



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUIMICA

**TALITA XAVIER LIMA**

**ANÁLISE DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO ENERGÉTICA  
DO BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO  
PELOS RSU DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**

Fortaleza

2010

TALITA XAVIER LIMA

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO ENERGÉTICA  
DO BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO  
PELOS RSU DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Trabalho de final de curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Química  
da Universidade Federal do Ceará como requisito  
parcial para obtenção de graduação em Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. João José Hiluy Filho

Fortaleza

2010

TALITA XAVIER LIMA

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO ENERGÉTICA  
DO BIOGÁS PRODUZIDO EM ATERRO SANITÁRIO  
PELOS RSU DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Químico

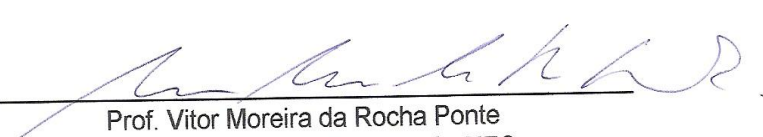
Aprovada em 29 / 11 / 2010

COMISSÃO EXAMINADORA



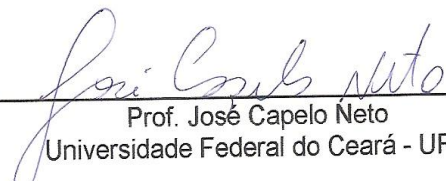
---

Prof. João José Hiluy Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC



---

Prof. Vitor Moreira da Rocha Ponte  
Universidade Federal do Ceará - UFC



---

Prof. José Capelo Neto  
Universidade Federal do Ceará - UFC

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso meu agradecimento sincero às pessoas que, com sua sabedoria e apoio, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Agradeço especialmente:

A Deus por ter me iluminado na minha trajetória;

Aos meus pais Dirceu e Vera por sempre acreditar em minhas capacidades, ajudar-me e para o apoio deles cada dia;

Ao professor Dr. José João Hiluy Filho, pela sua orientação, discussões e sugestões;

Ao Luis Henrique, pela ajuda incrível a cada dia e pela motivação de me apoiar;

À minha prima Mariana, pelo companheirismo inabalável;

Aos professores do corpo docente da engenharia química pela contribuição na minha formação profissional;

A todos os outros amigos, colegas, conhecidos e familiares que sempre me apoiaram quando sempre precisei.

*“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”*

Antoine de Lavoisier

## RESUMO

A grande e crescente quantidade de resíduos sólidos urbanos que vem sendo geradas, sobretudo nas grandes cidades, tem provocado uma série de problemas relacionados ao seu tratamento e descarte. A maioria das cidades brasileiras tem utilizado prioritariamente a tecnologia de encaminhamento aos aterros sanitários como destino final. O presente artigo consiste em um estudo técnico-ambiental relativo ao potencial de geração de energia a partir do biogás gerado no Aterro Municipal Oeste de Caucaia, responsável pelo recebimento dos Resíduos Sólidos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza. Foram analisados com detalhes a capacidade de geração de biogás, sua composição e a situação atual dos diversos poços existentes no aterro em suas diferentes trincheiras onde vem sendo depositados os resíduos ao longo dos últimos 10 anos. Estimou-se emissões de biogás no aterro por quase 60 anos. As emissões para o ano de 2007 atingiram valores em torno de 97.000 ton/ano de CO<sub>2</sub> e 30.000 ton/ano de CH<sub>4</sub>. Com base nos resultados obtidos foram elaborados cenários distintos com relação às diferentes possibilidades de utilização do biogás como recurso de geração de energia.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos Urbanos, Aterro Sanitário, Biogás.

## **ABSTRACT**

The large and growing amount of municipal solid waste that is being generated, especially in big cities, has caused a number of problems related to their disposal and treatment. Most Brazilian cities have used the technology primarily for with reference to the landfill as the main destination. This article presents a study on the technical and environmental potential of energy generation from biogas generated at West Municipal Landfill of Caucaia, responsible for collecting of Municipal Solid Waste in the Metropolitan Region of Fortaleza. It analyzed in detail the ability to generate biogas, its composition and current situation of several existing wells at the landfill in their different trenches where waste has been deposited over the past 10 years. It has estimated emissions of biogas in the landfill for nearly 60 years. Emissions for the year 2007 reached values around 97,000 ton / year of CO<sub>2</sub> and 30,000 tons / year of CH<sub>4</sub>, based on the results of different scenarios were developed regarding the different possibilities of using biogas as a resource for energy generation.

**Keywords:** Municipal Solid Waste, Landfill, Biogas.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1 Objetivos .....	9
1.1.1 Geral.....	9
1.1.2 Específicos .....	9
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	10
2.1. A Problemática dos RSU .....	10
2.1.1. Tipos de tratamento e destinação final no Brasil .....	11
2.1.2. Tipologia dos resíduos .....	11
2.2. Biogás .....	13
2.2.1. Fatores que afetam a composição do biogás .....	15
2.2.2. Aspectos microbiológicos .....	16
2.2.3. Tratamento ou purificação do gás .....	19
2.2.4. Sistema de conversão do biogás em energia elétrica.....	20
2.4 ASMOC .....	22
2.5 Estudos de casos .....	23
2.5.1 Aterro Bandeirantes .....	24
2.5.2 Aterro São João .....	25
2.5.3 Aterro Muribeca .....	27
2.5.4 Projeto Novagerar .....	28
2.5.5 Projeto Vega .....	28
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	29
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	32
4.1 Análises dos RSU de Fortaleza.....	32
4.2 Análise do Biogás.....	34
<b>5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS</b> .....	36
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	37



## 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos problemas dos centros urbanos, que têm sido continuamente retratados pela mídia nacional, diante de sua magnitude e complexidade, a questão dos resíduos sólidos urbanos - RSU vem sistematicamente apresentando especial destaque, pois sua geração e destino ocasionam uma série de graves problemas. Dentre os diferentes aspectos da geração dos RSU ressalta-se a sua disposição final, devido aos inúmeros riscos relacionados simultaneamente à saúde pública e ao meio ambiente. A questão vem assumindo proporções críticas devido ao crescimento populacional, ao aumento do consumo e à diversidades de materiais empregados.

A conversão biológica dos RSU com fins energéticos vem assumindo importância a cada dia, uma vez que esses resíduos passaram a ser considerados uma potencial fonte de energia alternativa.

O Biogás é uma mistura de metano, dióxido de carbono e outros gases em menores concentrações provenientes da decomposição de matéria orgânica, realizada por bactérias anaeróbias que atuam em certas faixas de temperatura, pH e umidade. Vem sendo utilizado em vários países, como Estados Unidos, Alemanha, Índia e China como fonte de energia. Já no contexto brasileiro, poucas iniciativas merecem destaque. Podem ser citados a Usina Bandeirantes e a Usina São João, localizadas em São Paulo, além do Aterro de Nova Iguaçu no Rio de Janeiro, que operam unidades com aproveitamento energético.

A liberação do biogás para a atmosfera, além de causar impactos ambientais devido à emissão do metano, propicia um grande desperdício de energia. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial energético do biogás gerado no ASMOC - Aterro Municipal Oeste de Caucaia, responsável pelo recebimento da maior parcela dos RSU da Região Metropolitana de Fortaleza.

Na operação de um aterro sanitário as três vertentes ambientais podem ser negativamente impactadas, ou seja, o ar, o solo e as águas. No caso do ASMOC pouco se conhece sobre os efeitos externos da variação de temperatura e incorporação de ar).

A razão desse estudo, portanto, é justificada tanto pelo potencial de aproveitamento energético do Biogás, atual passivo ambiental proveniente dos aterros como pela problemática da gestão dos resíduos sólidos urbanos.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

A elaboração de um diagnóstico sobre a viabilidade preliminar para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a partir do biogás gerado em aterro sanitário.

