



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA ATRAVÉS
DO TESTE BMP**

Gardênia Azevedo Silva

**Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre**

João Pessoa, dezembro de 2012.

Gardênia Azevedo Silva

**ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA ATRAVÉS
DO TESTE BMP**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Joácio de Araújo Moraes Júnior

Co-orientadora: Prof.^a Dra. Elisângela M. R. Rocha

João Pessoa, dezembro de 2012.

ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA ATRAVÉS DO TESTE BMP

Gardênia Azevedo Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em 09 de novembro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá- UFPE
Examinador externo

Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior - UFPB
Examinador interno

Prof. Dr. Joácio de Araújo Moraes Júnior - UFPB
Orientador

Prof^a. Dra. Elisângela M. R. Rocha - UFPB
Co-orientadora

João Pessoa, dezembro de 2012.

Confie em Deus e pratique o bem, habite na terra e viva tranquilo. Coloque em Deus o seu prazer, e Ele dará o que seu coração deseja. Entregue seu caminho a Deus, Nele confie, e Ele agirá.

(Salmo 37(36))

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que sempre incentivaram e viabilizaram meus estudos. Aos meus sobrinhos: Gabrielle Azevedo, Fágner Filho e João Neto, aos quais desejo um futuro de saúde, educação e sabedoria.

AGRADECIMENTO

Ao Orientador Prof. Dr. João de Araújo Moraes Júnior, pela apresentação do tema, aulas generosas através de reuniões e conversas, colaboração em pesquisas, dedicação, disponibilidade e pela credibilidade nos meus trabalhos.

A Co-orientadora Prof.^a Dra. Elisângela M. R. Rocha, pelos ensinamentos através de muitas experiências e conversas, pela dedicação e disponibilidade nos testes em laboratório e principalmente pelo companheirismo nesta pesquisa.

Ao prof. Dr. Jucá, pela honra de tê-lo presente na banca examinadora, contribuindo com sua integridade e inteligência, ampla e admirável.

Ao Prof. Dr. Gilson B. Athayde Jr., o qual tem meu apreço por fazer parte do curso com tanta dedicação e principalmente pela importante colaboração na banca examinadora, com apontamentos de grande valia.

Aos alunos PIVIC e PIBIC, Tiago Sá Sena (meu braço direito) e Viddianne Marine, os quais contribuíram muito nas análises de campo e laboratoriais. A Rodrigo Massao pela contribuição essencial na metodologia deste trabalho.

Ao laboratório de saneamento (LABSAN) pela disponibilização das análises físico-químicas no período de um ano, tendo a frente à professora Dra. Carmem Gadelha e os técnicos colaboradores: Romildo, Elson e Dorivaldo.

Ao laboratório de química analítica (LAQA) pela colaboração com as análises de cromatografia, tendo a frente o Prof. Dr. Mário Ugulino e o analista Mestre Hebertty Vieira, ao qual agradeço imensamente pela parceria e dedicação nas análises realizadas.

A CAPES e ao CNPQ pela bolsa de estudo e o financiamento do projeto universal. A RUMOS, a EMLUR, ao ASMJP e a CAGEPA, empresas parceiras que incentivaram na pesquisa e cederam informações importantes.

Por fim, a Annie Ottaviani por toda dedicação e colaboração na formatação e finalização desta dissertação.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

O estudo da conversão biológica com fins energéticos em aterros de resíduos sólidos urbanos representa um grande avanço para a sociedade, sendo considerada de extrema importância ambiental e econômica. Diante dessa ostentação foi realizado um estudo no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa, visando estimar a produção de biogás e do seu principal componente, o metano. Por não existir um protocolo oficial do Teste do Potencial Bioquímico de Metano (Teste BMP) para a previsão dos gases gerados, foram realizadas pesquisas bibliográficas e adaptada uma metodologia fundamentada nas caracterizações e monitoramentos dos principais fatores envolvidos no processo de degradação. As etapas do trabalho foram as seguintes: caracterização gravimétrica dos resíduos, caracterização físico-química e aclimação do inóculo e o Teste BMP, o qual inclui a inoculação dos meios de reação, o monitoramento do volume de biogás produzido, o controle quantitativo e qualitativo da geração dos gases que compõem o biogás e consequentemente a estimativa de geração do biogás no aterro. Os resultados mostraram que a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, a qual utilizou o método francês MODECOM, trouxe definições de dados mais precisos, dando confiabilidade à composição dos resíduos. A metodologia proposta para o teste BMP mostrou-se eficiente na obtenção dos resultados, pois produziu no resíduo biodegradável um volume acumulado de biogás de 282,66 NL.kg⁻¹MS em 90 dias, condizente com a bibliografia, possibilitando uma produção favorável de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa. Por ter sido considerado uma excelente ferramenta experimental para determinação do potencial de geração de biogás nos RSU, o teste BMP, viabiliza a elaboração para um procedimento oficial.

PALAVRAS CHAVES: Biogás, Teste BMP, caracterização gravimétrica dos RSU, MODECOM e inóculo.

ABSTRACT

The study of biological conversion for energy purposes in landfills of municipal solid waste is a major breakthrough to the society and it is considered having an extremely environmental and economic importance. Given this ostentation a study was conducted in the João Pessoa's metropolitan landfill , in order to estimate the production of biogas and its main component, methane. There is no an official protocol of the Biochemical Methane Potential Test (BMP) for the prediction of gas generated for this reason literature searches were conducted and a methodology was adapted based on the characterization and monitoring of the main factors involved in the degradation process. The steps of the study were as following: waste's gravimetric characterization, physicochemical characterization and acclimatization of inoculum and the BMP test, which includes the inoculation of the reaction ways , the monitoring of the biogas' volume produced, the quantitative and qualitative control of the generation of gases comprising the biogas and consequently the estimate of the generation of biogas in the landfill. The results has showed that the gravimetric characterization of the municipal solid waste, which used the French method MODECOM brought data definitions more precise, giving reliability to the composition of the waste. The proposed methodology for the BMP test was effective in obtaining the results, as it has produced a volume of accumulated biogas 282.66 NL.kg-1MS in 90 days in the biodegradable waste, consistent with the literature, providing a favorable production of biogas in the João Pessoa's metropolitan landfill. As it was considered an excellent experimental tool for determining the potential for the biogas generation in MSW, the BMP test enables the preparation for the official procedure.

KEYWORDS: Biogas, BMP Test, gravimetric characterization of MSW, MODECOM and inoculum.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	V
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1. Considerações Gerais	01
1.2. Justificativa e Relevância do Estudo.	04
1.3. Objetivos	05
1.3.1. Objetivo Geral.	05
1.3.2. Objetivos Específicos	05
1.4. Estrutura do Trabalho.....	05
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	07
2.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	07
2.1.1. Geração e Coleta dos RSU.	08
2.1.2. Composição Gravimétrica dos RSU no Mundo.	13
2.1.2.1. Composição gravimétrica dos RSU do ASMJP	16
2.1.2.2. MODECOM - <i>Método de Caracterização dos Resíduos Domésticos</i>	20
2.1.2.3. Fração Orgânica do Resíduo Sólido Urbano Padrão – FORSup.....	21
2.2. Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Urbanos.	23
2.2.1. Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia dos RSU.	27
2.2.1.1. Temperatura.	28
2.2.1.2. Toxicidade.	29
2.2.1.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)	30
2.2.1.4. Umidade	31
2.3. Inóculo e Aclimação.	32
2.4. Geração do Biogás.....	35
2.4.1. Potencial Bioquímico de Metano (Teste BMP)	38
2.4.2. Cromatografia Gasosa (CG).....	39
2.4.3. Potencial e Estimativa de Geração de Biogás.....	40

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	45
3.1. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do ASMJP	47
3.1.1. Avaliação do Sistema de Coleta.....	48
3.1.2. Seleção das Amostras.....	49
3.1.3. Amostragem.	50
3.1.4. Histórico da Caracterização Gravimétrica dos RSU e Acompanhamento Operacional das Células.	54
3.2. Teste BMP.....	54
3.2.1. Preparação do Inóculo	55
3.2.1.1. Caracterização Físico-química do Inóculo.....	57
3.2.1.2. Teste de Aclimação	58
3.2.2. Preparação da Solução Nutritiva.....	60
3.2.3. Amostras dos Resíduos Sólidos Urbanos	61
3.2.4. Inoculação dos Meios de Reação nos Reatores BMP.....	66
3.2.4.1. Caracterização Físico-química do Meio de Reação.	70
3.2.5. Monitoramento dos Reatores BMP	70
3.2.5.1. Temperatura.....	71
3.2.5.2. Pressão Interna.	72
3.2.5.3. Cromatografia Gasosa	75
3.2.6. Produção de Biogás CNTP (NL.kg) ¹ MS)	78
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1. Composição Gravimétrica dos RSU do Aterro Sanitário.	79
4.1.1. Histórico da Caracterização Gravimétrica dos RSU e Acompanhamento Operacional das Células	82
4.2. Teste BMP.....	86
4.2.1. Avaliação do Inóculo	86
4.2.2. Caracterização Físico-química da Fração Orgânica (OS) e Biodegradável (BS) do ASMJP.	90
4.2.3. Degradação Anaeróbia dos Meios de Reação.	91
4.2.4. Produção de Biogás.	97
4.2.5. Cromatografia Gasosa	99

4.3. Estimativa da Produção de Biogás.....	99
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	101
CAPÍTULO 6 - PERSPECTIVAS.	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
APÊNDICE.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Gráfico da geração de RSU anual e per capita no Brasil nos anos de 2010 e 2011	02
Figura 2.1 - Tratamento e destinação final em alguns países da Europa (2004).	09
Figura 2.2 - Participações das regiões do Brasil no total de RSU coletado.....	10
Figura 2.3 - Gráfico da Composição Gravimétrica do total de RSU coletado no Brasil .	16
Figura 2.4 - Fração do mapa da Paraíba.....	17
Figura 2.5 - Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa	19
Figura 2.6 - As quatro etapas da metanização	27
Figura 2.7 - Classificação dos micro-organismos em função da temperatura de crescimento	28
Figura 2.8 - Gráfico da produção de metano versus o tempo, com a aplicação de produto tóxico de efeito bacteriostático	29
Figura 2.9 - Balanço de gás em aterros	36
Figura 2.10 - Fases de degradação e parâmetros indicadores da estabilização da matéria orgânica em aterros.....	37
Figura 2.11 - Ilustração do Ensaio BMP	38
Figura 2.12 - Ilustração da cromatografia utilizando a coluna DFID	40
Figura 2.13 - Previsão da geração de gases pelo modelo de primeira ordem	43
Figura 2.14 - Produção de gás durante um período de cinco anos a partir de materiais orgânicos rapidamente e lentamente decompostos num aterro.....	44
Figura 3.1 - Fluxograma representativo das etapas seguidas nesta metodologia.....	46
Figura 3.2 - Rota de coleta do bairro da Torre em João Pessoa/PB	48
Figura 3.3 - Fluxograma representativo da amostragem do RSU para a composição gravimétrica.....	52
Figura 3.4 - Local para caracterização dos resíduos montado nas imediações do aterro sanitário.....	53
Figura 3.5 - Lagoa Anaeróbia do Módulo II da ETE de Mangabeira/João Pessoa/PB ..	55
Figura 3.6 - Material da coleta do lodo anaeróbio	56
Figura 3.7 - Ilustração do procedimento de coleta do lodo anaeróbio	56

Figura 3.8 - Comparação das características do lodo	57
Figura 3.9 - Lodo anaeróbio coletado	57
Figura 3.10 - Ilustração das amostras em processo de aclimação	59
Figura 3.11 - Ilustração de algumas etapas do procedimento - Fração Orgânica	63
Figura 3.12 - Ilustração de algumas etapas do procedimento - Biodegradável	64
Figura 3.13 - Material utilizado nas amostragens	65
Figura 3.14 - Desenho ilustrativo do reator (frasco)	67
Figura 3.15 - Ilustração das fases do procedimento da inoculação dos Reatores	69
Figura 3.16 - Demonstração da medição de temperatura do ambiente da amostra	71
Figura 3.17 - Isopor adaptado para o monitoramento da temperatura durante as análises de cromatografia	72
Figura 3.18 - Manômetro utilizado na pesquisa	73
Figura 3.19 - Amostra com alta pressão, septo com risco de ruptura	74
Figura 3.20 - Demonstração da medição da pressão	74
Figura 3.21 - Ilustração da medição de pressão com a mangueira de 15 e 3 cm	75
Figura 3.22 - Cromatógrafo utilizado na pesquisa	76
Figura 3.23 - Coleta do Biogás no reator anaeróbio com injeção no cromatógrafo gasoso	77
Figura 4.1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro municipal de João Pessoa – ASMJP	81
Figura 4.2 - Comportamento dos resíduos orgânico e biodegradável da série histórica do aterro metropolitano de João Pessoa - ASMJP	84
Figura 4.3 - Adaptação do Projeto de instalação do ASMJP. Fonte SUDEMA/PB	85
Figura 4.4 - Reator OS2 da 1ª Série	92
Figura 4.5 - Curvas da produção de biogás nos reatores OS e BS do Teste BMP.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Geração e Coleta dos RSU no Estado do Nordeste	11
Tabela 2.2 - Coleta de RSU nas capitais e cidades com populações superiores a 500 mil habitantes – Região Nordeste	12
Tabela 2.3 - Perfil qualitativo dos RSU gerados em alguns países	14
Tabela 2.4 - Perfil qualitativo dos RSU gerados em algumas cidades do Brasil.....	15
Tabela 2.5 - Composição Gravimétrica do total de RSU coletados no Brasil	16
Tabela 2.6 - Valores percentuais dos elementos utilizados na elaboração da FORSU	22
Tabela 2.7 - Resumo da revisão bibliográfica sobre digestão anaeróbia de RSU	23
Tabela 2.8 - Resultados de Parâmetros Físico-químicos em Pesquisas Bibliográficas	33
Tabela 2.9 - Valores de alguns potenciais de geração obtidos através do ensaio BMP relatados na literatura.....	39
Tabela 3.1 - Categorias MODECOM utilizadas no experimento	47
Tabela 3.2 - Níveis econômicos PNAD/IBGE	49
Tabela 3.3 - Lista dos bairros escolhidos para a caracterização gravimétrica representando a cidade de João Pessoa	50
Tabela 3.4 - Descrição dos Parâmetros e respectivos Métodos de Caracterização	57
Tabela 3.5 - Planejamento do crescimento da biomassa utilizada no experimento.....	58
Tabela 3.6 - Solução Nutritiva adaptada utilizada no procedimento	60
Tabela 3.7 - Composição da fração orgânica Utilizada no Experimento.....	61
Tabela 3.8 - Composição do biodegradável utilizada no experimento.....	62
Tabela 3.9 - Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos de caracterização	65
Tabela 3.10 - Composição dos Reatores BMP	66
Tabela 3.11 - Esquema geral dos procedimentos experimentais do Teste BMP na 1ª série	68
Tabela 3.12 - Esquema geral dos procedimentos experimentais do Teste BMP na 2ª série	69
Tabela 3.13 - Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos de caracterização	70

Tabela 3.14 - Programação DFID e DTCD utilizada no experimento	77
Tabela 4.1 - Relação dos bairros e seus correlacionados	79
Tabela 4.2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do ASMJP	80
Tabela 4.3 - Série histórica da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do ASMJP (em percentagem)	82
Tabela 4.4 - Série histórica da composição gravimétrica dos resíduos orgânicos e biodegradáveis de João Pessoa/ASMJP	83
Tabela 4.5 - Dados das células utilizadas até dezembro de 2011	85
Tabela 4.6 - Caracterização Físico-Química do Lodo Anaeróbio da ETE Mangabeira..	87
Tabela 4.7 - Resultados dos Parâmetros da Aclimação	89
Tabela 4.8 - aracterização Físico-química das Amostras Orgânica e Biodegradável após a sua preparação, em estado sólido (seco)	91
Tabela 4.9 - Balanço de massa e teor de umidade dos meios de reação	93
Tabela 4.10 - pH dos meios de reação no início e fim do experimento.....	95
Tabela 4.11 - DQO Total dos meios de reação no início e final do Experimento	95
Tabela 4.12 - STV dos meios de reação no início e final do experimento	96
Tabela 4.13 - Volume Acumulado de Biogás CNPT (NL/kgMS)	98
Tabela 4.14 - Estimativa da Produção de Biogás do ASMJP	100

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.

