

**Avaliação dos gases (metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico) gerados pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos.**

Carla Canton Sandrin

Orientador: José Julio Barrios Restrepo

2010/1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

**“AVALIAÇÃO DOS GASES (METANO, DIÓXIDO DE  
CARBONO E GÁS SULFÍDRICO) GERADOS PELA  
DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS.”**

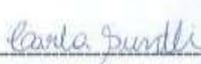
**CARLA CANTON SANDRIN**

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos  
requisitos para Conclusão do Curso em Engenharia Sanitária e  
Ambiental**

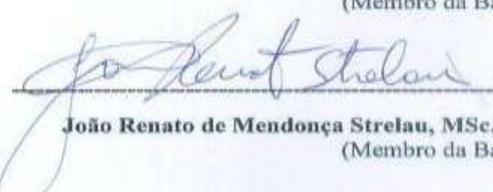
**BANCA EXAMINADORA:**



\_\_\_\_\_  
**José Julio Barrios Restrepo, MSc.**  
(Orientador)



\_\_\_\_\_  
**Carla Suntti, MSc.**  
(Membro da Banca)



\_\_\_\_\_  
**João Renato de Mendonça Strelau, MSc.**  
(Membro da Banca)

## AGRADECIMENTOS

À Deus e minha família, por todo o amor, ensinamentos e oportunidades que me proporcionaram durante a vida.

À minha mãe Ivanete Maria pela vida e amor incondicional; ao meu pai Luiz Carlos pelas palavras simples e verdadeiras; minhas irmãs Carolina e Carina pela sinceridade e apoio em todos os momentos; aos avós Maria Rosa, Cirilo e Ermida (em memória) pelo sempre amor, preocupação, força e orações feitas.

Às amigas Beatriz, Cândida, Cláudia, Cláudia Cristina e Patrícia por todo carinho e amizade verdadeira.

Ao meu orientador José Julio Barrios Restrepo por toda a orientação, pela oportunidade que me proporcionou e, acima de tudo, pela amizade.

Aos amigos Álvaro, Bruno, Carla, Igor, Irene e Mariele pelo verdadeiro incentivo e pelas diversas contribuições durante essa jornada.

Aos Professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por todas as contribuições técnicas, profissionais e pessoais.

Aos profissionais do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), em especial à Eliane e Vitor por toda contribuição durante o desenvolvimento do trabalho.

Para não correr o risco da injustiça, agradeço de antemão a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

Muito obrigada!

Carla Canton Sandrin.

SANDRIN, Carla C.. **AValiação dos Gases (Metano, Dióxido de Carbono e Gas Sulfídrico) Gerados pela Decomposição Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2010. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

## RESUMO

Com o objetivo de avaliar o biogás gerado pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em reatores com diferentes porcentagens na composição do seu preenchimento, o presente trabalho implicou na determinação das porcentagens dos principais gases presentes no biogás e na concentração de matéria orgânica do lixiviado por meio de análises de DBO<sub>5</sub> e DQO. O primeiro reator (R1) foi preenchido apenas com matéria orgânica (restos de alimentos), R2 foi preenchido com RSU de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007. Já para R3 também foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009.

Comparando-se os resultados das análises da composição do biogás entre os reatores R1, R2 e R3 pode-se identificar uma maior produção de CH<sub>4</sub> no R3, preenchido com RSU da cidade de Florianópolis do ano de 2009. Essa gravimetria do R3 corresponde a da usina de triagem da Comcap (Companhia Melhoramentos da Capital - Florianópolis /SC).

As diferenças na geração do CH<sub>4</sub> entre R1 (0,1% a 0,3%) e R2(0,5% a 0,7%) foram pequenas. Com relação ao CO<sub>2</sub>, há uma diferença considerável entre os três, sendo que o maior produtor foi R2 (42,2% a 71,6 %). A temperatura interna dos três reatores foi bastante semelhante, situando-se basicamente na faixa mesófila (25°C e 34°C com uma temperatura média de 34 °C no período da primavera e verão e 30°C no outono e início de inverno). Com relação à análise da concentração da DQO e DBO<sub>5</sub> do lixiviado, foram analisadas quatro amostras. A média dos resultados das amostras de DBO e DQO para R1 foi respectivamente, 12.217 mg/L e 94.252 mg/L; para R2, 12.062 mg/L e 95.426mg/L. R1 e R2 obtiveram uma média de valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se muito parecidos. Já R3 teve concentrações de DBO (7.130 mg/L) e DQO (58.423 mg/L) bem menores. As altas concentrações de DBO e DQO do lixiviado identificam teores elevados de matéria orgânica presente nos reatores. As concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> encontradas no R3 são as que mais se aproximaram da composição típica do biogás de aterros sanitários.

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

## ABSTRACT

The aim of this job was to evaluate the biogas generated by anaerobic decomposition of municipal solid waste (MSW) in reactors with different percentages of materials composition. The percentages of the main gases present in the biogas and the concentration of organic matter leached through analysis BOD<sub>5</sub> and COD was determined.

Three reactors (R1, R2, R3) were constructed. R3 reactor, filled with MSW of the city of Florianópolis in the year 2009, showed the higher CH<sub>3</sub> production. The R3 gravimetry to the screening plant Comcap. The differences in the generation of CH<sub>4</sub> between R1 (0.1% and 0.3%) and R2 (0.5% and 0.7%) were small. With respect to CO<sub>2</sub>, there is a considerable difference between the three; the largest producer was R2 (42.2% to 71.6%). The internal temperature of the three reactors was very similar, standing basically in the range mesophilic (25 ° C and 34 ° C, average of 34 ° C during the spring and summer and 30 ° C in autumn and early winter). Regarding the concentration of COD and BOD<sub>5</sub> four samples of the leachate were analyzed. The average sample results for BOD<sub>5</sub> and COD were 12.217mg / L and 94.252mg / L for R1 and 12 062 mg / L and 95.426mg / L for R2. R1 and R2 had in average high values and, even though both reactors had different proportional initial fillings, these parameters were very similar. R3 reactor had smaller BOD<sub>5</sub> and COD concentrations: 7.130mg / L and 58.423mg / L respectively smaller, though still considered high. The BOD<sub>5</sub> and COD values in the lixiviates revealed high levels of organic matter in the reactors.

**Key words:** Biogas, Anaerobic Digestion, Landfill, Solid Waste.

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1- Composição gravimétrica (%) dos RSU de algumas cidades brasileiras.....	7
Tabela 2 - Formas de disposição de resíduos por regiões do país.....	10
Tabela 3- Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.....	17
Tabela 4 - Características dos gases presentes no biogás de um aterro sanitário .....	20
Tabela 5 - Concentração média dos gases nos aterros Catarinenses de Içara e Tijuquinhas.....	21
Tabela 6- Principais fatores que afetam a geração de gases.....	24
Tabela 7 - Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás.....	25
Tabela 8 - Valores sugeridos para $L_0$ .....	27
Tabela 9 - Valores de $k$ ( $\text{ano}^{-1}$ ), em função da precipitação.....	28
Tabela 10 - Dados da composição típica dos elementos do lixo doméstico.....	29
Tabela 11 - Composição dos lixiviados reportados da literatura .....	36
Tabela 12- Composição do lixiviado de aterros sanitários Brasileiro....	37

Tabela 13- Composição do lixiviado de aterros sanitários em Santa Catarina.....	37
Tabela 14 - Variações das concentrações dos lixiviado segundo idade do aterro.....	38
Tabela 15 - Faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados durante as fases de estabilização biológica.....	38
Tabela 16 - Características do lixiviado nas fases Acidogênica e metanogênica em Aterros Sanitários.....	39
Tabela 17 - Composição gravimétrica do R2(2007).....	41
Tabela 18 - Composição gravimétrica do R3 (2009).....	41
Tabela 19 - Parâmetros, métodos analíticos e equipamentos usados nas análises.....	47
Tabela 20- Avaliação do Biogás durante o período experimental.....	49
Tabela 21- Parâmetros do lixiviado analisados durante o período experimental.....	53
Tabela 22 - Razão DBO <sub>5</sub> /DQO nos reatores durante período experimental.....	53
Tabela 23 - Concentração média dos principais gases nos aterros Catarinenses de Içara, Tijuquinhas, e nos reatores R1, R2 e R3.....	66

## **Índice de Figuras**

Figura 1: Análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário.....	14
Figura 2: Modelo triangular de produção de biogás para resíduos rapidamente degradáveis.....	30
Figura 3: Modelo triangular de produção de biogás para resíduos lentamente degradáveis.....	30
Figura 4: Reatores.....	42
Figura 5: Ilustração dos Reatores e Sistemas Componentes.....	43
Figura 6: Sistema de lavagem dos gases e bombas para injeção de água ultra-pura.....	44
Figura 7: Medidor de Concentrações de Gases.....	45
Figura 8: Sistema de mangueiras e válvulas para utilização do medidor de concentração de gases.....	46
Figura 9: Medições da composição do biogás.....	46
Figura 10: Composição do Biogás nos reatores em (%) durante o período experimental.....	52
Figura 11: Evolução do pH das amostras de lixiviado durante o período experimental.....	54
Figura 12: Resultado das análises de DQO e DBO do lixiviado durante o período experimental.....	55

Figura 13: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental (R1).....	56
Figura 13.1: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental (R2).....	60
Figura 13.2: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental (R3).....	63
Figura 14: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R1.....	58
Figura 14.1: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R3.....	61
Figura 14.2: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R3.....	48

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CaCO<sub>3</sub> - Carbonato de cálcio

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

Cl<sup>-</sup> - Cloretos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COMCAP - Companhia Melhoramentos da Capital (Florianópolis – SC)

COV- Compostos orgânicos voláteis

CNTP - Condições Normais de Temperatura e Pressão

COD - Carbono Orgânico Degradável

CODF - Fração do carbono orgânico degradável assimilado

COT - Carbono orgânico total

COVs - Compostos Orgânicos Voláteis

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio

ENS - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental

EPA - Environmental Protection Agency

ESMAP - Energy Sector Management Assistance Program

FATMA - Fundação do Meio Ambiente

FCM - Fator de Correção de Metano

FGV - Fundação Getúlio Vargas

GEE - Gases de Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry

LIMA - Laboratório Integrado de Meio Ambiente  
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo  
NBR - Norma Brasileira  
NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - Nitrogênio amoniacal (íon amônio)  
N-NH<sub>3</sub> - Nitrogênio amoniacal (amônia livre)  
NTK - Nitrogênio Total Kjeldahl  
PCI - Poder Calorífico Inferior  
pH - Potencial Hidrogeniônico  
PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico  
PPGEA - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
ppm -Partes por milhão  
PVC - Policloreto de Vinila  
R1 - Reator 1  
R2 - Reator 2  
R3 - Reator 3  
RSU - Resíduos Sólidos Urbanos  
SC - Santa Catarina  
SDT - Sólidos dissolvidos totais  
SFT - Sólidos fixos totais  
SST - Sólidos suspensos totais  
ST - Sólidos totais  
SVT Sólidos voláteis totais  
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina  
USEPA - United States Environment Protection Agency

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>3</b>
2.2 Objetivos Específicos .....	3
2.3 Justificativa .....	3
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos .....	4
3.1.1 Classificação dos Resíduos Sólidos .....	4
3.1.2 Composição dos Resíduos Sólidos .....	6
3.1.3 Taxa de Geração dos Resíduos Sólidos Urbanos .....	8
3.1.4 Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos .....	9
3.2 Digestão anaeróbia .....	11
3.2.1 Degradação dos RSU e formação do biogás .....	13
3.3.1 Mecanismos e variação da produção do biogás de aterro .....	18
3.3.2 Composição do biogás de aterro.....	18
3.3.3 Taxa de geração do biogás .....	21
3.3.4 Fatores que influenciam a geração do biogás.....	22
3.3.5 Estimativas teóricas da produção de biogás .....	26
3.4 O Lixiviado .....	30
3.4.1 Formação do Lixiviado .....	31
3.4.2 Composição e Características do Lixiviado .....	32
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
4.1 Local de Estudo.....	40
4.1.1 Os reatores e sua constituição .....	40
4.1.2 Operação dos reatores .....	42
4.2 Materiais e Métodos .....	45
4.2.1Medição da Composição, Coleta e Avaliação do biogás gerad.	45
4.2.2 Coleta e análise das Amostras do lixiviado.....	47
<b>5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
5.1 Medições das porcentagens dos principais gases presentes no biogás .	49
5.2 Análise das concentrações de DBO <sub>5</sub> e DQO do lixiviado .....	53

5.3 Análises dos resultados e comparação entre R1, R2 e R3 com relação ao biogás e ao líquido gerado nos mesmos .....	55
5.3.1 Reator (R1) .....	55
5.3.2 Reator (R2) .....	59
5.3.3 Reator (R3) .....	62
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos, na atualidade, é a produção, a coleta e principalmente a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU). O ser humano, ao longo de sua existência, esteve e ainda continua diretamente associado aos resíduos por ele produzidos, podendo o resultado desta interação ser responsável por diversificadas escalas de agressões ambientais. Com o crescimento populacional e o conseqüente aumento do consumo de bens descartáveis, a tendência é esse panorama agravar-se.

De maneira geral, a produção e a composição dos resíduos sólidos é função das atividades humanas domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas e industriais, dentro de qualquer contextualização social.

No Brasil 150 mil toneladas de resíduos domésticos são coletadas diariamente. Dessas 150 mil, 83 mil toneladas (54,9%) vão para aterros sanitários, enquanto 67 mil (45,1%) seguem com destinação inadequada e vão para aterros com problemas e lixões a céu aberto. Em média 20 mil toneladas de lixo doméstico são produzidas diariamente e não são coletadas, logo tem como destino cabeceiras de rios, valas, terrenos baldios ou são simplesmente queimadas, expondo um problema grave, que envolve saúde pública e saneamento (ABRELPE, 2009).

Além da problemática da coleta deficiente, outra questão preocupante é o destino final dado a esses resíduos, que na maior parte das vezes é inadequado, como é o caso da utilização de lixões, onde os resíduos são simplesmente descarregados sobre o solo, sem qualquer tipo de tratamento. Ao contrário desses, os aterros sanitários constituem uma forma de destinação final dada aos resíduos sólidos urbanos amplamente utilizada, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grandes quantidades de resíduos, quando comparados as demais formas de tratamento dos RSU (ENSINAS, 2003).

Nos aterros, após os RSU terem sido depositados, inicia-se a degradação, tendo como subprodutos do processo a geração de gases (biogás) e lixiviado. O biogás é definido como uma mistura de gases formada basicamente por metano, dióxido de carbono e pequenas concentrações de nitrogênio, oxigênio e gás sulfídrico. A emissão do biogás, principalmente o metano e o dióxido de carbono, quando não devidamente controlada, contribui para o agravamento do efeito estufa, mais um fator de relevante preocupação ambiental.

O lixiviado é um líquido resultante da percolação das águas de infiltração através da massa de resíduos. Assim, pela percolação dessa água, é extraído grande parte dos contaminantes contidos na fase sólida e formam o lixiviado de aterro sanitário, que contém uma grande variedade de compostos considerados tóxicos. De acordo com El-Fadel, et. al.,(1997), em sua composição estão presentes altas concentrações de produtos orgânicos e inorgânicos, elementos traços, substâncias recalcitrantes e contaminantes microbiológicos com alto potencial nocivo. Por esse motivo, o lixiviado possui elevada capacidade de contaminação de águas superficiais e solo.

Elaborado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2006), o Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa no Brasil, revela que as duas maiores fontes de produção de metano são os aterros sanitários e o tratamento anaeróbio de esgoto e águas residuárias. As emissões totais de metano procedentes do tratamento de resíduos totalizaram 803.000 toneladas em 1994, e destes, a maior parcela (cerca de 84%) foi atribuída às emissões oriundas dos aterros sanitários.

Leite et. al.,(2005), afirmam que com o capital oriundo do biogás se espera o rápido desenvolvimento da atividade de construção de aterros sanitários e recuperação de lixões e aterros controlados no país.

O intuito do presente trabalho foi avaliar as características dos subprodutos (biogás e lixiviado) produzidos pela decomposição anaeróbia desses resíduos dentro de três reatores anaeróbicos com diferentes constituições de resíduos sólidos urbanos no seu interior. Esses reatores fazem parte de uma pesquisa de doutorado, onde se pretende determinar a taxa de transferência de elementos traços contidos nos resíduos sólidos urbanos para o lixiviado.

Além de benefícios econômicos, há ainda os sociais e ambientais, tais como a redução na emissão de gases de efeito estufa que a conversão do gás metano proporciona (seja pelo aproveitamento ou pela simples queima) e a melhoria das condições sanitárias do aterro onde se pretenda implantar um projeto de aproveitamento do biogás, proporcionando assim benefícios ao meio ambiente e à sociedade em geral.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar os principais compostos do biogás gerado pela decomposição anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em reatores com diferentes porcentagens na composição do seu preenchimento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a porcentagem dos gases produzidos nos três reatores os quais são compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos;
- Relacionar a porcentagem dos gases com relação à fonte geradora do mesmo;
- Identificar o maior rendimento na produção de metano entre os três reatores;
- Determinar a concentração de matéria orgânica produzida no lixiviado por meio da demanda química de oxigênio (DQO) e da demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

### **2.3 Justificativa**

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de determinar as porcentagens dos gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$  e a concentração de matéria orgânica do lixiviado, os quais são gerados pela decomposição anaeróbia nos reatores com diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos no seu interior. Esses três reatores fazem parte de uma pesquisa de doutorado, onde se pretende determinar a taxa de transferência de elementos traços contidos nos resíduos sólidos urbanos para o lixiviado.