### 1.1.2 Específicos

- Análise dos RSU gerados na região metropolitana de Fortaleza (RMF)
- Avaliação Qualitativa e Quantitativa do Biogás produzido pelo ASMOC.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. A Problemática dos RSU

Um das maiores preocupações associadas à geração de resíduos é a sua destinação correta para minimizar o impacto ao meio ambiente. No Brasil são gerados diariamente toneladas de lixo. Na tabela 1, é mostrado o resultado de estudo realizado pela ABRELPE em 2008 sobre a quantidade de RSU gerados por cada região:

Macrorregião	2007	2008		
	RSU Coletado (t/dia) Índice (Kg/hab/dia)	População Urbana (hab)	RSU Total Coletado (t/dia)	Índice (Kg/habitante/dia)
Norte	7.978 / 0,730	11.314.869	8.919	0,788
Nordeste	31.422 / 0,859	36.577.772	33.372	0,912
Centro-Oeste	10.181 / 0,894	11.800.195	11.164	0,946
Sudeste	77.543 / 1,084	73.639.690	80.041	1,087
Sul	13.787 / 0,626	22.646.669	15.703	0,693
<b>Brasil</b>	<b>140.911 / 0,924</b>	<b>157.037.300</b>	<b>149.199</b>	<b>0,950</b>

Tabela 1: Quantidade de RSU gerado por Macrorregião e Brasil (ABRELPE, 2008)

Nesse estudo foi analisada ainda a destinação final dos resíduos, conforme mostrado na tabela 2:

Macrorregiões e Brasil						
Disposição Final	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Aterro Sanitário	67	448	163	789	691	2.158
Aterro Controlado	116	480	163	631	359	1.749
Lixão	266	865	140	248	138	1.657
<b>Brasil</b>	<b>449</b>	<b>1.794</b>	<b>466</b>	<b>1.668</b>	<b>1.188</b>	<b>5.565</b>

Tabela 2: Modalidade da disposição final do RSU por Macrorregião e Brasil (ABRELPE, 2008).

Percebe-se que na Região Nordeste o principal destino dos RSU são os lixões. Assim, a destinação final dos resíduos sólidos urbanos é um problema que só pode ser definitivamente solucionado a partir da sua gestão ambientalmente adequada.

#### 2.1.1. Tipos de tratamento e destinação final no Brasil

As formas de destinação final comumente realizada no Brasil são:

- Lixões – lançamento do lixo coletado sem qualquer cuidado ou técnica especial;
- Compostagem – reciclagem da massa orgânica e biodegradável para conversão adubo;
- Aterros sanitários – utilização de técnicas de engenharia para a disposição do lixo no solo com redução de impactos e minimização de riscos à saúde pública;
- Aterros controlados – despejo com cuidados simples que consistem de recobrimento com camadas de areia;
- Incineração – combustão controlada do lixo a temperaturas de 800°C a 1000°C com entrada de ar, diminuindo o volume do resíduos, gerando uma massa estável e sem risco à saúde. Devido ao seu alto custo, só é utilizado para a destruição de resíduos perigosos.

#### 2.1.2. Tipologia dos resíduos

Os resíduos podem ser classificados de acordo com sua origem:

- Domiciliar: é o lixo proveniente das residências, tendo na sua composição papéis, plásticos, vidros, restos de alimentos, dentre outros. A sua composição pode variar dependendo do nível social e da localização geográfica dos domicílios;
- Agrícola: são oriundos das atividades agropecuárias, por exemplo, estrume, restos de ração animal e de colheitas, defensivos agrícolas, dentre outros.

Contudo, deve haver um tratamento especial para produtos quimicamente tóxicos, já que são considerados perigosos ao meio ambiente;

- Serviço de saúde: são originados de hospitais, postos de saúde, clínicas, farmácias, laboratórios de exames e etc. Esse tipo de resíduos deve ser submetido a um tratamento especial, normalmente a incineração para não ocorrer nenhum tipo de contaminação por qualquer tipo de agente patogênico;
- Comercial: descartados em estabelecimentos comerciais em geral. A maioria desses resíduos são papel, papelão e plásticos, que podem ser reciclados ou reutilizados. Em menor escala há produção de material orgânico e sanitário;
- Industrial: originados das diversas atividades industriais, podendo possuir diferentes composições. Portanto, cada indústria deve seguir corretamente o seu procedimento de descarte de acordo com as normas relativas à gestão desses resíduos;
- Resíduos da construção civil: provenientes das atividades da construção civil. A maioria pode ser reaproveitada. São constituídos por restos de cimentos, rebocos, tijolos, cerâmicas, alguns tipos de metais;
- Resíduo Público ou Varrição: recolhido nos locais públicos, como vias públicas, praças, galerias. Possui uma composição muito variada, podendo ter plásticos, vidros, restos de alimentos, folhas de árvores, areia, etc;
- Resíduos de Portos, Aeroportos e Terminais Rodoviários e Ferroviários: esses resíduos pela lei devem ser incinerados, pois podem transmitir doenças oriundas de outros estados e países, e, por isso não possuem o mesmo tratamento do lixo domiciliar;

De acordo com as normas da ABNT os resíduos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Resíduos Classe I – perigosos: necessitam de tratamento físico-químico para serem neutralizados, como incineração ou em aterros com condicionamento isolado. São gerados em indústrias químicas, farmacêuticas, de explosivos, alguns tipos de produtos hospitalares dentre outros;
- Resíduos Classe IIA – não inerte: são resíduos não perigosos, mas podem ocasionar impactos, sua principal destinação são os aterros. Provém de resíduos domiciliares, os industriais degradáveis e os orgânicos;
- Resíduos Classe IIB – inertes: não se degradam e não se decompõem, contudo ocupam espaços. Podem ser reciclados ou destinados aos aterros. Os principais exemplos são os resíduos de construção civil, plásticos e vidros.

## 2.2. Biogás

No processo de decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos ocorre a geração de gases ocasionando impactos ambientais, pois além da produção de dióxido de carbono há também a formação de metano, um dos principais responsáveis pelo efeito estufa, pois esse gás é 21 vezes mais impactante em relação ao dióxido de carbono.

O processo biológico de metanização realizado, ocorre na ausência do oxigênio e leva à formação de biogás, composição rica em metano ( $\text{CH}_4$ ). O processo fermentativo é promovido por bactérias anaeróbicas. O biogás gerado vem associado com outros componentes e deve ser tratado para, em seguida, vir a ser utilizado para geração de energia elétrica.

O processo de metanização ocorre em cinco fases, sendo uma fase de decomposição aeróbica, uma fase de transição (facultativa) e três fases anaeróbicas (ácida, metogênica e maturação) (TCHOBANOGLIOUS et al, 1993 apud ALCÂNTARA, 2007). A figura 1 apresenta a evolução das diferentes fases de biodegradação da matéria orgânica durante o processo.

