados por falta de recursos. Os projetos de aterro sanitário podem contemplar recursos advindos do MDL, desde que exista a queima do gás metano ou o aproveitamento deste metano para a geração de energia. O gás metano é um gás de efeito estufa, e considerado também como um dos combustíveis domésticos mais limpos e mais baratos, sendo praticamente inesgotável por ser produzido em qualquer aterro

sanitário ou esgoto submetido ao tratamento anaeróbio (além das jazidas naturais). Esse gás pode ser colocado como uma importante alternativa energética, com condições de desempenhar expressivo papel na substituição do petróleo e seus derivados.

Nesta linha de incentivos, foi criado em 2002, pela Lei Federal 10.438, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com intuito de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de produtores independentes autônomos, concebidos com base em fontes eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa no sistema elétrico interligado nacional. Este programa desenvolve-se de maneira que essas fontes de energia representem 10% da matriz energética nos próximos 20 anos.

Destaca-se que a qualidade e a quantidade do biogás variam de acordo com a quantidade e a composição dos resíduos, tipos de resíduos, decomposição biológica, condições ambientais e a operação de aterros.

Atualmente, existem alguns projetos já desenvolvidos e em desenvolvimento para utilização do biogás como alternativa para gerar energia elétrica. Essa alternativa além de ser um enorme benefício para o setor elétrico contribui também para reduzir as emissões de metano na atmosfera.

### **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica de implantação de um projeto de geração de energia elétrica utilizando o biogás gerado no aterro sanitário Central de Resíduos do Recreio (CRR) localizado no município de Minas do Leão, RS.

Para isso serão estudadas a capacidade de geração e captação do biogás produzido neste aterro sanitário e simulada a geração de energia por um grupo motogerador de 230 KW para, então, verificar a possibilidade de implementação desse projeto no aterro objeto do estudo.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 O Biogás**

O biogás, até pouco tempo, era considerado como um subproduto obtido por meio da decomposição de lixo urbano, do tratamento de efluentes domésticos e resíduos animais. Porém, a alta dos preços dos combustíveis convencionais e o crescente desenvolvimento econômico vêm estimulando pesquisas de fontes renováveis para produção de energia tentando criar, deste modo, novas formas de produção energética que possibilitem a redução da utilização dos recursos naturais esgotáveis.

A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002).

### **2.2 Histórico do Biogás**

Segundo Coelho (2001), a descoberta do biogás, também denominado gás dos pântanos, foi atribuída a Shirley em 1667. Já em 1776, Alessandro Volta reconheceu a presença de metano no gás dos pântanos. No século XIX o aluno de Louis Pasteur, Ulysse Grayon, realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água, a 35°C, obtendo então 100 litros de gás/m<sup>3</sup> de matéria. No ano de 1884, ao apresentar os trabalhos do seu aluno à Academia das Ciências, Louis Pasteur considerou que a fermentação podia construir uma fonte de aquecimento e iluminação (PECORA, 2006).

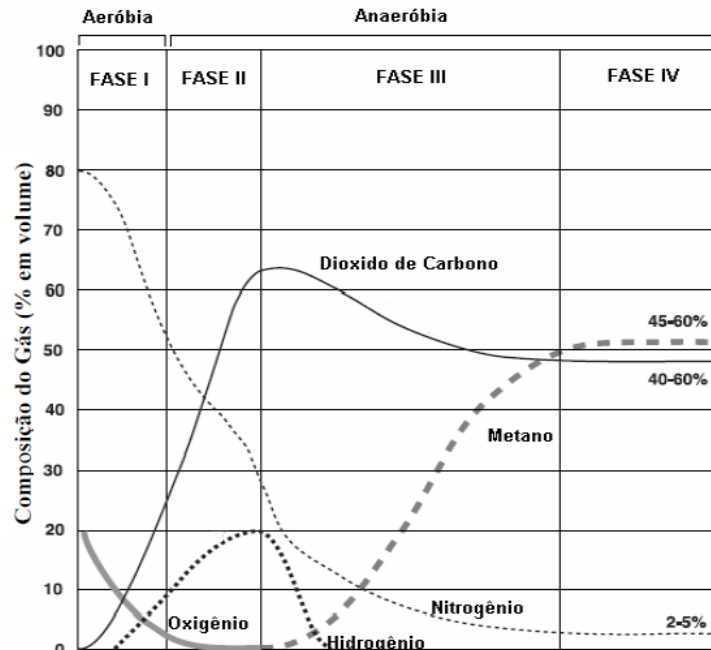
Nas décadas de 50 e 60, Índia e China foram os primeiros países a utilizar o processo de biodigestão, sendo que desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores. A tecnologia da digestão anaeróbia foi trazida para o Brasil com a crise do petróleo na década de 70. Diversos programas de difusão foram implantados no nordeste, porém os resultados não foram satisfatórios e os benefícios obtidos não foram suficientes para dar continuidade ao programa (COELHO, 2001).

De acordo com Pecora (2006), com a crise do petróleo, diversos países buscaram alternativas para sua substituição, acarretando em um grande impulso na recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio. Porém, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, capacidades e recursos humanos, recursos financeiros e cultura. Deste modo, o impulso recebido durante a crise não chegou a substituir os recursos não renováveis por fontes renováveis.

### **2.3 Formação do Biogás**

A transformação da massa de resíduos de um aterro sanitário em gases não é um processo simples, principalmente por conta da diversidade de materiais que a compõem e pelas interações físico-químicas e biológicas que ocorrem com o passar do tempo. As atividades microbiológicas têm grande influência na produção de biogás em aterros sanitários. No entanto, outros mecanismos como a volatilização e as reações químicas também exercem um papel importante na formação de metano, agindo isoladamente ou associado à microbiologia (VAN ELK, 2007).

A produção de gás em aterro sanitário, na sua fase de decomposição dos resíduos sólidos, pode ser dividida em quatro ou cinco fases, dependendo do autor (EPA, 1997; BIDONE & POVINELLI, 1999; LIMA, 2004). Na Figura 2.1, é mostrado um exemplo da divisão em quatro fases.



**Figura 2.1:** Duração das fases variando com o tempo

Fonte: EPA (1997)

- 1ª fase: A primeira etapa da decomposição é aeróbia, isto é, ocorre com presença de oxigênio. Nessa etapa, as bactérias aeróbias consomem oxigênio enquanto metabolizam as cadeias de carboidratos complexos, proteínas e lipídios que estão contidos nos resíduos orgânicos. O primeiro gás produzido é o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). No início dessa etapa, há uma grande quantidade de nitrogênio que declina rapidamente, à medida que o processo vai transcorrendo. Essa etapa pode durar dias ou meses, dependendo da quantidade de oxigênio presente no resíduo quando depositado no aterro. A quantidade de oxigênio dependerá da maneira como o resíduo foi depositado e, se houve ou não compactação. BIDONE & POVINELLI (1999) descrevem como uma etapa de ajustamento inicial e LIMA (2004), como etapa aeróbia. Nessa etapa, segundo LIMA (2004) a temperatura do meio se eleva para o estágio mesofílico em função do comportamento exotérmico das bactérias aeróbias, podendo ainda, dependendo das condições de contorno, atingir o estágio termofílico, com valores variando entre 45°C e 68°C.
- 2ª fase: A segunda fase inicia-se após o oxigênio ter sido consumido. Nessa fase, as bactérias convertem os compostos criados pelas bactérias aeróbias em ácido acético, láctico, fórmico e álcoois, tais como metanol e etanol. Tornando o ambiente totalmente ácido. Esses ácidos misturam-se com a umidade presente nos aterros, causando a dissolução de nutrientes e liberando nitrogênio e fósforo, disponíveis para o crescimento de diversas bactérias no aterro. Os gases produzidos são o dióxido de carbono e o hidrogênio. Caso ocorra o revolvimento da massa de resíduos ou a introdução, de alguma maneira, de oxigênio no aterro, os processos microbiológicos retornam para a primeira fase. De acordo com BIDONE & POVINELLI (1999), essa fase é dividida em duas: a fase de transição, em

que ocorre o estabelecimento das condições de óxido-redução, e a fase de formação de ácidos, com predominância de ácidos orgânicos voláteis. Segundo LIMA (2004), é denominada como fase ácida, na qual o pH varia de 5,2 a 6,8 e a temperatura diminui para 29 a 45 °C.

- 3ª fase: Esta fase também é caracterizada por um ambiente anaeróbio, inicia-se quando certas espécies de bactérias consomem os ácidos produzidos na segunda fase e forma-se o acetato, um ácido orgânico. Nesse processo o ambiente se torna neutro, possibilitando o estabelecimento das bactérias produtoras de metano. As bactérias metanogênicas e as bactérias acidogênicas são simbióticas ou apresentam mutualismo positivo. As acidogênicas criam compostos para as metanogênicas consumirem. As bactérias metanogênicas consomem carbono e acetato que são tóxicos para a maioria das bactérias acidogênicas. Nessa fase que então se inicia a produção do metano com a redução da quantidade de dióxido de carbono produzido. BIDONE & POVINELLI (1999) definem-na como fermentação metânica e LIMA (2004), como metânica instável. Segundo os autores (op.cit), o pH sobe e estabiliza-se na faixa de 6,8 a 7,2, e a temperatura estabiliza-se próximo de 30°C.
- 4ª fase: Etapa final que se inicia quando a taxa de composição e de produção de gás no aterro se mantém relativamente constantes. Usualmente, nessa fase, o gás do aterro contém, em volume, 45% a 60% de metano, 40% a 60% de dióxido de carbono, e 2% a 9% de outros gases. Essa fase é denominada por BIDONE & POVINELLI (1999) como maturação final, caracterizada por estabilização da atividade biológica, escassez de nutrientes, paralisação da produção de gás, predominância de condições ambientais naturais, aumento do valor do potencial redox com aparecimento de O<sub>2</sub> e espécies oxidadas, conversão lenta dos materiais orgânicos resistentes aos microorganismos em substâncias húmicas complexadas com metais. LIMA (2004) define como fase metânica estável. A temperatura é inferior a 30°C (próxima do ambiente), o pH estabiliza-se entre 7,0 e 7,2 e o potencial redox varia em torno de -330 a -600 mV.

Segundo CRAWFORD & SMITH apud AGENCY FOR TOXICSUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR, 2006) um resíduo que é disposto num aterro é capaz de emitir gás por 50 anos ou mais, porém um aterro ao atingir a quarta fase, é capaz de produzir gás a uma taxa constante por mais de 20 anos.

Pelo fato de os aterros serem heterogêneos e de todo o resíduo não ser depositado ao mesmo tempo, as fases descritas acima ocorrem simultaneamente em diferentes áreas e profundidades de um aterro ativo ou recentemente fechado. A separação entre fases torna-se difícil quando o aterro está ativo e resíduos novos são adicionados aos antigos. Após o encerramento do aterro e devido à presença de resíduos em diferentes fases de degradação, este tende a ser impulsionado para a quarta fase, mantendo-se nela por um longo período de tempo.

### 2.3.1 Aspectos Físico-Químicos

Visto que no biogás as concentrações de outros gases são muito pequenas se comparados ao metano e gás carbônico, pode-se restringir as propriedades físico-químicas apenas a esses dois componentes. Porém, esses gases presentes em menor

quantidade, como por exemplo, o gás sulfídrico, influenciam na escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão (PECORA, 2006).

O principal componente do biogás é o metano, quando se trata de utilizá-lo como combustível. Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás (água, dióxido de carbono) prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias entram com o combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. O poder calorífico do biogás se torna menor à medida que se eleva a concentração das impurezas.

Segundo Pecora, 2006, outros aspectos importantes que devem ser considerados são a umidade, visto que afeta a temperatura da chama, diminuição do poder calorífico, limites de inflamabilidade e solubilização do gás sulfídrico. Outro parâmetro importante quando se deseja a manipulação do gás para armazenamento é o volume específico, representado pelo peso específico. Estudos realizados mostraram que, de acordo com a quantidade de metano no biogás seu poder calorífico aumenta, visto que o CO<sub>2</sub> é a forma mais oxidada do carbono não podendo ser queimado. Algumas propriedades físicas do metano, gás carbônico e gás sulfídrico podem ser observadas na Tabela 2.1.