Assim, conhecendo-se as propriedades dos gases produzidos e o teor da matéria orgânica na decomposição anaeróbia dos diferentes reatores, pode-se aproveitar estes recursos de maneira sustentável para a produção de energia em aterros sanitários, contribuindo deste modo com a redução na emissão dos gases do efeito estufa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão fundamentou-se em pesquisas bibliográficas sobre os resíduos sólidos e sua destinação, além dos aspectos relacionados ao biogás e ao lixiviado, sendo esses subprodutos importantes, resultado da decomposição dos RSU. Foi abordada a revisão teórica acerca dos resíduos sólidos quanto à sua classificação, composição, taxa de geração e destinação final. Também foi disposto sobre a digestão anaeróbia. Com relação ao biogás, foram apresentados aspectos como sua formação e as diferentes fases, composição, taxa de geração, fatores que influenciam na sua geração, estimativas teóricas da sua produção, dentre outros. Para finalizar, uma abordagem sobre o lixiviado e suas características.

#### 3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo a norma brasileira (ABNT - NBR 10004, 2004) “resíduos sólidos são aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, incluindo ainda os lodos de estações de tratamento e líquidos que não possam ser lançados na rede pública de esgoto.

Já para Calderoni (1998), o termo resíduo é considerado sinônimo de lixo; sendo lixo todo material inútil cuja existência em um dado meio é tida como nociva, devendo ser descartado e colocado em lugar público, representando um problema para toda a sociedade.

##### 3.1.1 *Classificação dos Resíduos Sólidos*

Atualmente, os resíduos sólidos urbanos não se restringem apenas a vida doméstica, englobando também as atividades da cidade como as industriais, comerciais, as de varrição de praças e logradouros, dentre outras. Existem diversas formas de classificação dos resíduos sólidos que se fundamentam em determinadas características ou propriedades identificadas. Assim, a classificação é relevante para a escolha da estratégia de gerenciamento mais viável.

Em função da natureza ou origem, os resíduos sólidos podem ter a seguinte classificação, segundo D’Almeida e Vilhena (2000):

- **Domiciliares:** Originados nas residências e formados por restos de alimentos, materiais potencialmente

recicláveis, como metal, plástico, vidro, papéis em geral, além de lixo sanitário e tóxico.

- **Comerciais:** Procedentes das atividades comerciais e de serviços, tais como supermercados, bancos, lojas, bares e restaurantes.

- **Público:** Resíduos gerados dos serviços de limpeza pública urbana, tais como varrição de vias, praias, galerias, córregos e restos de podas de árvores e animais e áreas de feiras livres.

- **Serviços de Saúde e Hospitalar:** Compostos por resíduos sépticos como agulhas, seringas, gazes, órgãos e tecidos removidos, luvas, remédios com validade vencida e materiais de raio-X. Os resíduos assépticos são semelhantes aos resíduos domiciliares e devem ser coletados de forma segregada.

- **Portos e Terminais Rodoviários e Ferroviários:** Formados basicamente por materiais de higiene e restos de alimentos. Estes materiais podem conter germes patogênicos provenientes de outras cidades, estados e países.

- **Industrial:** Este resíduo varia de acordo com a atividade da indústria, incluindo nesta categoria a grande maioria do lixo considerado tóxico.

- **Agrícola:** Resultado das atividades pecuarista e agrícola, contém embalagens de fertilizantes e defensivos agrícolas na maioria das vezes tóxicos.

- **Entulho:** Resíduos da construção civil, tais como materiais de demolição e restos de obras. Geralmente são classificados como inertes, mas podem conter diversos tipos de materiais que podem ser tóxicos (tintas, solventes, amianto).

A norma (ABNT - NBR 10004, 2004) trata da classificação de resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, ou seja, característica apresentada pelo resíduo em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas comparando estes constituintes com listagem de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. De acordo com estas características os resíduos sólidos podem ser enquadrados como:

- **Resíduos Classe I – Perigosos :** são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública,

provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou destinados de forma inadequada. Podem apresentar características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- **Resíduos Classe II – Não Perigosos:** são subdivididos em resíduos classe II A (Não Inertes) e resíduos classe II B (Inertes) .

- **Resíduos classe II A - Não inertes:** são aqueles que não se enquadram na classe I (perigosos) ou na classe II B (inertes). Estes resíduos podem apresentar as seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- **Resíduos classe II B – Inertes:** são aqueles que por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente. Além disso, quando amostrados de uma forma representativa, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Os resíduos sólidos ainda podem ser classificados de acordo com o grau de degradabilidade, em (GOMES, 2003):

- i. Facilmente degradáveis: matéria orgânica;
- ii. Moderadamente degradáveis: papel, papelão e outros produtos celulósicos;
- iii. Dificilmente degradáveis: couro (tratado), trapos, borracha e madeira;
- iv. Não degradáveis: vidros, metais e plásticos.

### ***3.1.2 Composição dos Resíduos Sólidos***

A composição dos resíduos sólidos, tanto qualitativa quanto quantitativa é bastante variável e irregular, sendo que mudam de local para local e até mesmo entre os diversos bairros de uma mesma cidade. Tal variação é função dos diferentes hábitos e costumes da população, da atividade econômica predominante, dos padrões de vida, das

condições climáticas da região, das estações do ano e outras condições locais variáveis ao decorrer dos anos.

Cassini et al., (2003), afirmam que o poder aquisitivo da população, por exemplo, pode ser um dos fatores que influencia a composição gravimétrica dos RSU, bem como sua produção *per capita*. Ainda segundo os autores, os RSU são constituídos essencialmente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos muitas vezes denominados de material inerte, dependendo dos critérios de caracterização física ou gravimétrica. A tabela 1 apresenta a composição gravimétrica dos RSU em algumas cidades do país.

**Tabela 1- Composição Gravimétrica (%) dos RSU de cidades brasileiras.**

<b>Cidade</b>	<b>Matéria orgânica</b>	<b>Papel e Papelão</b>	<b>Plástico</b>	<b>Metais</b>	<b>Vidro</b>	<b>Outros</b>
<b>Belo Horizonte (MG)</b>	65,4	10,2	11,6	2,6	2,5	7,7
<b>Rio de Janeiro (RJ)</b>	44,0	23,0	12,0	4,0	2,0	15,0
<b>Florianópolis (SC)</b>	46,4	14,2	14,9	2,6	4,1	17,8
<b>Criciúma Içara e Nova Veneza (SC)</b>	45,2	21,1	17,1	2,1	2,1	11,2
<b>Porto Alegre (RS)</b>	52,1	15,0	12,4	2,5	1,9	16,0
<b>Botucatu (SP)</b>	74,1	7,6	8,4	3,9	2,0	4,0

Fonte: OROFINO (2002)

### 3.1.3 Taxa de Geração dos Resíduos Sólidos Urbanos

A taxa de geração dos resíduos sólidos urbanos é definida como a quantidade de lixo gerada por habitante num determinado período de tempo, refere-se aos volumes efetivamente coletados e à população atendida. D'Almeida e Vilhena (2000) a consideram como de importância fundamental para o planejamento de todo o sistema de gerenciamento de resíduos, principalmente do dimensionamento de instalações e equipamentos. Os fatores de geração consistem, essencialmente, na taxa de geração por habitantes e no nível de atendimento dos serviços públicos do município. As equações relativas à estimativa das gerações de resíduos sólidos atual e futura, em kg/dia, são apresentadas a seguir por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\text{Geração atual} = A \times B \times C_0 \quad (1)$$

$$\text{Geração futura} = A \times (1+D)^n \times B \times (1+E)^n \times C_t \quad (2)$$

Onde:

- $A$  é a população atual, em habitantes;
- $B$  é a geração *per capita* de lixo, em kg/habitante.dia;
- $C_0$  é o nível de atendimento atual dos serviços de coleta do lixo, em %;
- $D$  é a taxa de crescimento populacional, em %;
- $E$  é a taxa de incremento da geração *per capita* de lixo, em %;
- $C_t$  é o nível de atendimento dos serviços de coleta de lixo após  $n$  anos, em %;
- $n$  é o intervalo de tempo considerado, em anos.

Segundo IBGE (2000) a geração *per capita* pode variar conforme o tamanho das cidades. Em cidades com até 200 mil habitantes, os valores estão entre 0,45 e 0,70 kg/habitante.dia e nas cidades acima de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa entre 0,8 e 1,2 kg/habitante.dia. Estes valores são próximos aos encontrados por Orofino (2002) para a cidade de Florianópolis, em Santa Catarina, com população superior a 200 mil habitantes. A autora encontrou os valores de 0,87 kg/habitante. dia na alta temporada, entre dezembro a fevereiro, e 0,73 kg/habitante.dia na baixa temporada, entre março a novembro.

### ***3.1.4 Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos***

A ausência de uma destinação adequada ainda é um dos principais problemas relacionados aos RSU em diversos municípios brasileiros. Segundo Castilhos Jr. (2003), a falta de uma destinação apropriada implica em problemas ambientais como poluição do solo, da água e do ar, além de problemas socioeconômicos e também de saúde pública, como a proliferação de vetores de doenças.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil, no que diz respeito à destinação final, os dados referentes às formas de disposição final de resíduos sólidos distribuídos de acordo com a população dos municípios, mostram que 63,6% dos municípios brasileiros depositam seus resíduos sólidos em “lixões”, somente 13,8% informam que utilizam aterros sanitários e 18,4% dispõem seus resíduos em aterros controlados, totalizando 32,2 % (IBGE, 2000).

Recentemente, por meio de um estudo realizado, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), mostrou que no Brasil 150 mil toneladas de resíduos domésticos são coletadas diariamente, e dessas 150 mil toneladas, 83 mil (54,9%) vão para aterros sanitários, enquanto 67 mil (45,1%) seguem com destinação inadequada e vão para aterros com problemas e lixões a céu aberto. Em média 20 mil toneladas de lixo doméstico são produzidas diariamente e não são coletadas, logo tem como destino cabeceiras de rios, valas, terrenos baldios ou são simplesmente queimadas. Ainda conforme o levantamento efetuado pela Abrelpe, o maior problema, está nos estados do Norte, Centro-Oeste e Nordeste, onde se coletam 6%, 7% e 22% dos resíduos, respectivamente (os menores índices do País) (ABELPRE, 2009). A pior situação está no Centro-Oeste, onde 74% do total coletado têm destinação inadequada.

Verifica-se também que o depósito de resíduos sólidos a céu aberto ainda é a destinação mais utilizada na maioria dos municípios de pequeno porte (com população inferior a 10.000 habitantes), correspondendo a cerca de 48% dos municípios brasileiros. Nesses municípios, 63,6% dos resíduos sólidos coletados são depositados em lixões, enquanto 16,3% são encaminhados para aterros controlados. A seguir, na tabela 2, são expostas as principais formas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos no país por regiões.

**Tabela 2- Formas de disposição de resíduos por regiões do país.**

Forma de Disposição	Brasil (%)	Norte (%)	Nordeste (%)	Sudeste (%)	Sul (%)	Centro-Oeste (%)
<b>Vazadouro a céu aberto</b>	21,3	57,2	48,3	9,8	25,9	22
<b>Aterro controlado</b>	37	28,3	14,6	46,5	24,3	32,8
<b>Aterro sanitário</b>	36,2	13,3	36,2	37,1	40,5	38,8
<b>Estação de Compostagem</b>	2,9	0	0,2	3,8	1,7	4,8
<b>Estação de triagem</b>	1	0	0,2	0,9	4,2	0,5
<b>Incineração</b>	0,5	0,1	0,1	0,7	0,2	0,2
<b>Locais não-fixos</b>	0,5	0,9	0,3	0,6	0,6	0,7
<b>Outra</b>	0,7	0,2	0,1	0,7	2,6	0,2

Fonte: Pavan, 2000.

### Aterro Sanitário

A norma (ABNT-NBR 8419, 1992) define aterro sanitário como uma técnica de disposição dos resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais; método este que utiliza princípios de engenharia para confinar resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-lo ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou em intervalos menores, se necessário.

Na concepção de Ensinas (2003), uma das alternativas de tratamento dos resíduos sólidos são os aterros sanitários, que tem como um dos subprodutos a emissão de gases provenientes da decomposição do material orgânico. Tal alternativa constitui uma forma de destinação final dos resíduos sólidos urbanos largamente utilizada nos dias atuais, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grandes quantidades de resíduos, quando comparados as demais formas de tratamento dos RSU.

A técnica de destinação definida como aterro sanitário pode ser entendido como um reator bioquímico, onde as principais entradas são os resíduos sólidos e água de chuva e as principais saídas são o biogás e o lixiviado gerados na degradação dos resíduos, tendo como armazenamento dentro do “reator” a matéria orgânica parcialmente

biodegradada e os materiais inorgânicos disposto inicialmente, afirmam Castilhos Jr. e Reichert (2007).

Um aterro sanitário, quando tecnicamente executado (com drenos de coleta de lixiviados e impermeabilizados), operados com eficiência (com cobertura de solo ao final de cada período de serviço) e em localização apropriada (onde a vulnerabilidade do aquífero subjacente não tenha índices altos), constitui um bom destino final sob o ponto de vista sanitário. (FUNASA, 2000). Contudo, quando mal projetado pode causar poluição do ar (exalação de odores, gases tóxicos ou material particulado), das águas superficiais (escoamento de líquidos percolados ou carregamento de resíduos pela ação da água da chuva), do solo e das águas subterrâneas (pela infiltração de líquidos percolados).

Diversos estudos de poluição das águas subterrâneas apontam que todo lixão provoca algum tipo de poluição nas mesmas; assim, é de se prever que também muitos aterros sanitários, mal construídos, poderão estar alterando a qualidade dos aquíferos. De tal modo, preocupações como a contaminação do solo e dos recursos hídricos, das plantas, dos animais e do homem, decorrente da presença de elementos metálicos provenientes da inadequada disposição de resíduos sólidos, conduzem pesquisadores a direcionar seus objetivos de pesquisa a estes problemas.

### **3.2 Digestão anaeróbia**

Segundo IBGE (2000), das 72 mil toneladas de resíduos sólidos domiciliares lançados diariamente em lixões, logradouros públicos, canais, margens de rios ou outro qualquer agente receptor, 50% em média (36 mil toneladas), correspondem à matéria orgânica putrescível. Esta matéria orgânica, nos lixões, passará pelo processo de bioestabilização aeróbia ou anaeróbia, gerando percolato com elevada concentração de demanda química de oxigênio (DQO) e ácidos graxos voláteis e, em alguns casos, significativa concentração de metais pesados.

Na visão de Chernicharo (2007), a digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microorganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia além de novas células bacterianas.

A digestão anaeróbia é dentre outros, o processo de tratamento biológico de resíduos mais antigo e mais largamente usado, dispõe Pavlostathis (1988). Para Neething et al., (1989), é o mais popular

método usado para bioestabilizar lodo primário originado do tratamento de esgoto, convertendo sólidos voláteis para biogás e produtos finais. Baader et al., (1991) afirmam que todos os resíduos quer sejam de origem animal ou vegetal são bioestabilizados anaerobiamente. No caso de resíduos vegetais, apenas os componentes contendo lignocelulose não podem ser bioestabilizados. Segundo Barlaz et al., (1987), tratando-se do processo de bioestabilização da fração orgânica putrescível dos resíduos sólidos urbanos, a celulose e a hemicelulose são responsáveis por aproximadamente 91% do potencial energético do processo.

O processo de digestão anaeróbia é influenciado por diversos fatores, podendo ser destacados entre outros: (i) temperatura; (ii) a carga orgânica aplicada e (iii) a presença de materiais de natureza tóxica. Em temperaturas altas, as reações biológicas ocorrem com maior velocidade, resultando possivelmente em uma maior eficiência do processo. De forma geral, o processo anaeróbio poderá ser desenvolvido em temperaturas a nível mesófilo (30 a 45°C), ou a nível termófilo (45 a 60°C). Em relação à carga orgânica, já foram testadas diferentes cargas para diferentes tipos de reatores e substratos.

Em comparação com outros tipos de tratamentos, Peres et al. (1991), descrevem que o processo anaeróbio responde satisfatoriamente bem às flutuações de carga, principalmente quando os reatores já se encontram operando em estado de equilíbrio dinâmico.

Florêncio e Kato (1999) argumentam que com relação à utilização do processo anaeróbio para tratamento de resíduos sólidos, foram intensificados estudos desde a década de 60, com o objetivo de desenvolver tecnologias para recuperação de energia e a redução da massa de resíduos sólidos orgânicos. Na década de 70 ocorreu um expressivo impulso dos sistemas de tratamento anaeróbio de resíduos, principalmente de resíduos líquidos, uma vez que a realização de trabalhos passou a demonstrar um melhor entendimento do processo, principalmente nos seus aspectos biológicos.

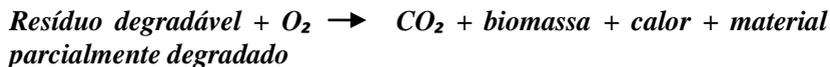
Até o presente, ainda não existe a produção de conhecimento tecnológico que possa viabilizar o tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos, no mesmo nível que se tem para resíduos líquidos. Segundo Vazoller (1999) o sistema mais usual de disposição e/ou tratamento de resíduos sólidos urbanos é o aterro sanitário. Diversas outras configurações de reatores precisam ser investigadas, levando-se em consideração a relação custo/benefício que possa se adequar às realidades regionais e locais.

### 3.2.1 Degradação dos RSU e formação do biogás

Castilhos Jr.(2003) aponta a conversão biológica da matéria orgânica em aterros sanitários como a principal responsável pela degradação dos resíduos, resultando na geração de gás (biogás) e no carregamento de moléculas diversas pela água da chuva (lixiviado). Os resíduos depositados em aterros sanitários sofrem decomposição na forma aeróbia, enquanto há presença de oxigênio e após a cessão de ar ocorre a decomposição anaeróbia.

Os produtos da decomposição aeróbia são dióxido de carbono, água, nitratos e nitritos, enquanto os produtos da decomposição anaeróbia constituem-se de metano, dióxido de carbono, água, ácidos orgânicos, nitrogênio, amônia, sais de ferro e manganês e sulfato de hidrogênio (MCBEAN et al., 1995).