A/M	Alimento e Microrganismos
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ASMJP	Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa
BMP	Potencial Bioquímico do Metano
C/V	Carbono e Nitrogênio
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMLUR	Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FORSUp	Fração Orgânica do Resíduo Sólido Urbano Padrão
GC	Cromatografia Gasosa
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
mbar	Milésimos de bar
BMP	Potencial Bioquímico do Metano
UASB	Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket (digestor anaeróbio de fluxo ascendente)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

A evolução da humanidade tem provocado mudanças em diversos campos do setor social e nos hábitos da maioria da população mundial. O desenvolvimento socioeconômico e conseqüentemente, o consumismo, são os principais problemas relacionados à escassez de recursos naturais. A destinação correta e a caracterização dos resíduos sólidos urbanos são as soluções para muitos problemas.

De acordo com a Lei Federal nº 12.305/2010 (PNRS), os resíduos sólidos urbanos englobam os resíduos domiciliares, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana, os quais são originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), a geração de lixo cresceu em ritmo muito superior ao da população, no Brasil, 6,2 milhões de toneladas de RSU deixaram de ser coletados no ano de 2012 e, por consequência, tiveram destino impróprio. Esta quantidade é cerca de 3% menor do que a constatada em 2011. Apesar de alguns avanços, a situação do setor ainda é crítica em relação à geração, coleta e destinação de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

No país 201.058 toneladas de RSU são produzidas por dia, sendo 42% desse resíduo disposto de forma inadequada. O país gerou em 2012 mais de 62 milhões de toneladas de lixo, teve um crescimento de 1,3% em relação a 2011 (Figura 1.1). Atualmente a produção de lixo por habitante/dia é de 1.295 kg no Sudeste, 1.145 kg no Norte, 0,905 kg no sul, 1.251 kg no centro-oeste e 1.309 kg no Nordeste, sendo este último o grande produtor de lixo. Em termos de iniciativas de coleta seletiva, o Sudeste é o que mais

coleta, chegando a 80,5% das suas cidades, já o Nordeste, apenas 37,8% das cidades tem implantada a coleta seletiva (ABRELPE, 2012).

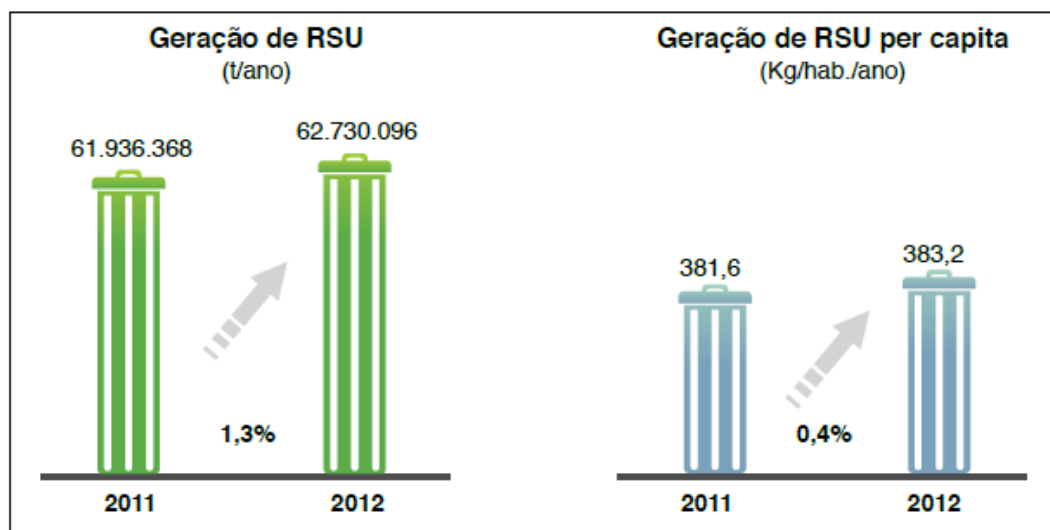


Figura 1.1 - Gráfico da Geração de RSU anual e per capita no Brasil nos anos de 2011 e 2012.

Fonte: Panorama ABRELPE (2012).

Dos referidos 201.051 toneladas de resíduos sólidos urbanos que são gerados no Brasil diariamente, uma fração de 51,4% é de resíduo orgânico (ABRELPE, 2012).

A decomposição natural ou biológica da fração orgânica dos RSU em condição anaeróbia acarreta a produção do biogás. A energia contida neste gás é proveniente basicamente do percentual de metano (CH_4) em sua composição. Em condições favoráveis, o CH_4 representa a faixa de 50 a 65% em volume do total de gás gerado.

O poder calorífico do biogás é em média $9,9 \text{ kWh/m}^3$ (Firmo, 2006 apud Alves, 2008). Esta energia pode ser utilizada de várias formas a depender da técnica de aproveitamento adotada: energia elétrica, gás veicular, energia térmica, metano, entre outras. A geração de energia elétrica a partir do biogás representa quase 70% das formas de aproveitamento existentes nos EUA, sendo a mais recomendada para países como o Brasil (Willumsfn e Bach, 1993).

Além dos aspectos econômicos, o aproveitamento deste gás evitará as emissões de metano (CH_4) para a atmosfera, o qual é considerado um gás causador do efeito estufa, vinte e uma vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO_2).

PNUD (2010) estimou a produção de energia potencial em 56 municípios no país, considerando a vazão de biogás no decênio 2010/2020 e o resultado foi que há a possibilidade de se ter uma capacidade instalada de geração de 311 MW, o que, segundo o estudo poderia abastecer uma população de 5,6 milhões de habitantes, praticamente a cidade do Rio de Janeiro. Dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012), afirma a oferta interna de energia elétrica por biomassa em 2011 foi de 6,6%, sendo incluída lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações. Atualmente, o processo de aproveitamento energético de biogás vem se difundindo como uma forma de tratamento de resíduos por vários países, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, às capacidades dos recursos humanos, aos recursos financeiros e à cultura.

Neste projeto serão utilizados reatores anaeróbios compostos de fração orgânica (resto de alimentos), biodegradáveis (matéria orgânica), inóculo e solução nutritiva, nos quais ocorrerão atividades metabólicas para a conversão do material orgânico complexo (carboidratos, proteínas e lipídios) em metano, dióxido de carbono, amônia dentre outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

O inóculo é rico em micro-organismos anaeróbios capazes de acelerar o tempo de bioestabilização. A adição do inóculo propicia substancialmente a rentabilidade de produção de biogás. A solução nutritiva é um agente tamponante, o qual tem a função de manter o pH estável, proporcionando a redução significativa do tempo de retenção de sólidos.

Os reatores anaeróbios serão estimados através do teste do *Potencial Bioquímico do Metano* (BMP), o qual avalia a capacidade de biodegradação dos resíduos por meio da produção total de Biogás.

O teste BMP apresenta-se como a ferramenta que mais se aproxima da realidade, ressaltando ainda que não existem normas técnicas (NBR) no país que abordem as questões de métodos de avaliação da geração e emissões de gases nos aterros, podendo dessa forma induzir ao erro, no que diz respeito, à estimativa de geração de biogás. Portanto, é importante estimar a geração de biogás para poder dimensionar uma usina de beneficiamento energético.

1.2. Justificativa e Relevância do Estudo

A conversão biológica dos resíduos sólidos com fins energéticos é realizada através do biogás o qual tem como principal componente o gás metano. A presença desse gás na atmosfera afeta a temperatura do sistema climático da Terra, por isso é um dos gases causadores do efeito estufa. Os gases do efeito estufa (GEE) são capazes de reter o calor do sol na atmosfera, formando uma espécie de cobertor em torno do planeta, impedindo que ele escape de volta para o espaço, este fenômeno se torna um problema ambiental, quando a emissão de gases do efeito estufa (como o gás carbônico, o metano e o óxido nitroso) é intensificada através dos lixões e dos aterros sanitários. Abreu et al. (2002) define bem essa questão do aproveitamento do biogás: “Ao captá-lo, canalizá-lo e utilizá-lo para gerar energia, com tecnologia disponível, a poluição decresce de maneira significativa, poupa-se a atmosfera e elimina-se o cheiro típico dos aterros. Sendo assim, utilizar o biogás como fonte de energia é um destino nobre”.

Portanto, o estudo da biodegradação e geração de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos tem sido considerado de extrema importância ambiental e econômica, devido ao elevado teor de metano na composição do biogás. O biogás gerado poderá ser usado no próprio aterro transformado em energia elétrica ou de outras formas como em sistemas de calefação ou como combustível veicular, sendo que neste último caso, ele deverá passar por um sistema de beneficiamento que aumentará seu teor de metano, aumentando assim, seu poder calorífico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Estimar, através do teste BMP, a quantidade de Biogás produzido no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Investigar parâmetros físico-químicos do lodo anaeróbio e dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário;
- Realizar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário;
- Monitorar as condições de temperatura, umidade, pressão e gases para avaliação do processo de decomposição anaeróbia do lixo;
- Aperfeiçoar a execução do protocolo do Teste BMP.

1.4. Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos.

O **Capítulo 1** é a introdução, a qual aborda os aspectos gerais dos resíduos sólidos junto ao biogás, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos a serem alcançados.

O **Capítulo 2** consiste na revisão bibliográfica, o qual referencia várias pesquisas embasadas na área de estudo, constituindo uma síntese analítica das informações consideradas relevantes e importantes para esta pesquisa.

O **Capítulo 3** é a metodologia. Descreve detalhadamente cada etapa estudada e analisada em laboratório através dos métodos utilizados. Tem como foco principal a

caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos e o Teste do potencial bioquímico do metano.

O **Capítulo 4** trata dos resultados e discussões. São apresentados todos os dados obtidos nos testes, discutidos de forma minuciosa.

A conclusão desta pesquisa está focada no **Capítulo 5** e as perspectivas estão expostas no **Capítulo 6**.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, de serviços de saúde, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987).

Em função da periculosidade oferecida por alguns desses resíduos, a ABNT-NBR 10.004 (2004) classificou os resíduos como: *Resíduos Classe I* (perigosos): pelas suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou apresentarem efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada; *Resíduos Classe IIA* (não perigosos – não inertes): incluem-se nesta classe os resíduos potencialmente biodegradáveis ou combustíveis; *Resíduos Classe IIB* (inertes): perfazem esta classe os resíduos considerados inertes e não combustíveis.

O parágrafo único do artigo 13 da Lei Federal nº 12.305/2010 instituída pela Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil considera resíduos domiciliares todo aquele gerado nas atividades comerciais e por prestadores de serviços (desde que não sejam serviços de saúde, construção civil e de transportes), caso os mesmos não tenham sua classificação como resíduos perigosos.

2.1.1. Geração e Coleta dos RSU

De acordo com Santos (2005), a globalização acaba por criar dificuldades administrativas, materiais e técnicas em muitos setores dos países em desenvolvimento, pelo estabelecimento de padrões incompatíveis com as realidades locais. Especificamente na gestão dos resíduos sólidos urbanos, a globalização tem influenciado no comportamento e no pensamento das pessoas e nas disputas das empresas pela conquista de novos mercados, resultando em conflito entre o desejo de um modelo de gestão e a sua viabilidade.

Nos Estados Unidos, afirma a EPA (*Environmental Protection Agency*), que 55% dos resíduos sólidos urbanos vão para aterros, 30% são reciclados ou compostados e 15% são incinerados (Miller Jr, 2007). Barlaz & Loughlin (2005) mostram uma especificidade interessante, cita que o governo dos Estados Unidos optou pela descentralização da gestão de seus resíduos, delegando aos estados uma grande autonomia quanto à gestão dos resíduos sólidos urbanos que, por sua vez, estabeleceram programas e planos que geralmente incluíam: desvio dos materiais recicláveis da disposição em aterros e a cobrança, da população, de taxas específicas para o serviço de gestão dos resíduos sólidos (Andrade *et al.*, 2011).

No Japão, a composição média de seus resíduos sólidos urbanos gira em torno de: 40% de papel, 20% de plásticos, 17% de orgânicos, 10% de vidro, 6% de metais e 7% de outros (Mendes & Imura, 2004 *apud* Andrade *et al.*, 2011). Por ser um país altamente urbanizado, populoso e espacialmente pequeno, sofre sérios problemas quanto à disposição final de seus resíduos tendo como alternativa a incineração. Através de 1.800 incineradores são tratados cerca de 70% de seus resíduos (Barlaz & Loughlin, 2005 *apud* Andrade *et al.*, 2011). Em aterros são depositados apenas 12% (Miller Jr., 2007). Segundo Barlaz & Loughlin (2005) *apud* Andrade *et al.* (2011), devido aos problemas oriundos dos poluentes dos incineradores na década de 1990, o governo japonês vem procurando programar políticas de reciclagem por meio de regulamentações sobre embalagens e subsídios para programas de reciclagem, entre

outras medidas. Miller Jr. (2007) afirma que no Japão produz por pessoa algo em torno da metade da produzida nos Estados Unidos.

Na União Europeia, por mais que ainda exista uma considerável diferença entre os países membros, a geração de resíduos sólidos também é bastante acentuada. Na Figura 2.1 podemos verificar os métodos de tratamento e a disposição final de boa parte dos seus países.

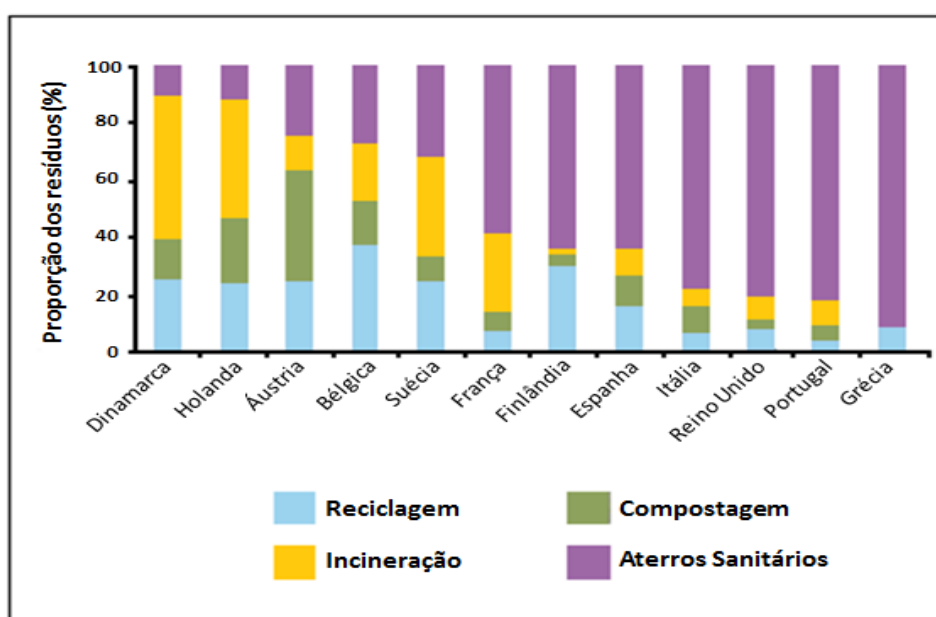


Figura 2.1 – Tratamento e destinação final em alguns países da Europa (2004).