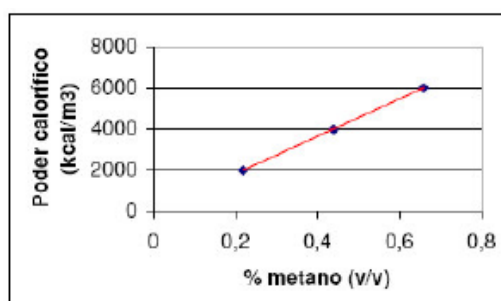
**Tabela 2.1:** Propriedades físico-químicas do metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico

Propriedades	Metano	Dióxido de carbono	Gás Sulfídrico
Peso Molecular	16,04	44,01	34,08
Peso Específico (Ar=1)	0,555 (a)	1,52 (a)	1,189 (b)
Volume Específico	1473,3 cm <sup>3</sup> /g (a)	543,1 cm <sup>3</sup> /g (a)	699,2 cm <sup>3</sup> /g (a)
Capacidade Calorífica	0,775 Kcal/kg°C	0,298 Kcal/kg°C	0,372 Kcal/kg°C
Relação CP/CV	1,307	1,303	1,32
Poder Calorífico	13,268 Kcal/kg	0 Kcal/kg	4,633 Kcal/kg
Limite de inflamabilidade	5-15% por volume	nenhum	4-46% por volume

Obs: (a) -60°C, 1 atm; (b) -70°C, 1 atm;

Fonte: PECORA (2006)

A Figura 2.2 mostra a relação entre o poder calorífico do biogás (kcal/m<sup>3</sup>) e a porcentagem de metano, em volume, presente no mesmo.



**Figura 2.2:** Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano em volume. Fonte: ALVES, 2000.

A equivalência energética do biogás em relação a outros combustíveis é determinada levando em conta o poder calorífico e a eficiência média de combustão. A Tabela 2.2 mostra a equivalência de 1 Nm<sup>3</sup> (normal metro cúbico) de biogás.



**Tabela 2.2:** Equivalência de 1 Nm<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis.

Combustível	Quantidade equivalente a 1Nm <sup>3</sup> de biogás
Carvão Vegetal	0,8 kg
Lenha	1,5 kg
Óleo Diesel	0,55 l
Querosene	0,58 l
Gasolina Amarela	0,61 l
GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	0,45 l
KWh	1,43
Álcool Carburante	0,8 l
Carvão Mineral	0,74 kg

Fonte: CARDOSO FILHO (2006)

O biogás pode substituir outros combustíveis utilizados na indústria. Como pode ser verificado na Tabela 2, com 1 Nm<sup>3</sup> de biogás obtêm-se a energia equivalente à de 1,5 kg de lenha ou 0,74 kg de carvão mineral, por exemplo.

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. O biogás não é tóxico, porém atua sobre o organismo humano diluindo o oxigênio, o que pode provocar morte por asfixia. Não é solúvel em água e sua combustão não libera resíduos (LIMA, 2005).

### 2.3.2 Fatores que Afetam a Formação de Gás

A capacidade de produção de gás em aterro depende de muitas variáveis, incluindo composição e idade do resíduo, composição química, umidade, tamanho das partículas, pH, temperatura, projeto do aterro, operação, entre outros. Descrevem-se, na sequência, os fatores que afetam a geração de gás (ATSDR, 2006; BIDONE & POVINELLI, 1999; BORBA, 2006; LIMA, 2005; VAN ELK, 2007).

- *Composição do resíduo:* A maior parte dos resíduos depositados em um aterro é constituída por material orgânico, facilmente degradável. O restante consiste em vários materiais inertes como plásticos, metais, entulho, entre outros materiais não degradáveis. O resíduo sólido de um município pode ter variações sazonais ao longo do ano, dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população. Quanto maior a fração orgânica biodegradável depositada no aterro, maior será a quantidade de gás produzido pelas bactérias durante a decomposição. Alguns resíduos degradáveis, tais como pedaços grandes de madeira, que não são inertes, mas se decompõem lentamente, na prática não contribuem significativamente com a geração de gás.
- *Idade do resíduo:* A produção do gás metano apresenta duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso e tempo de conversão. O tempo de atraso é o período da disposição dos resíduos até o início da geração do metano. O tempo de conversão é o período da disposição dos resíduos até o final da geração do metano. Geralmente, os resíduos recentemente depositados (menos

de 10 anos) geram uma quantidade maior de gás do que os resíduos mais antigos (mais de 10 anos). O pico da produção de gás em um aterro ocorre depois de 5 a 7 anos em que os resíduos foram depositados.

- *Composição química:* A análise química dos resíduos identifica a composição do substrato, possibilitando a avaliação do grau de resistência à atividade enzimática e da disponibilidade de nutrientes para os microrganismos. A relação de carbono/nitrogênio considerada ótima para a estabilização anaeróbia é de 30:1; no entanto, os resíduos sólidos urbanos (RSU), geralmente apresentam valores em torno de 50:1, sendo necessária à correção dessa relação, por meio da suplementação de nitrogênio. Os compostos de enxofre na forma de  $(SO_4)^{-2}$  e  $S^{-2}$  são utilizados pelos microrganismos para a formação da biomassa. O íon  $(SO_4)^{-2}$  também é utilizado como acceptor de elétrons; no entanto, ele inibe o processo metanogênico quando se reduz o sulfeto, que é tóxico, e pela competição por substratos comuns a outros microrganismos. Existem certos nutrientes que são essenciais tanto à metanogênese quanto a outros microrganismos para que o processo se desenvolva, como nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B12. Porém, para ocorrer a atividade microbiana é necessário que esses nutrientes estejam presentes em níveis adequados, principalmente o carbono, o nitrogênio e o enxofre (formas de sulfetos).
- *Umidade:* A umidade é o fator mais significativo para a taxa de produção de gás, além de favorecer o meio aquoso que é essencial para o processo de produção de gás, também serve como transporte para os microrganismos dentro do aterro sanitário. As condições de umidade dentro do aterro dependem de muitos fatores, um deles é a umidade inicial do resíduo (umidade com que os resíduos chegam ao aterro). Outros fatores são a composição gravimétrica, a impermeabilização de fundo, a pluviosidade da região, o tipo de cobertura e a prática ou não de recirculação. No Brasil, o teor de umidade dos resíduos varia de 40 a 60%. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção do gás e de  $CH_4$ . A produção máxima é atingida entre 60% e 80% de umidade. Por outro lado, JUCÁ & MACIEL apud BORBA (2006) verificaram altas taxas de decomposição dos resíduos no aterro de Muribeca situado na região metropolitana de Recife, para umidades variando entre 20 e 40%. O teor de umidade em um aterro muda ao longo do tempo. Alterações no teor de umidade do aterro podem resultar em mudanças na infiltração de águas superficiais e/ou influxo de águas subterrâneas, liberação de água como resultado da decomposição dos resíduos e variações sazonais do teor de umidade dos resíduos. Na teoria, a condição ideal para a produção de gás é a total saturação do resíduo. No entanto, segundo BIDONE & POVINELLI (1999) as infiltrações excessivas podem causar retardamento na produção, devido ao favorecimento da fermentação ácida da matéria orgânica, que liberam grandes quantidades de ácidos graxos voláteis e ocasionando a inibição do processo metanogênico. Na maior parte dos casos os resíduos sólidos quando são depositados nos aterros não estão saturados, porém dois fatores contribuem para saturar os resíduos: primeiramente a água proveniente das chuvas e depois a pressão das camadas superiores sobre as outras. Uma vez que a saturação é alcançada, a pressão da água livre acelera as reações químicas e biológicas (PEREIRA apud BORBA, 2006). Segundo JUNQUEIRA apud BORBA (2006), em períodos chuvosos é favorecida a entrada de uma carga extra de

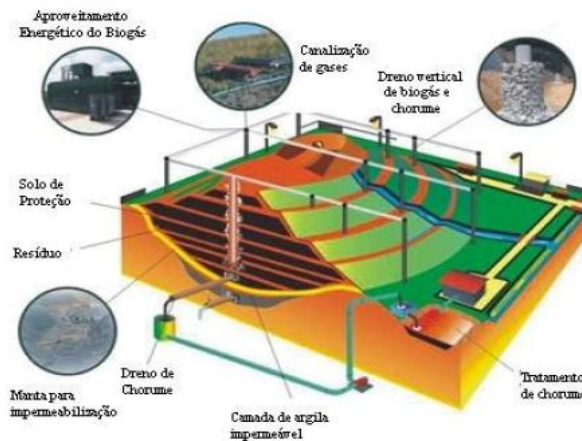
oxigênio dissolvido na água o que possibilita um incremento das atividades das bactérias aeróbias e facultativas, o que leva conseqüentemente a um aumento na temperatura na massa de resíduos em função das atividades exotérmicas dos microorganismos. O autor relata que verificou variações bruscas de temperatura na massa de resíduos em períodos chuvosos, e que estas variações favorecem a desestabilização dos microorganismos anaeróbios, provocando uma diminuição na velocidade de degradação da matéria orgânica.

- *Tamanho das partículas:* Há uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho dos mesmos, expressa pela superfície específica (área da superfície/volume). Sendo assim, observa-se um aumento da velocidade de degradação quando a massa é composta por resíduos menores, o que tem motivado o uso de trituradores, por exemplo, na compostagem e nos processos mecânico-biológicos. Vale salientar que o tamanho das partículas tem influência na degradação dos resíduos tanto nos processos aeróbios quanto nos anaeróbios (VAN ELK, 2007).
- *pH:* O potencial hidrogeniônico (pH) tem importância fundamental no processo da decomposição anaeróbia, pois suas variações podem acelerar ou inibir o processo. Em função do pH e da capacidade de crescimento no meio os microrganismos podem ser classificados em acidofílicos (crescimento ótimo com pH baixo), neutrofílicos (melhor crescimento com pH próximo de 7) e alcalinofílicos (crescimento ótimo com pH alto). Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que aumenta e se aproxima da neutralidade a partir do começo da fase metanogênica. As bactérias metanogênicas são as mais sensíveis ao pH, a faixa de pH ótima para essas bactérias é de 6,5 a 7,6. Caso haja o desbalanceamento no processo, por exemplo, devido a um aumento repentino da carga orgânica, poderá haver um acúmulo de ácidos voláteis se a capacidade tampão determinada em sua maior parte pela alcalinidade a bicarbonato não for suficiente para a neutralização. Nesse caso, ocorrerá queda do pH, provocando um desbalanceamento maior. Segundo BIDONE & POVINELLI (1999) e LIMA (2005) a produção de CH<sub>4</sub> é máxima quando o pH situa-se na faixa de 7,0 a 7,2, sendo que para valores abaixo de 6,0 e superiores a 7,6, pode ser inibida a atividade microbiana no aterro sanitário.
- *Temperatura:* A temperatura de um aterro interfere nos tipos de bactérias predominantes e na taxa de produção de gás. A formação de metano pode ocorrer a uma extensa faixa de temperatura, entre 0º e 97 ºC. Em ambientes anaeróbios, podem existir três faixas ótimas de temperatura: psicofílica (ainda não bem definida); mesofílica (30 a 35ºC) e termofílica (50ºC a 55ºC). A temperatura é altamente importante no processo de formação de metano. Quanto mais elevada, maior será a atividade bacteriana e, conseqüentemente, a produção de metano. Dois aspectos devem ser considerados com relação à temperatura: a temperatura desenvolvida dentro da massa de resíduos e a influência da temperatura externa sobre os processos que ocorrem internamente. A faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30ºC a 40ºC, sendo que temperaturas abaixo dos 15ºC propiciam severas limitações para a atividade metanogênica. Flutuações de temperatura são comuns na parte mais elevada do aterro, como resultado das mudanças na temperatura local (VAN ELK, 2007). No aterro sanitário as máximas temperaturas frequentemente são alcançadas dentro

de 45 dias após a disposição dos resíduos como um resultado da atividade aeróbia microbiológica, diminuindo nas condições anaeróbias. Geralmente a temperatura nos aterros não ultrapassa 45°C, sendo difícil um aterro ser operado na faixa termofílica. A temperatura ambiente não exerce influência significativa na massa de aterro em função da mistura de resíduos e solo. JUCÁ & MACIEL\* apud BORBA (2006) relatam que no Aterro de Muribeca, situado na região metropolitana de Recife, que possui características climáticas tropicais, a temperatura ambiente só influencia até 2,5m de profundidade.