Durante a deposição dos resíduos nos aterros é iniciada a biodegradação aeróbia, permanecendo até certo tempo após a colocação da camada de cobertura, enquanto existir presença de oxigênio. Na fase aeróbia predominam fungos, *streptomices* e bactérias fotossintéticas (CASTILHOS JR , 2003). Essa fase é rápida em relação à decomposição anaeróbia (MCBEAN et al., 1995) e segue conforme a relação a seguir:

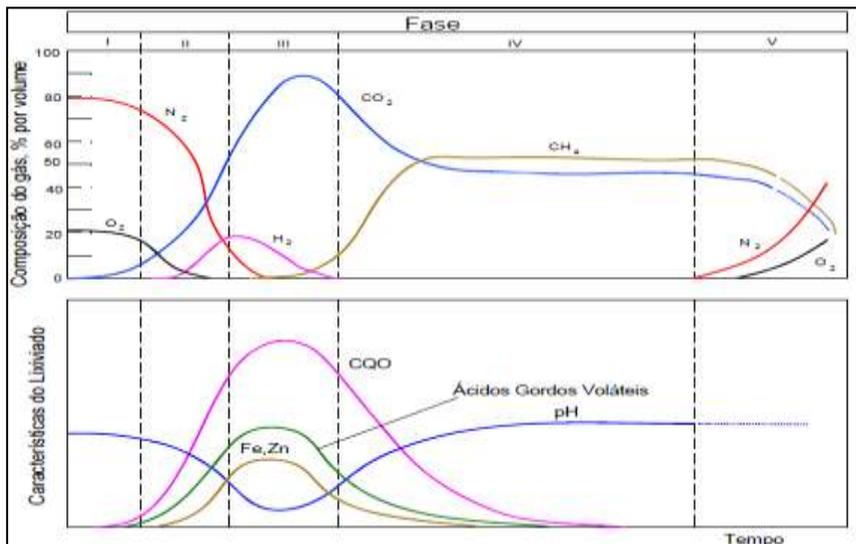


Neste processo, McBean et al., (1995) relatam que os microorganismos aeróbios elevam a temperatura da massa de resíduos a valores de até 70°C produzindo níveis elevados de dióxido de carbono de até 90%, o que acaba acidificando o pH dos lixiviados devido a formação de ácido carbônico, conforme está apresentado na Equação (3).



O restante da degradação se dá sob condições anaeróbias. Os consórcios microbianos presentes em sistemas anaeróbios de aterramento de resíduos são responsáveis pela seqüência das etapas de degradação: hidrólise de polímeros, fermentação de ácidos orgânicos e mineralização final dos resíduos com a etapa de metanogênese (CASTILHOS JR., 2003).

O processo da decomposição dos resíduos orgânicos e formação do biogás podem ser melhor entendido e estudado quando dividido em cinco fases as quais podem ser observadas na Figura 1.



**Figura 1: Fases de formação do biogás de aterro.**

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al., (1993).

A seguir, são descritas as diferentes fases apresentadas na Figura 1 (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993 *apud* ENSINAS, 2003):

- **Fase I** – Fase de Ajuste Inicial: a decomposição biológica da matéria orgânica acontece principalmente em condições aeróbias, devido à presença de certa quantidade de ar no interior do aterro. A principal fonte de microorganismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia nessa etapa é a terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final.
- **Fase II** – Fase de Transição: nesta fase a quantidade de oxigênio diminui e se desenvolvem as reações anaeróbias. Nitratos e sulfatos podem servir como receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. As reações de redução podem ser monitoradas medindo-se o potencial de óxido-redução do lixo, ocorrendo aproximadamente entre – 50 a –100 milivolts para nitratos e sulfatos. A produção do

metano ocorre com valores entre  $-150$  a  $-300$  milivolts. Com a continuação da queda do potencial de óxido-redução os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase o pH do lixiviado começa a diminuir devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$  dentro do aterro.

- **Fase III** – Fase Ácida: as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio.

As etapas que formam esta fase são:

**(i) Hidrólise:** Transformação de materiais particulados complexos (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores), que podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.

**(ii) Acidogênese:** Conversão dos produtos solúveis, oriundos da hidrólise, em ácidos graxos voláteis, principalmente, e ainda alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio além de novas células bacterianas. Os produtos solúveis oriundos da hidrólise são metabolizados no interior das células bacterianas fermentativas e excretados. Essas bactérias são também denominadas bactérias fermentativas acidogênicas.

**(iii) Acetogênese:** Oxidação, pelas bactérias acetogênicas, dos produtos gerados na fase acidogênica, por exemplo, propionato de butirato, em substratos apropriados para as bactérias metanogênicas. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato.

- **Fase IV** – Fase Metanogênica: nesta fase predominam os microorganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem o ácido acético e o gás hidrogênio em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida

consideravelmente. O pH do lixiviado nesta fase tende a ser mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0. É efetuada pelas bactérias metanogênicas em substrato como ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas, e monóxido de carbono. As metanogênicas, formam metano a partir de ácido acético ou metanol, são ditas acetoclásticas. E as que produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, de hidrogenotróficas.

- **Fase V** – Fase de Maturação: esta fase ocorre após grande quantidade do material orgânico ter sido biodegradado e convertido em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  durante a fase metanogênica. Como a umidade continua a migrar pela massa de lixo, porções de material biodegradável ainda não convertidos acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta.

Castilhos Jr. (2003) considera que embora essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Isto ocorre na medida em que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro.

A duração de cada fase na produção do biogás do aterro depende da distribuição da matéria orgânica no aterro, da disponibilidade de nutrientes, do teor de umidade do lixo e do grau de compactação inicial dos resíduos sólidos urbanos, relatam Tchobanoglous et al., (1993). Na tabela 3, abaixo, estão dispostas as fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário, bem como a duração dessas.

**Tabela 3 – Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.**

FASE	CONDIÇÃO	PERÍODO TÍPICO
<b>I</b>	Aeróbia	<b>Horas a 1 semana</b>
<b>II</b>	Anóxica	<b>1 a 6 meses</b>
<b>III</b>	Anaeróbia, metanogênica, instável	<b>3 meses a 3 anos</b>
<b>IV</b>	Anaeróbia, metanogênica, estável	<b>8 a 40 anos</b>
<b>V</b>	Anaeróbia, metanogênica, declinante	<b>1 a 40 anos</b>
<b>Total</b>		<b>10 a 80 anos</b>

Fonte: ESMAP (2004).

### **3.3 Biogás**

Biogás é a denominação dada à mistura de gases produzida durante o processo de digestão anaeróbia. Tal mistura é formada essencialmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e pequenas concentrações de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), além de traços de hidrocarbonetos voláteis. (ANDREOLI et al., 2001).

O biogás é originado como resultado de processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem dentro do material rejeitado. Os processos microbiológicos regem o processo de geração do gás, dada a natureza orgânica da maior parte dos resíduos (CHRISTENSEN et al., 2001). Esses processos são sensíveis ao meio-ambiente e, portanto, há numerosas condições naturais e antrópicas que afetam a população microbológica e, conseqüentemente, a taxa de produção do biogás. A massa de resíduo é responsável tanto pelos materiais sólidos, que são de 75-80% da massa, quanto pela umidade, que é 20-25% da massa. Esta porcentagem é uma função do conteúdo orgânico do resíduo que é disposto no aterro.

Barlaz et al (1987), afirmam que a qualidade do biogás depende do sistema microbológico, do substrato, do resíduo em decomposição e das variáveis específicas do aterro, como acesso a oxigênio para o aterro e o teor de umidade. O biogás é tipicamente descrito como consistindo de aproximadamente 50 % de  $\text{CH}_4$  e 50 % de  $\text{CO}_2$  com menos de 1 % de

outros componentes gasosos, inclusive sulfeto de hidrogênio e mercaptanas.

### ***3.3.1 Mecanismos e variação da produção do biogás de aterro***

Segundo Ensinas (2003) a produção do biogás pode ser realizada a partir da vaporização, decomposição biológica e reações químicas.

A vaporização é a mudança de estado líquido para gasoso que ocorre até que se atinjam concentrações de equilíbrio nos gases do aterro. Fatores como pressão parcial e concentração dos componentes orgânicos, além da temperatura e pressão no aterro, podem influenciar os mecanismos de produção dos gases a partir da vaporização.

Já a decomposição biológica acontece quando compostos orgânicos de grande massa molecular são decompostos por bactérias, gerando compostos voláteis. A decomposição biológica depende da disponibilidade de nutrientes para as bactérias, da composição do lixo, da idade do aterro, da umidade, da presença de oxigênio, da temperatura e do pH do lixo no aterro.

As reações químicas ocorrem como resultado do contato entre o lixo e os gases reativos gerados no aterro. Essas são condicionadas pela composição do lixo e pela temperatura do aterro.

### ***3.3.2 Composição do biogás de aterro***

A composição do biogás e a proporção dos compostos nele presentes variarão de acordo com as condições ambientais existentes no reator e das características do composto orgânico a ser degradado (CHERNICHARO, 2007).

O biogás de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é composto por vários gases, sendo seus principais constituintes o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A pequena diferença existente na concentração de gás metano e dióxido de carbono encontrada no biogás se deve à dissolução de parte do  $\text{CO}_2$  na fração aquosa da massa de resíduos (GUNNERSON e STUCKEY, 1986).

O biogás é formado a partir da degradação da matéria orgânica. Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. É composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de

carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano. (ENSINAS, 2003).

De acordo com Lima (1995), o biogás contém aproximadamente 50% de metano e considera-se combustível de valor médio a baixo, que pode ser utilizado em numerosas aplicações, como o uso de combustível direto em aquecimentos, geração de energia elétrica e subprodutos químicos comerciais. Além da mitigação das mercaptanas e da preocupação com o mau cheiro, a utilização do biogás pode gerar receita com a venda da energia verde e de outros produtos que podem diminuir os custos de operação e manutenção do aterro.

Uma composição típica do gás pode ainda conter 350 constituintes traços que chegam a representar até 1% do total do biogás. A maioria destes constituintes é formada por compostos orgânicos, porém pode-se encontrar constituintes inorgânicos, como compostos metálicos voláteis: cádmio, mercúrio, zinco e chumbo (UNITED KINGDOM, 2002). Alguns desses constituintes podem apresentar características de toxicidade bastante prejudicial à saúde humana.

De acordo com Palmisano e Barlaz (1996), os constituintes inorgânicos podem afetar diretamente a degradação, pois em alguns casos estes estão dispostos “encapsulando” ou isolando os resíduos orgânicos e dificultando a ação das bactérias.

Os principais constituintes do biogás e suas características estão na tabela 4.

**Tabela 4 – Características dos gases presentes no biogás de um aterro sanitário.**

Gás	Concentração típica	Densidade <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Potencial calorífico <sup>3</sup> (kJ/m <sup>3</sup> )	Solubilidade em água (g/l)	Propriedades gerais
CH <sub>4</sub>	45-60%	0,717	35.600	0,0645	Inodor, incolor, asfixiante, inflamável
CO <sub>2</sub>	35-50%	1,977	-	1,688	Inodor, incolor, asfixiante
N <sub>2</sub>	0-10%	1,250	-	0,019	Inodor, incolor
O <sub>2</sub>	0-4%	1,429	-	0,043	Inodor, incolor
CO	<0,1%	1,250	12.640	0,028	Inodor, incolor, tóxico, inflamável
H <sub>2</sub>	<0,1%	0,090	10.760	0,001	Inodor, incolor, inflamável
H <sub>2</sub> S	0-70 ppm	1,539	-	3,846	Incolor, tóxico

Fonte: MACIEL (2003).

Na tabela 5, estão dispostas as concentrações médias do biogás nos aterros sanitários de Içara/SC e Tijuquinhas, situado no município de Biguaçu/SC.

O aterro de Içara entrou em operação em setembro do ano de 2005 com previsão de fechamento no ano de 2025 (20 anos de vida útil). Atualmente recebe resíduos de 24 municípios, com uma média de aproximadamente sete mil toneladas por mês, e tem um total demais de 200 mil toneladas de resíduos depositados. Este é considerado um aterro novo (DIAS, 2009).

O aterro de Tijuquinhas teve o início de sua operação no ano de 1991 com provável fechamento no ano de 2013 (22 anos de vida útil). Atualmente recebe resíduos de 21 municípios, totalizando mais de 20 mil toneladas por mês, e apresenta um total de mais de dois milhões de toneladas de resíduos depositados (DIAS, 2009).

As cidades que depositam seus resíduos no aterro sanitário de Içara (Criciúma, Içara e Nova Veneza) possuem em média 66,4% de material altamente degradável, isso considerando apenas a fração de matéria orgânica, papel e papelão. Florianópolis é a maior colaboradora dos resíduos recebidos no aterro sanitário de Tijuquinhas e apresenta valor de 60,6% de material altamente degradável. (DIAS, 2009).

**Tabela 5 - Concentração média dos gases nos aterros Catarinenses de Içara (a) e Tijuquinhas (b)**

Gases	Média		Mínimo		Máximo	
	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	46,9	53,8	43,4	50,7	53,3	56,7
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	37,8	41,9	35,8	40,1	42,1	43,1
<b>O<sub>2</sub>(%)</b>	4,1	1,0	2,4	0,7	6,0	2,3
<b>H<sub>2</sub>S (ppm)</b>	12	21,9	6	14,2	25	30,1

Fonte: DIAS (2009).

### 3.3.3 Taxa de geração do biogás

O volume total de biogás produzido pode variar amplamente durante todo o tempo de decomposição, devido principalmente à quantidade total de matéria orgânica contida nos resíduos dispostos no aterro (QIAN et al., 2002). Em condições normais, a taxa de produção de gás, atinge um pico nos primeiros dois anos e diminui lentamente, continuando em muitos casos, por períodos de até 25 anos ou mais, conforme relatam Tchobanoglous et al., (1993). Quanto ao tempo, aterros secos em climas áridos, por exemplo, podem gerar um valor mínimo de gás por um longo período de tempo, podendo chegar a 100

anos; já em aterros com matéria orgânica úmida, a geração de biogás é muito rápida, variando de 8 a 15 anos (QIAN et al., 2002).

Castilhos Jr. et al. (2003) consideram que as taxas de produção de biogás em aterros sanitários são mais difíceis de avaliar do que em laboratório ou em células que simulam aterros sanitários (ou lisímetros). Os autores citam como método mais empregado na determinação das quantidades de gás produzido, a leitura dos volumes diretamente nos poços de captação dos aterros sanitários.

O potencial de geração de biogás pode variar de 2,5 m<sup>3</sup>/t de resíduos por ano a um valor máximo 8,74 m<sup>3</sup>/t de resíduos por ano em um aterro antigo, em condições inteiramente anaeróbias (QIAN et al., 2002). El-Fadel et al., (1997) citam valores de potencial de geração de biogás entre de 0 a 400 m<sup>3</sup>/t para o resíduo seco. Estes valores caem para 0 a 240 m<sup>3</sup>/t de resíduo aterrado com umidade média de 40%. Essa faixa é condizente com o valor de 200 m<sup>3</sup>/t de resíduo úmido apresentado por Aitchison (1996). Entretanto, os autores Ham e Barlaz (1989) encontraram valores que variaram entre 50 e 400 m<sup>3</sup>/t de resíduos em aterros de grande porte.

### ***3.3.4 Fatores que influenciam a geração do biogás***

Inúmeros são os fatores que afetam a geração de gases em aterros de resíduos sólidos. A capacidade de um aterro gerar gás é influenciada, por exemplo, pela composição do resíduo, umidade, pH, entre outros. Os fatores que afetam a geração de biogás são apresentados a seguir (ENSINAS, 2003):

- i. **Composição do resíduo:** quanto maior a porcentagem de materiais orgânicos no resíduo, maior será o potencial de produção de gases. Resíduos de alimentos são exemplos de matéria orgânica facilmente decomposta, o que acelera a taxa de produção do gás. Materiais que se decompõem lentamente, como grandes pedaços de madeira, não contribuem significativamente com a geração de gás. Cabe destacar que o lixo destinado aos aterros pode ter uma composição variada ao longo do ano dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local.
- ii. **Umidade:** uma umidade alta (60 a 90 %) pode aumentar a geração de biogás. A umidade vai depender da umidade inicial do resíduo, da infiltração da água da superfície e do solo, e da água produzida na decomposição. A construção do aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do lixiviado,

por exemplo, mantém a umidade do lixo baixa e prejudica a formação de biogás.

- iii. **Idade do lixo:** a geração do biogás segue as fases de decomposição do lixo. A duração de cada fase e o tempo de produção de metano depende de condições específicas de cada aterro.
- iv. **Temperatura do aterro:** as condições de temperatura de um aterro influenciam os tipos de bactérias predominantes e o nível de produção de gás. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. As máximas temperaturas do aterro frequentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos, como um resultado da atividade aeróbia microbiológica. Elevadas temperaturas de gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. As temperaturas típicas do gás produzido em um aterro variam, tipicamente, entre 30 a 60° C.
- v. **pH do aterro:** inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica. O pH ótimo para a produção do metano está entre 7,0 e 7,2. Num pH abaixo de 6,0 ou acima de 8,0, a produção de metano fica estritamente limitada.
- vi. **Tamanho das partículas:** quanto menor o tamanho da partícula, maior será a área da superfície específica e, portanto, a decomposição será mais rápida. Por exemplo, a decomposição de um tronco de madeira ocorrerá mais rápida se este for cortado em pedaços menores ao invés de ser disposto inteiro.
- vii. **Recirculação de efluente:** A prática da recirculação de lixiviado pode recuperar a umidade dos resíduos nos períodos mais secos favorecendo os processos de degradação. A recirculação, também, diminui as elevadas concentrações de DBO e DQO, causadas pelos ácidos orgânicos formados na decomposição dos resíduos no interior do aterro, proporcionando o rápido desenvolvimento de uma população de bactérias anaeróbias ativas produtoras de metano .
- viii. **Outros fatores:** outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os nutrientes, bactérias, compactação de resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

El-Fadel et. al. (1997), também afirmam que os fatores mais comuns estão relacionados com a composição, umidade, temperatura e pH da massa de resíduo, além da disponibilidade de bactérias e nutrientes e presença de agentes inibidores na célula. Além dos condicionantes citados anteriormente, outros aspectos relacionados com a geometria e operação do aterro e com o ambiente externo à célula também são fatores determinantes na geração de gases. Na tabela 6 estão relacionados os principais fatores que influenciam a geração do biogás.