Fonte: Andrade *et al.*, 2011.

Nesse bloco econômico, a temática da gestão de resíduos sólidos está sendo regulamentada pela Diretiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999. Dentre várias regras e restrições presentes nessa lei, existe a previsão de que “[...] até 2014 praticamente todos os resíduos deverão ser pré-processados antes da disposição final em aterros sanitários” (Eigenheer *et al.*, 2005 *apud* Andrade *et al.*, 2011).

Segundo Miller Jr. (2007), a Dinamarca foi a primeira a banir todos os recipientes não recicláveis de bebidas; na Finlândia 95% dos recipientes de refrigerantes e bebidas alcoólicas são reutilizáveis, sendo que essa porcentagem está próxima a 75% na

Alemanha; para incentivar as pessoas a usarem sacolas reaproveitáveis, as lojas na Holanda e Irlanda cobram pelas mesmas, o que resultou em redução entre 90% e 95% no uso de sacolas em ambos os países. Através desses números expostos sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos nos países centrais, percebem-se características marcantes como os resíduos que já chegam aos aterros com um pré-tratamento, ou seja, compostagem, reciclagem e incineração são apenas alguns exemplos do que as prefeituras vêm utilizando, além de aperfeiçoarem o tempo de vida dos respectivos aterros sanitários.

No Brasil, a ampliação da coleta domiciliar e da disposição adequada dos resíduos ainda são etapas a ser vencida, a produção de resíduos sólidos urbanos é crescente e os padrões atingidos pela reciclagem são pouco significativos no conjunto do total gerado. Dados da ABRELPE mostram que a quantidade de RSU gerados aumentou em 2012 se comparados a 2011 (Figura 1.1), porém a coleta em 2012 cresceu em todas as regiões. A região sudeste continua respondendo por mais de 50% dos RSU coletados e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país. A região nordeste vem em segundo lugar, com 22,1% do total, como mostra a Figura 2.2.

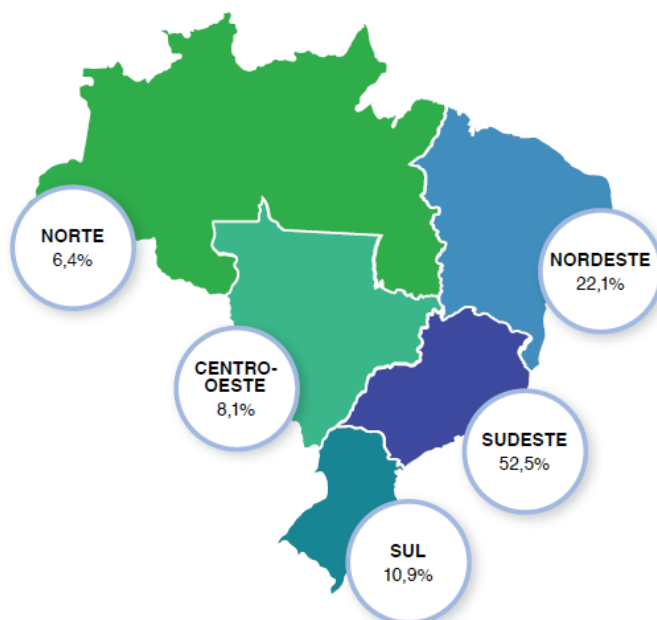


Figura 2.2 - Participações das Regiões do Brasil no Total de RSU coletado

Fonte: Panorama ABRELPE, 2012.

Os 1.794 municípios dos nove Estados da região Nordeste geraram, em 2012, a quantidade de 51.689 toneladas/dia de RSU, das quais 77,43% foram coletadas. Os dados indicam crescimento de 2,4% no total coletado e aumento de 1,4% na geração de RSU em relação ao ano anterior. (ABRELPE, 2012). A Tabela 2.1 mostra a geração e coleta de RSU no Estado do Nordeste.

A comparação entre os dados relativos à destinação de RSU em 2012 e 2010 resulta num aumento em torno de 5,8% na destinação final ambientalmente adequada em aterros sanitários, no entanto entre os dados relativos a 2011 e 2012 não houve evolução. Dos resíduos coletados na região do nordeste, cerca de 65%, correspondentes à média de 26 mil toneladas por dia, ainda são destinados para lixões e aterros controlados (ABRELPE, 2012).

Tabela 2.1 - Geração e Coleta dos RSU no Estado do Nordeste.

Estados do Nordeste	População Urbana 2011	Geração de RSU (t/dia)	RSU Coletado (t/dia)
Alagoas	2.336.035	2.807	2.299
Bahia	10.241.337	13.620	10.754
Ceará	6.471.917	9.060	7.108
Maranhão	4.238.099	6.754	4.061
Paraíba	2.880.280	3.405	2.754
Pernambuco	7.159.178	8.471	7.118
Piauí	2.081.271	3.033	2.011
Rio Grande do Norte	2.514.779	2.795	2.432
Sergipe	1.554.858	1.744	1.486
Total	39.477.754	51.689	40.023

Fonte: Adaptada de Panorama ABRELPE, 2012.

A Paraíba registrou uma geração de RSU na marca de 3.405 t/dia, sendo coletados aproximadamente 81% correspondente a 2.754 t/dia. Do total de RSU coletado na

Paraíba, aproximadamente 30% é na capital, João Pessoa, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Coleta de RSU nas Cidades e Capitais com Populações Superiores a 500 mil habitantes – Região Nordeste

Município	UF	População Urbana 2011 (hab)	Qtde. RSU Coletada (t/dia)	Qtde. RSU Coletada (Kg/hab/dia)
Aracajú	SE	579.563	592,0	1,021
Feira de Santana	BA	515.974	551,9	1,070
Fortaleza	CE	2.476.589	3.650,0	1,474
Jaboatão dos Guararapes	PE	635.660	653,8	1,029
João Pessoa	PB	730.393	786,5	1,077
Maceió	AL	942.478	1.023,7	1,086
Natal	RN	810.780	1.008,0	1,243
Recife	PE	1.546.516	1.995,0	1,290
Salvador	BA	2.692.869	3.679,5	1,366
São Luís	MA	970.224	1.075,2	1,108
Teresina	PI	775.247	835,7	1,078

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2011.

É sempre importante frisar que a coleta seletiva não abrange a totalidade da área urbana, podendo estar restrita à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou por meio de cooperativas de catadores para a execução dos serviços.

A coleta seletiva foi definida na Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, como a coleta de resíduos sólidos previamente separados de acordo com sua constituição e composição, devendo ser implementadas pelos municípios como forma de encaminhar as ações destinadas ao atendimento do princípio da hierarquia na gestão de resíduos sólidos, dentre as quais se inclui a reciclagem.

2.1.2. Composição Gravimétrica dos RSU no Mundo

A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos é uma espécie de avaliação preliminar da degradabilidade, do poder de contaminação e das possibilidades de reciclagem, reutilização e valorização energética e orgânica dos RSU. É de grande importância na definição das tecnologias mais adequadas ao tratamento e disposição final dos resíduos. A caracterização gravimétrica consiste na obtenção de percentuais, em peso, dos principais componentes do lixo, tais como: papel, papelão, plástico, podas, vidro, metais, dentre outros. As características dos RSU são influenciadas por vários fatores como: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população; condições climáticas e sazonais; as mudanças na política econômica de um país também são causas que influenciam na composição dos resíduos sólidos de uma comunidade (Jardim *et al.*, 1995).

A intensidade da caracterização é definida de acordo com o objetivo principal que se quer atingir, podendo tornar-se mais relevante à caracterização de um ou mais componentes. A forma e os aspectos da caracterização são amplos e suas amostragens variam de acordo com as categorias e métodos relacionados a cada pesquisador.

Alcântara (2007) cita algumas metodologias da literatura internacional, como: I. Metodologia DGQA (Direção Geral da Qualidade do Ambiente), definida para quantificação e caracterização de RSU em nível municipal - Portugal; II. Metodologia do REMECOM (Réseau Européen de Mesures pour la Caractérisation des Ordures Ménagères), estabelecida a partir de uma reunião técnica entre dezoito localidades de seis países europeus (Lipor, 2000); III. Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste (ASTM, 2003); IV. Waste Composition Analysis - Department for Environment Food & Rural Affairs (DEFRA, 2004) e V. Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA, 2004). Sharma & McBean (2007) sugerem uma metodologia simplificada para caracterização dos resíduos sólidos.

A Tabela 2.3 mostra o perfil qualitativo dos RSU gerados em alguns países e a Tabela 2.4 mostra o perfil qualitativo dos RSU gerados em algumas cidades do Brasil, utilizando algumas das citadas metodologias.

Tabela 2.3 - Perfil qualitativo dos RSU gerados em alguns países.

País	Matéria Orgânica (%)	Papel e papelão (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Têxteis (%)	Outros (%)
África do Sul ¹	31,0	33,0	7,0	12,0	7,0	-	10,0
Alemanha ²	44,0	18,0	5,0	9,0	3,0	-	20,0
Brasil ³	52,5	24,5	2,9	1,6	2,3	-	16,2
Canadá ¹	33,9	38,9	4,9	6,5	6,2	-	9,6
Espanha ¹	52,0	15,0	6,0	6,0	2,5	-	18,5
França ²	25,0	31,0	10,0	12,0	6,0	4,0	12,0
Holanda ²	52,0	25,0	8,0	5,0	4,0	2,0	5,0
Índia ³	78,0	2,0	-	-	-	-	20,0
Itália ²	47,0	23,0	7,0	6,0	3,0	-	14,0
Japão ¹	22,2	31,1	15,9	13,8	6,4	-	10,6
México ³	54,4	20,0	3,8	8,2	3,2	-	10,4
Portugal ²	60,0	23,0	4,0	3,0	4,0	-	6,0
Peru ³	51,4	10,0	3,2	1,3	2,1	-	32,0
Reino Unido ²	20,0	35,0	11,0	9,0	7,0	2,0	16,0
Suíça ²	30,0	31,0	15,0	8,0	6,0	3,0	7,0
Turquia ²	19,0	37,0	19,0	9,0	7,0	-	18,0
Escócia ⁵	31,9	24,3	11,5	6,6	7,1	5,1	17,1
U.S.A ⁴	11,4	35,7	11,1	5,5	7,9	-	28,4

Fonte: ¹Otero Del Peral (1992) e Carra & Cossu (1990) *apud* Palma (1995); ²Write (1995); ³Philippi Jr. (1999) *apud* D`Almeida & Vilhena (2000); ⁴EPA (2003); ⁵SEPA (2004). Adaptado de Alcântara, 2007.

Tabela 2.4 - Perfil qualitativo dos RSU gerados em algumas cidades do Brasil.

Cidade	Matéria Orgânica (%)	Papel e papelão (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Outros (%)
Brasília ¹	50	26	15	-	2,5	6,5
Belo Horizonte ²	61,6	9,5 (papel)	10,9	2,8	2,3	12,9
Salvador ³	-	16,2	17,1	2,9	3,7	60,2
São Carlos/SP ⁴	56,7	21,3	8,5	1,4	5,4	6,7
São Paulo ⁵	49	19	23	02	04	03
Rio de Janeiro ⁶	60,7	13,5	15,3	3,2	1,6	5,7
*Palmas ⁷	63	10,7	11,4	2,4	5,9	6,6
Recife ⁸	46,3	12,2	19,4	1,0	1,9	19,2

Fonte: ¹Junqueira (2000); ²SMLU (2004) *apud* Catapreta et al. (2007); ³D´Almeida & Vilhena (2000); ⁴Povinelli & Gomes (1991); ⁵Limpurb (1999) *apud* Ziglio (2002); ⁶COMLURB (2005); ⁷Naval & Gondim (2001); ⁸Mariano et al. (2007). *RSU Residencial – Valores médios considerados análises em períodos distintos. Adaptado de Alcântara, 2007.

A ABRELPE (2012) e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos apresentam composições gravimétricas médias dos RSU coletados no Brasil, que permite visualizar de um modo geral a participação de diferentes materiais na fração total dos RSU (Tabela 2.5 - Figura 2.3). A referida composição, porém, é bastante diversificada nas diferentes regiões, uma vez que está diretamente relacionada com características, hábitos e costumes de consumo e descarte da população local.

O método de pesquisa para composição gravimétrica dos RSU utilizado pela ABRELPE são questionários, os quais são direcionados as prefeituras das cidades a serem avaliadas.

Através dos dados mostrados por Alcântara (2007) e pela ABRELPE (2012) nas Tabelas 2.4 e 2.5, pode-se perceber que o teor de matéria orgânica nos resíduos sólidos urbanos no Brasil é em torno de 50%.

Tabela 2.5 - Composição Gravimétrica do total de RSU coletados no Brasil.

Material	Participação (%)	Quantidade (Ton/ano)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, Papelão e Tetrapak.	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
Total	100,0	56.561.856

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2012.

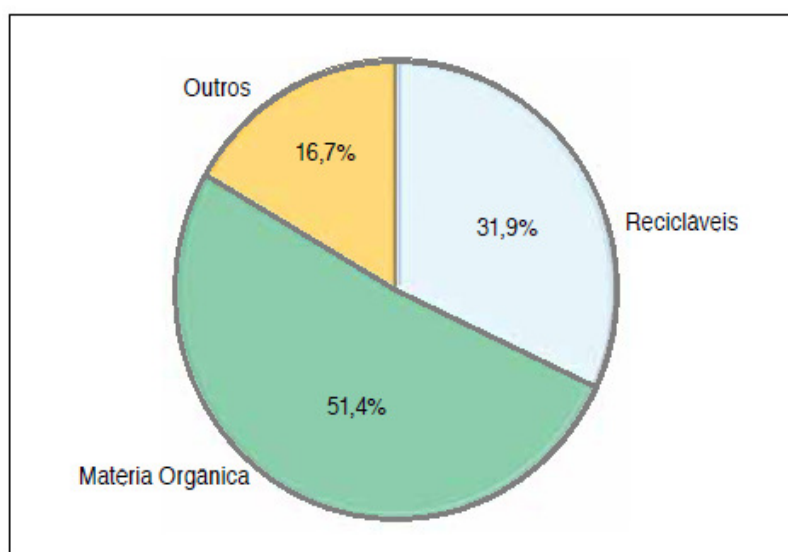


Figura 2.3 - Gráfico da Composição Gravimétrica do total de RSU coletado no Brasil.

Fonte: ABRELPE, 2012.

2.1.2.1. Composição gravimétrica dos RSU do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB

A cidade de João Pessoa, que representa o principal centro político, econômico e cultural do Estado, destaca-se na rede urbana paraibana por sua liderança político-

administrativa e, sobretudo, pela importância do seu amontoado urbano que abrange os municípios vizinhos como Cabedelo, Bayeux e Santa Rita, constituindo a chamada Grande João Pessoa.

João Pessoa, a capital do Estado da Paraíba, está localizado na porção extrema oriental do continente americano, com longitude oeste de 34°47'30" e latitude sul de 7°09'28. O local é conhecido como a Ponta do Seixas.



Figura 2.4 – Fração do mapa da Paraíba

Fonte: <http://www.brasil-turismo.com/imagens/mapa-paraiba.jpg>

Limita-se ao norte com o município de Cabedelo através do Rio Jaguaribe, ao sul com município do Conde pelo Rio Gramame, ao leste pelo Oceano Atlântico, a oeste com o município de Bayeux pelo Rio Sanhauá e a sudeste e noroeste com o município de Santa Rita pelo Rio Mumbaba e Paraíba respectivamente.