## 2.4 Aterro Sanitário

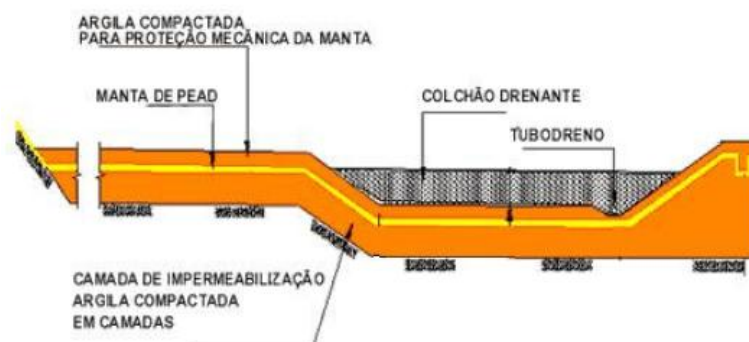
O aterro sanitário é a forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo através do seu confinamento em camadas compactadas e cobertas com terra, atendendo às normas operacionais, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. O esquema de um aterro sanitário pode ser representado conforme a Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Corte esquemático de um aterro (Fonte: RECICLOTECA – 2007)

Durante a projeção do aterro são realizados estudos geológicos e topográficos para selecionar a área a ser destinada, de forma que o meio ambiente não seja comprometido com a sua instalação.

A impermeabilização do solo é feita por meio de camadas de argila e uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) para evitar infiltração dos líquidos percolados (chorume) no solo, como pode ser visto nas Figuras 2.4 e 2.5.



**Figura 2.4:** Impermeabilização do solo (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005).



**Figura 2.5:** Geomembrana em PEAD em aterro sanitário (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005).

O lixo é depositado sobre o terreno e depois recoberto com camadas do solo do próprio local, isolando-o do meio ambiente. Formam-se então câmaras, nas quais é produzido o gás e liberado o chorume. O chorume é captado através de tubulações e escoado para tanques de tratamento. O sistema de drenagem do chorume pode ser observado na Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Dreno (E) e tanque (D) de chorume. (Fonte: SANTEC RESÍDUOS, 2005).

Para evitar o excesso de água de chuva, são colocados tubos ao redor do aterro, que permitem o desvio dessa água que são armazenados em lagos para posterior utilização, como pode ser visto na Figura 2.7.



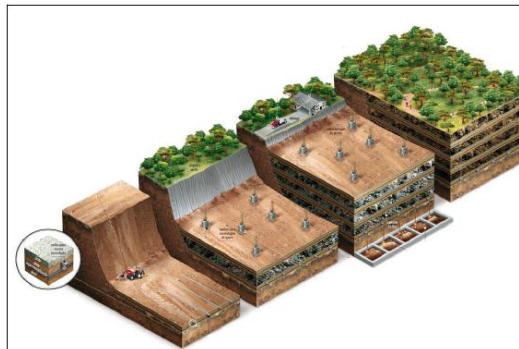
**Figura 2.7:** Canalização de águas pluviais. (Fonte: CIAS, 2003).

Os gases liberados durante a decomposição dos resíduos são captados e podem ser queimados em *flare* ou ainda utilizados como fonte de energia. O local da instalação do aterro deve ser cuidadosamente escolhido, abrangendo grandes dimensões e, devido a alguns inconvenientes como mau cheiro, tráfego de caminhões de lixo, etc., deve estar localizado distante das concentrações urbanas.

A forma mais simples de coletar gases do aterro é através da extração do biogás por meio de tubos verticais perfurados. Podem ser colocados tubos de sucção horizontais quando o lixo ainda está sendo depositado no aterro e assim ele poderá ser extraído desde o início da sua produção (WILLUMSEN, 2001). Em aterros sanitários construídos conforme a norma nacional vigente, já está prevista a colocação desta tubulação para a coleta do gás.

Algumas vezes, uma membrana impermeável protetora é colocada sobre o aterro e assim, quase todo o biogás pode ser coletado e recuperado. Porém esta solução é muito cara, utilizada em países com demanda limitada. Essa membrana obstrui a entrada de água impedindo assim a formação do biogás. Para que haja continuidade na produção de biogás, se faz necessária a injeção de água sob a membrana ou promover a recirculação do chorume injetando-o da mesma maneira.

Um sistema padrão de coleta do biogás de aterro é composto por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão e sistema de purificação do biogás. O sistema de coleta possui tubos verticais perfurados ou canais e em alguns casos membrana protetora. Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui *flare* para queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (MUYLEAERT, 2000; WILLUMSEN, 2001). A Figura 2.8 mostra as etapas de construção de um aterro sanitário.



**Figura 2.8:** Etapas de construção de aterro sanitário. (Fonte: RE, 2010).

A coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro ser fechada. Cada uma das pontas do tubo é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás para um coletor principal, como pode ser visto na Figura 2.9. O sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás se necessário (MUYLEAERT, 2000). O biogás é succionado do aterro por meio de pressão nos tubos de transmissão.



**Figura 2.9:** Tubos de coleta de biogás. (Fonte: CENBIO, 2006).

A conexão entre poço com a bomba e o sistema de utilização pode ser feita de diversas maneiras. Os poços são ligados a um tubo principal que percorre o aterro. O problema deste sistema é a dificuldade de regular a quantidade e qualidade do biogás, além de encontrar o local do vazamento quando todos os tubos estão ligados a um grande sistema. Para uma operação mais segura, econômica e com melhores condições para os trabalhadores, uma solução é ter um tubo para cada poço ligado a uma bomba e uma casa de regulagem (WILLUMSEN, 2001).

A sucção do gás dos poços de coleta é realizada por um compressor, conforme visto na Figura 2.10. Os compressores também podem ser necessários para comprimir o gás antes de entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários dependerão da taxa do fluxo de gás e do nível de compressão desejado, que pode ser determinado pelo equipamento de conversão energética (TOLMASQUIM, 2003).



**Figura 2.10:** Compressores para Flare. (Fonte: CENBIO, 2006).

Quando o biogás (quente) produzido pelo aterro passa pela tubulação, acaba resfriando formando então um condensado. Caso não se remova esse condensado o sistema de coleta pode ser bloqueado interrompendo, então, o processo de recuperação de energia. O controle do condensado tem início no sistema de coleta onde são utilizados conectores e tubos inclinados para permitir a drenagem em tanques e após a coleta o condensado é removido. Os métodos para disposição do condensado são: descarga no sistema público de esgoto, sistema de tratamento local, e recirculação para o aterro sanitário. O melhor método dependerá das características do condensado (em função dos componentes do lixo local), do custo do tratamento, além da legislação e regulação vigentes (TOLMASQUIM, 2003).

O *flare* (Figura 2.11) é um dispositivo utilizado na ignição e queima do biogás. É considerado um componente de cada opção de recuperação de energia, visto que pode ser necessário durante as etapas de início do processo e manutenção do sistema. Também pode ser utilizado para queima do biogás excedente entre os *upgrades* de sistemas, podendo ser abertos (ou vela) ou enclausurados. Estes últimos são mais caros, mas podem ser requeridos porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão altas. Além do que, *flares* enclausurados podem reduzir o nível de ruído e iluminação (MUYLAERT, 2000).



**Figura 2.11:** Flare. (Fonte: CENBIO, 2001).

Após a coleta e antes da sua utilização no processo de conversão de energia, o biogás é tratado para a remoção de algum condensado que não foi coletado, assim como particulados e impurezas em geral. Para sua utilização em caldeiras, um tratamento mínimo é requerido; em gasodutos é indispensável um tratamento extensivo para remover o  $\text{CO}_2$ . No caso da geração de energia podem ser utilizados filtros para a remoção de impurezas, visto que estas podem danificar os componentes do motor ou da turbina, reduzindo a eficiência do sistema. (TOLMASQUIM, 2003).

## 2.5 Tecnologias de Conversão do Biogás

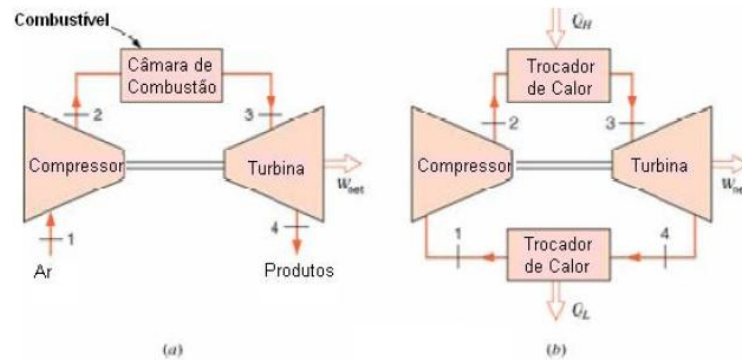
Pecora (2006) diz que a conversão energética do biogás é o processo de transformação da energia química das moléculas do biogás, por meio de uma combustão controlada, em energia mecânica, que por sua vez será convertida em energia elétrica.

As tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás são as turbinas a gás e os motores de combustão interna, que estão detalhadas a seguir. Existem também tecnologias emergentes como as células de combustíveis que, ainda em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, pode ser considerada uma tecnologia promissora (CASTRO, 2006).

### 2.5.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás podem ser classificadas, de acordo com o ciclo de operação, em ciclo fechado e ciclo aberto, sendo o último, o mais comum. O modo aberto é ilustrado na Figura 2.12a, onde o fluido de trabalho é comprimido (no compressor) elevando-se a pressão. Este processo não tem nenhum calor adicionado, visto que o compressor, em condições ideais, opera em regime adiabático, fazendo com que o trabalho de compressão aumente a temperatura do ar. Este então entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível, reage, iniciando o processo de queima. Os gases resultantes da combustão, à elevada temperatura, expandem-se na turbina gerando energia mecânica, além de acionar o compressor. O trabalho útil produzido é calculado pela diferença entre o trabalho da turbina e o consumido pelo compressor. No ciclo fechado, ilustrado na Figura 2.12b, os gases que deixam a turbina passam por um trocador de calor onde sofrem resfriamento para entrar novamente no compressor (MORAN; SHAPIRO, 2002). Esta configuração apresenta, portanto, melhor aproveitamento do calor e a possibilidade de operação em pressões elevadas (SANTOS, 2003).



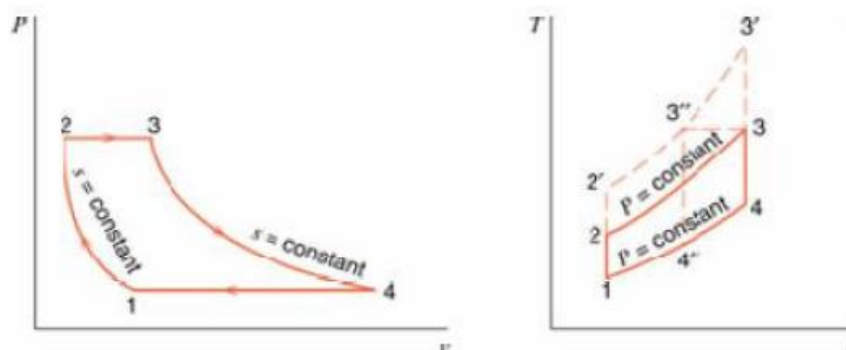


**Figura 2.12:** Turbina a gás: (a) circuito aberto – processo real de combustão interna; (b) circuito fechado – aproximação por um processo ideal de transferência de calor. (Fonte: CASTRO, 2006).

Segundo Moran e Shapiro (2002), visando à simplificação do processo, o estudo de instalações de potência com turbinas a gás é a de uma análise de ar-padrão, onde sempre são estabelecidas duas hipóteses: o ar é o fluido de trabalho (se comporta como gás ideal) e o aumento de temperatura que seria obtido por meio da combustão é realizado por meio de uma fonte externa de calor. Pode-se dizer, ainda, que o ciclo aberto é o processo real de combustão interna enquanto que o ciclo fechado é a aproximação de um processo ideal de transferência de calor.