**Tabela 6 – Principais fatores que afetam a geração de gases.**

<b>FATORES</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Geometria e operação do aterro	Dimensão do aterro Impermeabilização Compactação do resíduo
Características iniciais dos resíduos	Composição do resíduo Umidade do resíduo
Ambiente interno	Umidade da massa na degradação pH nas células Temperatura Disponibilidade de bactérias Presença de agentes inibidores
Ambiente externo	Precipitação e infiltração Variação pressão atmosférica Temperatura Evapotranspiração Umidade relativa do ar

Fonte: MACIEL (2003).

A composição e umidade dos resíduos na chegada ao aterro são fatores importantes na avaliação da geração dos gases. A composição do resíduo afeta quantitativamente e qualitativamente a produção do biogás. A disponibilidade de frações mais facilmente degradáveis, como carboidratos, proteínas e lipídios, significa uma maior quantidade de

substrato para a atuação de microorganismos. Desta forma, os resíduos com grande presença de matéria orgânica devem apresentar um maior potencial de produção de gases.

De acordo com El-Fadel et al. (1997) e Palmisano e Barlaz (1996), a umidade da massa de resíduo é o principal fator que influencia a geração de gases nos aterros. Desta forma, a umidade de chegada dos resíduos é também muito importante, pois é esta que determinará a umidade inicial da massa de resíduos imediatamente após a conclusão do aterro. Como forma de manter a umidade dos resíduos adequada para atuação dos microorganismos nas estações secas do ano utiliza-se a técnica de recirculação do lixiviado. A umidade de maximização da atividade microbiana na produção do biogás varia de 50 a 60%. (U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS ,1995).

A tabela 7 mostra os principais parâmetros relacionados com o ambiente interno da célula e sua influência na produção do biogás.

**Tabela 7 - Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás.**

FATORES DO AMBIENTE INTERNO	IMPLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DO BIOGÁS
Umidade da massa	Aumento da geração de biogás em umidades variando de 50-60%
pH	Maximização de produção de $CH_4$ – pH neutro (6,8 a 7,4)
Temperatura	Temperatura ótima para produção entre 35 – 45 °C
Disponibilidade de nutrientes e bactérias	Favorecimento com excesso de nutrientes (nitrogênio, fósforo e traços). Presença de bactérias metanogênicas e acetanogênicas aumenta a geração do biogás
Agentes inibidores	Metais pesados e ácidos em excesso inibem a produção de gases

Fonte: MACIEL (2003).

### 3.3.5 Estimativas teóricas da produção de biogás

Algumas metodologias para estimativa teórica da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são encontradas na literatura. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam. Os métodos variam de uma aproximação grosseira, onde se considera somente a quantidade de resíduos sólidos domésticos dispostos no aterro, até métodos que levam em conta uma cinética de geração de biogás em função parâmetros como: condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo. (QIAN et al., 2002).

Uma metodologia de simples aplicação para cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos para países ou regiões específicas é apresentada no International Panel on Climate Change (IPCC). Esse método, que segue a equação (4), envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente no resíduo, calculando assim a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo disposto, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos domésticos. São necessários dados estatísticos de população e sobre a composição dos resíduos sólidos urbanos. Caso não haja dados disponíveis para o cálculo no país, poderão ser usados dados padronizados fornecidos pelo IPCC, no entanto a qualidade dos resultados pode ser prejudicada. Esta equação também é conhecida como equação de inventário do IPCC (IPCC, 1996).

$$QCH_4 = Pop\ urb \times Taxa\ RS \times RSDf.Lo / pCH_4 \quad (4)$$

Onde:

- $QCH_4$  é o metano gerado [ $m^3CH_4$ / ano]
- $Pop\ urb$  é a população urbana [habitantes]
- $Taxa\ RSD$  é a taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano [kg de RSD/habitante . ano]
- $RSDf$ : é a taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro [%]
- $Lo$  é o potencial de geração de metano proveniente da degradação do resíduo [kg de  $CH_4$ / kg de RSD]
- $pCH_4$  é a massa específica do metano [ $kg/m^3$ ]. O valor da massa específica do metano é  $0,740\ kg/m^3$ .

O potencial de geração de metano ( $Lo$ ) depende da composição dos resíduos e das condições do aterro para o processo de

decomposição. Quanto maior a quantidade de material orgânico presente na massa de resíduos, maior será o valor de  $Lo$  (ESMAP, 2004). Os valores encontrados na literatura para aterros americanos são de 6,2 a 270  $m^3$  de  $CH_4/t$  de resíduos, sendo recomendado o valor de 100  $m^3$  de  $CH_4/t$  de resíduos.

Na tabela 8 podem ser visualizados os valores máximos e mínimos sugeridos por ESMAP (2004) a partir do tipo de resíduo, sendo que o mesmo sugere o valor de 170  $m^3$  de  $CH_4/t$  de resíduos.

**Tabela 8 - Valores sugeridos para  $Lo$ .**

Categorização do Resíduo	Valor mínimo ( $m^3CH_4/t$ )	Valor máximo ( $m^3CH_4/t$ )
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente inerte	140	200
Altamente degradável	225	300

Fonte: ESMAP (2004).

ESMAP (2004) apresenta o modelo *School Canyon* (Equação 5) como o modelo empírico de decomposição mais amplamente aceito, sendo utilizado pela indústria e por agências reguladoras, inclusive a EPA (*Environmental Protection Agency*) norte-americana.

$$QCH_{4i} = k \times Lo \times mi \times e^{-k \cdot ti} \quad (5)$$

Onde :

- $QCH_{4i}$  é a vazão de metano produzida no ano  $i$ , em  $m^3/ano$ ;
- $k$  é a constante de decaimento, em  $ano^{-1}$ ;
- $Lo$  é o potencial da geração de metano dos resíduos, em  $m^3/t$  de resíduos;
- $mi$  é a massa de resíduos depositada no ano  $i$ , em  $t$ ;
- $ti$  é a quantidade de anos após o fechamento, em anos.

A taxa de geração de metano ( $k$ ) está relacionada com o tempo de geração do biogás, e é influenciada pelo teor de umidade, composição dos resíduos, pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes para o

processo anaeróbico (ESMAP, 2004). Os valores sugeridos para  $k$  em função da precipitação anual estão apresentados na tabela 9. ESMAP (2004) sugere para  $k$  os valores de  $0,04 \text{ ano}^{-1}$  e  $0,06 \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente.

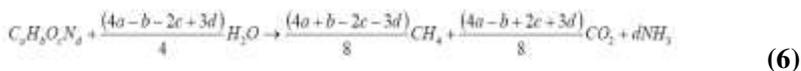
**Tabela 9 - Valores de  $k$  ( $\text{ano}^{-1}$ ), em função da precipitação**

Precipitação anual (P, em mm)	Material relativamente inerte	Material moderadamente degradável	Material altamente degradável
< 250	0,01	0,02	0,03
250 < P < 500	0,01	0,03	0,05
500 < P < 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Fonte: ESMAP (2004).

ESMAP (2004) ao apresentar esse modelo em seus cálculos para projetos de energia de aterros na América Latina e no Caribe justifica sua escolha pelo fato do modelo ser adequado ao objetivo pretendido, além de ser o mais empregado e aceito nas Américas do Norte e do Sul, de fácil aplicação e ser aceito pelas agências e instituições financeiras que estão interessadas em apoiar esse tipo de projeto.

Por outro lado, Tchobanoglous et al., (1993) apresentam uma metodologia de avaliação da quantidade de biogás produzido em aterro sanitário a partir da composição do lixo e da constituição química de cada um de seus elementos, que é apresentada a seguir. A reação de decomposição do lixo pode ser encontrada usando-se a seguinte equação(6):



Os índices “a”, “b”, “c” e “d” são estimados pela constituição típica de diversos componentes do lixo doméstico (tabela 10). O equacionamento deve ser separado para os dois tipos de lixo: rapidamente degradável, que inclui restos de alimentos, papel, papelão, grama e folhas e lentamente degradável, que é o caso de tecidos, borracha, couro e madeira.

**Tabela 10 - Dados da composição típica dos elementos do lixo doméstico.**

Componente	Porcentagem em massa (base seca)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinza
<b>Orgânicos</b>						
Restos de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Papelão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8			10,0
Tecidos	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Resíduos de jardim	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
<b>Inorgânicos</b>						
Vidro	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Diversos	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

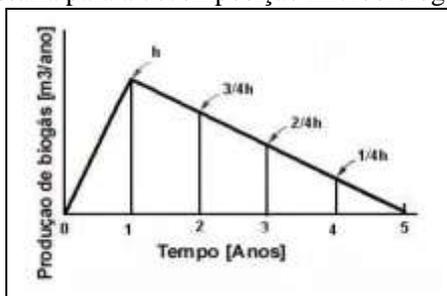
Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Conhecendo-se a massa de gás metano e de dióxido de carbono formada, através das equações de decomposição do lixo e a densidade de cada gás, pode-se conhecer o volume de gás gerado, obtendo-se assim as quantidades volumétricas de cada gás para as massas de resíduos rapidamente e lentamente degradáveis determinadas inicialmente.

Admite-se que os resíduos rapidamente degradáveis atingem seu pico de produção de biogás ao final do segundo ano após a sua deposição, decaindo a partir deste ponto até o 6º ano, quando a produção se esgota. O primeiro ano é considerado uma fase de maturação onde a produção é nula. Para os resíduos lentamente degradáveis o pico de produção ocorre no sexto ano, com decaimento até o final do décimo

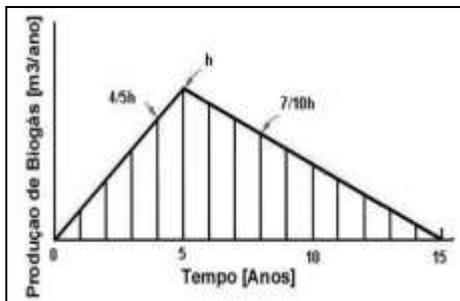
sexto ano. A produção em cada ano é obtida pelas áreas sob as curvas que seguem as distribuições apresentadas nas Figuras 2 e 3.

Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) também assumem que, respectivamente, 75% e 50% dos resíduos rapidamente e lentamente degradáveis estão disponíveis, pois nem toda massa de lixo está exposta à umidade necessária para a decomposição microbiológica.



**Figura 2: Modelo triangular de produção de biogás para resíduos rapidamente degradáveis.**

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al., (1993).



**Figura 3: Modelo triangular de produção de biogás para resíduos lentamente degradáveis.**

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al., (1993).

### 3.4 O Lixiviado

O lixiviado é um líquido cuja formação é resultado da remoção de compostos solúveis através da percolação não uniforme e intermitente da água pela massa de resíduos. Estes compostos solúveis

são encontrados nos resíduos dispostos, ou formados por processos químicos e biológicos de degradação, conforme explicam El-Fadel et al.,(1997).

O processo de lixiviação em aterros sanitários é a quantidade de água que excede a capacidade de retenção da umidade do material alterado representado pelos resíduos sólidos. Fatores como a precipitação, escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração e temperatura, afetam diretamente a capacidade de quantificar os lixiviados (CASTILHOS JR, 1991).

A poluição advinda da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros é crescente, e uma das contribuições mais significativas é devido aos lixiviados. Dessa forma, o tratamento destes líquidos assume uma grande importância ambiental para o meio (SILVA e SEGATO, 2002).

### ***3.4.1 Formação do Lixiviado***

A formação do lixiviado é um processo complexo, relacionado a diferentes fatores como:

- A origem dos resíduos e sua composição;
- O clima local;
- A forma do aterro e sua operação e a idade do aterro.

Para Giordano (2003), o líquido é formado essencialmente devido à perda natural de água em cada célula do aterro originada pelo acúmulo de resíduos e sua compactação. O lixiviado, por conseguinte escorre da parte superior destas células para a inferior. Num segundo momento, o mesmo é formado a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nos resíduos. A última parte da formação do lixiviado deve-se à água precipitada no aterro que se infiltra nas células do mesmo colaborando para o arraste do líquido contido no interior do aterro e com o aumento de seu volume produzido.

A geração do lixiviado geralmente ocorre pelo escoamento superficial e pela infiltração das águas de precipitações. Na maior parte dos casos, a precipitação será a principal fonte de umidade que contribui para a geração do líquido. As águas das chuvas são geralmente usadas para representar a quantidade total de água que atinge a superfície durante certo período de tempo para um local. Esta quantidade de chuva pode ser resultado de uma única tempestade ou de tempestades múltiplas. Numerosas reações químicas e biológicas ocorrem enquanto a

água infiltra e percola dentro da massa de resíduos. Como resultado, os compostos orgânicos e inorgânicos são carregados dos resíduos (MCBEAN et al.,1995). Dessa forma, os materiais presentes na massa de resíduos, podem ser arrastados ou diluídos. A estabilização dos resíduos, como um resultado dos processos físicos, químicos e biológicos, influencia diretamente na qualidade do lixiviado. Assim, solubilidade, presença de macronutrientes e micronutrientes, movimentação da água, e a presença ou abstinência de compostos tóxicos ou inibitórios, são fatores relevantes em sua formação e qualidade, reportam Segato e Silva (2000).

Embora a qualidade dos lixiviados varie de um aterro para outro, muitos fatores que afetam sua composição são comuns. Qian et al., (2002) mencionam algumas delas: (i) a composição e condição dos resíduos; (ii) profundidade dos resíduos aterrados; (iii) condições hidrogeológicas do local; (iv) técnicas operacionais do aterro como a compactação, método de disposição e volume de resíduos aterrados; (v) idade do aterro e (vi) condição final da cobertura de recobrimento.

Devido a suas características, os lixiviados provenientes de aterros precisam ser tratados antes de serem lançados no meio ambiente. Assim evitam-se maiores riscos de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, assim como da saúde pública, por conseguinte. O projeto de uma estação para tratamento de lixiviados não é tarefa simples, uma vez que os efluentes líquidos dos aterros não apresentam um padrão de composição como outros efluentes específicos (QASIM e CHIANG, 1994).

### ***3.4.2 Composição e Características do Lixiviado***

A variação na qualidade dos lixiviados produzidos é geralmente atribuída a uma complexa interação de fatores como a composição e a profundidade dos resíduos dispostos, a idade do aterro, a sequência de disposição, umidade e temperatura (PALMISANO e BARLAZ, 1996). Qasim e Chiang (1994) acrescentam ainda os aspectos construtivos e operacionais do aterro, e a interação do lixiviado com o ambiente. O lixiviado, como um composto químico, leva consigo os constituintes da massa de resíduos sólidos enquanto flui. Portanto não há um lixiviado típico, e cada massa de resíduo específico precisa ser considerada quanto a este respeito (KOERNER e SOONG, 2000).

É possível separar os principais fatores que influenciam a composição do lixiviado em quatro grupos, segundo El Fadel et al., (2002):

1) Características dos resíduos: composição dos resíduos, sua granulometria, umidade, estágio de decomposição e pré-tratamento.

2) Condições ambientais: geologia, regime pluviométrico, clima.

3) Características do aterro: aspectos construtivos, balanço hídrico, grau de compactação dos resíduos, propriedades do terreno, co-disposição de resíduos líquidos, irrigação, recirculação, impermeabilização do aterro.

4) Processos internos do aterro: hidrólises, adsorção, biodegradação, especiação, dissolução, redução, troca iônica, tempo de contato, partição, troca e transporte de gás.

Composto de matéria orgânica e inorgânica e de uma fração microbiológica, o lixiviado possui uma coloração que pode variar de amarela clara até negra. Sua condutividade possui valores acima de  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ , devido principalmente à alta concentração de sais conforme descreve Giordano (2003).

Expressa como DQO ou COT, a matéria orgânica dissolvida inclui  $\text{CH}_4$ , ácidos graxos voláteis e diversos compostos de difícil degradabilidade, como compostos fúlvicos e húmicos decorrentes da decomposição de madeira e vegetais. Aminas, proteínas, e açúcares também fazem parte da fração orgânica. Giordano (2003) aponta que há ainda a presença de compostos orgânicos xenobióticos, que abrangem uma variedade de hidrocarbonetos halogenados, compostos fenólicos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos, além de outras substâncias tipicamente tóxicas. Cálcio (Ca), magnésio (Mg), cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), sulfeto ( $\text{S}^{-2}$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) são os macrocomponentes inorgânicos do lixiviado. Em menores concentrações, sais de ferro e metais tóxicos como: cádmio, zinco, cromo, cobre, chumbo, níquel também são encontrados.

A fração inorgânica do lixiviado conta ainda com uma pequena parcela de boro, arsênio, selênio, bário, lítio, mercúrio e cobalto. Ainda conforme dispõe Giordano (2003), sobre a composição microbiológica, os microrganismos encontrados no lixiviado são aqueles provenientes do processo de biodegradação anaeróbia dos resíduos, sendo mais comuns as bactérias acetogênicas, metanogênicas e desnitrificantes.

Assim, a composição dos lixiviados é bastante variada e é normalmente descrita por meio de parâmetros de qualidade, sendo que

os mais empregados são a DQO, DBO<sub>5</sub>, COT, pH, alcalinidade, nitrogênio amoniacal, e toxicidade.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um teste empírico no qual procedimentos padronizados de laboratório são usados para determinar a quantidade de oxigênio relativa em águas naturais, efluentes domésticos e industriais. Mota (2003) relata que o teste de DBO é empregado para determinar os níveis de poluição, para avaliar cargas poluidoras e para avaliar a eficiência de um determinado sistema de tratamento. Grande parte dos organismos vivos depende, direta ou indiretamente, de oxigênio para manter seus processos metabólicos que produzem energia necessária para o seu crescimento e reprodução. Chama-se de organismos aeróbios àqueles que dependem exclusivamente do oxigênio da forma livre para mineralização da matéria orgânica, resultando como produtos finais substâncias inorgânicas mais simples tais como o CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O dentre outros.