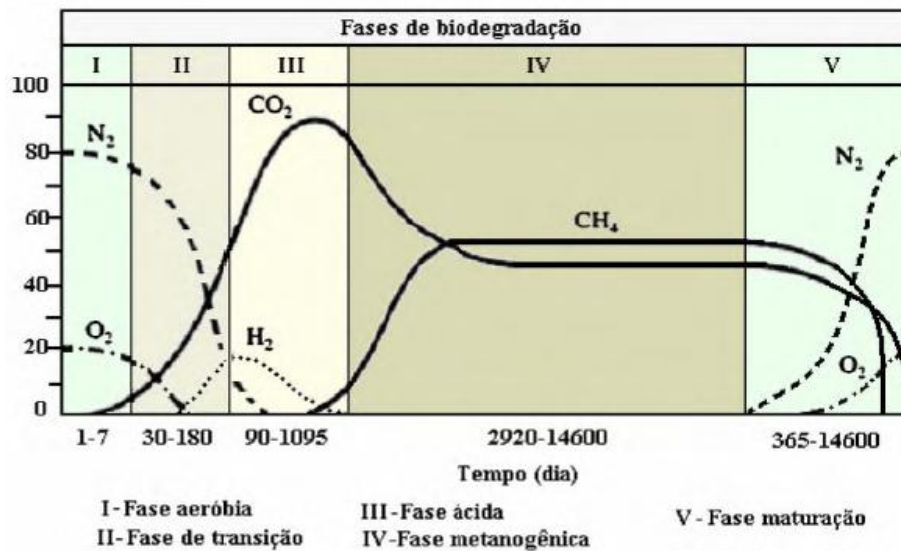


Figura 1: Fases da biodegradação da matéria orgânica.  
(TCHOBANOGLOUS et al, 1993 apud ALCÂNTARA, 2007)

- Fase aeróbia: é iniciada com a disposição da massa do lixo que vai se acumulando. O oxigênio vai se difundindo, permanecendo por vários dias até a execução do sistema de cobertura do aterro. Nessa fase, o pH vai diminuindo, por causa do consumo de oxigênio e do aparecimento de  $CO_2$ ;
- Fase de transição: ocorre quando as condições do meio estão adequadas para degradação anaeróbia, ou seja, quando a quantidade de  $O_2$  não é tão significativa;
- Fase ácida anaeróbia: possui um grande aumento da atividade microbiana, ocasionando uma alta concentração de  $CO_2$ ;
- Fase metânogênica: é a fase mais longa do processo. A concentração de  $CH_4$  se encontra na faixa de 50%-70% e de  $CO_2$  30%-50%;
- Fase de maturação: é a última fase do processo. Há um aumento nas concentrações de  $O_2$  e  $N_2$  e um decaimento de produção do  $CH_4$  e do  $CO_2$ , ocasionado pela queda da atividade microbiana devido à escassez dos nutrientes.

### 2.2.1. Fatores que afetam a composição do biogás

Há fatores que alteram a composição do biogás. De acordo com Maciel, a tabela 3 a seguir mostra resumidamente esses fatores:

Geometria e Operação do aterro	Características iniciais dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente Externo
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dimensão do aterro</li> <li>2. Impermeabilização do aterro</li> <li>3. Compactação do Lixo</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Composição do lixo</li> <li>2. Umidade do lixo</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Umidade da massa na degradação</li> <li>2. pH nas células</li> <li>3. Temperatura</li> <li>4. Disponibilidade de nutrientes/bactérias</li> <li>5. Presença de agentes inibidores</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Precipitação e infiltração</li> <li>2. Variação da pressão atmosférica</li> <li>3. Temperatura</li> <li>4. Evapotranspiração</li> <li>5. Umidade relativa do ar</li> </ol>

Tabela 3: Fatores que alteram a composição do biogás (MACIEL, 2003).

#### 2.2.1.1. Geometria e distribuição do aterro

As principais características da geometria que influenciam o biogás são a altura do aterro e o seu sistema de impermeabilização. A altura do aterro possui grande importância para o predomínio da fase anaeróbia, pois deve ser maior do que a profundidade da massa de lixo para evitar o contato com  $O_2$ . A impermeabilização atua reduzindo o efeito do meio externo, pois diminui a entrada de ar e água.

#### 2.2.1.2. Características iniciais dos resíduos

A composição e a umidade do lixo são os fatores de grande importância para a formação do biogás. A umidade da massa de lixo vai disponibilizar a água necessária para o metabolismo celular responsável pelo transporte de nutrientes e excreções dos microorganismos.

Segundo Maciel, a composição do lixo é considerada importante porque afetará as propriedades do biogás. Logo, quanto maior a quantidade de matéria orgânica será produzir mais biogás.



### 2.2.1.3. Ambiente interno

O ambiente interno deve ser apropriado, já que está associado ao favorecimento ou inibição da atividade dos microorganismos. A faixa de temperatura ótima é 35° à 45°C considerando-se pH neutro. A disponibilidade de macronutrientes (N, P) e micronutrientes (K, Mn) contribuem para a formação do biogás. Contudo, a sanilidade e a presença de metais pesados inibem a atividade microbiológica (ALCÂNTARA, 2007).

### 2.2.1.4. Ambiente externo

O ambiente externo influencia o processo através da incorporação de O<sub>2</sub> e da variação de temperatura. A adição de oxigênio pode ser originada através da infiltração de águas pluviais. Isto pode ser considerado um benefício, pois contribui com o sistema de drenagem e impermeabilização. Já a variação de temperatura dependerá da variação do clima local e da temperatura interna da massa lixo durante o decorrer do ano.

## 2.2.2. Aspectos microbiológicos

Os microorganismos que participam na formação do biogás são anaeróbios, facultativos e aeróbios. Esses últimos normalmente são originados da matéria que entra no sistema.

A fase aeróbia é curta, normalmente com duração de dois meses. Na etapa anaeróbia trabalha com diversos tipos de microorganismos para possibilitar a conversão da matéria orgânica a metano, gás carbônico, água, ácido sulfúrico e amônia. As populações microbianas podem ser classificadas em grupos de acordo com seus diferentes tipos de metabolismos (VILLAS BÔAS, 1990; JUNQUEIRA, 2000; CASSINI et al., 2003; MELO, 2003).

Os microorganismos hidrolíticos e fermentativos são responsáveis por duas etapas da decomposição: a hidrólise e a acidogênese. A sua função é hidrolisar compostos orgânicos, tais como celulose, amido e outros de menor tamanho, através de produção de enzimas. Em seguida, ocorre a fermentação de vários produtos intermediários como, por exemplo, etanol e acetato.

A degradação dos sólidos é geralmente a etapa limitante. A presença de lignina pode prejudicar o processo, pois não é degradada nessas condições e impede o acesso das enzimas à matéria fermentescível (BAYARD, 2010). Nessa etapa, os microorganismos implicados são as bactérias anaeróbias ou facultativas e alguns fungos.

A segunda etapa, a acetogênese, consiste em converter os intermediários metabólicos em acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), hidrogênio e gás carbônico, graças a três grupos de bactérias específicas: as acetogênicas ou produtoras de hidrogênio, as acidogênicas e as bactérias sulfatoredutoras (MOLETTA, 2008).

- Acidogênicas: convertem os compostos da hidrólise em compostos mais simples, por exemplo, ácidos graxos voláteis, alcoóis, gás carbônico, hidrogênio, amônia e entre outros, ocorrendo novas células bacterianas;
- Acetogênicas ou produtoras de hidrogênio: convertem os produtos da primeira etapa em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Bactérias sulfatoredutoras: produzem hidrogênio e na ausência de sulfato, utilizam substratos orgânicos que também são utilizados pelas metanogênicas. Já, na presença de sulfato ocorre uma competição entre esses microorganismos, podendo inibir a metanogênese.

A última etapa do processo de degradação anaeróbia é a metanogênese, realizada pelas bactérias *Arquéias metanogênicas*. Convertem o acetato em metano e gás carbônico e reduzem o dióxido de carbono com o hidrogênio para formar metano e água.

De acordo com a afinidade com substrato são divididas em dois grupos:

- Acetoclásticas: usam o metanol para a formação de metano;
- Hidrogenotróficas: utilizam o hidrogênio e o dióxido de carbono para a formação de metano.