### 2.5.2 Ciclo de ar-padrão ideal Brayton

Nas condições simplificativas anteriormente citadas (ciclo fechado), os sistemas de potência equipados com turbinas a gás operam de acordo com o ciclo de Brayton e são compostos por quatro processos. De acordo com as idealizações do ar-padrão, desconsiderando as perdas por transferência de calor para o ambiente e as perdas de carga por atrito, além de que o ar escoar a pressão constante através do trocador de calor, os processos no compressor e na turbina são considerados isoentrópicos (MORAN; SHAPIRO, 2002). Os quatro processos envolvidos são descritos a seguir e podem ser observados na Figura 2.13.



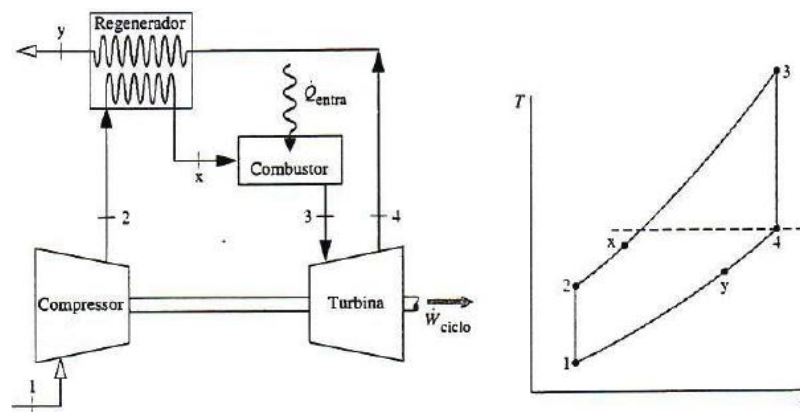
**Figura 2.13:** Ciclo de ar-padrão ideal Brayton. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002).

Por meio da Figura 2.13 podem-se identificar os quatro processos:

- 1-2: Compressão isoentrópica no compressor;
- 2-3: Aumento de temperatura a pressão constante;
- 3-4: Expansão isoentrópica na turbina e;
- 4-1: Recuperação de calor a pressão constante.

### 2.5.3 Ciclo Brayton com Regeneração

Caso os gases provenientes da turbina fossem descarregados diretamente para o ambiente, grande quantidade de energia estaria sendo desperdiçada, visto que a temperatura de saída desses gases é normalmente superior à ambiente. Através de um trocador de calor (regenerador) é possível utilizar esse potencial energético pré-aquecendo o ar antes de entrar na câmara de combustão, reduzindo a quantidade de combustível a ser queimado (MORAN; SHAPIRO, 2002). O ciclo ar-padrão Brayton com regenerador é mostrado na Figura 2.14a. O gás que deixa a turbina é resfriado do estado 4 ao estado y e o ar que deixa o compressor é aquecido do estado 2 ao estado x (Figura 2.14b).



**Figura 2.14:** (a) Ciclo de ar-padrão de turbina a gás regenerativa. (b) Diagrama T x s do sistema regenerativo. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002).

Ainda segundo Moran e Shapiro (2002), para que ocorra o aumento da temperatura do estado x ao estado 3 é necessária a transferência de calor de uma fonte externa e, portanto, o calor adicionado por unidade de massa é dado pela Equação 1:

$$\frac{Q_{entra}}{m} = h_3 - h_x \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$m$ : vazão mássica (kg/s);

$h_3$ : entalpia no ponto 3 (kJ/kg);

$h_x$ : entalpia no ponto x (kJ/kg).

Visto que o calor adicionado é reduzido e a potência líquida não sofre alteração com a presença de um regenerador, conclui-se que a eficiência térmica aumenta.

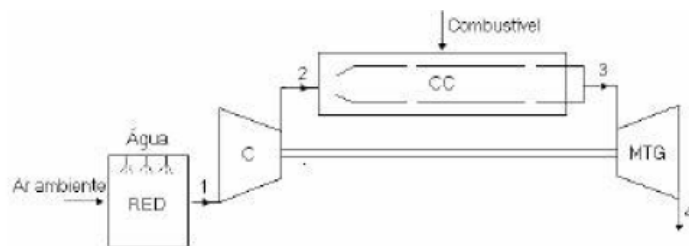
### 2.5.4 Microturbinas

As microturbinas possuem o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de circuito aberto, apresentando possibilidade de geração de eletricidade em pequena escala. Apresenta alta confiabilidade, simplicidade de projeto, é compacta, de fácil instalação e manuseio. Foram, inicialmente, construídas para aplicações em transporte como motores de ônibus e turbinas de aviões e, posteriormente, aplicadas em sistemas de geração de energia elétrica e cogeração (GOMES et. al., 2001).

A redução no consumo de combustível e máxima geração de potência elevam a eficiência do ciclo. Pode-se realizar o resfriamento do ar de combustão na entrada do

compressor, obtendo-se, desta forma, melhor eficiência e potência destes ciclos, já que o ar, a elevadas temperaturas apresenta menor densidade, reduzindo a massa de ar a ser fornecida à turbina. O resfriamento do ar pode ser feito com a utilização de sistemas evaporativos por painéis de contato (PEREIRA, 2003).

A Figura 2.15 mostra uma microturbina constituída basicamente por um ciclo Brayton aberto com um painel evaporativo acoplado à entrada de ar do compressor. No resfriador evaporativo direto (RED) o ar sofre resfriamento e umidificação antes de entrar no compressor (1). Na saída do compressor o ar é insuflado para a câmara de combustão (CC) onde é queimado com o combustível gerando os produtos de combustão que sofrerão expansão na microturbina a gás (MTG) gerando trabalho de eixo (PIMENTA; CASTRO, 2003).



**Figura 2.15:** Microturbina baseada no ciclo Brayton aberto.  
(Fonte: PIMENTA; CASTRO, 2003).

### 2.5.5 Motores de combustão Interna

O motor de combustão interna é assim chamado por realizar trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro. O trabalho mecânico é gerado com a transformação do movimento retilíneo do pistão em circular por meio de um virabrequim. É um mecanismo amplamente utilizado, por ser um processo prático e apresenta grande durabilidade (CORREA, 2003).

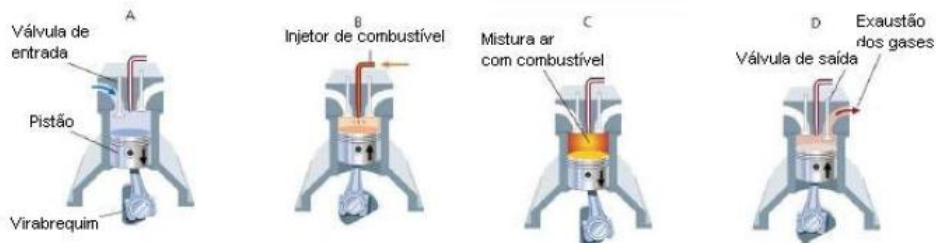
Ainda segundo Correa (2003), em 1876, o engenheiro alemão chamado Nikolaus August Otto desenvolveu um motor com o conceito de 4 tempos que foi introduzido no mundo em 1878, e até hoje é conhecido como motor de ciclo Otto. No ano de 1892, Rudolph Diesel, outro engenheiro alemão, eliminou a necessidade de um circuito elétrico para o início da combustão, criando um motor similar ao de ciclo Otto em que o ar é comprimido a alta pressão tendo sua temperatura elevada suficientemente de modo a promover a ignição espontânea do combustível. Esse motor foi então denominado de ciclo Diesel.

O ciclo Otto e o ciclo Diesel são muito parecidos. A diferença principal está no processo de adição de calor, visto que o Otto ocorre a volume constante (isocórico) e o Diesel ocorre à pressão constante (isobárico) (CASTRO, 2006). Estes ciclos são vistos a seguir.

### Motores Ciclo Diesel

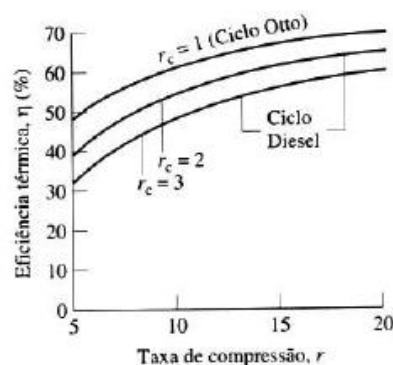
Motores de ciclo Diesel são aqueles em que o combustível é injetado no final da compressão do ar. Como a pressão do combustível é maior que a do ar aquecido, ocorre a combustão por auto-ignição. Este processo não se limita apenas a combustíveis líquidos. Atualmente já são produzidos motores conhecidos como de combustível misto ou conversível que utilizam gás como combustível no processo Diesel (PEREIRA, 2006).

A Figura 2.16 mostra os quatro ciclos do motor Diesel. No primeiro estágio (A) o ar é aspirado através da válvula de entrada para o interior do cilindro. O pistão então sobe comprimindo (com taxa muito elevada) o ar do cilindro durante o segundo estágio (B) e a temperatura é elevada. A injeção do combustível a alta pressão ocorre no terceiro estágio (C), onde ao entrar em contato com o ar comprimido a alta temperatura promove a combustão espontânea e força o pistão para baixo. No último estágio (D) os gases são liberados pela válvula de exaustão pelo movimento de subida do pistão.



**Figura 2.16:** Funcionamento do motor Diesel. (Fonte: CASTRO, 2006).

No ciclo Diesel, com o aumento da taxa de compressão ocorre o aumento da eficiência térmica do ciclo, o que pode ser observado na Figura 2.17. Nesta figura é possível observar que o mesmo acontece para o ciclo Otto, diferenciando-se do ciclo Diesel apenas pela razão de corte, lembrando que, no ciclo Diesel, o processo 2-3 é a adição de calor ao fluido à pressão constante, no ciclo Diesel e a volume constante, no ciclo Otto.



**Figura 2.17:** Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Diesel. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002).

### Motores Ciclo Otto

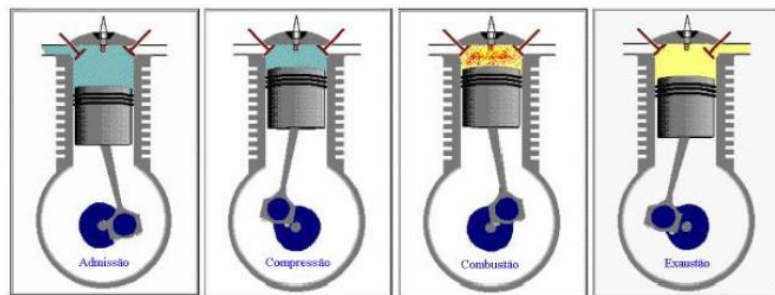
Os motores de ciclo Otto aspiram a mistura ar-combustível antes de ser comprimida no interior dos cilindros e a combustão da mistura é dada por centelha produzida numa vela de ignição (PEREIRA, 2006).

A Figura 2.18 mostra os quatro tempos do motor Otto, assim designado, pois seu funcionamento ocorre sequencialmente em quatro etapas. Castro (2006) lista, na sequência, as 4 etapas do funcionamento do motor Otto.

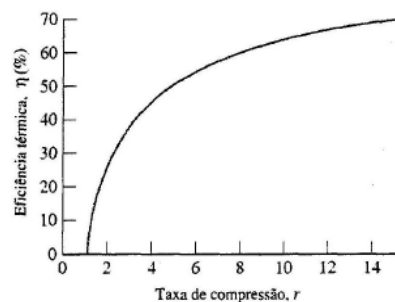
- *Primeiro tempo:* abertura da válvula de admissão através da qual é injetada no cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim.

- *Segundo tempo*: fechamento da válvula de admissão e compressão da mistura (taxa da ordem de 10:1) e conforme o pistão sobe (antes de chegar à parte superior) a vela gera uma faísca.
- *Terceiro tempo*: explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. Esta expansão promove uma força que faz com que o pistão desça.
- *Quarto tempo*: Abertura da válvula de escape através do qual os gases são expulsos pelo pistão.

A eficiência térmica do ciclo Otto é função apenas da taxa de compressão em relação diretamente proporcional, como pode se verificar na Figura 2.19. Seria interessante, portanto, que motores de combustão interna possuíssem razões de compressão elevadas, porém, é estabelecido um limite superior de compressão para motores ciclo Otto devido à possibilidade de auto-ignição, que ocorre caso a temperatura da mistura não queimada se torne muito alta antes que a mistura seja consumida pela frente de chama. A auto-ignição pode causar ondas de alta pressão que provocam perda de potência e danos no motor.