A matéria orgânica presente nas águas naturais e nos efluentes domésticos e industriais tende a ser mineralizada naturalmente pelos microrganismos aeróbios existentes, consumindo oxigênio dissolvido no meio aquoso. O teste de DBO tem como finalidade determinar essa quantidade de oxigênio consumido, e assim, relacionar com a quantidade de matéria orgânica biodegradável presente na amostra. O método habitualmente empregado para a determinação da DBO é o da diluição, incubação por um período de 5 dias a 20°C (BRAGA, 2002).

Com relação ao teste de DQO é usado para medir a quantidade de matéria orgânica de esgotos, águas naturais e lixiviado. O conhecimento da DQO fornece dados para a determinação e estimativa da DBO e seu ensaio é simples e rápido. O oxigênio equivalente à matéria orgânica que pode ser oxidada é medido usando-se um agente oxidante forte em meio ácido. O teste deve ser realizado em elevadas temperaturas. O teste de DQO é também utilizado para medir a matéria orgânica em esgotos industriais e municipais que contém compostos que são tóxicos para a vida biológica. A DQO de um esgoto é, em geral, maior do que a DBO porque mais compostos podem ser quimicamente oxidados do que biologicamente oxidados.

Não é possível estabelecer relações fixas entre as medidas de DBO e DQO, até que uma determinada amostra seja caracterizada por ambos os parâmetros. Se a amostra é constituída de compostos que são oxidados por ambos os processos (DBO e DQO) a DQO pode substituir a DBO ou a DQO pode ser usada como indicação da diluição necessária para análise da DBO. Se a amostra é caracterizada pela predominância

de material oxidável quimicamente, porém não bioquimicamente a DQO será maior que a DBO (MOTA, 2003).

A DBO e a DQO medem a oxidação da matéria orgânica sob condições diferentes, fornecendo, frequentemente resultados finais distintos. Os resultados da DBO indicam o consumo de oxigênio por meio de organismos. As interferências são numerosas, a oxidação é incompleta, mas se a matéria orgânica é oxidável num curso de água ou numa estação de tratamento, também pode ser sob condições da DBO (em laboratório).

Os resultados da DQO se referem a substâncias oxidáveis pelo dicromato de potássio em meio ácido em refluxo por duas horas. A oxidação determinada pela DQO e DBO difere qualitativamente e quantitativamente.

Usualmente o lixiviado é classificado de acordo com a idade do aterro e a verificação da razão DBO/DQO, chamada razão de biodegradabilidade, sofre um decréscimo com o aumento da idade do aterro. O baixo valor desta relação (0,3-0,7) indica que o lixiviado possui pouca biodegradabilidade, sugerindo que a parte biodegradável dos resíduos já tenha sido digerida, e assim, a idade do aterro em questão é avançada (tabela 11). Ziyang et al. (2009) analisaram a variação da DQO e de contaminantes nos lixiviados com idades diferentes, dispostos no aterro sanitário de Xangai, que está em operação desde 1991. Para as análises, o lixiviado foi coletado diretamente das células selecionadas. As concentrações dos contaminantes químicos nos lixiviados de diferentes células diminuíram com o tempo de disposição. A relação COT/DQO diminuiu com o tempo de disposição, de 0,4-0,54 para 0,1-0,39. Isto indicou que a contribuição de DQO das substâncias inorgânicas redutoras aumentou com tempo no lixiviado.

Os lixiviados jovens são grandes poluidores. A partir desse momento, as concentrações das substâncias presentes no lixiviado diminuem continuamente com o tempo, isto ocorre como uma regra geral. Mas em alguns casos, como os metais que apresentam reações de óxido-redução, pode ocorrer de suas concentrações iniciais serem menores (GIRALDO, 2001).

Giordano (2003), após seus estudos, disse que a existência de baixa fração de material biodegradável no lixiviado indica que grande parte dos resíduos já foi digerida, podendo ser considerado como um aterro velho. A Tabela 11 apresenta a composição dos lixiviados de diferentes locais citados na literatura. As características destes líquidos percolados estão representadas pelos parâmetros pH, DQO, DBO e

relação DBO/DQO. Os dados mostram que a idade do aterro sanitário e, portanto, o grau de estabilização dos resíduos tem um efeito significativo na qualidade dos lixiviados, apresentando grande variação na composição em função do tempo. Como regra geral, pode-se dizer que a grande maioria dos parâmetros de qualidades usualmente utilizados para quantificar o grau de contaminação dos lixiviados, em termos de concentração, decai com o tempo de vida do aterro, exceto o pH.

**Tabela 11 - Composição dos lixiviados reportados da literatura.**

Local	Idade	pH	DQO	DBO	DBO/DQO	Referência
China	novo	6-9	3.780-28.100	1.040-11.300	0,3-0,7	[1]
Coréia do Sul	novo	7,3	24.400	10.800	0,44	[2]
Coréia do Sul	novo	6,6	41.507	32.790	0,79	[3]
Grécia	novo	6,2	70.900	26.800	0,38	[4]
Itália	médio	8,4	5.050	1.270	0,25	[5]
Coréia do Sul	médio	7,9	5.348	2.684	0,5	[3]
Brasil	velho	8,0	3.079	1.244	0,4	[6]
França	velho	8,1	314	13	0,04	[7]
Suécia	velho	7,6	688	25	0,037	[8]

[1] Yang e Zhou (2008); [2] Im et al. (2001); [3] Kang et al.,(2002); [4] Tatsi et al., (2003); [5] Frascari et al. (2004); [6] Máximo (2007); [7] Giust et al., (2007); [8] Öman e Junestedt (2008).

Nas tabelas 12 e 13 mostram a composição do lixiviado encontrada em aterros sanitários no Brasil e em Santa Catarina, respectivamente. Já nas tabelas 14 e 15 estão dispostas as variações das concentrações dos lixiviados com a idade do aterro e as faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados segundo as fases de estabilização biológica.

**Tabela 12- Composição do lixiviado de aterros sanitários Brasileiros.**

Parâmetro (mg/L)	Santo André		Bandeirantes		Itapecerica da Serra	
	min.	Máx	min.	máx	min.	máx
<b>pH</b>	6,90	8,65	7,14	8,50	7,05	7,14
<b>DBO</b>	2.600	2.050	5.500	7.150	2.560	3.700
<b>DQO</b>	1.720	5.790	3.410	8.430	2.520	2.720
<b>Ntotal</b>	600	4.950	80	650	160	160
<b>Namoniacal</b>	25	1.000	62	220	-	-
<b>SST</b>	1.230	3.350	3.560	5.100	1.320	2.760

Fonte: Castilhos, 2006.

**Tabela 13- Composição do lixiviado de aterros sanitários em Santa Catarina.**

Parâmetro	Aterro Sanitário Canhanduba Itajaí/SC [1]	Aterro Sanitário de Biguaçu/SC [2]
<b>pH</b>	7,9	8,6
<b>DQO (mg/L)</b>	3.690	2.879
<b>Cl<sup>-</sup> (mg/L)</b>	4.033	2.476
<b>N-NH<sub>3</sub> (mg/L)</b>	2.146	1.450
<b>ST (mg/L)</b>	10.943	10.300

[1] Haddad (2009) ; [2] Strelau (2006)

**Tabela 14 - Variações das concentrações dos lixiviados de acordo com a idade do aterro.**

Parâmetro (mg/L)	0 a 5 anos	5 a 10 anos	10 a 15 anos	>15 anos
<b>pH</b>	3 – 6	6 - 7	7 - 7,5	7,5
<b>DBO</b>	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
<b>DQO</b>	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000	< 1.000
<b>N (total)</b>	1.000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
<b>N(amoniacoal)</b>	500 - 1.500	300 - 500	50 - 200	< 30
<b>SDT</b>	10.000 - 25.000	5.000 - 10.000	2.000 - 5.000	< 1.000

Fonte: Adaptado de Castilhos, 2003.

**Tabela 15 - Faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados durante as fases de estabilização biológica.**

Parâmetros (mg/L)	Fase II: Fase de Transição	Fase III: Fase Ácida	Fase IV: Fase de Fermentação	Fase V: Fase de Maturação
<b>pH</b>	6,7	4,7 a 7,7	6,3 a 8,8	7,1 a 8,8
<b>ST</b>	2.050 a 2.450	4.120 a 55.300	2.090 a 6.410	1.460 a 4.640
<b>DBO</b>	100 a 10.900	1.000 a 57.700	600 a 3.400	4 a 120
<b>DQO</b>	480 a 18.000	1.500 a 71.100	580 a 9.760	31 a 900

Fonte: Adaptado de Pohland & Harper (1986)

Na tabela 16, estão dispostas as características do lixiviado nas fases Acidogênica e Metanogênica em Aterros Sanitários, fases essas pertencentes à fase III de degradação.

**Tabela 16 - Características do lixiviado nas fases Acidogênica e Metanogênica em Aterros Sanitários**

Parâmetro	Fase Acidogênica			Fase Metanogênica	
	Unidade	Média	Variação	Média	Variação
pH	-	6,1	4,5 a 7,5	8	7,5 a 9
DBO <sub>5</sub>	mg/L	13000	4000 a 40000	180	20 a 550
DQO	mg/L	22000	6000 a 60000	3000	500 a 4500
DBO <sub>5</sub> /DQO	-	0,58	-	0,06	-
SO <sub>4</sub>	mg/L	500	70 a 1750	80	10 a 420
Ca	mg/L	1200	10 a 2500	60	20 a 600
Mg	mg/L	470	50 a 1150	180	40 a 350
Fe	mg/L	780	20 a 2100	15	3 a 280
Mn	mg/L	25	0,3 a 65	0,7	0,03 a 45
Zn	mg/L	5	0,1 a 120	0,6	0,03 a 4

Fonte: EHRIG, 1998 *apud* WICHITSATHIAN, 2004

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Local de Estudo

O estudo foi desenvolvido em três reatores anaeróbios instalados no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

#### 4.1.1 Os reatores e sua constituição

Os três reatores eram constituídos por tubos de PVC com diâmetro de 200 mm, 2m de altura e duas janelas de acrílico de 78 x 13 cm (Figura 4). O preenchimento dos mesmos foi realizado com resíduos sólidos urbanos, sendo que cada um deles possui uma diferente porcentagem na composição do “recheio”. Tal preenchimento foi feito no mês de dezembro de 2009. A densidade de compactação desses resíduos foi de  $0,4 \text{ t/m}^3$  (similar a densidade de aterros). Todos os três reatores possuíam a mesma massa de resíduos sólidos no seu interior (25,23 Kg). A seguir, a descrição da constituição dos reatores:

i) O primeiro reator, R1 foi empregado como referência padrão, sendo que seu interior tinha como preenchimento apenas matéria orgânica (restos de alimentos);

ii) R2 foi preenchido com resíduos sólidos urbanos de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007. No reator R3 também foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009. Outra diferença entre eles é que a gravimetria de R2 foi preparada em laboratório (sem a presença de matéria orgânica *in natura*), enquanto a gravimetria do R3 foi correspondente a da usina de triagem da Comcap (com presença de matéria orgânica) (RESTREPO, 2010).

Com a finalidade de ativar o processo de decomposição anaeróbia, foram injetados 100 ml de lodo em cada um dos reatores. A montagem das gravimetrias foi efetuada de acordo com (ABNT -NBR 10004, 2004) e o método de quarteamento proposto por Stech (1982). Nas tabelas 17 e 18 são apresentadas as gravimetrias dos reatores R2 e R3.

**Tabela 17 - Composição gravimétrica do R2 (2007)**

<b>Resíduos Sólidos Urbanos</b>	<b>Massa(g)</b>	<b>Percentual em peso (%)</b>
Orgânico	13060	51,76
Plástico	4040	16,02
Papel/Papelão	2660	10,56
Vidro	890	3,52
Multicamada (caixas tetra park)	950	3,76
Tecido	269	10,68
Contaminado (papel-higiênico, absorventes, fraldas)	550	2,18
Metais	230	0,91
Outros (tijolos, telhas, madeira)	150	0,61

**Tabela 18 - Composição gravimétrica do R3 (2009)**

<b>Resíduos Sólidos Urbanos</b>	<b>Massa(g)</b>	<b>Percentual em peso (%)</b>
Orgânico	12130	48,07
Plástico	3610	14,31
Papel/Papelão	3626	14,36
Vidro	50	0,20
Multicamada	400	1,59
Tecido	410	1,62
Contaminado(papel-higiênico, absorventes, fraldas)	1514	6,00
Metais	130	0,515
Outros(tijolos, telhas, madeira)	3360	13,32



**Figura 4: Reatores**

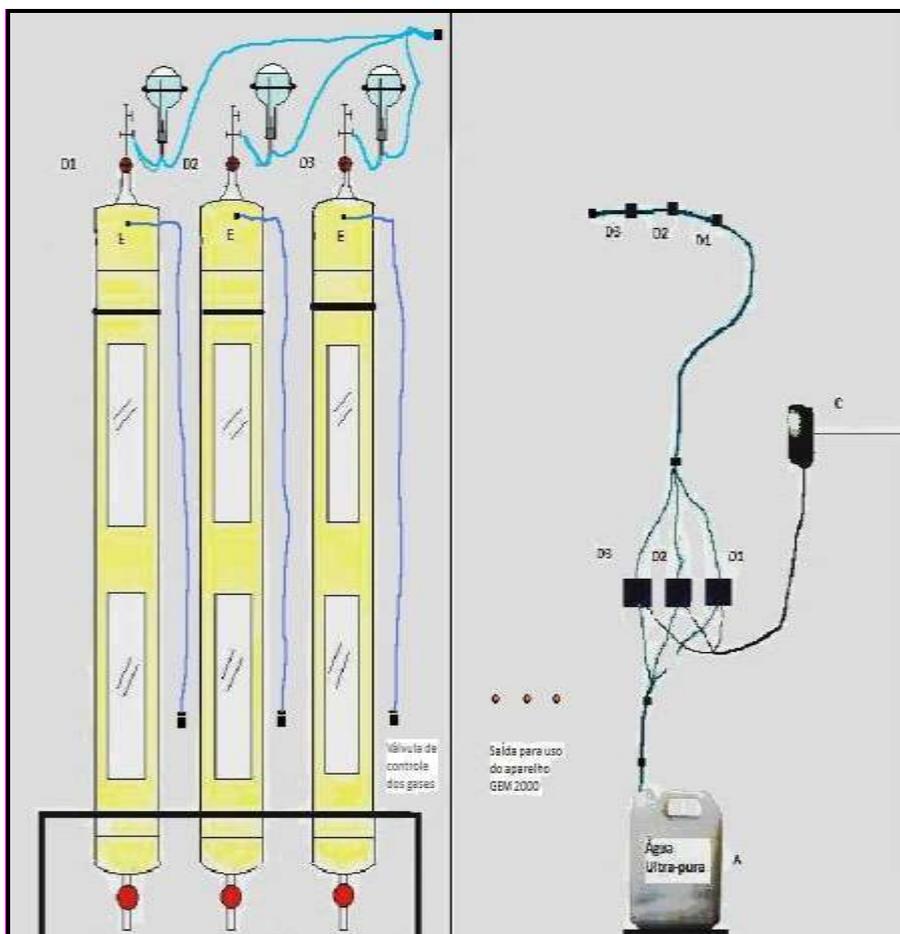
#### ***4.1.2 Operação dos reatores***

Como se pretendeu simular as condições reais de funcionamento de um aterro sanitário, semanalmente foi injetada água ultra-pura nos reatores por meio do sistema simulador de chuva, simulando as chuvas que caem sobre o aterro.

Esse sistema era composto por bombas (três, uma para cada reator) e *timer*, que era programado para a liberação da água nos reatores. Assim, a bomba automática é programada para funcionar durante quatro minutos semanalmente, no entanto com vazões diferentes, de acordo com a média de precipitação mensal dos últimos 30 anos.

O controle da temperatura foi realizado por meio de um aquecedor a óleo com termostato para manter a temperatura adequada do sistema, uma vez que a mesma é um fator importante no processo de degradação da matéria orgânica. O ideal era que a temperatura interna dos reatores estivesse entre 25°C e 34°C, (com uma temperatura média de 34 °C no período da primavera e verão e 30°C no outono e início de inverno) para o melhor trabalho das bactérias mesófilas.

Os gases gerados eram conduzidos até os balões volumétricos e assim lavados com solução de hidróxido de cálcio. Na figura 5, uma ilustração dos reatores. O sistema simulador de chuva e de lavagem dos gases pode ser visualizado na figura 6.



**Figura 5: Ilustração dos Reatores e Sistemas Componentes (frente e verso do sistema, respectivamente)**

**A - água ultra-pura;**

**C - timer ;**

**D- bombas para injeção da água nos reatores**



**Figura 6: Sistema de lavagem dos gases e bombas para injeção de água ultrapura.**

## 4.2 Materiais e Métodos

### 4.2.1 Medição da Composição, Coleta e Avaliação do biogás gerado

Semanalmente, a partir do mês de abril de 2010, foram efetuadas medições da composição do biogás com o uso do aparelho GEM 2000, da LandTec (figura 7). O equipamento determina as concentrações dos gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (em %) e H<sub>2</sub>S (em ppm) presentes no biogás.



**Figura 7: Medidor de Concentração de Gases.**

Para a utilização do aparelho Gem 2000, um sistema composto por mangueiras e válvulas para controle da passagem dos gases foi montado (figura 8). No total foram realizadas seis medições em cada um dos reatores durante o período experimental (figura 9).



**Figura 8:** Sistema de mangueiras e válvulas para utilização do medidor de concentração de gases.



**Figura 9:** Medições da composição do biogás.

#### 4.2.2 Coleta e análise das Amostras do lixiviado

As amostras para análise do lixiviado foram coletadas (de cada um dos três reatores) a partir do mês de abril de 2010 e finalizaram no mês de maio de 2010. Para a análise do lixiviado utilizou-se os parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio, em 5 dias a 20°C (DBO<sub>5</sub>) e a demanda química de oxigênio total (DQO<sub>total</sub>), sendo que a coleta e as análises eram realizadas no mesmo dia. As mesmas eram analisadas semanalmente no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), totalizando quatro análises.