A capital da Paraíba foi fundada em 1585, denominada João Pessoa em 1930. Possui atualmente cerca de 750.000 habitantes com uma área de 210,8 Km², com 427 anos, é considerada a segunda capital mais verde do mundo, com mais de sete m² de floresta por habitante, possui temperatura amena, num clima decididamente tropical, média de 26 °C.

A limpeza urbana na cidade de João Pessoa é de responsabilidade da EMLUR - Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana, pertencente à prefeitura municipal. O setor de limpeza urbana tem como base legal o Decreto Lei 3.316 de 03/11/97, intitulado Regulamento de Limpeza Urbana do Município de João Pessoa.

A cidade conta hoje com um aterro sanitário que foi inaugurado em 05 de agosto de 2003, localizado no Engenho de Mussurê, distrito industrial da capital, com o objetivo de atender a demanda do lixo gerado pelas cidades de João Pessoa, Bayeux, Cabedelo, Conde, Pitimbu e Santa Rita. O projeto do aterro prevê a construção de 20 células para receber resíduos sólidos domiciliares. Depois de totalmente instalado, o aterro tem capacidade para tratar e destinar adequadamente 1.172 toneladas de lixo por dia durante 24 anos. O aterro sanitário de João Pessoa foi criado para substituir o antigo "lixão do Roger", que funcionou durante quatro décadas (Entrevista SUDEMA, 2002).

Segundo Costa *et al.* (2010) foram concedidos licenciamentos para cada um de seus componentes. Cada célula de deposição de resíduos domiciliares que tem uma vida útil de onze meses recebe um licenciamento próprio, sendo o único aterro no Brasil que tem esse tipo de gestão. A cada célula construída conforme projeto é requerido uma licença de operação para seu devido funcionamento, incluindo as atividades de drenagem de águas pluviais e de drenagem e tratamento do chorume.

O tratamento do biogás gerado no ASMJP é feito através da simples queima, reduzindo a emissão de gás metano diretamente na atmosfera, liberando o gás carbônico. O monitoramento dos gases é feito a partir de poços instalados nas células que são interligados com a Planta de Extração e Combustão de Biogás – PECB, onde são

medidos os gases metano e oxigênio, além da pressão e temperatura da queima. Outros gases, como o sulfídrico e amônia, são medidos na caixa de coleta do lixiviado oriundos de cada célula (Costa *et al.*, 2010).



Figura 2.5 - Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP)

Fonte: www.sudema.pb.gov.br

Em relação aos métodos de composição gravimétrica para os RSU são diversos e cada autor opta pelo que achar mais conveniente ao projeto. As categorias também são definidas de acordo com a metodologia escolhida, existindo, devido a isso, algumas diferenças de composições gravimétricas. Nos últimos doze anos, foram realizados quatro campanhas de caracterização dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa. Em 1998, 2001 e 2006 por Flores Neto, com indicativo de matéria orgânica de 68,26%, 59,56% e 61,34, respectivamente. E em 2003, por GRS, com 60,08% de matéria orgânica.

2.1.2.2. MODECOM - *Método de Caracterização dos Resíduos Domésticos*

O MODECOM é uma metodologia de análise que foi desenvolvido pela ADEME, em colaboração com o BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières - Escritório de Pesquisa Geológica e Mineração), o CEMAGREF (La Recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement - Pesquisa de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente) e a empresa TIRU (Traitement Industriel des Résidus Urbains - Tratamento de Resíduos Industriais Urbanos).

Segundo De Araújo Morais (2006), esta metodologia foi aplicada durante a campanha nacional da França para a caracterização dos resíduos domésticos em 1993, com a finalidade de especificar a composição do lixo doméstico e estimar a percentagem dos componentes potencialmente recuperáveis.

Uma amostra representativa dos resíduos é coletada, em seguida, é classificado por tamanho do grão e por tipo de resíduo. O MODECOM considera a separação de resíduos em três frações granulométricas: 1º elementos finos, <20 mm, separadas em duas sub frações: finos grossos (8 - 20 mm) e finos pequenos (<8 mm); 2º os elementos médios, 20 - 100 mm; 3º os elementos grosseiro, mm> 100 (De Araújo Morais, 2006).

De Araújo Morais (2006) afirma que este método de caracterização é também recomendado para separar uma amostra em treze categorias, sendo elas: resíduos putrescíveis, papel, papelão, composto, tecidos, têxteis sanitários, plásticos, combustíveis não classificados, vidros, metais, perigosos e as partículas finas (<20 mm).

A fração de resíduos chamado putrescível consiste em resíduos alimentar, resíduos de jardins, dentre outros chamados de material orgânico natural.

2.1.2.3. Fração Orgânica do Resíduo Sólido Urbano Padrão - FORSup

Segundo Pinto (2000), a fração orgânica equivale só à parcela “úmida” dos resíduos, conhecida como “resíduos alimentares”. Esses resíduos são fartamente encontrados nos resíduos sólidos domiciliares, em proporções de até 65%. Refere-se aos resíduos orgânicos originados do preparo da alimentação humana, representada e caracterizada especificamente pelos restos de alimentos crus ou preparados. Em geral, estes resíduos são gerados nas próprias residências, restaurantes (comerciais, hospitalares, universitários), Ceasas, Supermercados, Shopping Centers entre outros.

De Araújo Moraes (2006) cita que Castilhos Jr (1988) ressaltou que a variedade e a complexidade dos resíduos sólidos é uma questão delicada do ponto de vista experimental, a coleta aleatória dos resíduos orgânicos em locais de disposição com finalidade de serem utilizados em estudos que exijam padronização, fica impossibilitada pela sua heterogeneidade.

Pinto (2000) propôs uma metodologia com composição e granulométrica definidas, a qual foi analisada em biorreatores operados em regime de batelada. A pesquisa concluiu que a composição encontrada, apresentou uma partida rápida e equilibrada, com imediata e elevada produção de metano e degradação de sólidos totais superiores a 50%, em um período de 150 dias, atingindo a estabilização na produção de metano após 50 dias do início do processo de digestão com a composição do gás metano em torno de 60% do Biogás.

A metodologia proposta, com seus respectivos percentuais, está apresentada na Tabela 2.6.

Vale salientar que a granulometria dos alimentos é de grande importância no processo de digestão.

Tabela 2.6 - Valores percentuais dos elementos utilizados na elaboração da FORSup.

Categoria	% Em massa da categoria na FORSup	Elemento	% Em massa componente na FORSup
Frutas	30,0	Casca/Bagaço de laranja	17,80
		Casca de banana	3,80
		Pedaços de tomate	4,60
		Casca de melancia	3,80
Legumes crus	11,0	Casca de batata	5,50
		Casca/Pedaços de cebola	2,30
		Casca de abóbora	1,60
		Casca/Pedaços de mandioca	1,60
Legumes cozidos	4,0	Casca/Pedaços de batata	1,30
		Pedaços de mandioca	2,70
Hortaliças	7,2	Alface	3,80
		Repolho	1,90
		Couve flor	1,50
Pão/bolo	3,0	Pão	3,00
Carne	2,0	Pele/Pedaços de frango crus	1,30
		Pele/Pedaços de carne crus	0,70
Café	3,5	-	3,50
Folhas	10,8	Seca	9,20
		Verde	1,60
Queijo	0,4	-	0,40
Arroz	11,2	-	11,20
Feijão	4,7	-	4,70
Macarrão	2,2	-	2,20
Osso	1,8	Frango	1,8
Outros	8,2	Papel Úmido	5,00
		Casca de ovo	3,20

Fonte: Adaptado de Pinto (2000) apud Barcelos (2009).

Fritsch (2006) comenta que quanto menor a partícula, maior é a superfície que pode ser atacada e digerida pelos micro-organismos. Teoricamente, uma partícula menor tem um somatório de área e assim teriam um ataque intenso dos micro-organismos, porém uma granulometria muito fina e possivelmente, traria sérios problemas de aeração, compactação e encharcamento. Quanto maior a granulometria, mais intensas serão as trocas de ar saturado de gás carbônico pelo ar atmosférico, trocas essas efetuadas

pelos fenômenos de difusão e convecção. Resumindo, as partículas muito pequenas podem comprometer a aeração e as partículas grandes, por terem pouca umidade, desaceleram a decomposição. Por fim, Pereira Neto (1989) comenta que o tamanho da partícula também é limitado por fatores de ordem operacional, sendo o aspecto econômico o principal, relacionado ao alto custo dos equipamentos de trituração.

Barcelos (2009) comenta que diversos estudos têm sido realizados na área de digestão de resíduos sólidos urbanos usando apenas a fração orgânica. Para demonstrar tal tendência, na Tabela 2.7 é apresentado um resumo dos dados de alguns sistemas experimentais investigados e disponíveis na literatura científica.

Tabela 2.7 – Resumo da revisão bibliográfica sobre digestão anaeróbia de RSU.

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temp. (°C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Foster - Carneiro <i>et al.</i> (2006)	FORSU	Esterco bovino, esterco suíno e lodo de esgoto.	30	55	60	43 (STV)
Agdag e Sponza (2007)	FORSU	Lama de esgoto industrial	32, 38 e 45.	35-40	150	83. 87 e 89 (DQO)
Capela <i>et al.</i> (2007)	FORSU	Lodo de esgoto industrial e esterco bovino.	05	35	65	65 (SVT)

Fonte: Adaptado de Barcelos, 2009.

Verifica-se que diversas pesquisas experimentais têm sido realizadas na área de digestão anaeróbia e, no geral, são obtidos bons resultados de eficiência de remoção de matéria orgânica (Barcelos, 2009).

2.2. Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Urbanos

Para a produção do biogás, o resíduo sólido urbano é metabolizado, através da digestão anaeróbia, por uma mistura de micro-organismos capazes de metabolizar carboidratos, lipídeos e proteínas produzindo, principalmente, metano (CH₄), dióxido de

carbono (CO₂) e material celular (Junior, 1994 & Santos, 2001).

O processo de digestão anaeróbio é conhecido como biometanização e compreende um sistema biológico delicadamente balanceado, no qual cada microrganismo tem uma função essencial. A biometanização é um processo de estabilização biológica em que um consórcio de diferentes tipos de micro-organismos, na ausência de oxigênio molecular, promove transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples como metano e gás carbônico. Para que essa transformação ocorra, distinguem quatro etapas principais no processo global da conversão da matéria orgânica: I. Hidrólise, II. Acidogênese, III. Acetogênese e IV. Metanogênese (Bueno, 2010).

O detalhe de cada grupo microbiano envolvido na biometanização dos resíduos sólidos urbanos será descritos a seguir:

1ª Etapa: Hidrólise

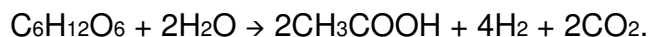
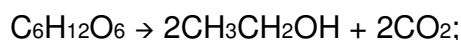
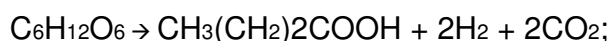
A hidrólise é a etapa inicial e, por isto, deve-se ficar atento a sua velocidade de reação, pois poderá limitar todo o processo de digestão anaeróbia. A hidrólise consiste na conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos, através da ação de exo enzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Na anacrobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado. Alguns desses fatores são: temperatura operacional do reator; tempo de residência do substrato no reator; composição do substrato (ex.: teores de lignina, carboidrato, proteínas e gordura); tamanho das partículas; pH do meio; concentração de NH₄; concentração de produtos da hidrólise dentre outros (Lettinga *et al.*, 1996 & Chernicharo, 2007).

2ª Etapa: Acidogênese

A acidogênese conduz à formação de ácidos graxos voláteis (AGV), CO₂ e H₂. Esta etapa pode ser rápida e levar a acidificação do meio. O pivô das fermentações dos

compostos (ácidos, álcool...) é o piruvato. O nível microbiológico, o passo de hidrólise - acidogênese é atingido por anaeróbios estritos ou facultativos. Algumas espécies têm uma atividade hidrolítica importante. Os seguintes tipos são os mais representados: Bacilos, Clostridium, Pseudomonas, Micrococcus, Alcaligenes. É essencial que os resíduos sólidos sejam adequadamente triturados para promover a biodegradação, e a digestão deve ser suficientemente agitado para permitir um bom contato entre os substratos e micro-organismos e boa sintropia entre diferentes populações. Por vezes é útil para separar as fases hidrólise - acetogênese e acidogênese - metanogênese em dois reatores em série (Gourdon, 2001 *apud* De Araújo Moraes, 2006).

Segundo Alcântara (2007), as prováveis reações que ocorrem na acidogênese, a partir da glicose, é:



3ª Etapa: Acetogênese

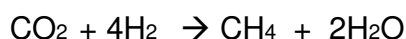
Segundo Gourdon (2001) *apud* De Araújo Moraes (2006), a conversão de AGV para acetato, principalmente CO_2 e H_2 , passo da acetogênese, é realizada por um grupo particular de bactérias estritamente anaeróbicas, as bactérias produtoras de hidrogênio forçado (APOH). Os produtos da acidogênese passam a servir como substratos para acetogênese. Todos os acetogêneses (APOH) produzem hidrogênio (H_2). Do ponto de vista termodinâmico, a degradação de AGV para acetato é possível desde que haja baixas pressões parciais de H_2 . Deve-se, por exemplo, ter o (H_2) $< 10^{-4}$ atm. para que o processamento de acetato propionato seja possível. É, portanto, muito estreita a sintropia entre bactérias acetogênicas e outras bactérias capazes de consumir o produto H_2 (metanogênicos e redutoras de sulfato).

Bactérias acetogênicas podem ter muito tempo de geração: 6 a 8 dias a 30°C durante a degradação do propionato, as *Syntrophobacter wolinii*, e durante a degradação do butirato, *Syntrophomonas wolfei* e *Clostridium bryantii*, respectivamente. Este grupo de bactérias é fundamental para o equilíbrio da população bacteriana durante digestão anaeróbia (Gourdon, 2001 *apud* De Araújo Moraes, 2006).

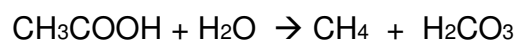
Alcântara (2007) comenta que nessa fase, poderá ocorrer ainda a redução de CO₂ para o acetato de hidrogênio (homoacetogênese). Essa rota metabólica não tem sido observada em aterros (Barlaz, 1996 *apud* Alcântara, 2007) e é pouco provável em reatores anaeróbios (Foresti *et al.*, 1999 *apud* Alcântara, 2007), pois as acetogênicas seriam superadas pelas hidrogenotróficas, uma vez que a formação de metano via H₂/CO₂ é termodinamicamente mais favorável (Megonigal *et al.*, 2004 *apud* Alcântara, 2007).

4ª Etapa: Metanogênese

Conforme Gourdon (2001) *apud* De Araújo Moraes (2006), as bactérias metanogênicas são bactérias anaeróbias estritas e muito específicas (estruturalmente e fisiologicamente), à medida que elas são consideradas correspondentes a uma classe de bactérias do reino protistas, elas também são bactérias capazes de usar um número muito pequeno de compostos carbono (formiato e metanol). Quase todas as espécies podem produzir metano a partir da mistura de hidrogênio e dióxido de carbono através da reação:



A produção de CH₄ à partir do acetato tem-se a seguinte reação:



A Figura 2.6 representa as quatro fases do processo de degradação anaeróbia.