**Figura 2.18:** Desenho esquemático das etapas de funcionamento de um motor ciclo Otto. (Fonte: PECORA, 2006).



**Figura 2.19:** Eficiência térmica do ciclo de ar padrão frio Otto. (Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002).

## 2.6 Comparação Entre as Tecnologias de Conversão

De acordo com estudos realizados por Coelho (2001), algumas tecnologias disponíveis comercialmente serão descritas na Tabela 2.3 a seguir.

**Tabela 2.3: Comparação das emissões entre as tecnologias de conversão.**

<b>Tecnologia de Conversão</b>	<b>Potência Instalada</b>	<b>Rendimento Elétrico</b>	<b>Emissões NOx (PPM)</b>
Motores a gás (Ciclo Otto)	30 KW - 20 MW	30% - 40%	250 - 3000
Turbinas a gás (Médio Porte)	500 KW - 150 MW	20% - 30%	35 - 50
Microturbinas (Pequeno Porte)	30 KW - 100 KW	24% - 28%	< 9

Fonte: CENBIO, 2005

Observa-se que os motores possuem maior eficiência de conversão elétrica, porém, as turbinas a gás podem apresentar um aumento no seu rendimento quando operadas no sistema de cogeração (calor e eletricidade). Nas turbinas e microturbinas, a taxa de emissão de NOx, gás de grande impacto quando relacionado ao efeito estufa, é muito menor quando comparada à taxa de emissão dos motores, sendo vantajosa a utilização deste tipo de tecnologia.

A conversão de motores ciclo Diesel para ciclo Otto por meio de adaptações necessárias como, por exemplo, a substituição dos bicos injetores por velas de ignição pode ser uma alternativa tecnológica. Por meio dessa conversão é possível aproveitar a alta taxa de compressão dos motores Diesel para compensar o baixo poder calorífico do biogás.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Modelos para a Estimativa de Geração de Biogás

Os modelos matemáticos são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de GDL (gás de lixo) no local do aterro sanitário. Os resultados podem ser utilizados para avaliar o potencial para migração/emissões de GDL perigosas e para avaliar a viabilidade do projeto de gestão do GDL. Atualmente existem vários modelos matemáticos disponíveis para calcular a produção de gás de lixo (BORBA, 2006; GONÇALVES, 2007). São esses os mais utilizados:

- Modelo de Primeira Ordem (First order model – TNO)
  - LandGEM (Versão 3.02);
  - Modelo utilizado pelo Banco Mundial;
  - Modelo utilizado pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Modelo Multi-fase
  - Modelo GasSim.

Serão descritos apenas os modelos LandGEM, Banco Mundial e IPCC por serem os mais difundidos, mas será aplicado neste estudo apenas o modelo IPCC.

##### 3.1.1 LandGEM (Versão 3.2)

O LandGEM (Landfill Gas Emissions Model – Modelo de Emissão de Gases em Aterros Sanitários) é um programa desenvolvido pelo CTC (Control Technology Center – Centro de Controle de Tecnologia) da EPA (Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) em 2005 (EPA, 2005).

O LandGEM é um modelo matemático utilizado para contabilizar quantidade e variações na geração de gases em aterros, calculando, além do metano, a emissão de 49 outros componentes. O programa LandGEM adota parâmetros variáveis de acordo com o clima da região e com o tipo de resíduos gerados. Esse modelo usa uma equação de primeira ordem (equação 2) para calcular a estimativa anual das emissões pelo período especificado.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] e^{-kt_j} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  = geração anual de metano para o ano calculado ( $m^3$ /ano);

$i = 1$  - acréscimo por ano;

$n$  = ano do cálculo (ano inicial de abertura do aterro);

$j = 0,1$  - acréscimo por ano;

$k$  = taxa de geração de metano ( $\text{ano}^{-1}$ );

$L_0$  = potencial de geração de metano ( $m^3$ /Mg);

$M_i$  = massa de resíduos recebidos no ano em cada seção (Mg);

$t_{ij}$  = ano, em cada seção, de recebimento da massa de resíduos

Esse modelo pode ser usado tanto com os dados específicos do local, quanto com dados padrões para estimar as emissões de gases em aterros sanitários de resíduos sólidos municipais. O programa possui dois conjuntos de parâmetros para o cálculo da geração de metano em aterros sanitários:

- AP42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors) – utiliza os parâmetros de  $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{t}$  de resíduos e  $k=0,02 \text{ ano}^{-1}$  (regiões áridas  $< 635 \text{ mm/ano}$ ) ou  $k=0,04 \text{ ano}^{-1}$  (regiões áridas  $> 635 \text{ mm/ano}$ ).
- CAA (Clean Air Act) – utiliza os parâmetros de  $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{t}$  de resíduos e  $k=0,02 \text{ ano}^{-1}$  (regiões áridas  $< 635 \text{ mm}$ ) ou  $k=0,05 \text{ ano}^{-1}$  (regiões áridas  $> 635 \text{ mm/ano}$ ).

Os parâmetros  $L_0$  e  $k$  são os mais importantes da equação 2, pois refletem variações de acordo com local, clima, tipo de resíduos etc. Teoricamente, o fator  $k$  varia de 0,003 a 0,21 ( $\text{ano}^{-1}$ ), porém, nas condições brasileiras, o fator pode ser aplicado com magnitudes de 0,05 até 0,15. Já o fator  $L_0$  é proporcional à porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos, e pode variar de zero (ausência de material degradável) até  $300 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ . Como no Brasil a matéria orgânica constitui cerca de metade dos RSUs, o valor para  $L_0$  varia de 140 até  $190 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$  (CEPEA, 2004).

### 3.1.2 Modelo Utilizado pelo Banco Mundial

O Banco Mundial apresenta no Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe (2003) o Modelo Scholl Canyon, que é também um modelo cinético de primeira ordem com base na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo. Segundo o manual citado anteriormente, o modelo foi selecionado por ser o mais comumente empregado e aceito nas Américas do Sul e do Norte e por sua forma simples de compreender e aplicar. O modelo é representado pela equação 3 apresentada abaixo :

$$Q_{(\text{CH}_4)_i} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k \cdot t} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$Q_{(\text{CH}_4)_i}$  = Metano produzido no ano  $i$  a partir da seção  $i$  do resíduo, ( $\text{m}^3/\text{ano}$ );

$k$  = Taxa da geração de metano, ( $\text{anos}^{-1}$ );

$L_0$  = Potencial da geração de metano, ( $\text{m}^3 \text{ CH}_4 / \text{t resíduo}$ );

$m_i$  = Massa de resíduo despejada no ano  $i$ , ( $\text{t/ano}$ );

$t_i$  = Anos após o fechamento.

Os valores sugeridos para a constante de geração de metano ( $k$ ) estão apresentados na tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Valores para  $k$  propostos em correspondência com a precipitação anual

Precipitação Anual	Campo dos Valores de $k$		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Degradável	Altamente Degradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 e <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: BANCO MUNDIAL, 2003.



O potencial de geração de metano ( $L_0$ ) representa sua produção total por tonelada de lixo. Valores típicos para este parâmetro variam de 125 m<sup>3</sup> a 300 m<sup>3</sup> de metano/tonelada de resíduo.

O Manual do Banco Mundial propõe a utilização de um valor pré-estabelecido de  $L_0$  de 170 m<sup>3</sup> de metano/tonelada de resíduos, conforme a Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Valores  $L_0$  em função da degradabilidade do resíduo.

Categorização do Lixo	Valor Mínimo para $L_0$	Valor Máximo para $L_0$
Lixo Relativamente Inerte	5	25
Lixo Moderadamente Inerte Degradável	140	200
Lixo Altamente Degradável	225	300

Fonte: BANCO MUNDIAL, 2003.

A equação 3 não fornece uma representação adequada de aterros de RSU ativos, já que neste caso a exponencial da equação assume o valor um, não fornecendo para aqueles aterros com grandes flutuações de resíduos recebidos um valor próximo da realidade; pois nesta equação fica claro a geração constante de metano, independente do tempo de atividade do aterro.

### 3.1.3 Modelo Utilizado pelo IPCC

As diretrizes do IPCC descrevem dois métodos para estimar as emissões de metano procedentes de aterros: o método simplificado, que tem como base a suposição de que o total de metano potencial se libera durante o ano em que se produz a disposição dos resíduos, e o método de decomposição de primeira ordem. O método de decomposição de primeira ordem gera um perfil de emissões que depende do tempo transcorrido e que reflete melhor o processo de degradação ao longo do tempo, de acordo com a equação 4.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$L_0$ : potencial de geração de metano do resíduo (m<sup>3</sup> biogás/kg<sub>RSD</sub>);

MCF : fator de correção do metano (%);

DOC : fração de carbono degradável (kg<sub>C</sub>/kg<sub>RSD</sub>);

DOC<sub>F</sub> : fração de DOC dissolvida (kg<sub>C</sub>/kg<sub>RSD</sub>);

F : fração de metano no biogás;

16/12 : conversão de carbono (C) para metano (CH<sub>4</sub>);

RSD : resíduo sólido domiciliar;

MCF = 1 (aterro bem gerenciado).

A fração de carbono degradável é expressa pela equação 5, a seguir.

$$DOC = 0,40A + 0,17B + 0,15C + 0,30D \quad (\text{Eq. 5})$$

Em função das grandes quantidades de alimentos (B) e resíduos orgânicos (C) que são depositados juntos, a Equação 5 foi modificada, segundo a equação 6, para:

$$DOC = 0,40A + 0,16(B + C) + 0,30D, \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

A: percentual de papelão e tecidos;  
 B+C: alimentos e outros resíduos orgânicos;  
 D: resíduos de madeira.

A fração de carbono degradável dissolvida é dada pela equação 7:

$$DOC_f = 0,014T + 0,28 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

T: temperatura (°C) na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35° C;

A vazão de metano, em m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/ano, pode ser calculada pela equação 8, da seguinte forma:

$$LFG = k \times Rx \times L_o \times e^{-k(x-T)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Rx : fluxo de resíduo no ano (t/ano);

X : ano atual;

T : ano de deposição do resíduo no aterro;

t<sub>1/2</sub> : tempo médio para 50% da decomposição (tempo de meia-vida);

k : constante de decaimento (1/ano).

### 3.1.4 Determinação da Potência e Energia Disponíveis

Foi utilizado a metodologia proposta pela Cenbio (2006) que adota as equações 10 e 11 para calcular a potência disponível a cada ano e a energia disponível, respectivamente:

$$Px = \frac{Q_x \times n \times PCI}{860000} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

Px: Potência disponível a cada ano (MW);

Qx: Vazão de metano captado (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/h);

PCI: Poder calorífico do metano = 8500 Kcal/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>;

n: Eficiência do motor.

$$E = Px \times Rend \times \text{tempode operação} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

E: Energia disponível (MWh/dia);

Px: Potência disponível (MW);

Rend: Rendimento do motor a plena carga;

Tempo de operação.

## 4 Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico

Em 2001 a SIL Soluções Ambientais teve o licenciamento concluído para a instalação da Central de Resíduos do Recreio (CRR), através da expedição da licença de operação número 3012/2007 – DL, emitida pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEPAM), para atividade de destinação final de resíduos sólidos urbanos (classe I, IIA e IIB), com sistemas de tratamento de lixiviado e do biogás gerado.

A CRR opera de acordo com os parâmetros da legislação ambiental em vigor (Normas NBR 10.157, 8418, 8419, 10.004 de 2004 e portaria 05/89 SSMA).

O Aterro sanitário operado pela empresa, localizado na Central de Resíduos do Recreio, localiza-se no município de Minas do Leão, a 80 Km de Porto Alegre e atende cerca de 150 municípios do estado do Rio Grande do Sul. A área onde o aterro situa-se é rural, ficando afastada das grandes cidades. Além disso, possui condições geológicas e hidrogeológicas favoráveis com a inexistência de aquíferos, conta com a disponibilidade de cava aberta de grande volume, com possibilidade de expansão, disponibilidade de materiais indicados para confinamento (impermeabilização) e cobertura diária dos resíduos em uma área não inundável.

A empresa opera com 111 colaboradores, dos quais 58 são moradores de Minas do Leão, 45 de Butiá e 8 de outras localidades. A CRR possui área total de 500 hectares e, atualmente, destina 73 hectares para receber resíduos, correspondente a uma capacidade total de 13 milhões de m<sup>3</sup>.