O procedimento das análises físico-químicas foi determinado segundo os métodos padrões habitualmente utilizado na literatura, descritos segundo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005), com o objetivo de se obter precisão e confiabilidade nos valores mensurados. Os parâmetros, métodos analíticos e equipamentos constam na tabela 19.

**Tabela 19 - Parâmetros, métodos analíticos e equipamentos usados nas análises.**

Parâmetro	Método Analítico	Equipamento
pH	Eletrométrico	Peagâmetro <i>Orion 410 A</i>
DBO <sub>5</sub>	Manométrico	<i>H1839800 - COD REACTOR - HANNA instruments</i>
DQO	Espectrofotométrico	<i>Espectrofotômetro Cary 1E-UV-Visible Spectrophotometer –Varian</i>

Para as análises químicas do lixiviado foi necessário fazer diluições devido à alta concentração de matéria orgânica, para assim tornar possível a leitura das amostras. Foram realizados testes com diferentes diluições (10, 20, 50 e 100 vezes) e suas respectivas correções até se chegar a mais adequada para cada parâmetro. Logo, para o parâmetro DBO<sub>5</sub> o lixiviado passou a ser diluído 10 vezes e para o parâmetro DQO a diluição foi de 100 vezes.

Para assegurar a representatividade e confiabilidade das amostras foram considerados alguns cuidados básicos recomendados por APHA (2005). Como:

- Coletar volume suficiente de amostra para uma eventual necessidade de se repetir alguma análise prevista;
- Empregar somente os frascos e as preservações recomendadas para cada tipo de determinação;
- Verificar a limpeza dos frascos e demais materiais de coleta;
- A parte interna dos frascos e do material de coleta, assim como das tampas não podem ser tocadas com a mão ou ficar expostas ao ar;
- Imediatamente após a coleta e preservação das amostras, colocá-las ao abrigo da luz solar;
- Etiquetar os frascos, e registrar as informações de campo necessárias a cada coleta.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos três reatores deste estudo e as discussões sobre os mesmos. A seção 5.1 contém os resultados referentes à análise das porcentagens dos principais gases encontrados no biogás e na seção 5.2 os resultados das concentrações de matéria orgânica presentes no lixiviado, determinados por meio da DBO<sub>5</sub> e DQO (total). Na seqüência (seção 5.3), é feita uma análise comparativa dos resultados de cada um dos reatores com dados da revisão bibliográfica e também uma comparação entre R1, R2 e R3 com relação ao biogás e ao lixiviado gerado nos mesmos.

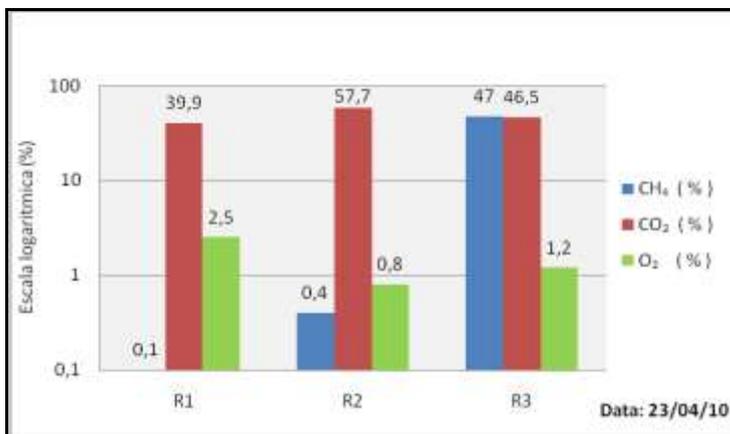
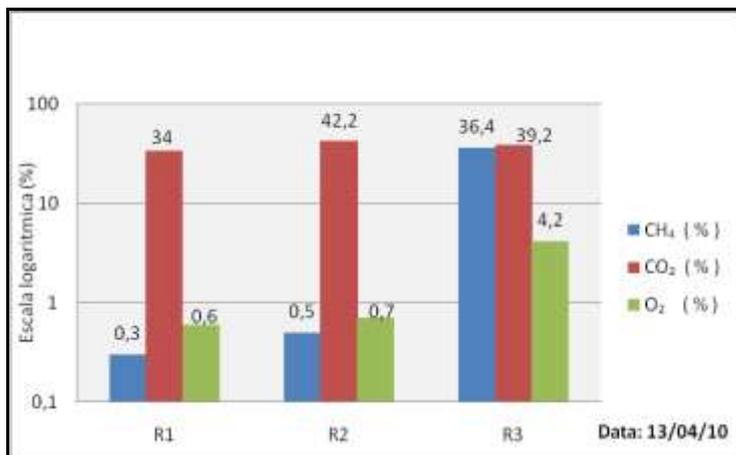
### 5.1 Medições das porcentagens dos principais gases presentes no biogás

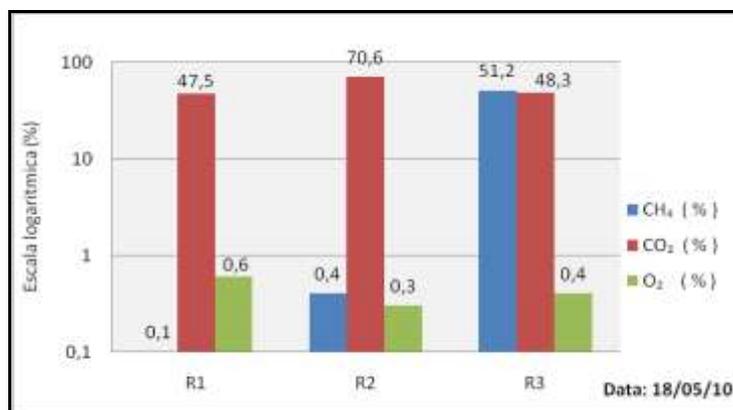
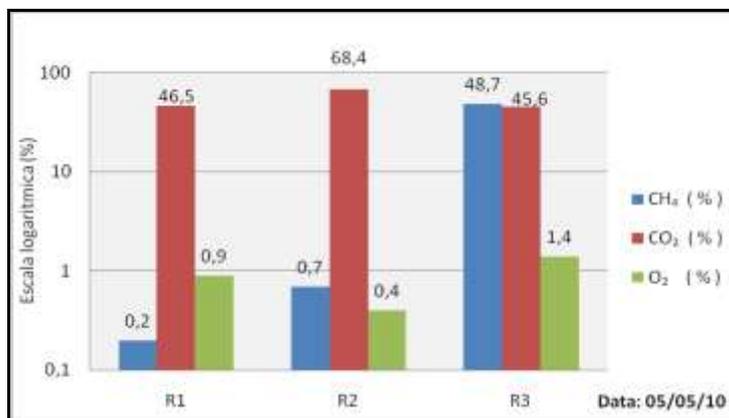
O resultado da “caracterização” do biogás proveniente dos reatores anaeróbios (R1, R2 e R3) feita com o aparelho GEM 2000, está compilado na tabela 20. Foram feitas seis leituras em duplicata em cada reator.

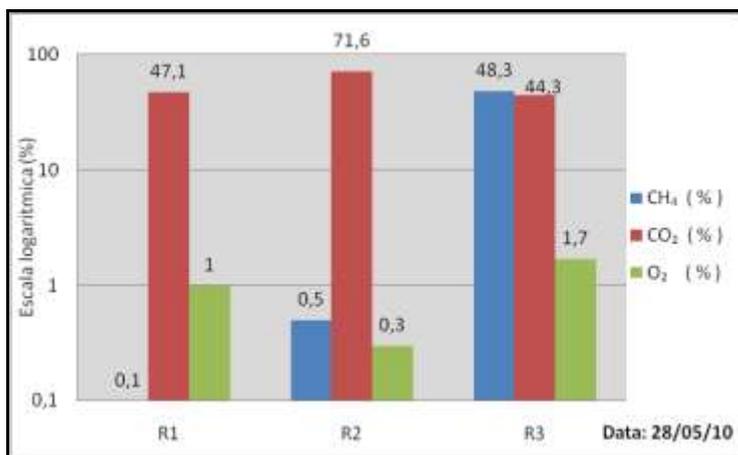
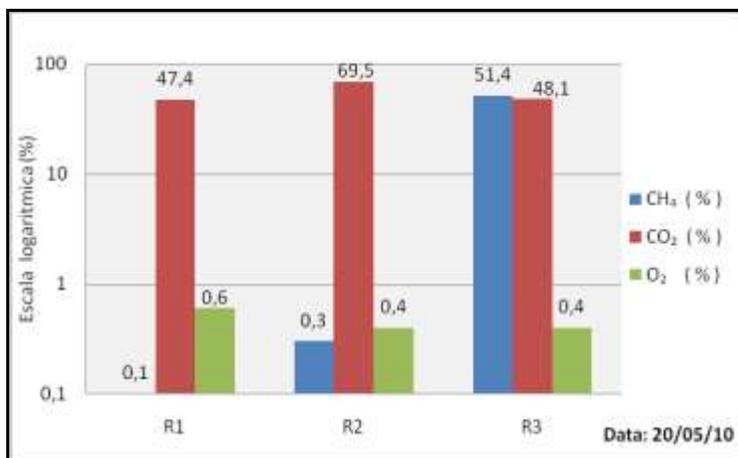
**Tabela 20 – Avaliação do Biogás durante o período experimental.**

Gases	Valor Mínimo			Valor Máximo			Média das Amostragens		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
<b>CH<sub>4</sub></b> (%)	0,1	0,3	36,4	0,3	0,7	51,4	0,15	0,47	47,2
<b>CO<sub>2</sub></b> (%)	34,0	42,2	39,2	47,5	71,6	48,1	43,7	63,3	45,3
<b>O<sub>2</sub></b> (%)	0,6	0,3	0,4	1,0	0,7	4,2	1,03	0,48	1,55
<b>H<sub>2</sub>S</b> (ppm)	25,0	1702	750	125	4312	1097	25,0	2903	754

Na figura 10, consta os resultados obtidos das medições das concentrações dos principais gases feita nos reatores com o uso aparelho GEM 2000. Os gráficos estão em escala logarítmica para facilitar a visualização e interpretação dos valores obtidos.







**Figura 10: Composição do Biogás nos reatores em (%) durante o período experimental.**

## 5.2 Análise das concentrações de DBO<sub>5</sub> e DQO do lixiviado

Para as amostras de lixiviado provenientes dos reatores, os resultados das análises obtidos estão codificados na Tabela 21. Para tal análise, os valores são referentes aos parâmetros pH, DBO<sub>5</sub> e DQO (total). No total, para os parâmetros DBO<sub>5</sub> e DQO (total) foram analisadas quatro amostras. Conforme descrito anteriormente, as amostras de DBO<sub>5</sub> foram diluídas 10 vezes e as de DQO 100 vezes.

**Tabela 21 – Parâmetros do lixiviado analisados durante o período experimental**

Parâmetro	Valor Mínimo			Valor Máximo			Média das Amostragens		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
pH	3,38	3,92	5,42	4,55	4,62	5,88	3,78	4,19	5,64
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	12.050	11.090	5.380	12.450	12.500	8.150	12.218	12.063	7.130
DQO total (mg/L)	90.239	93.427	51.824	98.146	98.427	69.814	94.252	95.426	58.424

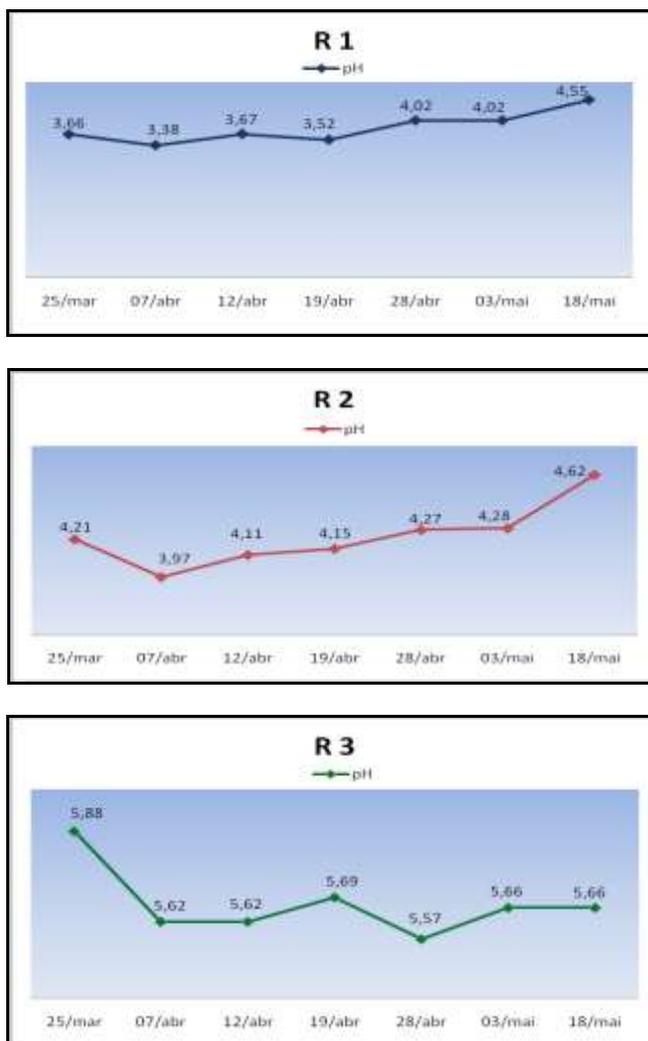
Na tabela 22, é apresentada a razão DBO<sub>5</sub>/DQO dos reatores nas diferentes datas de análise das amostras do lixiviado.

**Tabela 22 – Razão DBO<sub>5</sub>/DQO nos reatores durante período experimental**

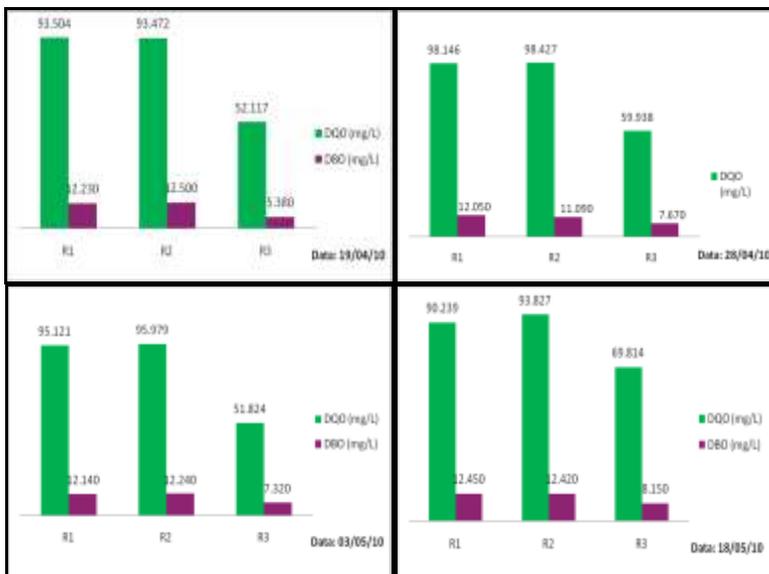
Data	19/04/10	28/04/10	03/05/10	18/05/10
R1	0,13	0,12	0,13	0,14
R2	0,13	0,11	0,13	0,13
R3	0,13	0,12	0,13	0,14

Os valores obtidos para essa razão são baixos, o que segundo a literatura identifica um aterro “novo”. Na figura 12 estão dispostos os gráficos com os valores de DQO e DBO<sub>5</sub> obtidos nas análises físico-químicas do lixiviado. Com relação ao pH das amostras de lixiviado (figura 11) foi medido com maior frequência, uma vez que também eram coletadas amostras do lixiviado dos reatores para se fazer análise

por digestão ácida, com a finalidade de se determinar elementos-traços contidos no lixiviado, parte do trabalho de tese de doutorado.



**Figura 11: Evolução do pH das amostras de lixiviado durante o período experimental.**



**Figura 12: Resultado das análises de DQO e DBO do lixiviado durante o período experimental.**

### **5.3 Análises dos resultados e comparação entre R1, R2 e R3 com relação ao biogás e ao lixiviado gerado nos mesmos**

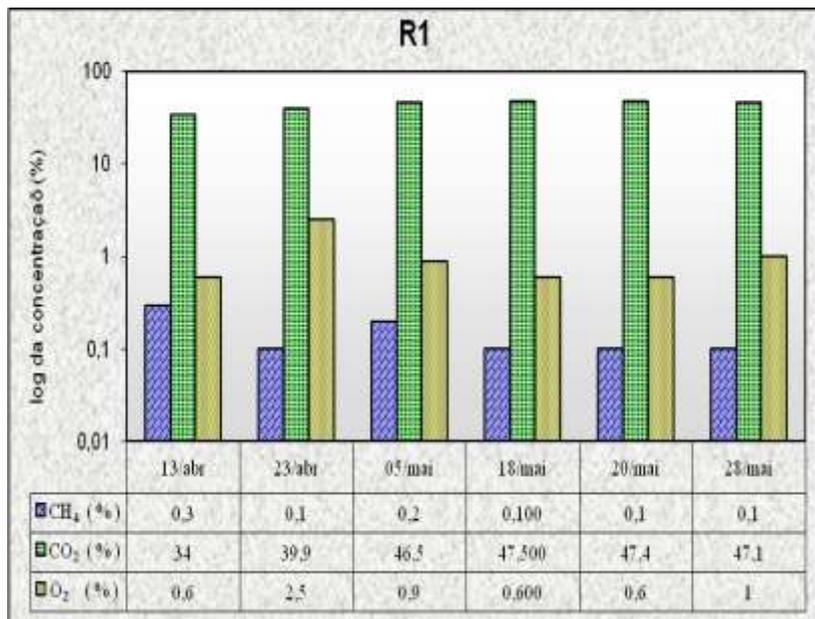
#### **5.3.1 Reator (R1)**

O reator R1, conforme mencionado anteriormente foi preenchido apenas com matéria orgânica, basicamente restos de alimentos. A temperatura interna de R1 esteve numa média de  $30^{\circ}\text{C} \pm 1$ , logo dentro da faixa ( $25^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C}$ ) para o melhor trabalho das bactérias mesófilas.