Devido à grande diversidade de microorganismos presentes no aterro, é importante saber as quais os grupos que as espécies pertencem. A tabela 4 e a figura 2 mostram os diferentes tipos de bactérias anaeróbias durante as diferentes fases do processo:

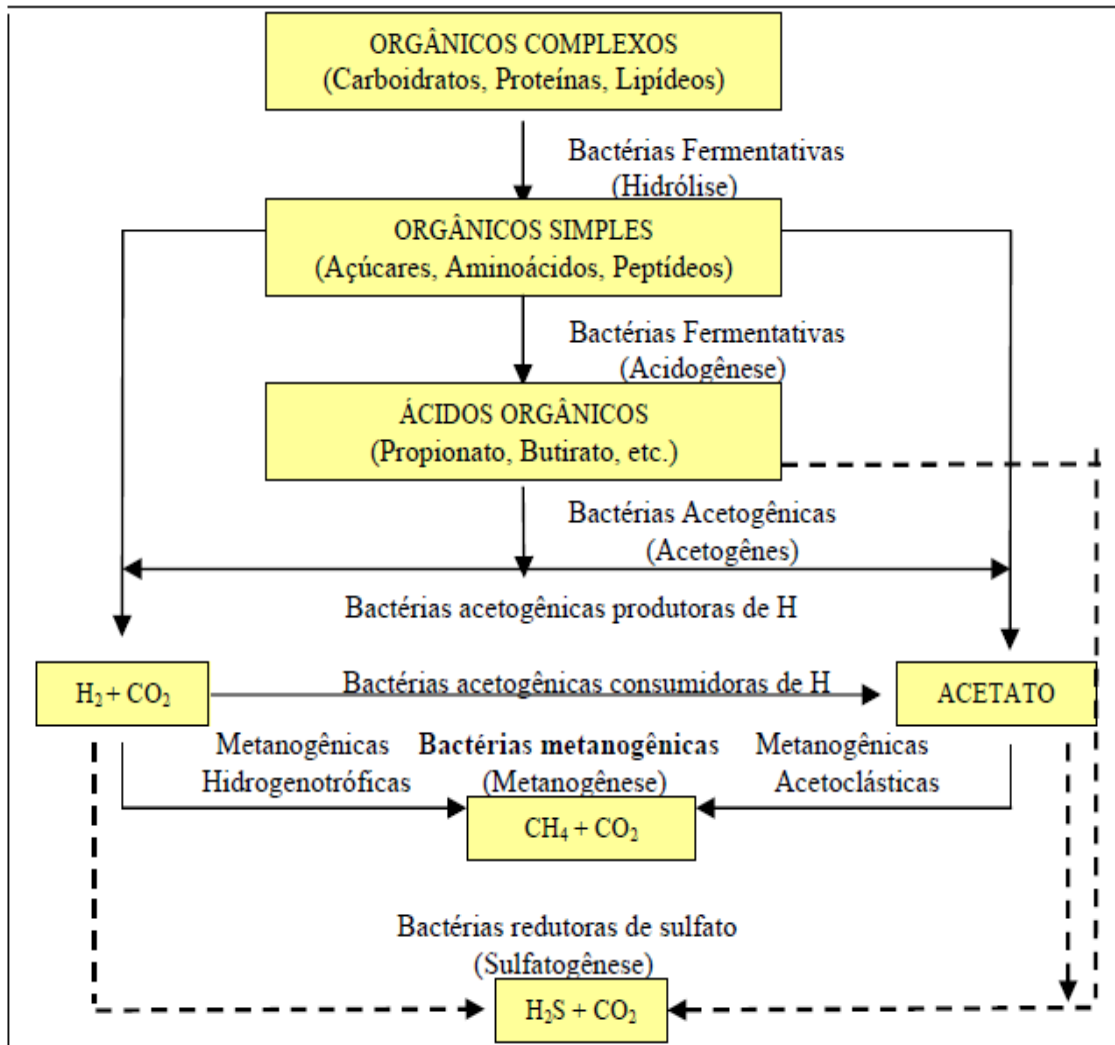


Figura 2: Sequências das rotas metabólicas e dos grupos envolvidos na digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 1993 *apud* MELO, 2003).

Etapas da digestão anaeróbia	Espécies bacterianas
Hidrólise e Acidogênese	<i>Clostridium s.</i> , <i>Acetivibrio cellulolyticus</i> , <i>Bacteroides succinogenes</i> , <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i> , <i>Eubacterium cellulosolvens</i> , <i>Bacillus sp.</i> , <i>Selenomonas sp.</i> , <i>Megasphaera sp.</i> , <i>Lachnospira multiparus</i> , <i>Peptococcus anaerobicus</i> , <i>Bifidobacterium sp.</i> , <i>Staphylococcus sp.</i>
Acetogênese	<i>Syntrophomonas wolinii</i> , <i>S. wolfei</i> , <i>Syntrophus buswelierii</i> , <i>Clostridium bryantii</i> , <i>Acetobacterium woddii</i> , várias bactérias redutoras do íon sulfato – <i>Desulfovibrio sp.</i> , <i>Desulfotomaculum sp.</i>
Metanogênese Acetoclástica	<i>Methanosarcina sp.</i> , <i>Methanotherix sp.</i>
Metanogênese Hidrogenotrófica	<i>Methanobacterium sp.</i> , <i>Methanobrevibacter sp.</i> , <i>Methanospirillum sp.</i>

Tabela 4: Espécies de bactérias anaeróbias (MELO, 2003).

### 2.2.3. Tratamento ou purificação do gás

É importante purificar o biogás para conseguir aumentar o poder calorífico, evitar perdas na eficiência global e minimizar o desgaste dos equipamentos. A etapa de purificação do biogás para distribuição em uma rede é considerada mais complexa quando comparada ao simples aproveitamento térmico. Esse tratamento pode ser classificado em primário e secundário. A Tabela 5 mostra as principais impurezas e suas respectivas técnicas de remoção.

Tipo de tratamento	Impureza	Problemas ocasionados	Técnicas utilizadas de remoção
Primário	Condensado (H <sub>2</sub> O)	- Redução de espaço para o gás nos dutos eleva perdas de carga. - Aumento oscilações na rede. - Incrustações na tubulação.	- Separador/drenos de condensado. - Condensação do vapor por filtração. - Resfriamento do gás.
	Material particulado	- Provoca desgaste excessivo de partes mecânicas do motor.	- Filtros de aço inox, de material granular ou cerâmico. - Separador tipo ciclone.
Secundário	Gases sulfurosos (S)	- Provoca corrosão química no motor - emissão de gases ácidos; - Afeta a qualidade do óleo lubrificante;	- Absorção à seco. - Absorção com água. - Absorção com solventes.
	Compostos halogenados (Cl, Br e F)	- Provoca corrosão química no motor e em tubulações metálicas. - Contribui para formação de gases ácidos (HCl, HF, PCDDs e PCDFs - dioxinas e furanos).	- Absorção com água/solventes. - Separação por membrana - Adsorção por troca pressão. - entre outros.
	Amônia (NH <sub>3</sub> )	- Formação de emissões de NO <sub>x</sub>	- Não informado
	Compostos de silício (Si)	- Incrustações (silício inorgânico) internas no motor. - Desgaste físico, redução de vida útil do motor e afeta a qualidade do óleo lubrificante.	- Carbono ativo - Lavagem com água - Injeção química interna ao motor

Tabela 5: Impurezas e técnicas correspondentes para cada remoção (Environmental Protection Agency, 2004).

O tratamento primário tende a melhorar a eficiência do motor, ocasionando um menor custo para manutenção e operação do sistema. Isso ocorre devido à remoção dos compostos condensados, vapores e particulados. Envolve sistemas simples de separação usando drenos e filtros.

O tratamento secundário é mais oneroso, pois devem ser observadas maiores preocupações com a formação de eventuais subprodutos que poderiam causar impactos ambientais. Envolve, principalmente, a remoção de compostos químicos como amônia e gás sulfídrico. Utilizam-se técnicas de adsorção, absorção e refrigeração (REINHART,1994).

A Tabela 6 foi publicada pela US Environmental Protection Agency em 2004. Apresenta os principais requisitos da qualidade do biogás para os diferentes tipos de motores comerciais.