A CRR também conta com uma estação de tratamento de efluentes líquidos do aterro (ETEL), que obedece aos padrões de preservação ambiental determinados pela FEPAM. A estação é composta por filtros biológicos, lagoa aerada e lagoas facultativas, além de dois banhados com área de 10.000 m<sup>2</sup> que utilizam plantas emergentes no processo de tratamento do lixiviado. Os efluentes derivados da decomposição dos resíduos também chamados de chorume são tratados e permanecem em circuito fechado, sendo utilizados para a lavagem do carvão, ao invés de serem descartados no meio ambiente.

Em dezembro de 2007, a Sil Soluções Ambientais reduziu em 85% as emissões de gás metano eliminado da decomposição dos rejeitos de seu aterro sanitário (captação de 85% do metano produzido pelo aterro sanitário). Em janeiro do mesmo ano a empresa recebeu a aprovação da Organização das Nações Unidas (ONU) para a implantação de seu projeto PROGAS que visou a instalação de um sistema de captação e queima de gás ativo. Essa foi a última etapa do processo que autorizou a empresa a operar no âmbito dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto e previu a venda de créditos de carbono através dos Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) conseguidos com tal processo pela empresa.

O presente trabalho tem o objetivo de estudar um aproveitamento melhor para o biogás (metano), que hoje é captado e simplesmente queimado em um *flare*, para a geração de energia elétrica e assim gerar renda para empresa e uma confiabilidade maior para o sistema elétrico nacional com a implantação de um sistema de geração de energia diferente daquela usualmente praticada.

## 5 Resultados e Discussão

### 5.1 Estudo de Viabilidade Técnica

Para o cálculo do potencial de geração de biogás no aterro foi utilizada a metodologia sugerida pelo IPCC (1996) a partir de dados fornecidos pela Sil Soluções Ambientais da Central de Resíduos do Recreio (CRR), logo tem-se os dados apresentados na Tabela 5.1:

**Tabela 5.1:** Previsão da quantidade de resíduos a ser depositado

Ano	Quantidade de resíduos estimados (t/ano)	Quantidade de resíduos recebidos (t/ano)
2001		592
2002		32.072
2003		272.395
2004		385.607
2005		460.603
2006		586.820
2007		664.584
2008		711.878
2009		756.715
2010		1.020.000
2011		1.080.000
2012	1.080.000	
2013	1.080.000	
2014	1.080.000	
2015	1.080.000	
2016	1.080.000	
2017	1.080.000	
2018	1.080.000	
2019	1.080.000	
2020	1.080.000	
2021	1.080.000	
2022	1.080.000	
2023	1.080.000	

Fonte: SIL SOLUÇÕES AMBIENTAIS, 2011.

Da Equação 7 tem-se que:

- $DOC_f(T=35^\circ C) = 0,77$ .

Da equação 6 tem-se :

- $DOC = 0,163$ , sendo os parâmetros:
  - $A = 9,9\%$ ;
  - $B+C = 74,31\%$ ;
  - $D = 1,5\%$ .

Aplicando os valores na equação 4 com:

- $F = 50\%$  (presença de 50% de metano no biogás, relação mol/mol);
- $MCF=1$  (aterro bem gerenciado).

Resulta  $L_0 = 0,084 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{RSD}}$  e considerando a densidade do  $\text{CH}_4$  ( $0^\circ\text{C}$  e  $1,013 \text{ bar}$ ) como  $0,7168 \text{ kg}/\text{m}^3$ , obtém-se:

$$L_0 = 117,19 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{RSD}}$$

A vazão de metano em  $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{ano}$ , mostrada na Tabela 5.2, é verificada aplicando os valores na equação 8 e também utilizando os valores da tabela 5.1, com:

- $t_{1/2} = 6,93$  anos;
- $k = 0,1$ .

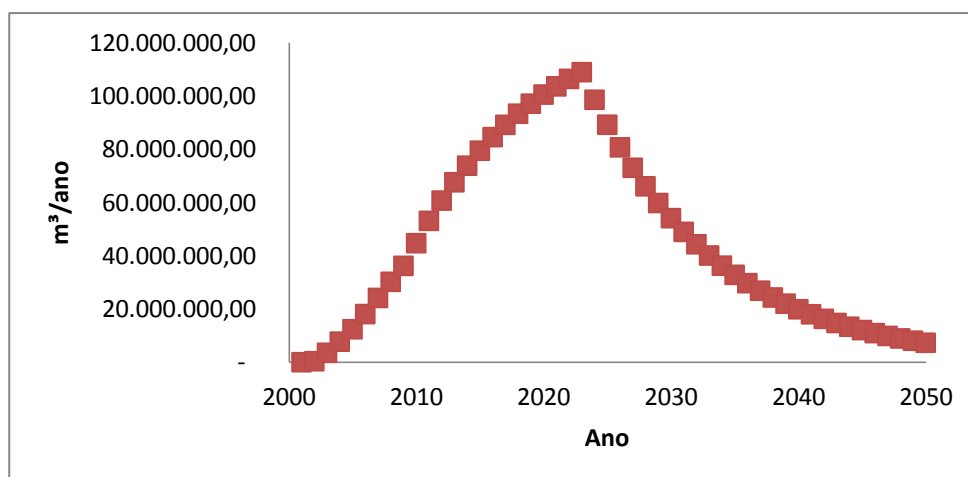
**Tabela 5.2:** Geração anual de metano e volume de metano captado.

Ano	Metano produzido $\text{m}^3/\text{ano}$	Metano captado $\text{m}^3/\text{ano}$	Metano captado $\text{m}^3/\text{hora}$
2001	6.936,12	5.895,71	0,67
2002	382.128,77	324.809,45	37,08
2003	3.537.957,55	3.007.263,92	343,29
2004	7.720.201,29	6.562.171,10	749,11
2005	12.383.333,91	10.525.833,82	1.201,58
2006	18.081.843,01	15.369.566,56	1.754,52
2007	24.149.382,18	20.526.974,85	2.343,26
2008	30.193.762,90	25.664.698,46	2.929,76
2009	36.188.389,55	30.760.131,12	3.511,43
2010	44.697.988,96	37.993.290,62	4.337,13
2011	53.100.932,92	45.135.792,98	5.152,49
2012	60.704.231,04	51.598.596,39	5.890,25
2013	67.583.979,68	57.446.382,73	6.557,81
2014	73.809.033,67	62.737.678,62	7.161,84
2015	79.441.695,46	67.525.441,14	7.708,38
2016	84.538.338,60	71.857.587,81	8.202,92
2017	89.149.972,03	75.777.476,22	8.650,40
2018	93.322.750,51	79.324.337,93	9.055,29
2019	97.098.436,61	82.533.671,12	9.421,65
2020	100.514.818,68	85.437.595,88	9.753,15
2021	103.606.089,01	88.065.175,66	10.053,10
2022	106.403.186,07	90.442.708,16	10.324,51
2023	108.934.104,15	92.593.988,53	10.570,09
2024	98.567.653,54	83.782.505,51	9.564,21
2025	89.187.701,13	75.809.545,96	8.654,06
2026	80.700.369,21	68.595.313,83	7.830,52
2027	73.020.713,71	62.067.606,66	7.085,34
2028	66.071.874,06	56.161.092,95	6.411,08
2029	59.784.303,93	50.816.658,34	5.800,99

2030	54.095.075,20	45.980.813,92	5.248,95
2031	48.947.248,18	41.605.160,95	4.749,45
2032	44.289.301,66	37.645.906,41	4.297,48
2033	40.074.617,36	34.063.424,76	3.888,52
2034	36.261.013,30	30.821.861,31	3.518,48
2035	32.810.321,65	27.888.773,40	3.183,65
2036	29.688.006,73	25.234.805,72	2.880,69
2037	26.862.819,35	22.833.396,45	2.606,55
2038	24.306.484,11	20.660.511,49	2.358,51
2039	21.993.416,32	18.694.403,87	2.134,06
2040	19.900.466,04	16.915.396,13	1.930,98
2041	18.006.686,31	15.305.683,36	1.747,22
2042	16.293.123,54	13.849.155,01	1.580,95
2043	14.742.627,84	12.531.233,66	1.430,51
2044	13.339.681,31	11.338.729,11	1.294,38
2045	12.070.242,79	10.259.706,37	1.171,20
2046	10.921.607,32	9.283.366,23	1.059,75
2047	9.882.278,97	8.399.937,13	958,90
2048	8.941.855,79	7.600.577,42	867,65
2049	8.090.925,71	6.877.286,85	785,08
2050	7.320.972,32	6.222.826,48	710,37

A Tabela 5.2 mostra a vazão de metano no aterro da Central de Resíduos do Recreio, desde o ano de 2001 até a previsão para 2050. A concentração de metano presente no biogás durante o ano de 2011 está na média de 50%.

A quantidade de metano gerado no ano de 2011 é estimada em 53.100.932,92  $m^3_{CH_4}/ano$  sendo captados 45.135.792,98  $m^3_{CH_4}/ano$  ou 5.152,49  $m^3_{CH_4}/h$ , conforme apresentado na Tabela 5.2. O comportamento crescente da curva presente na Figura 5.1 corresponde ao período em que o aterro recebe lixo, pois a cada tonelada de lixo, soma-se um novo potencial. O último ano de deposição de resíduos no aterro é dado pelo ponto máximo da curva. No decaimento, a curva é dirigida pela constante  $k$ , referente à degradação da matéria orgânica no tempo.



**Figura 5.1:** Comportamento da vazão de metano captado.

Para a determinação da potência e energia disponível, mostradas na Tabela 5.3, foram utilizadas as equações 10 e 11, respectivamente, e os dados da tabela 5.2, com:

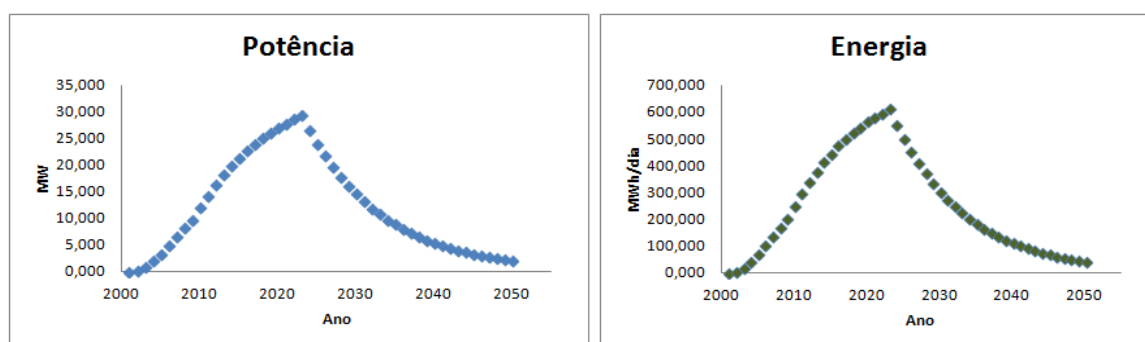
- $n = 0,28$
- $Rend = 0,87$
- Tempo de operação = 24 h/dia

**Tabela 5.3:** Potência e energia disponíveis em função da vazão de metano

Ano	Potência disponível (MW)	Energia disponível (MWh/dia)
2001	0,002	0,039
2002	0,103	2,143
2003	0,950	19,837
2004	2,073	43,286
2005	3,325	69,432
2006	4,856	101,383
2007	6,485	135,403
2008	8,108	169,294
2009	9,718	202,905
2010	12,003	250,618
2011	14,259	297,732
2012	16,301	340,363
2013	18,148	378,937
2014	19,820	413,841
2015	21,333	445,423
2016	22,701	473,999
2017	23,939	499,856
2018	25,060	523,253
2019	26,074	544,422
2020	26,991	563,578
2021	27,821	580,910
2022	28,572	596,593
2023	29,252	610,784
2024	26,468	552,660
2025	23,950	500,068
2026	21,670	452,480
2027	19,608	409,421
2028	17,742	370,459
2029	16,054	335,205
2030	14,526	303,306
2031	13,144	274,443
2032	11,893	248,326
2033	10,761	224,695
2034	9,737	203,312
2035	8,811	183,965
2036	7,972	166,458
2037	7,213	150,617

2038	6,527	136,284
2039	5,906	123,315
2040	5,344	111,580
2041	4,835	100,962
2042	4,375	91,354
2043	3,959	82,661
2044	3,582	74,794
2045	3,241	67,677
2046	2,933	61,237
2047	2,654	55,409
2048	2,401	50,136
2049	2,173	45,365
2050	1,966	41,048

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados dos cálculos da potência e energia disponível no aterro, em função da vazão de metano. Os valores disponíveis para o ano de 2011 são: potência de 14,2 MW e energia de 297,7 MWh/dia. O comportamento da curva de disponibilidade de potência e energia pode ser observado nas Figuras 5.2 a e b, respectivamente.