Para este reator, os valores de  $\text{CH}_4$  variaram pouco no período do estudo, sendo a média dos valores das amostragens foi de 0,15% da composição do biogás (tabela 20). Com relação ao  $\text{CO}_2$ , os valores aumentaram com o passar do tempo, sendo que início do experimento era de 34% e no final já estava com uma porcentagem de 47,1 %. O oxigênio ( $\text{O}_2$ ) teve baixa porcentagem em concentração e pequena

variação média (1,55%), o que já era esperado por se tratar de um reator anaeróbico. A média dos valores de H<sub>2</sub>S foi de 25 ppm.

A composição do biogás gerado no R1, ao longo do período experimental, pode ser observada no gráfico da figura 13.



**Figura 13: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental.**

Com esses resultados e estabelecendo-se uma comparação com relatos de Tchobanoglous et al.,(1993) no que diz respeito à análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário, conforme figura 1 da secção 3.2.1, pág. 10 , pode-se enquadrar R1 como estando na transição da Fase II para a Fase III da degradação dos resíduos em um aterro sanitário. Logo, sendo uma fase instável, fica difícil classificar exatamente em que ponto da degradação R1 se encontra. Com isso e visualizando o gráfico da tabela 1 pode-se explicar as baixas concentrações de O<sub>2</sub> encontradas no reator, o aumento do CO<sub>2</sub>, as pequenas concentrações de CH<sub>4</sub> e o comportamento do pH. A média do pH do lixiviado de R1 foi de 3,78 , um pH ácido.

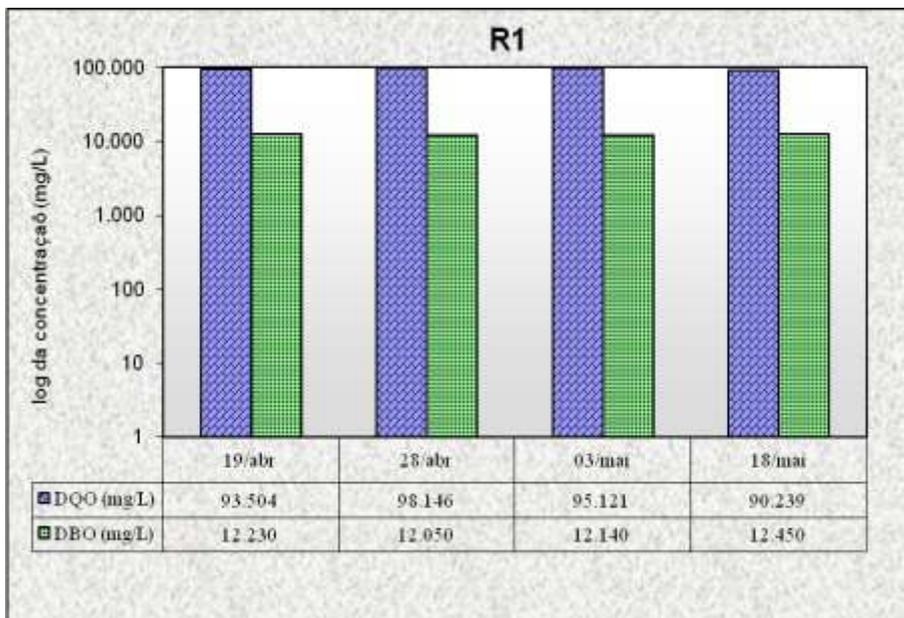
De acordo com Tchobanoglous et al.,(1993), na Fase III (Ácida), as reações iniciadas na Fase II (transição) são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio.

A presença de gás sulfídrico (ou sulfeto de hidrogênio) no reator é admissível que o mesmo esteja na fase III, uma vez que o sulfeto de hidrogênio começa a aparecer nesta fase, mais precisamente no início da etapa da Acidogênese.

Comparando os valores das concentrações dos gases de R1 com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (Tabela 23) as concentrações de CO<sub>2</sub> foram semelhantes (Içara 37,8%; Tijuquinhas 41,9% e R1 43,7%) e de gás sulfídrico R1, com 25 ppm ficou com um valor próximo do encontrado no aterro de Tijuquinhas (21,9 ppm).

Já quando comparando com as fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário, segundo Esmap (2004) e de acordo com o período típico de funcionamento (3 meses a 3 anos) no qual se enquadraria R1, este também estaria na Fase III de degradação, identificando uma fase anaeróbia, metanogênica e com condições instáveis.

O lixiviado do R1 foi analisado de acordo com os resultados das concentrações de matéria orgânica presentes no mesmo, determinados por meio da DBO<sub>5</sub> e DQO (total) (figura 14).



**Figura 14: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R1.**

A concentração média das amostras de DQO(total) para R1 foi de 94.252 mg/L, valor relativamente elevado(tabela 21). Esse valor pode ser comparado com a DQO (total) de aterros novos. Já os valores de DBO tiveram pequena variação durante o estudo, estando entre 12.050 e 12.450 mg/L. Esses valores elevados de DBO e DQO, indicam o alto teor de matéria orgânica presente no reator. Como pode-se visualizar a composição dos lixiviados reportados da literatura (tabela 11), um aterro Grego considerado novo, possuía concentrações de DQO de 70.900 mg/L e DBO de 26.800 mg/L, conforme relatam Tatsi et al. (2003).

As variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade do aterro para um aterro de 0 a 5 anos (tabela 14), possui valores de DBO entre 10.000 - 25.000 mg/L . Logo os valores de DBO de R1 estão dentro dessa faixa. Já quando comparado com faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados, durante as fases de estabilização biológica (tabela 15), R1 pode ser classificado como estando na fase III de degradação, caracterizada por ser uma fase ácida. Os valores de DQO de R1, comparados com os da tabela 15, são

maiores, no entanto os de pH e DBO estão dentro dos dispostos na mesma. Ainda com relação aos parâmetros de DBO e DQO, o R1 pode ser classificado como estando na fase Acidogênica de degradação de acordo com a tabela 16, onde estão as características do lixiviado nas fases Acidogênica e Metanogênica em Aterros Sanitários.

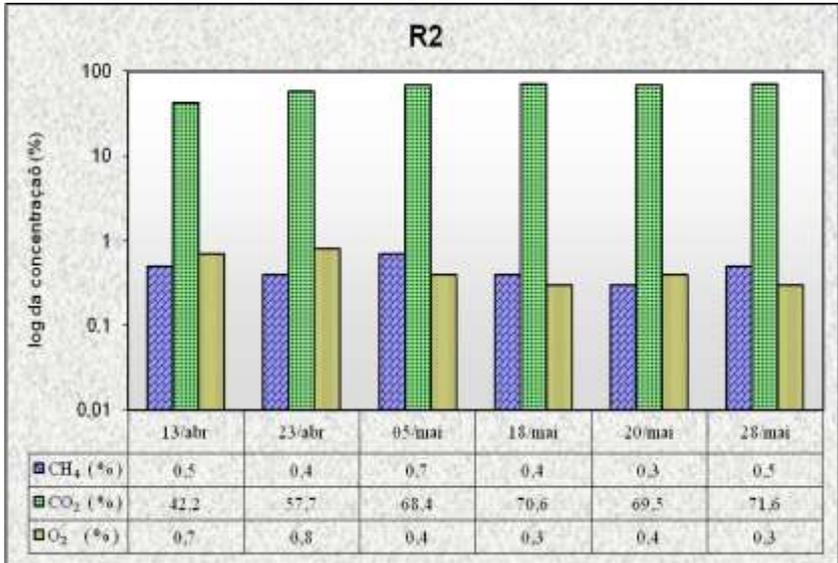
### **5.3.2 Reator (R2)**

O preenchimento do R2 foi realizado com resíduos sólidos urbanos de gravimetria correspondentes à cidade de Florianópolis realizada no ano de 2007. Tal gravimetria foi preparada em laboratório (sem a presença de matéria orgânica *in natura*). A porcentagem de material orgânico foi de 51,76% (13,06Kg).

A temperatura interna de R2 foi em média de 30°C ±1, permanecendo assim como R1, dentro da faixa para o melhor trabalho das bactérias mesófilas (25°C e 34°C). O valor médio das concentrações de CH<sub>4</sub> para R2 estava em 0,47% da composição do biogás, mostrando uma baixa concentração do gás, o qual teve pequena variação ao longo do período de estudo, assim como em R1.

Com relação ao gás CO<sub>2</sub>, os valores também aumentaram com o passar do tempo, sendo que na primeira amostragem era de 42,2% e na última já atingiu uma porcentagem de 71,6 %. O oxigênio (O<sub>2</sub>) teve pequenas variações (0,3% - 0,8%).

A composição do biogás gerado no R2, ao longo do período experimental, pode ser observada no gráfico da figura 13.1, abaixo.



**Figura 13.1: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental.**

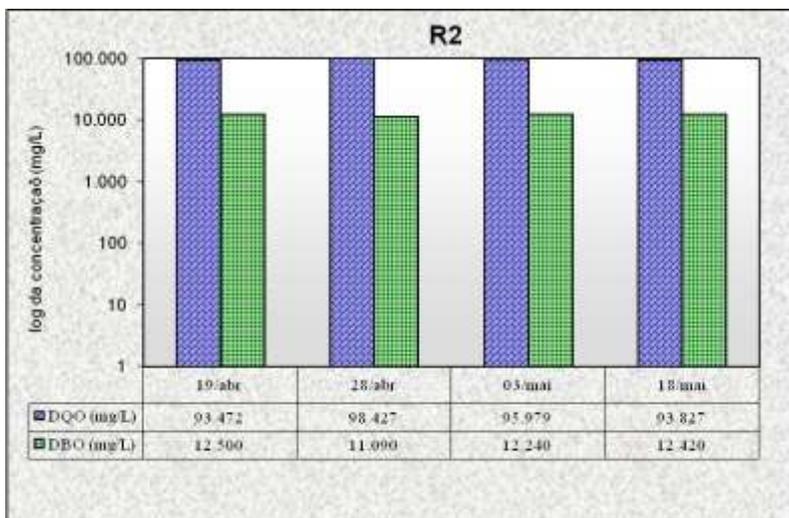
Observando esses resultados e estabelecendo-se uma comparação com a análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário, pode-se classificar R2 como estando na Fase III da degradação. Pode-se chegar a essa conclusão devido às baixas concentrações de O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, o crescente aumento das porcentagens de CO<sub>2</sub> e o valor de pH baixo, conforme Tchobanoglous et al.,(1993).

A média do valor de pH do lixiviado do R2 foi de 4,19(tabela 21), mostrando um pH ácido, assim como o pH de R1. De acordo com a literatura, a Fase III é descrita como sendo uma fase ácida onde se tem a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O aparecimento do gás sulfídrico no reator confirma mais uma vez o enquadramento do R2 na Fase III de degradação.

Quando comparado com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (tabela 23), os valores das concentrações dos gases de R2 não se assemelham. As concentrações de O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> estiveram muito abaixo e já às concentrações de CO<sub>2</sub> acima dos valores obtidos naqueles aterros. Já comparando com dados da tabela 3 (Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário), e

de acordo com o período típico de funcionamento ao qual pertenceria R2 (3 meses a 3 anos), este também estaria na Fase III de degradação.

O lixiviado do R2, assim como o do R1, foi analisado de acordo com os resultados das concentrações de matéria orgânica presentes no mesmo, determinados por meio da DBO<sub>5</sub> e DQO (total) (figura 14.1).



**Figura 14.1: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R2.**

A média das concentrações de DQO (total) situou-se em 95.426 mg/L, valor bastante parecido com o obtido no R1 e relativamente elevado. Assim como no R1, os valores desse parâmetro para R2 podem ser comparados com a DQO (total) de aterros novos e identificam uma alta carga de matéria orgânica presente no reator.

Os valores de DBO tiveram pequena modificação durante o estudo, estando entre 11.090 e 12.500 mg/L, com um valor médio de 12.063 mg/L.

Segundo dados da tabela 14 (variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade do aterro) para um aterro com idade de 0 a 5 anos, as concentrações de DBO estão entre 10.000 - 25.000 mg/L. Os valores de DBO do R2 estavam dentro dessa faixa. Já quando comparado com faixas de concentrações de parâmetros de caracterização dos lixiviados durante as fases de estabilização biológica (tabela 15), R2 do mesmo modo que R1 pode ser classificado como estando na fase III de degradação. Assim como R1, com relação aos

parâmetros de DBO, DQO e pH o R2 pode ser classificado como estando na fase Acidogênica de degradação de acordo com a tabela 16 , onde estão as características do lixiviado nas fases Acidogênica e Metanogênica em Aterros Sanitários.

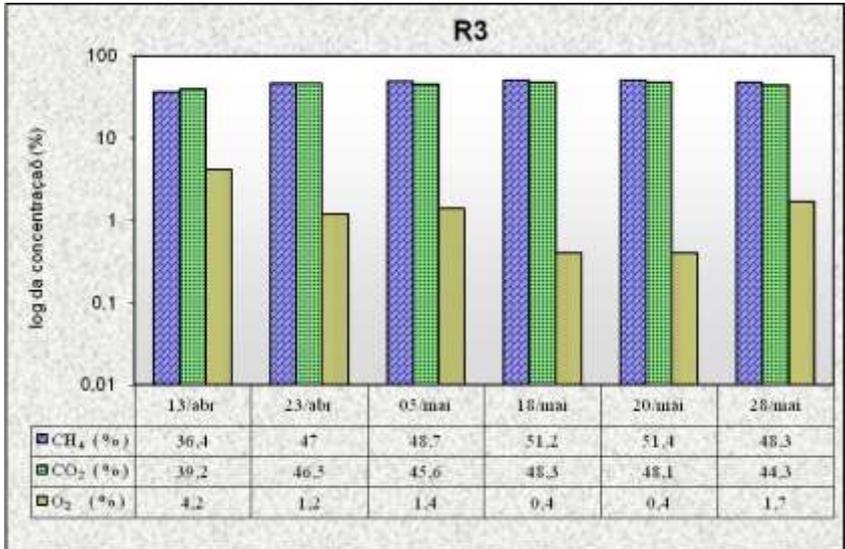
De forma geral, comparando os resultados das análises da composição do biogás entre R1 e R2, pode-se notar uma maior produção tanto de CH<sub>4</sub> quanto de CO<sub>2</sub> no R2. As diferenças na geração do CH<sub>4</sub> são pequenas, no entanto com relação ao CO<sub>2</sub>, há uma diferença considerável. Os maiores valores encontrados para R2 podem ser justificados pelo fato do mesmo estar numa etapa de degradação um pouco mais avançada que R1, embora seja difícil se enquadrar os reatores definitivamente em uma única fase, pois os processos de degradação podem não ocorrer de forma igual em todos os reatores.

### **5.3.3 Reator (R3)**

Para o preenchimento do R3 foi utilizada a gravimetria da cidade de Florianópolis, porém do ano de 2009. Essa gravimetria do R3 corresponde a da usina de triagem da Comcap (com presença de matéria orgânica). A temperatura interna do R3 ficou na média de 30°C ±1, estando assim como R1 e R2 dentro da faixa para o melhor trabalho das bactérias mesófilas (25°C e 34°C).

No R3, as concentrações de CH<sub>4</sub> foram relativamente mais altas, quando comparadas com R1 e R2, atingindo valores de 36,4% na primeira amostragem e evoluindo para um valor máximo de 51,4% na penúltima medição do período de estudo. O gás CO<sub>2</sub> teve valores de 39,2% no início e aumentou, atingindo um valor máximo de 48,3%. O oxigênio (O<sub>2</sub>) teve maiores variações (0,4% - 4,2%), sendo que no início do experimento as concentrações foram maiores.

No gráfico da figura 13.2, pode ser observada a composição do biogás gerado no R3, ao longo do período experimental.



**Figura 13.2: Porcentagens dos gases presentes no biogás ao longo do período experimental.**

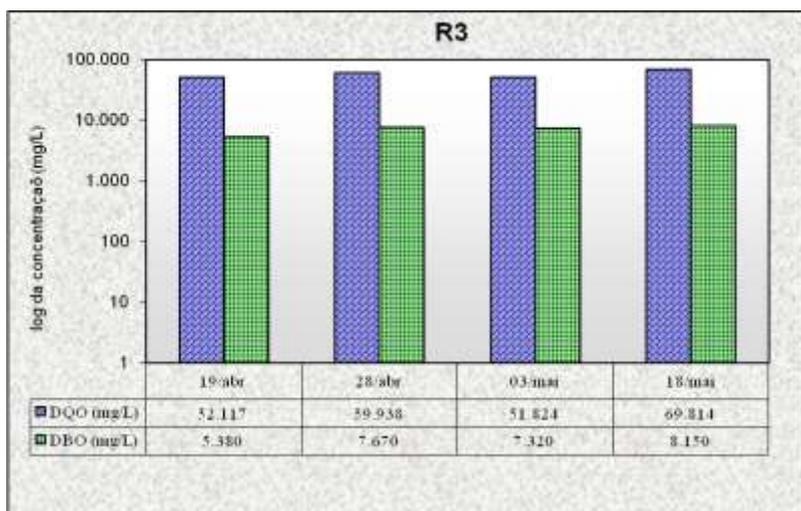
De posse dos resultados das porcentagens dos gases presentes no biogás, e conforme Tchobanoglous et al.,(1993), pode-se estabelecer uma comparação do R3 com a análise qualitativa típica da geração dos principais gases ao longo das fases de degradação em um aterro sanitário. Desse modo pode-se classificar R3 como estando na Fase IV da degradação. Pode-se assim classificar devido às baixas concentrações de O<sub>2</sub>, e altas porcentagens de CH<sub>4</sub>, e CO<sub>2</sub>. Nesta fase, denominada Fase Metanogênica, predominam os microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem o ácido acético e o gás hidrogênio em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.