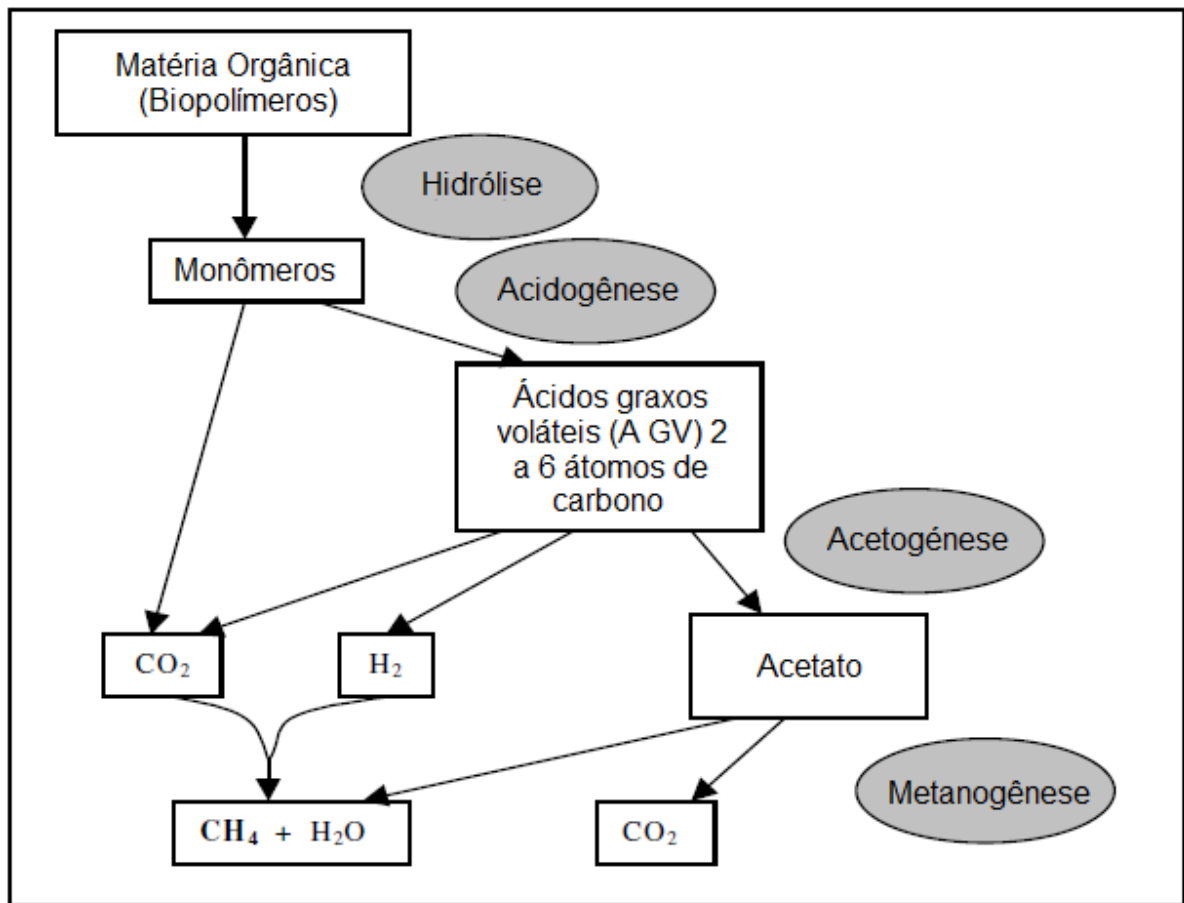


Figura 2.6 - As quatro etapas da metanização.

Fonte: Gourdon, 2001 apud De Araújo Moraes, 2006.

2.2.1. Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia dos RSU

Sabendo-se que no processo de digestão anaeróbia os micro-organismos mais sensíveis são os metanogênicos e, sendo estes de extrema importância para o equilíbrio do processo, todas as condições ambientais devem proporcionar meios ideais para o seu desenvolvimento.

Devido a isto, é de grande preocupação para a biometanização o controle dos seguintes fatores:

2.2.1.1. Temperatura

A temperatura tem importância significativa no processo de conversão de resíduos, pois tem a ver com a produção de gás e com a eficiência da atividade microbiana (Lima, 1988 apud Gadelha, 2005).

Segundo Alcântara 2007, nos processos biodegradáveis a temperatura é um parâmetro que implica balanços energéticos e, em geral, dentro de determinados limites, menor temperatura significa menor atividade e menor taxa de conversão do material orgânico presente nos RSU através da ação bioquímica dos micro-organismos. Os micro-organismos em geral e aqueles que atuam na degradação do material orgânico em aterros de RSU, mantidos sob condições anaeróbias, a depender da faixa de temperatura ótima de crescimento, podem ser agrupados em quatro categorias (Madigan *et al.*, 2002 apud Alcântara, 2007)

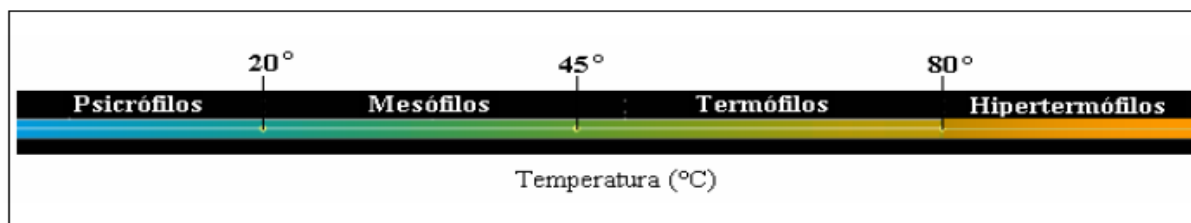


Figura 2.7 - Classificação dos micro-organismos em função da temperatura de crescimento.

Fonte: Alcântara, 2007.

As bactérias podem crescer em faixa de temperaturas mínima, ótima e máxima. Na temperatura ótima, as enzimas bacterianas estão na forma mais ativa, enquanto que na temperatura mínima as enzimas trabalham com menor eficiência e são, portanto, mais demoradas durante a conversão da matéria orgânica complexa em subprodutos. Na faixa máxima de temperatura, pode ocorrer a desnaturação das proteínas (destruição do arranjo molecular) causando a morte celular (Melo, 2003 apud Alves, 2008). As arqueias metanogênicas, por exemplo, são bastante sensíveis às bruscas mudanças de temperatura e se desenvolvem naturalmente, sob temperaturas mesófilas, de 30°C a 40°C e termofílicas, de 50°C a 60°C (Paes, 2003 apud Alves, 2008).

Em média, o crescimento ótimo está em torno de 37°C.

Souza (1984) afirma que ensaios realizados em escala piloto, com lodo de esgoto contendo elevadas concentrações de compostos tóxicos, parecem indicar que a digestão anaeróbia resiste mais a cargas de choque de compostos tóxicos, quando a temperatura está mais próxima da temperatura ótima.

2.2.1.2. Toxicidade

Segundo Foresti (1993) apud Barcelos (2009), durante décadas difundiu-se o conceito errôneo de que os processos anaeróbios seriam extremamente sensíveis a cargas tóxicas que provocariam a 'morte' da biota, e, conseqüentemente, o colapso dos reatores, na seguinte sequência de eventos: exposição das metano-bactérias a agentes tóxicos, acúmulo gradativo de ácidos voláteis e abaixamento do pH.

Os compostos tóxicos podem ter diferentes efeitos sobre as bactérias, podem ser bactericida quando as bactérias não se adaptam a determinadas concentrações do tóxico e bacteriostático quando se adaptam a determinadas concentrações de tóxico (Foresti, 1993). Ver-se na Figura 2.8 o efeito do produto tóxico quando for bacteriostático.

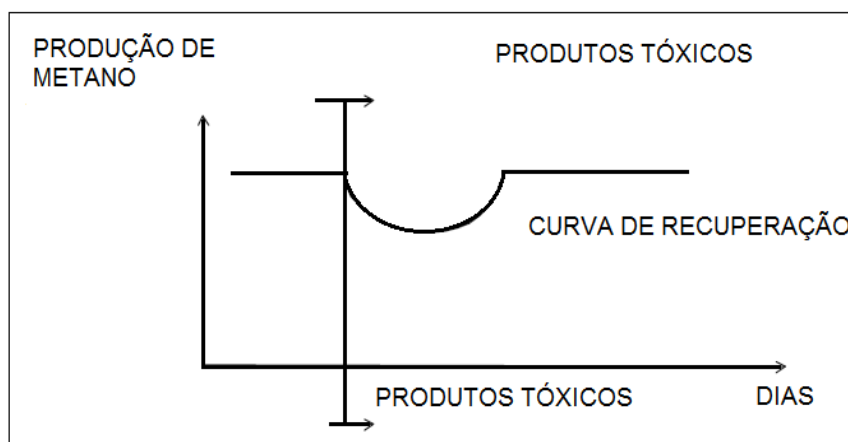


Figura 2.8 – Gráfico da produção de metano versus o tempo, com a aplicação de produto tóxico de efeito bacteriostático. Fonte: Foresti (1993) apud Barcelos (2009).

Os Metais não são biodegradáveis e podem até se acumular em concentrações potencialmente tóxicas. Em estudos a respeito do desempenho de digestores anaeróbios, foi encontrado que a toxicidade de metais pesados é uma das maiores causas de falhas em digestores. O efeito tóxico dos metais é atribuído muitas vezes por causar distúrbios nas funções e estruturas enzimáticas pela ligação de metais com tióis (grupos-SH) ou outros grupos orgânicos em moléculas proteicas, ou até mesmo por substituir metais que ocorrem naturalmente em grupos prostéticos de enzimas de muitos organismos (Chen *et al.*, 2008 *apud* Alves, 2008). Sendo assim, o metabolismo dos micro-organismos pode ser afetado por metais em diversos aspectos, tais como respiração, síntese proteica e transporte por membrana, acarretando na diminuição dos níveis de crescimento, aumento da fase lag e mudanças na morfologia e fisiologia dos microrganismos. No entanto, alguns micro-organismos podem adquirir adaptações fisiológicas e desenvolver habilidade de crescer em ambientes contaminados por metais pesados (Gomes *et al.*, 1998 *apud* Alves, 2008).

A precipitação extracelular do metal sob a forma de sulfetos, é outro exemplo de bioacumulação, já que envolve metabolismo ativo. Neste caso, ocorre uma precipitação do metal, após reação com o H_2S gerado pelas bactérias redutoras de sulfato, sob a forma de sulfeto metálico insolúvel (Mesquita, 1995 *apud* Alves, 2008).

Gadelha 2005, afirma que existe controvérsia sobre os limites de toxicidade de sulfetos. Em princípio, concentrações da ordem de 100 a 150 mg/L de sulfetos são consideradas inibitórias aos processos anaeróbios. O limite de operação de um digestor está situado entre 0,5% a 6% de gás sulfídrico na atmosfera do reator.

2.2.1.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH afeta o nível da atividade metabólica de vários microrganismos, os quais são bastante diversificados e sobrevivem em ambientes alcalinos, ácidos e neutros, sendo respectivamente denominados alcalofílicos, acidofílicos e neutrófilos. Os micro-organismos neutrófilos predominam em vários ambientes, entretanto, os limites máximo

e mínimo são estabelecidos sem, contudo, haver restrição para uma única condição de pH (Melo, 2003 *apud* Alves, 2008).

Gadelha (2005) comenta que o pH do meio anaeróbio está diretamente relacionado com as concentrações dos álcalis e dos ácidos no sistema. Bruscas alterações do pH afetam consideravelmente a atividade dos organismos metanogênicos, (Bidone e Povinelli, 1999 *apud* Gadelha, 2005). Os organismos metanogênicos são os mais sensíveis ao pH e a sua faixa ótima é de 6,6 a 7,4 (Kayahanian *et al.*, 1971 *apud* Gadelha, 2005).

2.2.1.4. Umidade

Alcântara (2007) afirma que a variação do percentual de água dos resíduos influencia em parâmetros associados ao seu comportamento mecânico e ao desenvolvimento e transporte de micro-organismos participantes do processo de degradação da matéria orgânica, sendo apontado por Chugh *et al.* (1998) e Vavilin *et al.* (2003), como um dos fatores críticos que afetam a biodegradação de RSU. Fritsch (2006) faz uma observação importante, diz que uma determinada quantidade de umidade é necessária no processo, uma vez que, os micro-organismos só são capazes de absorver os nutrientes que se encontrem na fase dissolvida. Além disso, a água é necessária aos processos metabólicos e à construção de biomassa, que é constituída por mais de 70% de água.

Alves (2008) afirma que a umidade, além de suprir as necessidades dos micro-organismos através da mobilização de nutrientes e substratos, possibilita o transporte de enzimas e outros produtos microbianos por todo o sistema. Contudo, a umidade isoladamente não constitui um fator fundamental, mas deve-se considerar a necessidade de associação com outros parâmetros como temperatura, pH, compactação e composição do lixo (Merbach Jr., 1989 *apud* Alves, 2008).

Paes (2003) comenta que até um determinado nível de umidade pode haver estímulo

de produção de biogás, no entanto, infiltrações excessivas podem causar retardamento da sua produção.

Na pesquisa realizada por Kasali *et al.* (1990) foram observados aumentos da produção e metano nas etapas de degradação anaeróbia em substratos contendo umidade crescente na faixa de 60 a 75% e queda quando chegou a 80% de umidade (Gadelha, 2005).

2.3. Inóculo e Aclimação.

A digestão anaeróbia é um processo complexo que requer a presença de diversos microrganismos. Neste contexto é importante encontrar um inóculo apropriado que contenha os micro-organismos necessários para o processo de degradação (Aquino *et al.*, 2008).

No caso de lodo proveniente de lagoas anaeróbias, segundo Cassini (2003), a digestão anaeróbia apresenta vantagem significativa em relação ao processo, pois é gerador de biogás, podendo ser utilizado como fonte de energia, possui baixo custo de instalação e tem maior facilidade operacional. No tocante aos sólidos presentes no esgoto e que sedimentam na lagoa, sua fração orgânica é decomposta pelos micro-organismos anaeróbios, sendo transformados em biogás (CH_4 e CO_2 , principalmente), produtos solúveis intermediários da decomposição e material sólido mineralizado (Franci *et al.*, 2000). No entanto, pode acontecer do efluente conter compostos que em certas concentrações podem ser tóxicos à biomassa, estimulando o seu decaimento.

O lodo de lagoa anaeróbia, não é normalmente estudado como inóculo de reatores visando a produção do biogás (biometanização), assim como é estudado e aplicado em escala real, o lodo do reator UASB (*Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket – digestor anaeróbio de fluxo ascendente*). Segundo Abreu (2003) e Ramos (2008), 80% do inóculo escolhido para ser usado no processo de biogás utilizam lodos provenientes de reatores UASB, devido sua relação de sólidos totais e sólidos totais voláteis (STV/ST)

apresentarem-se em torno de 77%.

O inóculo tem a função de catalisar a reação, em particular, acelerar o processo de decomposição dos resíduos sólidos urbanos para que a produção do Biogás aconteça mais rápida, isto é, em um tempo reduzido. Para isso, o inóculo deverá apresentar uma boa quantidade de biomassa, contribuindo assim, para o desempenho do processo de digestão anaeróbia. Na Tabela 2.8, estão expostos resultados dos principais parâmetros físico-químicos de inóculos encontrados em pesquisas bibliográficas.

Tabela 2.8 - Resultados dos Parâmetros Físico-químicos em Pesquisas Bibliográficas.