**Figura 5.2:** (a) Curva de comportamento da potência. (b) Curva de comportamento da energia.

Assim como na produção de metano, o ponto máximo da curva corresponde ao último ano de deposição de resíduos no aterro e, no decaimento, a curva é dirigida pela constante  $k$ , referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

## 5.2 Estudo de Viabilidade Econômica

O modelo de avaliação econômico-financeira baseou-se em um fluxo de caixa que contempla o investimento inicial, lucro líquido anual durante um período de amortização de dez anos e, com base nestes valores, é possível realizar o cálculo do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR). Estes parâmetros determinam o comportamento do fluxo de caixa e dos resultados do projeto durante sua vida útil, bem como os custos envolvidos (investimento, operacionais fixos e variáveis), taxa de juros de financiamento, percentual do investimento financiado, prazos de amortização (SALOMON, 2007).



Para avaliação econômica foi avaliado o custo de um conjunto motogerador de pequeno porte.

- Conjunto motogerador Landset desenvolvido pela empresa Brasmetano;
- Motor Mercedes-Benz modelo 447 convertido para ciclo Otto;
- Gera energia elétrica a partir do biogás com variações de metano entre 30% e 80%;
- Gerador marca WEG com atuadores Woodward;
- Potência nominal: 230 KW;
- Rendimento: 28%
- Disponibilidade: 8760 h
- Energia elétrica gerada: 2014,8 MWh/ano;
- Auto consumo (5%): 100,74 MWh/ano;
- Energia elétrica entregue: 1914,06 MWh/ano;
- Vazão de biogás necessária: 157,91 m<sup>3</sup>/h.

### 5.2.1 *Custo de Investimento*

O custo do investimento inicial contempla todos os custos associados aos equipamentos que compõe o sistema de geração elétrica, bem como os serviços de instalação e montagem, transporte, frete e seguro. A tabela 5.4 apresenta estes valores em reais.

**Tabela 5.4:** Custos dos equipamentos, materiais e serviços do sistema de geração de energia elétrica.

<b>Descrição</b>	<b>Valores (R\$)</b>
Equipamentos	392.725,00
Automação	183.480,00
Civil	58.208,00
Instalação e montagem	82.850,00
Frete e seguro	3.654,68
<b>Total</b>	<b>720.917,68</b>

Fonte: CENBIO, 2007

A discriminação completa do investimento pode ser consultada no anexo 1.

### 5.2.2 *Custos de Manutenção e Operação*

Para a determinação do custo de operação é necessário calcular os custos com mão de obra, utilizados para a operação do sistema, além dos custos com combustível

consumido. Já o custo de manutenção, engloba todos os gastos com peças, materiais e ferramentas necessárias para sua execução.

A manutenção pode ser definida como um conjunto de intervenções executadas no período de vida útil do equipamento, de forma a mantê-lo nas melhores condições de operação possíveis. Sua realização é de extrema importância a fim de reduzir os custos associados a quebras e falhas, aumentar o rendimento, a disponibilidade do equipamento e pode ser caracterizada como preventiva, preditiva ou corretiva.

A manutenção preventiva consiste em intervenções com intervalos pré-estabelecidos visando reduzir a possibilidade de que o equipamento opere em condições inferiores ao nível requerido, além de rotinas de inspeção e verificação, lubrificações e reposição de peças com desgaste intensivo. Já a manutenção preditiva engloba as ações que podem ser tomadas a partir de um histórico do equipamento e análises específicas, onde se pode optar por uma troca antes mesmo de ocorrer falha evitando assim sua parada (SILVA, 2010).

A manutenção corretiva, como o próprio nome diz, visa à correção de um equipamento após a ocorrência de uma falha ou quebra, ou seja, não é um evento programado. Esta manutenção possui o maior custo associado, visto que é necessário manter um estoque de peças sobressalentes, além de grande tempo de mão de obra e máquina parada, diminuindo a disponibilidade da produção.

Neste contexto, a determinação dos custos com manutenção foi realizada a partir do plano de manutenções definido pelo fabricante do equipamento. Este plano de manutenção considera apenas as manutenções preventivas e preditivas, enquanto que os custos com manutenção corretiva foram estimados em 30% do custo com estas manutenções, visto que se trata de uma tecnologia adaptada para operação com biogás.

O plano de manutenção completo elaborado pelo fabricante pode ser visto no anexo 2.

Foi contabilizado quantas intervenções de cada tipo seriam necessárias ao longo de 10 anos de projeto. Multiplicando-se o custo de cada intervenção pela quantidade realizada no período mencionado mais o custo com a manutenção corretiva, chega-se ao montante de R\$ 34.510,60 anual. Dividindo o custo de manutenção pela geração de energia elétrica no período, obtem-se o valor de 18,03 R\$/MWh.

Para a definição do custo com operação, considera-se o custo com combustível nulo, visto que o biogás é um subproduto do processo atual. Já o custo com mão de obra é calculado apenas para o técnico de manutenção que trabalhará 7h e 20 min. por dia, durante seis dias na semana, e será responsável pela realização de todas as manutenções e rotinas de manutenção executadas no grupo motogerador. As demais atividades de operação, como partir o motor em caso de parada ou parar o motor em uma situação específica poderão ser executadas pelos operários da própria planta de biogás. Desta forma, o custo para as atividades descritas totalizam o valor de 4,22 R\$/MWh.

### 5.2.3 Avaliação Econômica do sistema a ser instalado

Para a avaliação econômica do sistema foram adotadas as seguintes premissas:

- Taxa mínima de atratividade (TMA) de 15% a.a;

- Tempo de projeto de 10 anos;
- Depreciação linear ao longo do projeto (7,5% a.a);
- Taxa de juros de financiamento de 9,25% a.a;
- Valor de venda de energia de 144,20 R\$/MWh, preço negociado para projetos de biomassa no leilão de fontes alternativas de energia elétrica A-3/2010 (EPE,2010);
- Disponibilidade: 8760 h;
- Energia elétrica gerada: 2014,8 MWh/ano;
- Energia elétrica entregue: 1914,06 MWh/ano;
- Custo de operação e manutenção: 22,25 R\$/MWh;
- Não foi contabilizada a receita proveniente de créditos de carbono;
- Desconsidera a inflação durante o período do projeto.

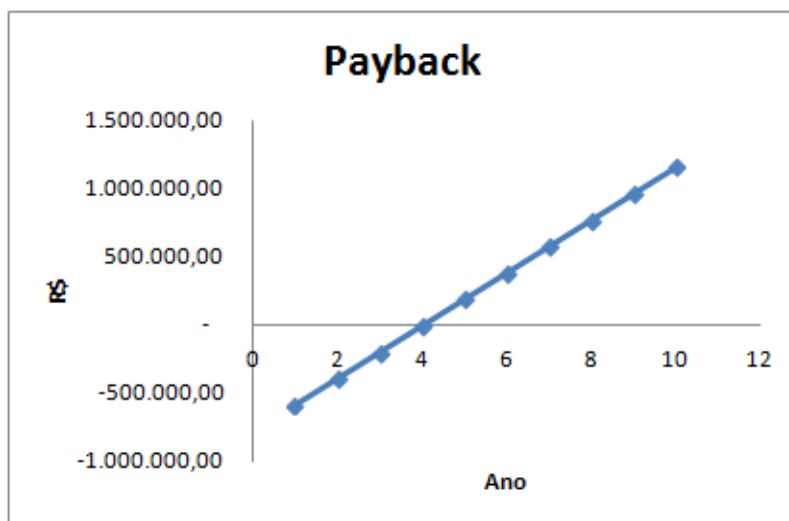
Para a análise da viabilidade de um projeto, geralmente é realizado um estudo de viabilidade técnico-econômico (EVTE), que servirá como base para obtenção de financiamento. A lucratividade, por sua vez, é medida a partir dos fluxos de caixa estimados para este projeto, ano a ano. Diante das premissas descritas e dos valores estudados, o fluxo de caixa do projeto é apresentado na Tabela 5.5 a seguir.

**Tabela 5.5:** Fluxo de caixa do projeto

	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
<b>Financiamento</b>	787.602,56				
<b>Receita</b>	276.007,45	276.007,45	276.007,45	276.007,45	276.007,45
<b>Custo de operação (-)</b>	42.596,60	42.596,60	42.596,60	42.596,60	42.596,60
<b>Depreciação (-)</b>	39.272,50	39.272,50	39.272,50	39.272,50	39.272,50
<b>Saldo Final</b>	194.138,35	194.138,35	194.138,35	194.138,35	194.138,35
<b>Fluxo de caixa (R\$)</b>	- 593.464,21	-399.325,86	-205.187,50	- 11.049,15	183.089,20

	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
<b>Financiamento</b>					
<b>Receita</b>	276.007,45	276.007,45	276.007,45	276.007,45	276.007,45
<b>Custo de operação (-)</b>	42.596,60	42.596,60	42.596,60	42.596,60	42.596,60
<b>Depreciação (-)</b>	39.272,50	39.272,50	39.272,50	39.272,50	39.272,50
<b>Saldo Final</b>	194.138,35	194.138,35	194.138,35	194.138,35	194.138,35
<b>Fluxo de caixa (R\$)</b>	377.227,55	571.365,90	765.504,26	959.642,61	1.153.780,96

Assim, o tempo de retorno do investimento será de 4,1 anos conforme mostrado na Figura 5.3 a seguir:



**Figura 5.3:** Payback de 4,1 anos

O valor presente líquido em reais, calculado para um período de 10 anos, é mostrado na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6:** Valor Presente Líquido (R\$)

Ano	A=Fluxo de caixa	$B=(1+0,05)^n$	A/B
1	- 593.464,21	1,15	- 516.055,83
2	- 399.325,86	1,3225	- 301.947,72
3	- 205.187,50	1,520875	- 134.914,11
4	- 11.049,15	1,74900625	- 6.317,39
5	183.089,20	2,011357188	91.027,69
6	377.227,55	2,313060766	163.085,88
7	571.365,90	2,66001988	214.797,61
8	765.504,26	3,059022863	250.244,70
9	959.642,61	3,517876292	272.790,32
10	1.153.780,96	4,045557736	285.197,01
<b>VPL=</b>			<b>317.908,15</b>

A tabela 5.5 permite verificar que o cenário estudado apresenta viabilidade econômica, considerando o valor de venda da energia elétrica de R\$ 144,20, valor negociado para projetos a biomassa no último leilão de fontes alternativas de energia elétrica A-3/2010. Para a taxa de atratividade de 15%, o VPL em 10 anos será de aproximadamente 317 mil reais e a taxa interna de retorno (TIR) de 20%.

O estudo econômico foi realizado considerando uma escala de pequeno porte. A partir da utilização de grupos motogeradores de maior capacidade pode-se obter melhores resultados em um estudo de viabilidade econômica, visto que os custos associados ao equipamento são menores e a produção de energia elétrica é maior.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Atualmente, a sociedade e a administração pública, se deparam com um grande desafio quanto à gestão dos resíduos sólidos. Sua produção vem aumentando devido à intensificação das atividades humanas nas últimas décadas, dificultando o manejo e disposição correta dos mesmos. Quando dispostos de forma inadequada, como em lixões, por exemplo, geram metano, cuja emissão para atmosfera contribui com o aumento do aquecimento global, por se tratar de um gás de efeito estufa.

Por meio de gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos é possível aproveitar o potencial energético do biogás e conseqüentemente diminuir o consumo de combustíveis fósseis, reduzindo assim o impacto ambiental e contribuindo para melhoria social e econômica.

Os aterros sanitários são alternativas interessantes para a disposição final do lixo, considerando, posteriormente, a captação dos gases liberados através de dutos e queima em flares, em que o metano, principal contribuinte do biogás, é transformado em gás carbônico, com potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor. Porém, ao queimar o biogás em flares, os aterros deixam de aproveitar seu potencial energético, enquanto que sua utilização para geração de energia elétrica, ganha auto-suficiência energética em seu processo e pode vender o restante para a rede elétrica local.