Parâmetros	Fabricantes de motores a combustão interna			
	Jenbacher	Deutz	Caterpillar	Waukesha
Poder calorífico ou variação	Variação máx: < 0,5% CH <sub>4</sub> em 30s.	14,4 MJ/Nm <sup>3</sup>	15,5 a 23,6 MJ/Nm <sup>3</sup> (faixa recomendada)	>15,73 MJ/Nm <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub>	-----	40%	Recomendado CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> = 1,1 - 1,2	-----
H <sub>2</sub> S	1.150 a 2.000 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	< 0,15% v/v	2.140 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	< 715 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (total S)
Amônia	< 55 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	-----	< 105 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	-----
Teor de umidade	< 80% c/ ausência condensado	< 60-80%	< 80%	Ausência de água
Material particulado	< 50 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (partículas < 3 µm)	< 10 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (partículas 3-10 µm)	< 30 mg/ Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (partículas < 1 µm)	Remoção partículas > 0,3 µm
Pressão na entrada	80-200 mbar	até 2.000 bar	-----	-----
Flutuação da pressão do gás	< 10 mbar/seg	< ± 10% do especificado	-----	-----
Temperatura do gás na entrada	< 40°C	10-50°C	-----	>-29°C e < 60°C

Tabela 6: Requisitos de motores combustão a biogás (Environmental Protection Agency, 2004).

Vale ressaltar que a vida útil desses motores e o custo de manutenção são influenciados pelo teor de ácido sulfídrico existente no biogás (Chambers e Porter, 2002).

#### 2.2.4. Sistema de conversão do biogás em energia elétrica

A energia química do biogás é proveniente de suas moléculas. É convertida em energia mecânica através de processo de combustão controlada, ativando um gerador que vai converter em energia elétrica.

Outra forma de aproveitamento energético consiste na queima direta do biogás em caldeiras, turbinas a gás, motores de combustão interna e microturbinas para cogeração e outras formas de energia. A incineração tem por função transformar o biogás, composto principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para evitar o aumento crítico nas tubulações e não deixar escapar o metano para a atmosfera (ENSINAS, 2003).

A Figura 3 representa um sistema de captação, distribuição, queima e geração de energia elétrica para a posterior transmissão.

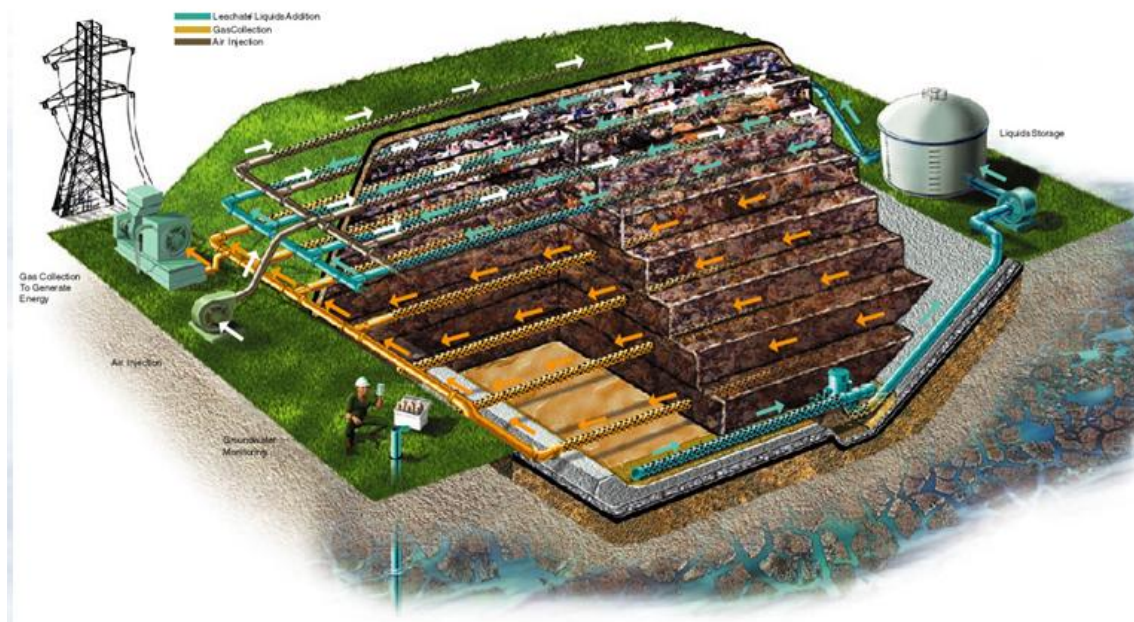


Figura 3: Sistema de captação, distribuição, queima e geração de energia elétrica (Jucá, 2003).



## 2.4 ASMOC

O município de Fortaleza passou a destinar seus resíduos sólidos ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) em 1997. Houve a desativação do Lixão de Jangurussu, decorrente de um acordo feito entre as prefeituras de Fortaleza, Caucaia e o Governo do Estado do Ceará, pois traria benefícios para RMF. Contudo, a desativação do aterro sanitário, a responsabilidade e a preocupação sobre a área foram do município que o abriga.

O ASMOC recebe os resíduos de Fortaleza desde 1997, quando começou a operar, e também recebe os resíduos oriundos no município de Caucaia. De acordo com Empresa Municipal de Limpeza Urbana (EMLURB), Fortaleza produz atualmente mais de 3.000 toneladas/dia de resíduos.

O ASMOC atende majoritariamente a cidade de Fortaleza. Existe ainda mais dois aterros: aterro sanitário em Maracanaú (Aterro Sanitário Metropolitano Sul) e um em Aquiraz (Aterro Sanitário Metropolitano Leste).

O aterro estudado se encontra limitado pelos paralelos 3° 45' e 3° 47' de longitude Sul e pelos meridianos 38° 43' e 38° 45' de longitude Oeste, localizado na margem esquerda e a 1,6 km da BR-020 em Caucaia. Foi projetado para receber por volta de 16 mil toneladas de resíduos por mês, possibilitando uma estimativa de vida útil em torno de 15 anos. A Figura 4 mostra uma vista aérea do ASMOC obtida pelo Google Earth®.



Figura 4 - Vista Aérea do ASMOC. Fonte: Google Earth (2007).

Entretanto, houve uma grande demanda entre o período compreendido de 1998 a 2007, logo ocupando 65% da área do ASMOC.

O ASMOC está dividido nos seguintes setores relacionados na Tabela 7.

Tipo de Ocupação	Área (ha)	%
Administração/Urbanização/Estacionamento	2,35	1,9
Sistema Viário (Acesso Interno)	3,19	2,6
Área para compactação dos Resíduos	78,47	63,71
Faixa de Preservação do Contorno	7,04	5,7
Área de Preservação Ambiental	32,15	26,1
<b>Total</b>	<b>123,20</b>	<b>100,00</b>

Tabela 7: Distribuição da Área do Aterro Sanitário de Caucaia por Setor (Santos, 2007).

Observou-se através do ritmo de geração de resíduos sólidos em Fortaleza que o ASMOC teria sua vida útil reduzida e esgotaria sua capacidade em meados de 2011. Contudo, estudos de sua estrutura e de melhor aproveitamento de seu espaço possibilitaram a prorrogação de sua vida útil.

Através do uso de áreas de arruamento, que medem 500m de comprimento por 27,6 de largura, para fusão de setores e formação de um grande platô de 34,14 hectares; o que permitiria trabalhar no método da área com altura máxima de 50m. Esta seria uma alternativa operacional, advinda dos conhecimentos da engenharia sanitária e ambiental.

Além disso, observa-se que a área ao redor do aterro vem sendo urbanizada, devido ao aumento de algumas atividades econômicas como pequenos comércios, borracharias, dentre outros. Existe a preocupação que essa urbanização esteja ocorrendo sem acompanhamento nem orientação técnica que são de responsabilidade da Prefeitura de Caucaia, acarretando problemas na saúde da população e na operação do aterro.