Parâmetros	Valor	Observação	Referência
pH	6,8 – 7,4	Ideal	Cassini <i>et al.</i> (2003)
pH	6,7 – 6,72	Reator UASB	Ramos (2008)
Densidade (g/L)	1,02 – 1,03	Lodo Anaeróbio	Sperling <i>et al.</i> (2001)
Umidade (%)	90 – 100	-	Sperling <i>et al.</i> (2001)
ST (%)	2 – 6	Lodo de ETE	Cassini <i>et al.</i> (2003)
ST (%)	1,3	L.A. Eldorado/ES	Franci <i>et al.</i> (2000)
STV (%)	37,2	L.A. Eldorado/ES	Franci <i>et al.</i> (2000)
ST (mg/L)	21.862	Reator UASB	Ramos (2008)
STV (mg/L)	16.325	Reator UASB	Ramos (2008)
STV/ST (%)	74,7	Reator UASB	Ramos (2008)
ST (mg/L)	40.813	Reator UASB	Abreu (2003)
STV (%)	31.449	Reator UASB	Abreu (2003)
STV/ST (%)	77,07	Reator UASB	Abreu (2003)
N-NH ₃ (mg/L)	36 – 278	Tanque Séptico	Cassini <i>et al.</i> (2003)
DQO filtrada (mg/L)	63 – 199	Reator UASB	Cassini <i>et al.</i> (2003)
DQOfilt/DQOtotal (%)	60 – 69	Reator UASB	Abreu (2003)

Fonte: Adaptado de Silva, 2011.

O estudo do lodo anaeróbio usado como inóculo, na maior parte das vezes, recorre também ao estudo de uma aclimação. A aclimação tem a função de tornar o inóculo viável para digestão anaeróbia e conseqüentemente para a produção do biogás, fazendo com que o inóculo seja adaptado através de métodos que contribuam para a obtenção rápida e equilibrado dos micro-organismos.

Segundo Monteggia (2007), a fonte de carbono a ser usada na aclimação mantém o inóculo alimentado, tornando-o preparado para quando for adicionado ao reator. A glicose, a partir da qual compostos orgânicos como carboidratos, aminoácidos, lipídios e vitaminas, podem ser sintetizados, é a fonte de carbono mais utilizada.

O tempo de aclimação da biomassa depende das condições específicas do sistema, não sendo possível pré-estabelecer um tempo de adaptação padrão, porém para a realização dos testes devem ser definidos parâmetros como, tempo e concentração, pré-estabelecidos, com base nos resultados da caracterização físico-química do inóculo a ser aclimatado (Monteggia, 2007).

Na literatura, até o momento, não foi encontrado nenhuma relação ótima de percentagem de inóculo a ser adicionado para acelerar o processo de digestão. Segundo Barcelos (2009), para obter um processo balanceado, a quantidade de inóculo a ser adicionada dependerá da atividade metanogênica do inóculo e da taxa de produção inicial do substrato (quantidade da fração facilmente degradável). Para calcular a quantidade de inóculo utiliza-se a seguinte equação:

$$FI = \frac{ST_i}{ST_i + ST_s}$$

(Equação 2.1)

Onde:

FI = fator de inóculo;

ST_i = sólidos totais do inóculo;

ST_s = sólidos totais do substrato.

2.4. Geração do Biogás

Segundo Chambers & Potter (2002), a aplicação da digestão anaeróbia na América do Norte encontra-se, predominantemente, nos domínios da estabilização do lodo do esgoto urbano e no tratamento anaeróbio de efluentes industriais e agropecuários. Esta mobilização iniciou-se em 1973 com a crise do petróleo, que desencadeou a formação de grupos de pesquisa na América do Norte, Suíça, Alemanha e Grécia. Somente nos Estados Unidos, mais de sessenta unidades foram instaladas, mobilizando fundos do governo americano e de empresas privadas ligadas ao uso do gás ou à exploração de recursos energéticos alternativos, tais como: Aterro de Monterey Park (112.000 m³/ dia de gás metano), Aterro de San Fernando (100.000 m³/ dia), Aterro de Liosia – Atenas – Grécia (192.000 m³/ dia).

No Brasil, o tratamento de gases em aterros sanitários é praticamente todo feito através da queima do metano (CH₄) e liberação do dióxido de carbono (CO₂). Segundo Alcântara (2007), a composição do biogás é difícil de ser definida, pois depende do material orgânico utilizado e do tipo de tratamento anaeróbio que sofre. Em aterros onde o processo de degradação ocorre predominantemente sob condições anaeróbias, os principais constituintes da fase gasosa, de acordo com Tchobanoglous *et al.* (1993), incluem o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e amônia (NH₃) além de diversos traços de gases, assim denominados por estarem presentes em quantidades muito pequenas.

Os gases produzidos em aterros durante a biodegradação dos resíduos podem percorrer diversos caminhos no interior das células. O metano, por exemplo, pode ser transformado em gás carbônico no interior do aterro pela ação de bactérias metanotróficas, através de reações de oxidação que ocorrem na superfície da célula de lixo e, dessa forma, na presença de oxigênio atmosférico (Alcântara, 2007). A Figura 2.9 mostra o esquema do balanço de gás em um aterro.

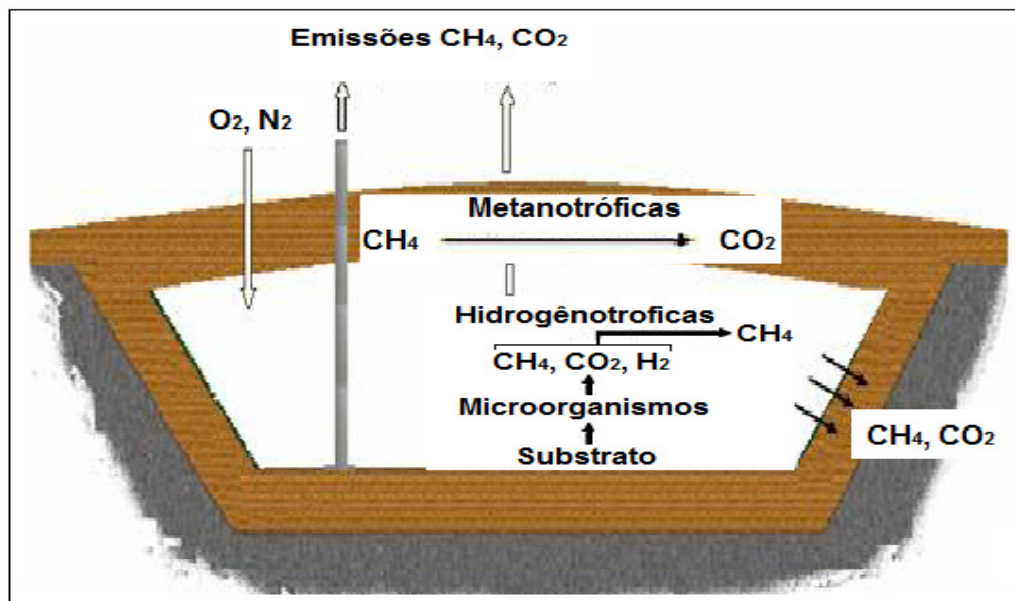


Figura 2.9 - Balanço de gás em aterros.

Fonte: Alcântara, 2007.

As reações de biodegradação da matéria orgânica que ocorrem no interior das células dos aterros são explicadas por Jucá (2003) através de cinco fases, são elas: 1ª Fase, fase aeróbia, o nitrogênio é predominante na massa do lixo em aproximadamente 80%, sendo os 20% restante de oxigênio. À medida que o O_2 vai sendo consumido pelas bactérias aeróbias, o CO_2 começa a ser gerado. Na 2ª e 3ª Fase, fases ácidas, a concentração de CO_2 representa a maior parte dos gases gerados no aterro devido aos processos acidogênicos e acetogênicos que resultam na formação de CO_2 e H_2 . No final da 3ª Fase, metanogênica instável, a população das arqueias metanogênicas começa a crescer, caracterizando o início da geração de CH_4 . O “biogás” é gerado na fase metanogênica, 4ª Fase, sendo composto basicamente pelo CH_4 e CO_2 , numa proporção de 45 a 60% e 35 a 50%, respectivamente. Ao final da degradação dos resíduos orgânicos (5ª Fase), a concentração destes gases tende a cair e condições aeróbias (N_2 e O_2) podem vir a aparecer na massa de lixo a depender da susceptibilidade do aterro aos condicionantes atmosféricos.

A Figura 2.10 ilustra as cinco fases da biodegradação.

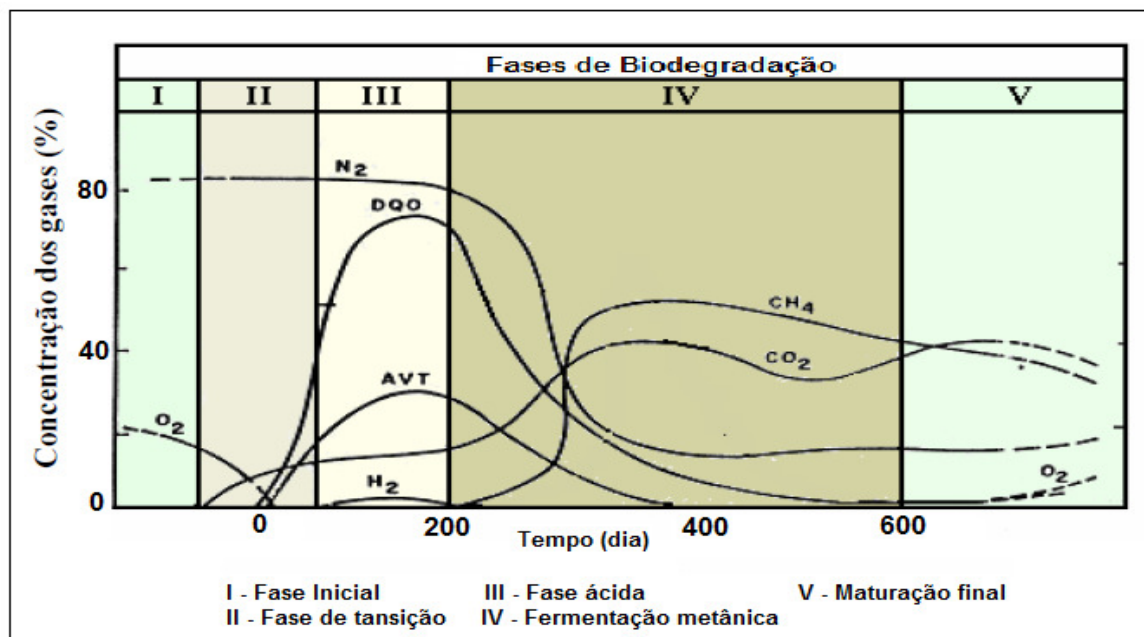


Figura 2.10 - Fases de degradação e parâmetros indicadores da estabilização da matéria orgânica em aterros. Fonte: Adaptado de POHLAND & HARPER, 1985 *apud* Alves, 2008.

O sistema de drenagem de gases é individual (tipo aberta) com a utilização de queimadores do tipo “flare”, havendo algumas exceções em sistemas conjugados de drenagem com extração forçada de gás. O tratamento de gás com queima do tipo aberta não é o mais aconselhado uma vez que a queima não é completa, como acontece nos queimadores do tipo enclausurados. Esta combustão incompleta ou a baixas temperaturas, além de não garantir a transformação do metano (CH_4) em dióxido de carbono (CO_2), resultaria na liberação de compostos tóxicos, podendo ser destruídos pela ação de elevadas temperaturas (Maciel *et al*, 2002).

De acordo com Lima (1995), apesar das incertezas, muitos projetos visando à exploração do gás metano em aterros sanitários vêm sendo implementados nas últimas décadas em todo mundo.

A evolução das concentrações desses gases durante a vida do aterro pode durar de 10 a 80 anos ou mais (Augenstein & Pacey, 1991).

2.4.1. Potencial Bioquímico de Metano (Teste BMP)

O Teste BMP monitora o volume do biogás gerado em uma fração de resíduos sólidos urbanos, avaliando a capacidade de biodegradação dos resíduos através da produção total de CH_4 . Os ensaios são monitorados através de medições constantes de pressões e temperaturas internas além da pressão ambiente.

Para a realização do Teste BMP são inoculadas amostras contendo uma pequena fração de resíduo sólido, previamente cortada e triturada, um meio de cultura líquido e uma fração de inóculo. O ambiente do frasco deverá ser mantido em condição anaeróbia estrita através da recirculação de uma mistura gasosa (CO_2/N_2). Dessa forma, será promovida a aceleração da degradação do resíduo e mantida a viabilidade das metanogênicas.

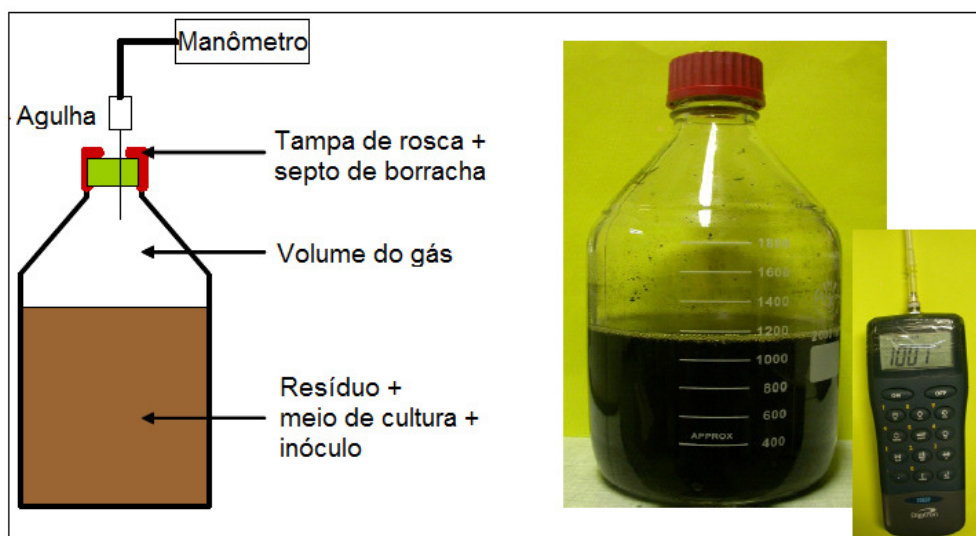


Figura 2.11 - Ilustração do Ensaio BMP.

Fonte: De Araújo Morais Jr, 2006.

No momento, o Teste BMP não tem um padrão oficial o a ser seguido, mesmo se mostrando como excelente ferramenta experimental para avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários.

Na literatura há vários trabalhos que utilizam o ensaio BMP para a avaliação do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos. A relação geralmente é através da quantidade de resíduos totais, massa seca ou sólidos voláteis.

Alves (2008) apresenta na Tabela 2.9 dados obtidos no ensaio BMP de vários autores.

Tabela 2.9 - Valores de alguns potenciais de geração obtidos através do ensaio BMP relatados na literatura.

Referência	Material	Potencial de Geração
Heiss-Ziegler & Lechner, 1999.	Resíduos sólidos	177 NL/Kg MS
	Resíduos sólidos após decomposição	4,8 NL/Kg MS
Harries <i>et al.</i> 2001 ^a	Jornal Papel Papelão Madeira Putrescíveis + jardim	93 Nm ³ CH ₄ /Ton MS 127 a 167 Nm ³ CH ₄ /Ton MS 13 Nm ³ CH ₄ /Ton MS 66 Nm ³ CH ₄ /Ton MS 16 a 94 Nm ³ CH ₄ /Ton MS
Harries <i>et al.</i> 2001b	Resíduos sólidos	85 a 125 Nm ³ CH ₄ /Ton MS
Bayard <i>et al.</i> 2005	Resíduos orgânicos	194 a 229 NL CH ₄ /Kg MS
Vignerón <i>et al.</i> 2005	Resíduos sólidos	126 Nm ³ CH ₄ /Ton MS
	Resíduos orgânicos	178 Nm ³ CH ₄ /Ton MS
De Araújo Morais Jr. 2006	Resíduos sólidos	312,6 a 410,5 NL Biogás/Kg SV

Fonte: Adaptado de Alves (2008).