No entanto, para utilização deste gás como combustível, é necessário que ele possua a composição adequada para a tecnologia de conversão utilizada. Sendo a composição variável, torna-se necessário um constante monitoramento para que a alteração de composição não danifique as instalações, além de prever a necessidade de um sistema de purificação.

Este estudo mostrou que a CRR – Central de Resíduos do Recreio possui um potencial de geração de energia de aproximadamente 14 MW em 2012, podendo chegar a 29 MW até o seu encerramento em 2024.

A metodologia utilizada para previsão da geração de metano nos próximos anos mostra-se adequada, pois considera nos seus cálculos o potencial de produção de metano de acordo com a composição do lixo, fluxo de resíduo anual, tempo de deposição de resíduo no aterro e constante de decaimento de geração de gás, aproximando-se, dessa forma, das condições reais de trabalho.

A implantação de um sistema de geração de energia em um aterro tem custo elevado, visto que os equipamentos de grande porte são importados e englobam as despesas com transporte, impostos e taxas alfandegárias. Porém, é uma solução eficaz para problemas provocados pela emissão de metano, reduzindo dessa forma a emissão de gases de efeito estufa e a energia gerada pelo sistema poderá ser consumida pelo próprio aterro e a excedente vendida.

Para melhorar os resultados, poderiam ser feitos novos estudos sobre a implantação de grupos geradores de maior capacidade e também sobre a quantidade de grupos que poderiam ser instalados a fim de maximizar a geração de energia e a lucratividade do projeto.

Grupos motogeradores de maior capacidade apresentam um rendimento elétrico maior, o que faz gerar uma quantidade de energia elétrica maior com uma mesma vazão de biogás. O custo seria diluído no tempo de projeto e assim haveria uma tendência de que o projeto se tornasse ainda mais atraente.

Dentre as vantagens da utilização do biogás para a geração de energia elétrica pode-se destacar a geração de empregos, geração de energia descentralizada próxima aos pontos de carga, utilização de um resíduo como combustível, possibilidade de receita adicional proveniente da venda de energia excedente, diminuição da dependência da energia da concessionária local, melhor gerenciamento dos aterros sanitários, redução da utilização de combustíveis fósseis e redução e monitoramento das emissões de gases de efeito estufa.

**7 Anexo 1**

Custo dos equipamentos, materiais e serviços do sistema de geração de energia elétrica.

<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>VALOR (R\$)</b>
<b><i>EQUIPAMENTOS</i></b>	<b><i>392.725,00</i></b>
Motor e acessórios	263.235,00
Gerador	46.000,00
Segurança (válvulas, sensores e acessórios)	83.490,00
<b><i>AUTOMAÇÃO</i></b>	<b><i>183.480,00</i></b>
Painel de controle elétrico manual e acessórios	83.050,00
Sistema de alimentação e ignição eletrônicas	100.430,00
<b><i>CIVIL</i></b>	<b><i>58.208,00</i></b>
Container 6 m	42.158,00
Obras civis	16.050,00
<b><i>INSTALAÇÃO / MONTAGEM</i></b>	<b><i>82.850,00</i></b>
Serviços (projeto, mão de obra, supervisão, treinamento)	65.890,00
Transporte	4.800,00
Hospedagem	4.500,00
Alimentação	2.250,00
Mão-de-obra local	3.210,00
Guincho	2.200,00
<b><i>FRETE E SEGURO</i></b>	<b><i>3.654,68</i></b>
Frete e seguro	3.654,68
<b>TOTAL</b>	<b>720.918,68</b>

Fonte: CENBIO (2007).

## 8 Anexo 2

Plano de manutenção elaborado pelo fabricante do grupo gerador.

---

### 300 horas

---

Lubrificações dos mancais

Verificação do nível de água e óleo

Verificação da tensão das correias e reaperto de parafusos e conexões

Limpeza do elemento filtrante de umidade

### 1.000 horas

---

Troca de óleo e filtro

Limpeza dos cabos de bateria

Análise físico-química do óleo

### 2.500 horas

---

Alinhar as polias do esticador de correias, booster e bomba d'água

### 5.000 horas

---

Troca das correias do booster e alternador

Troca das velas e cabos de ignição

Regulagem do jogo de válvulas

Análise de vibração e termografia

### 10.000 horas

---

Troca dos elementos filtrantes de ar

Troca das abraçadeiras e mangotes do sistema de refrigeração, admissão e biogás

Verificação da estanqueidade do radiador e trocador de calor

### 25.000 horas

---

Substituição dos rolamentos, gaxetas, anéis de vedação e retentores

Substituição dos anéis de vedação do Intercooler

Troca das bobinas do sistema de ignição

Troca do elemento filtrante de umidade

Troca da água e fluido do sistema de refrigeração



---

**50.000 horas**

---

Verificar o desgaste das escovas e a folga dos rolamentos

Substituição das baterias

Substituição do sensor lambda

Verificação do estado de corrosão das tubulações (circuitos primário e secundário)

---

Fonte: Brasmetano (2009).

## 9 Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Resíduos sólidos: classificação – NBR 10004. São Paulo, 2004.

ALVES, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. (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, 2000.

AMBIENTE BRASIL – Ambiente Brasil. Coleta e disposição final do lixo. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/>. Acesso em: 14/11/2012.

Balanco Energético Nacional (BEN). Disponível em <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em 05/11/2012.

BRASMETANO – Brasmetano. Moto geradores a biogás. Disponível em <http://www.brasmetano.com.br/>. Acesso em: 10/09/2012.

Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). Tempo de degradação dos resíduos sólidos. Disponível em: <http://www.cacege.com.br>. Acesso em 20/08/20012. Ceará, 2005.

CAIEIRAS – Aterro Essencis – CTR Caieiras. Redução das emissões de gases de aterro – Caieiras, SP. Documento de concepção de projeto (DPC), Versão 0. Caieiras, SP, 2004.

CARDOSO FILHO, E. P. Fatores que influenciam na digestão anaeróbia de efluentes líquidos. Sem publicação. CETESB, 2001.

CASTRO, R. Energias renováveis e produção descentralizada. DEEC, Área Científica de Energia, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2006.

California Energy Commission (CEC). Microturbine. Disponível em: <http://www.energy.ca.gov>. Acesso em: 10/09/2012.

CBTAG – Tecnologia e Automação a Gás. Documentos cedidos pela CBTAG. São Paulo, 2007.

Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENER-G-BIOG. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.

\_\_\_\_\_(2006a). Identificação dos aterros disponíveis nas regiões SE, CO e NE do país, quantidade, tipos de resíduo e infra-estrutura. Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

\_\_\_\_\_(2006b). Escolha e caracterização do aterro para implementação do projeto. Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

\_\_\_\_\_(2006c). Levantamento de dados técnicos e estudo das alternativas de produção de eletricidade a partir de biogás, no aterro escolhido para a elaboração do projeto. Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

\_\_\_\_\_(2006d). Determinação do potencial de biogás a ser produzido e do potencial de eletricidade a ser gerado. Relatório de Atividades. São Paulo, 2006.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Biogás, geração e uso energético. Manual do usuário do programa de computador. Versão 1.0. São Paulo, 2006.

Companhia Hidroelétrica de São Francisco (CHESF). Inventário de fontes energéticas brasileiras. Resíduos sólidos urbanos (lixo). Departamento de Engenharia e Geração / Divisão de Tecnologia de Energia. Volume II: Tecnologias. Rio de Janeiro, 1987.

Consórcio Intermunicipal para Aterro Sanitário (CIAS). Relatório de Atividades. Várzea Paulista, 2003.

\_\_\_\_\_(2004). Relatório de Atividades. Várzea Paulista, 2004.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; VARKULYA, A. Jr.; AVELLAR, L. H. N.; FERLING, F. Estado da arte do biogás. Relatório de acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001.

CONPET – Programa nacional da racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural. Gás natural. Disponível em: <http://www.conpet.org.br/>. Acesso em 13/10/2012.

CORREA, A. S. A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

COSTA, D. F. Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização. (Monografia).

Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ENSINAS, A. V. Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP. (Dissertação de Mestrado) Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2003.

Environmental Protection Agency (EPA). Methane. Disponível em: [www.epa.gov/methane/](http://www.epa.gov/methane/). Acesso em: 09/08/2012.

ESSENCIS – Essencis Soluções Ambientais. Aterros classe I, II e III. Disponível em: <http://www.essencisl.com.br/>. Acesso em: 09/12/2012.

FILHO, L. F. B., Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

GOMES, E. E. B; COBAS, V. R. M.; NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S.; NETO, L. J. M. Aspectos econômicos e ambientais da aplicação de microturbinas a gás natural na geração distribuída. (Artigo). Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, Itajubá, MG, 2001.

Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM). Classificação dos resíduos sólidos. Disponível em: <http://www.ibam.org.br/>. Acesso em 25/09/2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa. Módulo 6: Lixo. Volume 2: Livro de trabalho de 1996.

J JUNQUEIRA F.F., 2000, Análise de Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência o Aterro do Jóquei Clube, Tese de Doutorado, UNB, pp283. apud BORBA, S. M. P. (2006). Análise de modelos de geração de

gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil

JUCA, J.F.T. e MACIEL, F.J.,1999. “Permeabilidade ao Gás de um Solo Compactado não Saturado”, Anais do IV Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, São Paulo, pp 384-391. apud BORBA, S. M. P. (2006). Análise de modelos de geração de gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil.

LAENDER, A. T. Combustíveis gasosos: biogás. Disponível em <http://www.demec.ufmg.br/>. Departamento de engenharia mecânica, DEMEC. Acesso em 19/08/20012.

LIMA, F. P. Energia no tratamento de esgoto: Análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás. (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, 2005.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Princípios da Termodinâmica para Engenharia. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

MUYLAERT, M. S.; AMBRAM, R.; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L.B. - Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso. Editora COPPE, 247 p., Rio de Janeiro, 2000.

Project Design Document (PDD ), versão português. Redução de Emissões de Gás de Aterro. Documento de Concepção de Projeto (MDL DCP).– Caieiras, SP. Versão 2, 2005.

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.

PEREIRA, A. G. H., 2000, Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Espana..apud BORBA, S. M. P. (2006). Análise de modelos de geração de gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil.

PEREIRA, W.C., Projeto de sistemas de climatização por resfriamento evaporativo (Relatório de Graduação). UNB, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

PEREIRA, J. C., Motores e Geradores – Princípio de funcionamento, instalação e manutenção de grupos diesel geradores. Disponível em <http://www.joseclaudio.eng.br>. Acesso em 02/07/2012.

PIMENTA, J. M. D.; CASTRO, W. P. Simulação computacional do desempenho de painéis evaporativos acoplados a microturbinas a gás. VIII Congresso Brasileiro de refrigeração, ventilação e condicionamento de ar. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) / Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Número de distritos com serviço de limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por percentual de lixo coletado, 2000.

PROJETO APOEMA – Projeto APOEMA – Educação Ambiental. Disponível em <http://www.apoema.com.br/>. Acesso em 26/11/2012.

RECICLOTECA. Sistema de Tratamento de Resíduos. Disponível em <http://www.recicloteca.org.br>. Acesso em 02/09/2012.

SANTEC RESÍDUOS. Estudo e análises geológicas e geotécnicas. Disponível em <http://www.santecresiduos.com.br>. Acesso em 02/11/2012. SC, 2005

SANTOS, A.A. Análise técnico-econômica da utilização de um gerador a gás natural em um sistema de cogeração: estudo de caso (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

SOLAR TURBINES – Gás Turbine Overview. Disponível em: <http://mysolar.cat.com>. Acesso em: 15/11/2012.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil – Editora Interciência, p., Rio de Janeiro, 2003.

VAN WYLEN, J.G., SONNTAG, R.E., BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica. Tradução da 6ª Edição Americana – Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2003.

VELÁZQUEZ, S.G., A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética no Brasil. (Dissertação de Mestrado) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade São Paulo, São Paulo, 2000.

WILLUMSEN, H. C. Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide. LG Consultant, 2001.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. Tradução Daniel Grassi. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

YURA, D.; TURDERA, M. V. Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados. (Trabalho de pesquisa). Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, UEMS, 2006.