## 2.5 Estudos de casos

A seguir são apresentados alguns exemplos de aproveitamento energético a partir do biogás gerado em diferentes aterros sanitários no Brasil.



### 2.5.1 Aterro Bandeirantes

O aterro sanitário Bandeirantes, localizado na zona oeste do município de São Paulo, possui uma área de 150 hectares e cerca de 135 milhões de lixo estocado. Em 2003, ali foi implantada a primeira usina de geração de energia a partir do biogás no Brasil. A produção média situa-se por volta de 175 mil megawatts por ano.

A captação do biogás é realizada através de 60 tubos instalados verticalmente no aterro. O material coletado escoa por 35 Km de tubulações até a estação de beneficiamento, onde é comprimido e conduzido até uma bateria de motogeradores para a posterior queima do metano, conforme mostrado na figura 5.



Figura 5: Motogeradores do aterro Bandeirantes (CETREL, 2008).

A combustão permite a transformação da energia química em mecânica e posteriormente para disponibilização em elétrica, que é diretamente transferida para a rede de distribuição da concessionária estadual Eletropaulo.

A produção do aterro Bandeirantes já abastece edifícios administrativos do Unibanco, um dos principais investidores do empreendimento, e também é comercializada no mercado livre (CETREL, 2008).

Atualmente, o empreendimento ainda consegue aumentar a sua lucratividade através da venda de créditos de carbono para outros países como a Alemanha.

As principais vantagens desse projeto são os baixos custos e tecnologia relativamente simples, devido à facilidade de execução e à grande capacidade de absorção de resíduos. As desvantagens, entretanto, são a baixa eficiência e o baixo potencial de geração de energia.

Esse projeto representa, portanto, a concretização do sucesso de uma parceria entre empresas públicas e privadas. Esse consórcio pode trazer um grande benefício para o meio ambiente e para a população. A figura 6 a seguir apresenta uma visão panorâmica do aterro Bandeirantes.



Figura 6: Aterro Bandeirantes (CETREL, 2008).

### 2.5.2 Aterro São João

No aterro São João, a unidade de implantação da usina de Biogás foi inaugurada oficialmente em janeiro de 2007, mas começou de fato em junho de 2007, com o início da operação de descontaminação do metano. Em seus 80 hectares e cerca de 26 milhões de toneladas de lixo estocadas, foram instalados mais de 30 km de tubulações especiais para a coleta do gás e construídos 126 poços conectados.

O Aterro São João, em operação durante 15 anos, possui 82,4 hectares de área, dos quais 50 hectares (60,68%) servia como depósito para o lixo produzido pela cidade. Ao fim de sua operação total, em outubro de 2007, o local recebia, em média, 5.812 toneladas de resíduos por dia e gerava 1.800m<sup>3</sup> de líquido percolado (chorume). A capacidade da usina é de 200 mil MW/h por ano, o equivalente ao consumo de uma cidade de 400 mil habitantes.

O empreendimento é um projeto do consórcio São João Energia Ambiental S.A., formado pela Arcadis Logos Energia S.A., Heleno & Fonseca Construtécnica S.A. e Van Der Wiel. A planta elétrica foi desenvolvida pela unidade de negócios Sistemas de Energia Sotreq S.A prevendo o fornecimento de 16 grupos geradores CAT, com potência unitária de 1,54 MW, totalizando 24,64 MW de potência bruta instalada. As máquinas foram produzidas no Large Engine Center da Caterpillar, em Lafayette, Indiana (EUA). A Figura 7 mostra uma vista da usina de biogás do aterro São João.



Figura 7: Usina de captação do biogás no aterro São João

Juntos esses aterros fizeram com que a Prefeitura Municipal de São Paulo, que está à frente dos projetos, reduzisse em até 20% das suas emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. E ainda também tivesse algum retorno financeiro. A iniciativa vem rendendo dividendo através da venda de créditos de carbono que já foram negociados em dois leilões, em 2007 e 2008, gerando algo em torno de R\$ 71 milhões. A verba é utilizada em projetos destinados às comunidades que vivem ao redor dos aterros.



#### 2.5.4 Projeto Novagerar

O projeto Novagerar, desenvolvido na Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Nova Iguaçu, foi o primeiro projeto realizado de acordo com Mecanismo do Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto. Esse registro aconteceu em 18 de novembro de 2004, na sede do MDL em Bonn, Alemanha.

O gás gerado no aterro sanitário da CTR de Nova Iguaçu é aproveitado na produção de energia limpa. Este gás é drenado, canalizado e transformado em combustível que alimenta as unidades de tratamento dentro da própria CTR. O projeto prevê ainda instalação de usinas geradoras de energia elétrica que terão capacidade para iluminar os prédios públicos da cidade onde o empreendimento está instalado.

O projeto Novagerar atraiu interesse do Governo da Holanda que por meio do Banco Mundial (BIRD), fechou contrato com a empresa para a compra de créditos de carbono. Para a aprovação dessa operação, o Banco Mundial realizou auditorias para verificação de conformidade com as políticas ambientais do banco. Este foi o primeiro projeto do Brasil ligado à destinação final de lixo que tem o apoio do BIRD.

#### 2.5.5 Projeto Vega

O Projeto Vega, localizado em Salvador, usa tecnologia nacional igualmente aos projetos citados. Entretanto, possui sistema gerador importado.

A instalação da motogeradora movida a biogás possui capacidade de geração máxima de 230 kW, no Aterro Metropolitano Central. Esse projeto atraiu os países Japão e Inglaterra para a compra dos créditos de carbono.

### 3. METODOLOGIA

Além das questões de natureza práticas como o levantamento dos dados e parâmetros, foram paralelamente estimulados a leitura de bibliografias sobre o tema, a participação em cursos e eventos no mesmo contexto e discussões com especialistas para o aprofundamento em áreas correlatas do conhecimento. Em especial direcionou-se o foco do estudo para os aterros, o processo de formação do biogás e as questões relativas à geração de energia elétrica.

O estudo propõe-se a traçar um perfil da situação do Lixo Urbano através de análises qualitativas e quantitativas dos Resíduos Sólidos Urbanos gerados em Fortaleza através de amostragem, visitas de campo e coleta de dados nos aterros e estações de transbordo. Nesse sentido a participação da Secretária de Infraestrutura (SEINFRA) é fundamental para viabilizar o acesso às diversas instâncias implicadas; prefeituras da Região Metropolitana de Fortaleza, Secretaria de Meio Ambiente (SEMACE), Empresas de Coleta e dados de séries históricas, além da disponibilização dos dados dos projetos das instalações envolvidas. Foi feita também uma avaliação quanto à quantidade e a natureza da composição do biogás que atualmente é produzido no aterro municipal de Caucaia - ASMOC.

A obtenção das amostras foi feita in loco, através do isolamento de drenos de gás bem como da inserção de uma seringa para realizar a sucção do gás retido no isolamento. Para uma maior confiabilidade dos dados foram escolhidos 15 pontos de acesso baseados em um estudo gravimétrico do local. A Figura 9 ilustra o sistema de isolamento para a coleta de gás.





Figura 9: Isolamento do dreno.

As amostras foram acondicionadas em cilindros de retenção de gás e em seguida enviadas para análises, feitas em um cromatógrafo portátil no qual foram inseridas amostras de biogás dos diversos pontos de coleta do ASMOC.