Pode-se observar na Tabela 2.9 que há uma variação nas unidades de medida do potencial de biogás (NL/Kg MS, Nm³CH₄/Ton MS e NL Biogás/Kg SV), tal fato reforça o quanto se faz necessário uma padronização para o ensaio BMP.

2.4.2. Cromatografia Gasosa (CG)

Segundo Dantas (2010), a cromatografia gasosa é uma técnica baseada na separação de componentes da amostra, que são arrastadas por gases para a coluna cromatográfica e em seguida cada componente da amostra é analisado no detector. O tipo de coluna cromatográfica, detector, gases de arraste e forma de injeção da amostra depender de cada aplicação.

O cromatógrafo é operado por um software sincronizado que controla todos os parâmetros e arquiva o método usado nas análises, garantido as mesmas condições para todas as amostras (Dantas, 2010).

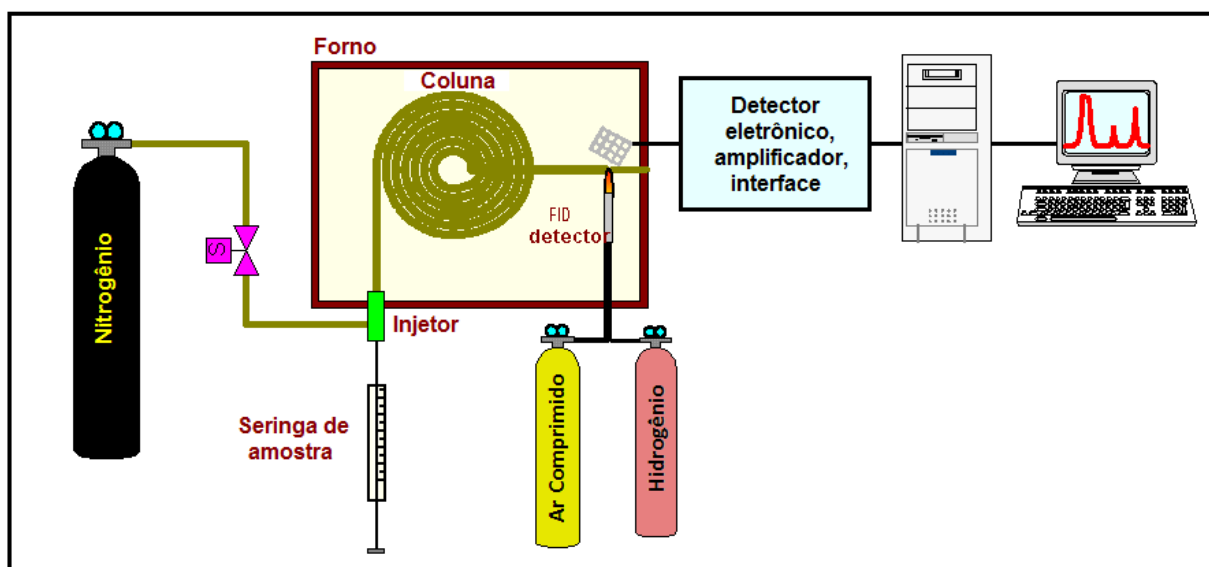


Figura 2.12 - Ilustração da cromatografia utilizando a coluna DFID.

Fonte: <http://www.protecaorespiratoria.com/2011/04/cromatografia.html>

Entre as vantagens do uso da cromatografia gasosa, pode-se destacar a robustez da técnica e o volume de conhecimento já descrito na literatura. A técnica é adequada para amostras voláteis, com componentes que possam ser evaporados a temperatura de até 450°C. Dependendo da coluna utilizada, a técnica pode ser altamente seletiva para um grande número de analitos. Muitos instrumentos de CG permitem o acoplamento de outras técnicas ou de outros detectores interligados (Poole *et al.*, 2005; Meyers, 2001; Settle, 1997 *apud* Dantas, 2010).

2.4.3. Potencial e Estimativa de Geração de Biogás

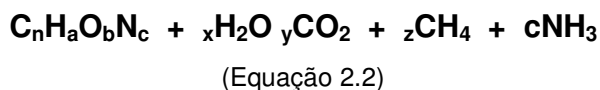
Segundo Henriques (2004), cerca de 100 a 200 m³ de biogás são produzidos por tonelada de resíduos sólidos urbanos decompostos, dependendo de sua composição, condições do meio e operação. Pesquisas mostram que em aterros sanitários de diferentes países foi constatado que a taxa de produção de gás situa-se entre 0,8 e 20

m³/ton/ano a depender da idade do lixo. Estudos semelhantes relataram que a mesma varia de 1 a 14 m³/ton/ano (Willumsfn e Back, 1993 e El- Fadel *et al.*, 1997 *apud* Maciel, 2003).

O poder calorífico do biogás depende primordialmente da quantidade de metano nele existente. O metano puro, em condições normais de temperatura (0°C) e pressão de 1atm, possui um poder calorífico de 9,9 kWh/m³, enquanto o biogás com concentração variando entre 50 e 80% de metano tem um poder calorífico inferior de 4,95 a 7,9 kWh/m³ (Firmo, 2006 *apud* Alves, 2008).

A estimativa da geração do biogás é de extrema importância, uma vez que, se obtém o balanço energético e econômico de instalações de recuperação de gás. Para estimar a produtividade do biogás foram desenvolvidos métodos que quantificam o metano gerado. Segundo a CETESB/SMA (2003) *apud* Mendes *et al.* (2005), dentre estes métodos existe uma variação, dos que consideram somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposta no aterro, até métodos que consideram uma cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros (condições climáticas locais, concentração de nutrientes no solo e composição do resíduo).

De acordo com Tchobanoglous *et al.* (1993), o volume de gases produzido durante a decomposição anaeróbia pode ser estimado utilizando a Equação 2.2, baseada no conhecimento da composição química dos resíduos e assumindo a completa conversão do resíduo orgânico biodegradável a CO₂ e CH₄.



Onde:

$$x = (n - (a/4) - (b/2) + 3(c/4))$$

$$y = ((n/2) - (a/8) + (b/4) + (c/8))$$

$$z = ((n/2) + (a/8) - (b/4) - 3(c/8))$$

De acordo com Harries *et al.* (2001), as fórmulas para os cálculos do potencial de geração de biogás são mostradas nas equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6.

Equação 2.3: Volume de Biogás gerado entre T e T+1

$$\text{Gerado entre T e (T+1)} = [(PF_{(mbar)} \times VUF_{(L)} \times 22,41) / (83,14 \times TF_{(K)})] \times 1000$$

Onde:

T = Tempo (dias);

PF (mbar) = Pressão do Frasco em milibar;

VUF (L) = Volume Útil do Frasco em litros;

TF (K) = Temperatura do Frasco em Kelvin.

Equação 2.4: Volume de Biogás Acumulado (mL)

$$\text{Volume Acumulado}_{(mL)} = [\text{Gerado entre T e (T+1)}] + VGA_{(mL)}$$

Onde:

T: Tempo (dias)

VGA (mL): Volume de biogás acumulado do dia anterior em mililitros

Equação 2.5: Volume de Biogás Acumulado CNTP (NmL)

$$[\text{Volume Acumulado}_{(mL)}] \times [273/TF_{(K)}] \times [(Patm_{(mbar)} - 42)/760]$$

Onde:

TF (K): Temperatura do Frasco em Kelvin

P_{atm.} (mbar): Pressão Atmosférica em milibar

Equação 2.6: Taxa de Geração de Biogás (NmL /dia)

$$\text{Taxa de Geração de Biogás} = \text{Volume Acumulado CNPT}_{(NmL)} / N^{\circ} \text{ de dias corridos}$$

Segundo Alves (2008) o volume de biogás acumulado (mL), de acordo com a equação 2.6, deverá ser corrigido para as Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP, obtendo, portanto, o volume de biogás em NmL, que associado aos dias corridos, fornece a taxa de geração de média de biogás (NmL/dia).

Algumas modelagens matemáticas já mostram previsões de comportamento da geração de biogás em aterros sanitários. A *modelagem de ordem zero*, conforme Jucá (2003) assume que a geração de biogás é “constante” ao longo do tempo. Apesar desta enorme simplificação, esta ainda é utilizada quando se deseja prever as emissões de gases em aterros sanitários em nível global ou nacional.

O *modelo de primeira-ordem* (Figura 2.13) já incorpora o efeito do tempo de degradação dos resíduos, descrevendo, inicialmente, um crescimento da taxa de produção de gases, seguido de um decaimento exponencial (Alves, 2008).

Outro exemplo de modelo é o *Multi-fase* de Tchobanoglous *et al.* (2003). O modelo assume que os resíduos são decompostos numa duração de três meses a cinco anos, atingindo seu pico de produção de biogás ao final do segundo ano após sua deposição, diminuindo a geração a partir deste instante até o 6º ano, quando não há geração (Figura 2.14).

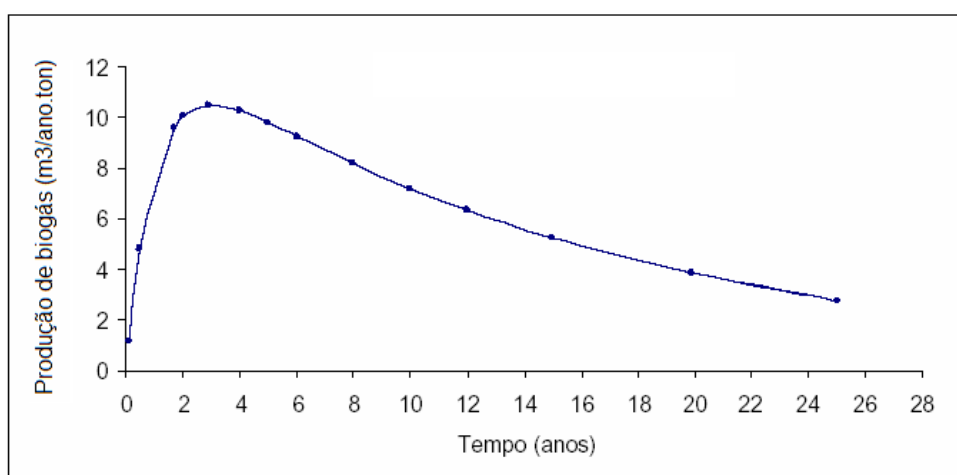


Figura 2.13: Previsão da geração de gases pelo modelo de primeira ordem.

Fonte: Jucá, 2003.

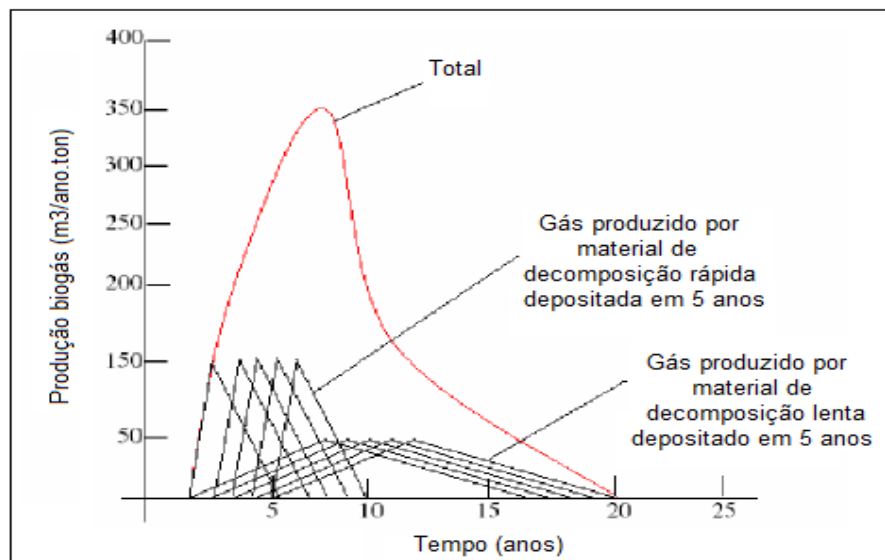


Figura 2.14 - Produção de gás durante um período de cinco anos a partir de materiais orgânicos rapidamente e lentamente decompostos num aterro. Fonte: Alves, 2008.

Segundo Jucá (2003), o estudo destes modelos de Ordem Zero, Primeira Ordem e Multi-fase, foi verificado por de Coops *et al.* (1995), com amostras coletadas em oito aterros sanitários holandeses, o qual constatou que o modelo multifase é o que fornece melhor resultado devido uma menor diferença entre a previsão teórica e a medição *in situ* com 18% de erro médio, seguido pelo de primeira ordem com 22% e por fim o de ordem zero com variação de 44%.

3. METODOLOGIA

A parte experimental do presente trabalho teve o propósito de investigar o processo de biometanização dos resíduos sólidos, através do Teste BMP, para estimar a produção de biogás gerado no aterro sanitário de João Pessoa/PB, iniciando com a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do referido aterro.

Por não existir um protocolo oficial do Teste BMP, optou-se por investigar em laboratório parâmetros físico-químicos abrangentes, iniciando por qualificar e quantificar o inóculo planejando uma possível melhoria, principalmente dos STV, através de testes de aclimação. Em sequência, com base na composição dos resíduos sólidos urbanos do ASMJP caracterizado neste trabalho e na composição FORSup de Pinto (2000), houve a amostragem em dois tipos, sendo: biodegradável (matéria orgânica) e orgânico (fração orgânica – restos de alimentos). Após esses procedimentos, foram planejados as inoculações dos meios de reação e os monitoramentos dos reatores para acompanhamento do processo de biometanização e consequentemente, da produção do biogás, através do teste BMP e cromatografia gasosa. Com a execução desta parte experimental pretendeu-se conhecer o potencial de geração do biogás dos resíduos, orgânico e biodegradável, do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa.

Conforme os resultados obtidos a partir desta metodologia, haverá a possibilidade de aprimorar as diretrizes para um registro do protocolo do Teste BMP.

Todas as análises físico-químicas e o aparato para o Teste BMP foram instalados e monitorados nas dependências no Laboratório de Saneamento do Centro Tecnológico. As medições dos gases (CH_4 , N_2 e CO_2) foram realizadas nas dependências do Laboratório de Química Analítica (LAQA) no Centro de Ciências Exatas da Natureza (CCEN), ambos integrantes da UFPB.

O experimento iniciou-se no dia 02 de agosto de 2011 e finalizou em 13 de setembro de 2012, sendo que, para o Teste BMP a duração máxima foi de 111 dias. O desenvolvimento do projeto teve as seguintes etapas descritas na Figura 3.1.