Freqüentemente a Fase IV de produção de gás contém, aproximadamente, em volume, 45% a 60% de metano, 40% a 60% de dióxido de carbono, e 2% a 9% de outros gases, tal como os gases sulfídricos. O pH do lixiviado nesta fase tende a ser mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0 conforme dispõe Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993). A média dos valores de CH<sub>4</sub> (47,2%) e CO<sub>2</sub> (45,3 %) presentes

no biogás do R3, podem confirmar que o reator se encontra nessa fase de degradação.

O pH do lixiviado do R3 (figura 13) situou-se entre 5,42 e 5,88, bastante próximo de 6,0 e mais elevado que nos reatores R1 e R2. Quando comparado com as concentrações médias dos gases do aterro de Içara/SC e Tijuquinhas (tabela 23), os valores das concentrações dos gases de R3 estavam muito próximos. Pode-se explicar essa proximidade dos valores pelo fato de que o aterro de Tijuquinhas, em Biguaçu/SC, recebe os resíduos sólidos da cidade de Florianópolis, logo a gravimetria desses RSU se assemelha com a gravimetria de R3. As concentrações de O<sub>2</sub> eram menores em R3, porém CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> possuíram concentrações dentro da faixa dos valores desse aterro.

Assim como R1 e R2, o lixiviado do R3 foi analisado de acordo com os resultados das concentrações de matéria orgânica presentes no mesmo, determinados por meio da DBO<sub>5</sub> e DQO (total) (figura 14.2).



**Figura 14.2: Concentrações (mg/L) de DQO e DBO ao longo do período experimental para R3.**

A média das concentrações de DQO (total) foi de 58.424mg/L, valor bem menor que os obtidos no R1 e R2 que foram elevados. Assim como no R1 e R2 os valores desse parâmetro para R3 podem ser comparados com a DQO (total) de aterros novos.

O valor médio de DBO foi de 7.130 mg/L. Segundo dados da tabela 14 (variações das concentrações dos lixiviados segundo a idade

do aterro) para um aterro com idade de 0 a 5 anos, as concentrações de DBO estão entre 10.000 - 25.000 mg/L . Logo os valores de DBO do R3 estavam dentro dessa faixa.

Comparando-se os resultados das análises da composição do biogás entre R1, R2 e R3 pode-se identificar uma maior produção de CH<sub>4</sub> no R3. Isso se deve ao fato do R3 ter sido preenchido com RSU coletados diretamente no caminhão da estação de triagem da Comcap. Esses resíduos já estavam misturados e compactados, além de já apresentarem textura úmida, líquido e um odor forte, o que indicava que já haviam iniciado o processo de degradação. Tais resíduos eram provenientes do bairro de Canasvieiras e continham grande quantidade de matéria orgânica vegetal (podas de árvores e capim) e também, por ser uma área com grande concentração de restaurantes, havia grande quantidade de restos de alimentos de origem marinha. Enquanto o preenchimento de R2 (gravimetria de 2007) foi feito em laboratório, com resíduos vindos diretamente de casa, logo eram “mais limpos”, não misturados, sem compactação e sem material orgânico vegetal como capim, por exemplo.

As diferenças na geração do CH<sub>4</sub> entre R1 e R2 foram pequenas. Com relação ao CO<sub>2</sub>, houve uma diferença considerável entre os três, sendo que o maior produtor foi R2 (fase III de degradação). Os maiores valores de H<sub>2</sub>S no R2 podem ser justificados pelo fato desse reator apresentar uma maior porcentagem de tecido na composição do seu preenchimento. Os tecidos sintéticos contem petróleo na sua composição, sendo o mesmo uma fonte natural de H<sub>2</sub>S. Também a tinta do tecido apresenta H<sub>2</sub>S na composição.

A temperatura interna dos três reatores foi bastante semelhante, situando-se basicamente na faixa mesófila. Com relação à análise da concentração da DQO e DBO<sub>5</sub> do lixiviado, R1 e R2 obtiveram valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se parecidos. O R3 teve concentrações de DQO e DBO<sub>5</sub> bem menores, o que pode ser explicado pelo fato desse reator estar numa fase mais avançada de degradação (fase IV) que R1 e R2. As altas concentrações de DQO identificam o alto teor de matéria orgânica presente nos reatores. Isso pode ser explicado pelo fato do lixiviado ter sido coletado durante a fase ácida, e que os reatores ainda não atingiram a fase estável de fermentação anaeróbia.

A tabela 23 apresenta as médias das porcentagens dos principais gases nos aterros catarinenses de Içara e Tijuquinhas e nos reatores desse estudo. Essa tabela é utilizada na comparação dos resultados.

**Tabela 23 - Concentração média dos principais gases nos aterros Catarinenses de Içara, Tijuquinhas, e nos reatores R1, R2 e R3.**

<b>Gases</b>	<b>Içara</b>	<b>Tijuquinhas</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>
<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	46,9	53,8	0,15	0,47	47,2
<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	37,8	41,9	43,7	63,3	45,3
<b>O<sub>2</sub>(%)</b>	4,1	1,0	1,03	0,48	1,55
<b>H<sub>2</sub>S (ppm)</b>	12	21,9	25,0	2903	754

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal deste trabalho foi atingido, uma vez que por meio da metodologia proposta foram obtidas as porcentagens dos principais gases presentes no biogás dos três reatores e identificado o reator que obteve a maior produção de gás metano. A revisão da literatura auxiliou na elaboração da metodologia e também em uma parte da comparação dos resultados obtidos.

Com relação à caracterização do biogás, pode-se concluir que:

- Com os dos resultados obtidos das medições das concentrações dos gases presente no biogás dos três reatores, identificou-se que o reator R3 foi o que apresentou maior rendimento na produção de CH<sub>4</sub>. A concentração média do biogás para este reator foi de 47,2% de CH<sub>4</sub>, 45,3% de CO<sub>2</sub> e 1,5% de O<sub>2</sub>.
- A temperatura interna e externa dos reatores manteve-se na faixa mesófila (25°C e 34°C), com pouca variação. Logo, a temperatura pode não ter sido um fator de influência na diferença na composição do biogás entre os reatores.
- A qualidade do biogás foi dependente dos preenchimentos de cada um dos reatores (composição), com diferentes proporções de resíduos.

Quanto ao lixiviado gerado, pode-se finalizar que:

- A média dos resultados das amostras de DBO e DQO para R1 foi respectivamente, 12.217 mg/L e 94.252 mg/L; para R2, 12.062 mg/L e 95.426 mg/L. R1 e R2 obtiveram uma média de valores elevados e mesmo sendo as porcentagens dos preenchimentos diferentes, os valores desses parâmetros mostraram-se parecidos. R3 teve concentrações de DBO (7.130 mg/L) e DQO (58.423 mg/L) bem menores. As altas concentrações de DBO e DQO do lixiviado identificam teores elevados de matéria orgânica presente nos reatores.
- O lixiviado, como um composto químico, leva consigo os constituintes da massa de resíduos sólidos enquanto flui. Portanto não há um lixiviado típico, e cada massa de resíduo específico precisa ser considerada quanto a este respeito.

Assim, como cada reator possui um preenchimento com diferentes porcentagens de composição de resíduos sólidos urbanos, tanto o biogás quanto o lixiviado gerado é uma característica particular de cada um deles. Pode-se dizer que a qualidade do biogás e do lixiviado gerado está diretamente relacionada a composição dos RSU utilizados como preenchimento.

Embora a divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro. Isto pode explicar, por conseguinte, a dificuldade em se definir e classificar a fase de degradação pela qual os reatores estão atravessando.

Como recomendação, pode-se destacar que, como o período de desenvolvimento do trabalho foi relativamente curto, é interessante que se dê continuidade ao monitoramento dos reatores, para assim se poder acompanhar a evolução do processo de degradação dos RSU e também melhor identificar a qualidade do biogás e do lixiviado que está sendo gerado. Assim, para analisar a concentração de matéria orgânica produzida, os testes de DBO e DQO do lixiviado deveriam ser mantidos, assim como a caracterização do biogás.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Recife, abril de 2009.

AITCHISON, E. **Methane generation from UK landfill sites and its use as an energy resource**. In: Energy Conversion and Management, 1996. v. 37, n. 6, p. 1111-1116.

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES F. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias: Lodo de Esgotamento e disposição final**. DESA-UFMG, v.6, 2001. 483p.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 63p.

BAADER, W. et al. **Biotechnological methods for the utilization of residues and byproducts of agriculture**. Institute for Technology. V. 3, 265p. 1991.

BARLAZ, M. et al. **Mass balance analyses of anaerobically decomposed refuse**. Journal of Environmental Engineering. v. 119, n. 1, p.39-56, 1993.

BARLAZ M. A.; MILKE M. W.; HAM R. K. **Gas production parameters in sanitary landfill simulators**. Waste Management & Research, v. 5, n. 1, p. 27-39, 1987.

BRAGA, B. **Introdução a Engenharia Ambiental**. 2ª edição. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 305p. 2002.

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

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. In: **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro:ABES, RIMA, 2003. p. 1-9.

CASTILHOS JR, A.B. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**, Rio de Janeiro, ABES, RIMA Editora, 2003. 294 p.

CASTILHOS JR, A. B. **Produção de Líquidos Percolados e Biogás em Aterros Sanitários**. Revista Saneamento Ambiental. São Paulo, n. 12, p. 28-33, 1991.

CASTILHOS JR, A. B.; REICHERT, G. A. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Florianópolis: UFSC, 2007. 92p.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**, 2. ed. Belo Horizonte, UFMG/ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.5, 2007. 380p.

CHRISTENSEN T. H.; KJELDSEN P.; BJERG P. L.; JENSEN D. L.; CHRISTENSEN J. B.; BAUN A.; ALBRECHTSEN H.; HERON G. **Biogeochemistry of landfill leachate plumes**. Applied Geochemistry, v .16, n 7/8, jun. 2001.

CLARETO, C. R. , **Tratamento biológico de líquidos percolados gerados em aterros sanitários utilizando reator anaeróbio compartimentado**, São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

COLLINS, C.H.; BRAGA, G.L. e BONATO, P.S. **Introdução a métodos cromatográficos**. 5ª ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1993.

DEGANI A. L. G., CASS, Q.B., VIEIRA, P.C. **Revista Química Nova na Escola, Cromatografia** . N° 7, maio 1998. Disponível em: <[http://qnesc.s bq.org.br es/online/qnesc07/atu al.pdf](http://qnesc.s bq.org.br/es/online/qnesc07/atu al.pdf) > .Acesso em 05/11/2009.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.

DIAS, Vanessa C. **Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas /SC** . Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2009. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. 115p.

DUARTE A. C. **Projetos de MDL em aterros sanitários do Brasil: Alternativa para o desenvolvimento sustentável**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. 124p.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. **Environmental impacts of solid waste landfilling**. Journal of Environmental Management, v. 50, n. 1, 1997, p. 1-25.

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

EHRIG, H.-J. **Waste Management & Research**. Institut für Satadtbauwesen. TU Braunschweig. West Germany, 1983.

ESMAP – Energy Sector Management Assistance Programme. **The World Bank Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Ontário, 2004.

FLORENCIO, M de L.; KATO, M. T. **Sistema de tratamento anaeróbio**. Apostila do IV Curso de tratamento biológico de resíduos, FURB/UFSC, Florianópolis, p.24. 1999.

FRASCARI, D.; BRONZINI, F.; GIORDANO, G.; TEDIOLI, G.; NOCENTINI, M. **Longterm characterization, lagoon treatment and migration potential of landfill leachate: a case study in an active Italian landfill**. Chemosphere, v. 54, n. 3, p. 335-343, 2004.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. Departamento de Saneamento, Ministério da Saúde, Brasil.2000 Disponível em:< <http://www.funasa.gov.br/pub>>. Acesso em 26/08/2009.

GIORDANO, G. **Análise e Formulação de Processos para Tratamento dos Chorumes Gerados em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado. PUC Rio, Rio de Janeiro. 2003.

GIRALDO, E. **Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes**. Revista de Ingeniería, Universidad de Los Andes, v. 14, p. 44–55, 2001.

GIUST, E.; VISINTIN, D.; DEL PICCOLO, C. **A combination of cogeneration of evaporation and membrane technique for landfill leachate treatment**. Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy, 2007.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. **Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte**. In: Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.51-105.

GUNNERSON C. G.; STUCKEY, D. C. **Anaerobic digestion**. Tech. Pap. 49, World Bank, Washington, D.C, 1986.

HADDAD, H. S. **Avaliação da qualidade do efluente resultante da evaporação/destilação do lixiviado do Aterro Sanitário Canhanduba, Itajaí/SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. 66p.

HAM, R. K.; BARLAZ, M. A. **Measurement and prediction of landfill gas quality and quantity in sanitary landfilling: process, technology and environmental impact.** U.K.: Academic Press, p.155-156. 1989.

HELD, A., **Procesos Para el Tratamiento de Lixiviados de Vertederos,** Revista Residuos, n.º. 30, Bilbao – Espanha, Mai/Jun, 1996.

IM, J-H.; WOO, H-J.; CHOI, M-W.; HAN, K-B.; KIM, C-W. **Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system.** Water Research, v. 35, n. 10, p. 2403-2410, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico,** PNSB, 2000. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 26/08/2009.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3).** 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 28/08/2009.

KANG, K.; SHIN, H. S.; PARK, H. **Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications.** Water Research, v. 36, n. 16, p. 4023–4032, 2002.

KOERNER, R. M.; SOONG. T. Y. **Leachate in landfills: the stability issues.** Geotextiles and Geomembranes, v. 18, n. 5, p 293-309, 2000.

LEITE, E. H. B. C.; MAHLER, C. F.; BRITO FILHO, L. F. **Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás de aterros**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais... Campo Grande, 2005.

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

MACIEL, F.J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE..** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003. 173p.

MÁXIMO, V. A. **Tratamento por coagulação-floculação dos lixiviados do aterro sanitário da região metropolitana de Florianópolis**. 2007. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1995. 521 p.

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

MOTA, S., **Introdução a Engenharia Ambiental**. 3ª edição. Rio de Janeiro. ABES, 416p. 2003.

NASCIMENTO, T. S. & CAMPOS L.M. **Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes - SP**. Artigo técnico Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.13 - Nº 1 - jan/mar 2008, p. 88-96.

NEETHING, J.; CHUNG, Y. C. **Microbial activity measurements for anaerobic sludge digestion**. Journal WPCF. V. 61, 4-3, 1989.

NETO, F.R.A. **CGAR em análise de resíduos**. Química Nova, v. 18, n. 1, p.65-67, 1995.

ÖMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. **Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds**. Waste Management & Research, v. 28, n. 10, p. 1876-1891.2008

OROFINO, F. V. G. **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis**. Florianópolis: COMCAP, 2002. 112p.

PALMISANO, A.C.; BARLAZ, M.A. **Microbiology of solid waste**. Boca Raton, Flórida, USA: CRC Press, 1996.

PAVAN, M. O. - **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2000. Disponível em: <http://revistasustentabilidade.com.br/sustentabilidade/artigos/gestao-e-gerenciamentode-residuos-solidos-urbanos-no-brasil/>. Acesso em 01/11/09.

PAVLOSTHATHIS, S. G. **Preliminary conversion mechanisms in digestion anaerobic of biological sludge**. Journal of Environmental Engineering. V. 114, n. 4, p. 10-12, 1988.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem**. 1996. Disponível em: <<http://www.rrr.cirp.usp.br/compostagem.html>>. Acesso em 01/11/2009.

PERES, C. S. **Anaerobic biodegradability of the organic components of municipal solid waste**. São Paulo, Brasil. Paper preprints. VI International Symposium of Anaerobic Digestion, p. 12-16, 1991.

POHLAND, F.G.; S.R HARPER. **Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production From Landfills**. EPA/600/2-86/073, US Environmental Protection Agency, Cincinnati,OH , 1986.

QASIM, S. R.; CHIANG, W. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment**. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 1994. 339p.

QIAN, X. ; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 717p.

RESTREPO, José.J.B. **Determinação da taxa de transferência de elementos traços dos resíduos sólidos urbanos para o lixiviado**. Tese de doutorado em andamento . Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis,2010.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. **Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru**. In: 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS, Porto Alegre, 2000.

SILVA, C. L.; SEGATO, L. M. **Tratamento de Líquidos Percolados por Evaporação Através do Aproveitamento de Gás de Aterros Sanitários**. In: 28º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitária y Ambiental, Cancun, 2002.

STRELAU, João. R. M. **Estudo comparativo de métodos de extração para determinação de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por cromatografia gasosa a espectrômetro de massa**. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 137p

TATSI, A. A.; ZOUBOULIS, A. I.; MATIS, K. A.; SAMARAS, P. **Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates**. Chemosphere, v. 53, n. 7, p. 737-744, 2003.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid wastemanagement: engineering principles and management issues**. McGraw-Hill, Hightstown, NJ, 1993. 978p.

UNITED KINGDOM – Environmental Agency. **Guidance on Landfill Gas Flaring**. 2002. <http://www.environment-agency.gov.uk/> . Acesso em: 12/10/ 2009.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- USEPA. **Turning a Liability into an asset: A Landfill Gas-to-energy Project Development Handbook**. USA: 1996. Disponível em <http://www.epa.gov/> . Acesso em 29/08/2009.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Landfill off-gas collection and treatment system**. 1995. < <http://www.usace.army.mil> > Acesso em 29/08/2009.

VAZOLLER, R.F. **Microbiologia e saneamento Ambiental**,1999.  
<http://www.bdt.org.br/~marinez/padct.bio/cap9/3/rosana.html> .

OLIVEIRA, Selene de; PASQUAL, Antenor. **Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente líquido de um aterro sanitário**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, set. 2004 .

YANG, Z.; ZHOU, S. **The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system**. Chemosphere, v. 72, n. 11, p. 1751-1756, 2008.

ZIYANG, L.; YOUCAI, Z.; TAO, Y.; YU, S.; HUILI, C.; NANWEN, Z.; RENHUA, H. **Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages**. Science of the Total Environment, v. 407, n.10, p. 3385-3391, 2009.