Figura 10: Cromatográfico portátil  
Cromatógrafo VARIAN CP4900



Figura 11: Medição cromatográfica



Figura 12: Medição de temperatura e vazão  
Termoanemômetro INSTRUTEMP

Após a realização das análises foi criado de um banco de dados atualizado contendo todas as informações obtidas. A partir daí, tornou-se possível analisar e avaliar a produtividade entre células velhas e novas, ou entre determinados pontos do aterro onde existe um manejo diferenciado dos resíduos.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1 Análises dos RSU de Fortaleza

Foi realizado o estudo da quantidade de resíduos que o ASMOC recebeu mensalmente durante os anos de 2005 e 2006, mostrados nas Tabelas 8 e 9:

2005	TONELADA	2006	TONELADA
JANEIRO	70.988,73	JANEIRO	64.058,94
FEVEREIRO	58.881,48	FEVEREIRO	52.014,91
MARÇO	63.755,25	MARÇO	63.018,05
ABRIL	57.680,63	ABRIL	59.103,36
MAIO	57.035,55	MAIO	69.113,82
JUNHO	62.515,38	JUNHO	62.198,74
JULHO	60.684,44	JULHO	60.037,06
AGOSTO	58.226,89	AGOSTO	63.094,97
SETEMBRO	56.367,07	SETEMBRO	65.648,27
OUTUBRO	58.580,56	OUTUBRO	68.589,92
NOVEMBRO	57.555,42	NOVEMBRO	70.330,44
DEZEMBRO	62.012,05	DEZEMBRO	72.250,80
<b>TOTAL 2005</b>	<b>724.283,44</b>	<b>TOTAL 2006</b>	<b>769.459,27</b>

Tabelas 8, 9: Toneladas de RSU por mês enviados ao ASMOC (EMLURB, 2007).

Observa-se que a geração de RSU sofreu um aumento de 6% entre os anos de 2005 e 2006 e que no período de férias (meses de janeiro, julho e dezembro) há uma maior geração de resíduos. (EMLURB, 2007)

Com isso, foi obtida a análise da tipologia dos RSU gerados em Fortaleza, mostrado na Tabela 10:

MATERIAL	FRAÇÃO NO LIXO (%)
Papel	6,98
Papelão	7,88
Plástico	10,69
Metal	3,03
Vidro	2,15
Material Orgânico	38,51
Terra e Entulhos	3,84
Rejeitos de Parques e Jardins	14,24
Outros	6,9
TOTAL	100

Tabela 10: Tipologia do RSU de Fortaleza (FIRMEZA, 2005).

Constatou-se que há uma grande geração de material orgânico (38,51%) provenientes de Fortaleza, e que o ASMOC possui um grande potencial para a geração do biogás, devido à decomposição desses resíduos.

O ASMOC, portanto, está subutilizando este material, pois fazendo uma comparação com um biorreator, o uso energético do biogás gerado pelos resíduos é um dos princípios do desenvolvimento sustentável. O ganho energético, o biogás proporciona um aumento na qualidade operacional e ambiental a fora a possibilidade de geração de recursos a partir dos créditos de carbono.

A Figura 13 apresenta o mapeamento dos poços inspecionados.

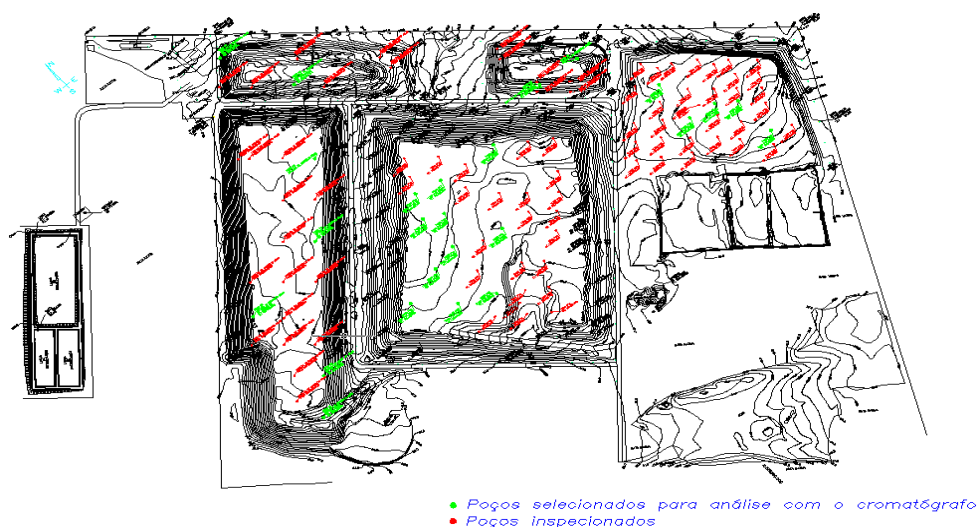


Figura 13: Mapeamento dos poços inspecionados.

## 4.2 Análise do Biogás

A partir das análises realizadas, foi possível a construção do gráfico de estimativa das emissões de metano e dióxido de carbono, mostrado a seguir.

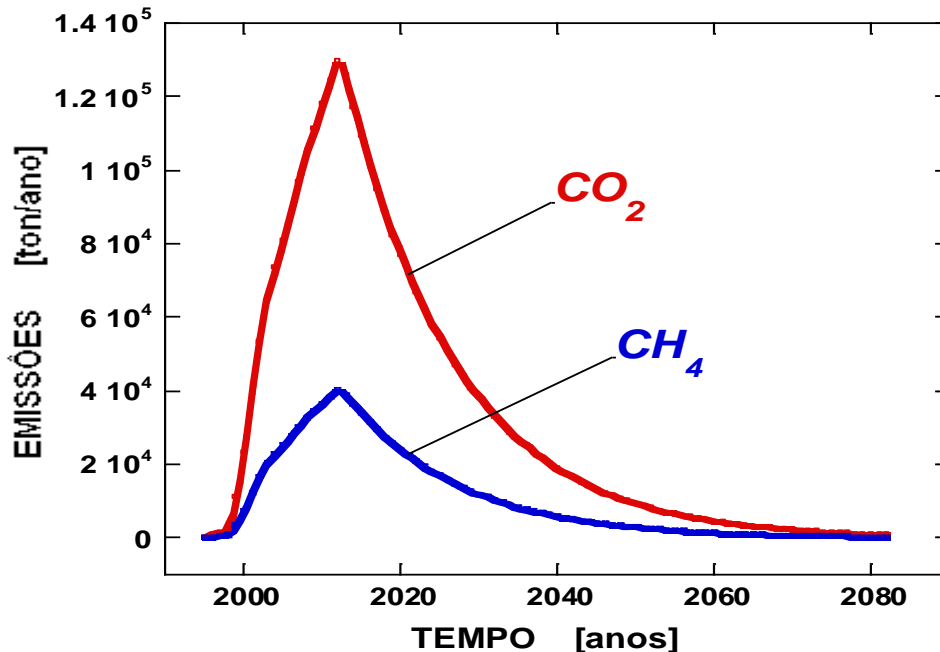


Figura 14: Estimativa da emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no ASMOC

A medição de campo, através do modelo Landgen®, serviu de referência para o modelo que caracteriza o perfil da curva da estimativa da vida útil do ASMOC.

Analisando o gráfico apresentado, verifica-se que está sendo projetada, através de simulação, atividades de emissão do biogás no aterro por quase 60 anos, como estimativa média para todas as células que compõem o ASMOC.

Tendo como referência os valores experimentais, foram calculadas as emissões do ano de 2007, que atingiram valores em torno de 97.000 ton/ano de CO<sub>2</sub> e 30.000 ton/ano de CH<sub>4</sub>. Embora a concentração média do CH<sub>4</sub> no Biogás produzido no ASMOC seja de aproximadamente 46%, a grande diferença em tonelagem se deve a diferença de peso molecular entre os gases.

O gráfico mostra que essa diferença entre os gases tende a se tornar mais acentuada à medida que o aterro vai envelhecendo. Entretanto, a produção de ambos os gases deverá decair na mesma época, aproximadamente.

Observando-se o gráfico verifica-se que a partir 2012 a produção estimada de ambos os gases deve começar a ser reduzida.

Por essa razão, o plano de aproveitamento do potencial energético do ASMOC deve adotar um valor de potência de referência para que o aproveitamento seja o mais prolongado possível e, ao mesmo tempo, tenha-se uma quantidade de energia produzida em níveis passíveis de comercialização.

Contudo, essas análises podem ser consideradas como uma primeira aproximação devido aos detalhes operacionais. O duto que fazia emissão do biogás era de PVC que, por possuir baixa resistência mecânica, eventualmente apresentava deformações devido à alta pressão oriunda da compactação do lixo. Isso ocasionava a criação de caminhos preferenciais ou obstruções que gerariam resultados não condizentes com a realidade.

Atualmente, após a mudança da concessão, os dutos foram totalmente substituídos por manilhas de concreto, possuindo uma maior resistência. As figuras a seguir mostram os dutos de emissão do biogás.



Figuras 14, 15: Dutos de emissão de biogás do ASMOC.  
À esquerda, em 2007, duto de PVC. À direita, em 2010, duto de concreto.

Pode-se fazer uma estimativa da geração de energia produzida em um aterro através da quantidade de resíduos sólidos que recebe.

Utilizando-se a tabela 10, verifica-se que o valor de 770 mil toneladas de RSU geradas em 2006, implicaria, portanto, numa taxa de  $7\text{m}^3/\text{ton}/\text{ano}$ , possibilitando uma conversão de energia de aproximadamente de  $1,43\text{KW}/\text{m}^3$  de biogás.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O estudo da geração de biogás produzido nos aterros sanitários é de fundamental importância devido ao grau de impacto ambiental e da potencialidade de ganho econômico na sua utilização.

No caso do ASMOC, em especial, podem-se perceber diversas necessidades adicionais de engenharia para viabilizar seu beneficiamento. Porém, tais implementações são dificultadas, tendo em vista o alto investimento necessário e a ingerência política fortemente presente nos aspectos relacionados às questões dos RSU.

Portanto, como forma de minimizar o impacto causado devido à emissão do gás diretamente na atmosfera, sem tratamento, uma opção considerando apenas o caráter ambiental seria realizar simplesmente a combustão controlada do biogás. Tal projeto pode ser implantado de forma rápida e de custo relativamente baixo. O único problema seria a inviabilização do beneficiamento para o aproveitamento energético.

O aterro deveria ter sido desativado em 2007, tendo em vista que, em seu projeto inicial, sua vida útil seria de apenas 10 anos. Com o implemento de novas técnicas de compactação e aproveitamento do terreno, esse prazo se postergou por mais 5 anos e, atualmente, há uma previsão para mais 10 anos. Assim, é notória a necessidade de novos projetos na área, pois devido à crescente demanda de disposição final adequada. Até o final de 2011, a falta de espaço no aterro pode ser um problema crucial para a Região Metropolitana de Fortaleza.

Uma iniciativa tomada recentemente, a partir da promulgação da Lei Federal 12305/2010, proporcionou a criação de projeto para a implantação de consórcios no Estado do Ceará. Pelo menos mais 26 aterros sanitários dispostos nas localidades do estado proporcionarão um destino minimamente aceitável para diversas comunidades. O intuito da formação de consórcios visa ratear custos, pois é praticamente impossível que pequenos municípios realizem isoladamente esses investimentos, já que os seus recursos são escassos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2009). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2009**. São Paulo, SP.

ALCANTARA, P. B (2007). **Avaliação da influencia da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 366p.

ALVES, Ingrid Roberta de F.S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

BAYARD R. ; GOURDON R. **Traitement biologique des déchets. ed. Techniques de l'Ingénieur**, C-2060v2, 2010.

BAYARD R. ; GOURDON R. **Traitement biologique des déchets. ed. Techniques de l'Ingénieur**, J-3966, 2007.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 4ª Edição, Humanitas Editora/FFLCH/USP, Universidade de São Paulo, 1999.

CASSINI, S.T; CHERNICHARO, C. A. L; ANDREOLI, C. V; FRANÇA M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. (2003). **Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos**. In.: CASSINI, S. T. (Coord.). Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, Projeto PROSAB. 210 p.

ENVIRONMENT AGENCY, **Interim internal technical guidance for Best practice flaring of landfill gas**, Document nº LFG2, Bristol, UK. 1999.

FIRMEZA, Sérgio d. M. **A caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares de Fortaleza como fator determinante do seu potencial reciclável**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

FIRMO, A. L. Barbosa. **Análise Numérica de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Calibração de Experimentos em Diferentes Escalas**. Dissertação de

Mestrado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

HILUY, J. J; BARCELLOS, W. M. **Estudo Preliminar de Viabilidade Técnico-Econômico Para Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos da Região Metropolitana de Fortaleza.** 2007. Fortaleza, CE.

<http://www.adrianodiogo.com.br/meioambiente/usinabiogas.asp> acessado 16/11/10 às 17:22

<http://www.cetrel.com.br/salaImprensa/entrevistasCompleta.asp?codigo=527> acessado 16/11/10 17:23

<http://www.ctrnovaiguacu.com.br/portug/novagerar.asp> acessado 16/11/10 às 17:19

<http://www.ecopress.org.br/eco+watch/aterro+sao+joao+tera+segunda+usina+de+geracao+de+energia+por+biogas+de+sao+paulo> acessado 16/11/10 às 17:22

<http://www.gasnet.com.br/conteudos.asp?cod=4578&tipo=Artigos&categoria=7> acessado 16/11/10 às 17:25

<http://www.infoescola.com/ecologia/residuos-solidos/> acessado 16/11/10 às 17:22

<http://www.scribd.com/doc/2364279/Disponibilidade-do-biogas-em-uma-celula-do-aterro-de-residuos-solidos-da-Muribeca> acessado 16/11/10 às 17:29

<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/conj/conj12/artigo03.pdf> acessado 16/11/10 às 17:21

<http://www.solvi.com/vega/> acessado 16/11/10 às 17:21

MACIEL, F. J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE.** Tese, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2003.

MACIEL, F. Jucá. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos.** Tese de Doutorado - Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

MARIANO, M. O. Holanda. **Avaliação da retenção de gases em camadas de coberturas de aterros de resíduos sólidos**. Tese de Doutorado – Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.

MELO, V. L. A.; JUCÁ, J. F. T. **Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000.

MOLETTA R. **Méthanisation de la biomasse**. ed. *Techniques de l'Ingénieur*, BIO-5100, 2008.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 3ª ed., Rio de Janeiro: ABES 2003.

MOTTA R. ; CALÔBA G. M. **Análise de investimentos : tomado de decisão em projetos industriais**. São Paulo : Atlas, 2000.

REINHART, D. **Beneficial use of Landfill Gas**, University of Central Florida, Depart, of Civil and Environmental Eng., Report nº 94-7, 1994.

REINHART, D. R; TOWNSEND, T. G. **Landfill Bioreactor Design & Operation**, CRC Press LLC (Lewis Publishers), 189 p. 1998.

REINHART, D. Why wet landfills with leachate recirculation are effective, In: **Geotechnical Especial Publication nº 53**, ASCE, eds. Jeffrey Dunn e Udai Singh, pp 93-99. 1995.

SANTOS, G. O. **Análise Histórica do Sistema de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Fortaleza como Subsídio às Práticas Ambientais** Monografia de Especialização Universidade Estadual do Ceará , Fortaleza, 2007.

SANTOS, G. O; HILUY, J. J. **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC-CE**. 2009. Fortaleza, CE.

SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. **Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes - SP**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, Mar. 2008.

TCHOBANOGLIOUS G. ; THIESEN H. ; VIGIL S. **Integrated solid waste management : engineering principles and management issues**. ed. Mc Graw-Hill, 1993.



VILLAS BÔAS, D.M.F. (1990). **Estudo da microbiota anaerobia hidrolítica-fermentativa em aterro sanitário**. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos - SP. 156 p.