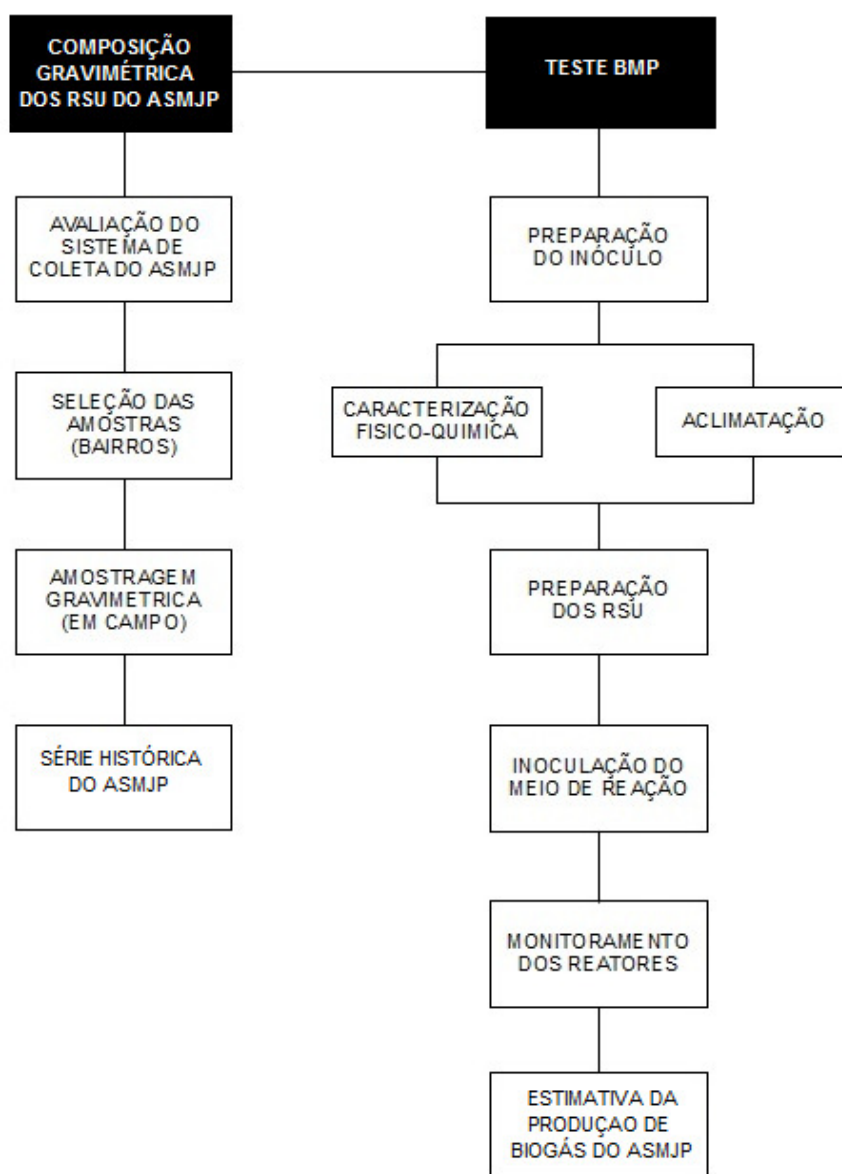


Figura 3.1 - Fluxograma representativo das etapas seguidas nesta metodologia.

Devido à inexistência de um protocolo do Teste BMP, o planejamento desta metodologia ocorreu com base em alguns experimentos já realizados por pesquisadores, principalmente, por De Araújo Moraes, 2006.

3.1. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do ASMJP

A metodologia definida consistiu em três fases:

1ª fase: Avaliação do sistema de coleta do aterro sanitário nos bairros de João Pessoa e nos municípios de Cabedelo, Santa Rita e Bayeux;

2ª fase: Seleção das amostras em termos de levantamentos dos bairros da capital paraibana;

3ª fase: Amostragem em campo para composição gravimétrica do aterro sanitário.

A caracterização dos resíduos foi realizada seguindo as treze categorias da metodologia francesa MODECOM, com exceção da categoria de “Resíduo Composto” que foi substituído por “Resíduo Verde” (Tabela 3.1). Essa modificação no padrão original de categorias relaciona-se à grande produção de resíduos verdes na cidade em estudo sendo, portanto alvo de avaliação.

Tabela 3.1 – Categorias MODECOM utilizadas no experimento.

CATEGORIAS	EXEMPLO DE RESÍDUOS
FRAÇÃO ORGÂNICA	RESTOS DE ALIMENTOS E CASCAS.
PAPEL	JORNAL, REVISTAS, PAPEIS EM GERAL.
PAPELÃO	CAIXAS, EMBALAGENS, ENTRE OUTROS.
RESÍDUO VERDE	PODA (GALHOS E FOLHAS) e COCO.
PLÁSTICO	SACOLA, PET, DESCARTÁVEIS E EMBALAGENS.
METAL	LATINHAS, TAMPINHAS E CONSERVAS.
VIDRO	VIDRARIA EM GERAL
TECIDO	ROUPAS, RETALHOS, LENÇÓIS, ENTRE OUTROS.
HIGIENE PESSOAL	PAPEL HIGIÊNICO, ABSORVENTE E FRALDA.
INFLAMÁVEIS	COURO, MADEIR, BORRACHA, ENTRE OUTROS.
INERTE	PEDRA, OSSO, CERÂMICA, PORCELANA, ENTRE OUTROS.
RESÍDUO ESPECIAL	HOSPITALAR, PILHAS, AEROSSOL, TINTAS E ETC.
FINOS	RESÍDUO INFERIOR À 20 mm

3.1.1. Avaliação do Sistema de Coleta

Foi realizado um estudo detalhado sobre o sistema de coleta de lixo da cidade em questão. A setorização da região estudada se tornou imprescindível para identificação dos roteiros de coleta e homogeneização das características de certo local. Para cada uma das cidades periféricas, foi designado apenas um setor, representando assim, todo o território do município. Para a capital paraibana, os setores foram divididos seguindo os limites dos bairros da cidade.

Adotou-se apenas um itinerário de coleta dos resíduos para cada setor. Por mais que o setor possa ser considerado homogêneo, os roteiros de coleta têm características próprias, já que são influenciadas de forma direta pela região por onde passam. Portanto, se fez necessário verificar a abrangência e homogeneidade destes circuitos.

A figura a seguir mostra a abrangência do bairro da Torre.



Figura 3.2 – Rota de coleta do bairro da Torre em João Pessoa/PB.

3.1.2. Seleção das Amostras por bairro

O critério de seleção das amostras referentes aos bairros de João Pessoa foi realizado através da estratificação social, com base na renda do chefe familiar (em salários mínimos) dos setores demarcados. Os bairros foram correlacionados a partir da avaliação da renda dos responsáveis domiciliares, das respectivas classes sociais, da massa coletada de RSU e da população residente. De acordo com o critério da Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílio - PNAD do IBGE, a sociedade brasileira pode ser dividida em sete níveis econômicos (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Níveis econômicos PNAD/IBGE.

FAIXA	DESCRIÇÃO
1	ATÉ 1 SALÁRIO MÍNIMO
2	DE 1 A 2 SALÁRIOS MÍNIMOS
3	DE 2 A 3 SALÁRIOS MÍNIMOS
4	DE 3 A 5 SALÁRIOS MÍNIMOS
5	DE 5 A 10 SALÁRIOS MÍNIMOS
6	DE 10 A 20 SALÁRIOS MÍNIMOS
7	SUPERIOR A 20 SALÁRIOS MÍNIMOS

No estudo foram consideradas apenas três classes sociais: baixa, média e alta. A classe baixa compreende as faixas 1, 2 e 3 do estudo do IBGE; a classe média compreende as faixas 4 e 5 e a classe alta compreende as faixas 6 e 7. Os bairros foram considerados similares, homogêneos, de forma que a renda familiar fosse próxima uma da outra, considerando assim, características de produção de RSU relativos.

Utilizando os dados de rendimento do chefe familiar constituinte do Censo Demográfico (IBGE, 2010), foram escolhidos quarenta setores amostrais, sendo trinta e sete referentes aos bairros de João Pessoa e aos setores referentes às áreas de Cabedelo, Bayeux e Santa Rita. Este tipo de critério conduz à distinção dos setores em comunidades rurais e urbanas, cada vez que a área de intervenção o justifique.

Tabela 3.3 - Lista dos bairros escolhidos para a caracterização gravimétrica representando a cidade de João Pessoa.

BAIRRO CARACTERIZADO			BAIRRO CARACTERIZADO		BAIRRO CARACTERIZADO
1	AERoclUBE	14	EXPEDICIONÁRIOS	27	MUÇUMAGO
2	AUTO DO CéU	15	GROTÃO	28	OITIZEIRO
3	ALTO DO MATEUS	16	INDÚSTRIAS	29	PADRE ZÉ
4	ANATÓLIA	17	JAGUARIBE	30	ROGER
5	BANCÁRIOS	18	JARDIM OCEANIA	31	SÃO JOSÉ
6	BESSA	19	JARDIM VENEZA	32	TAMBAÚ
7	CABO BRANCO	20	JD CIDADE UNIVERSITÁRIA	33	TAMBAUZINHO
8	CASTELO BRANCO	21	JOÃO PAULO II	34	TORRE
9	CENTRO	22	JOSÉ AMÉRICO	35	TREZE DE MAIO
10	COSTA E SILVA	23	MANAÍRA	36	VALENTINA
11	CRUZ DAS ARMAS	24	MANDACARÚ	37	VARJÃO
12	ERNESTO GEISEL	25	MANGABEIRA	-	-
13	ESTADOS	26	MIRAMAR	-	-

3.1.3. Amostragem

I - Critérios para amostragem:

- i. A seleção de bairros foi efetuada a partir da avaliação da renda dos responsáveis domiciliares e as respectivas classes sociais; massa coletada de RSU e população residente;
- ii. A determinação da quantidade de caminhões foi equivalente à fração de população que o bairro representa em relação ao total da cidade;
- iii. Bairros com rendas similares foram considerados, para o estudo, como homogêneos e, portanto terão características de produção de RSU coincidentes. Esse item é fundamental para a representação da caracterização gravimétrica do município.

II - Procedimento da amostragem (para cada bairro, com a escolha aleatória do caminhão de coleta):

- i. O caminhão-compactador era pesado, compondo um registro de viatura com dados sobre massa bruta, massa líquida, horário de entrada e saída do aterro e setor atendido;
- ii. O caminhão descarregava o seu conteúdo, de aproximadamente 10.000 kg, em quatro partes aproximadamente iguais. Estas amostras eram revolvidas e separadas com o auxílio de uma pá mecânica;
- iii. Em seguida, efetuava o primeiro quarteamento, desprezando duas quartas - (duas partes vis-à-vis);
- iv. As outras duas quartas da amostra foram misturadas, totalizando aproximadamente 5.000 kg de lixo e realizado mais um quarteamento, onde eram desprezadas duas quartas-partes, vis-à-vis, resultando aproximadamente 2.500 kg de material por amostra;
- v. Por fim, as duas amostras restantes foram agrupadas, formando a amostra final de 1.000 kg de lixo, aproximadamente;
- vi. Em seguida esta amostra, era direcionada à estação de caracterização para separação por categoria;
- vii. A amostra final era disposta em duas mesas classificadoras com aberturas de 20 mm de diâmetro (categoria “finos”), circundada por depósitos designados para cada categoria supracitada;
- viii. Em sequência era realizado à separação manual e determinado o peso por categoria;
- ix. Finalmente, através de regra de três simples, era obtido o percentual em peso de cada componente, ou seja, a composição gravimétrica do lixo.

Este procedimento seguiu o padrão de quarteamento, utilizando as precauções de amostragem da NBR 10.007/2004. O mesmo foi realizado durante o período compreendido entre 22 de agosto e 17 de setembro de 2011. Este é o período de inverno da região (clima úmido).

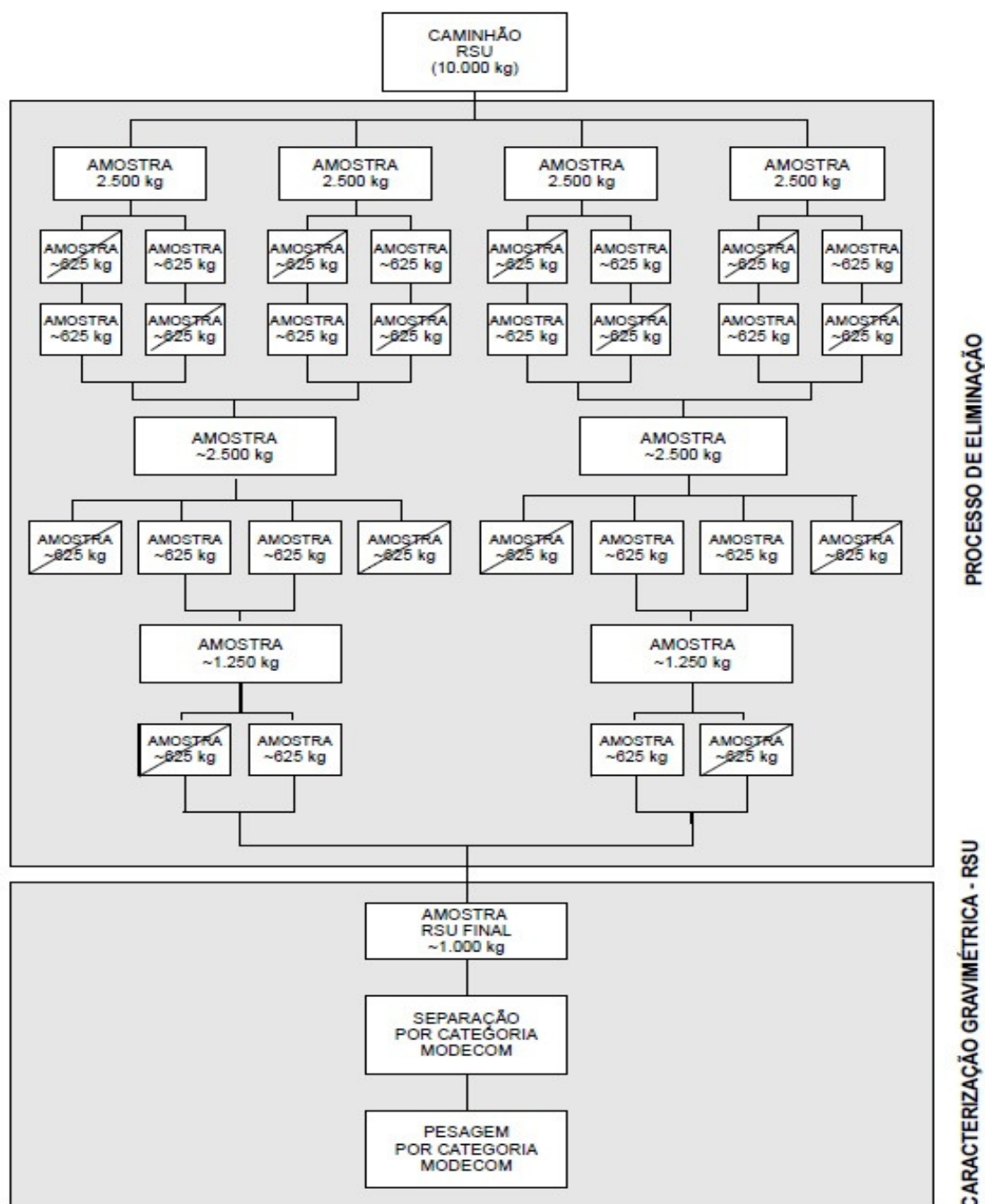


Figura 3.3 - Fluxograma representativo da amostragem do RSU para a composição gravimétrica.

O local para caracterização dos resíduos foi montado nas imediações do aterro sanitário.

III - Os materiais utilizados foram:

- i. Força de trabalho: Dez funcionários treinados para separação e classificação dos resíduos, balanceiro para registro do material classificado e corpo técnico;
- ii. Equipamentos e maquinário: retro escavadeira, pá mecânica, caminhões compactadores, balança tipo rodoviária com capacidade de 40 ton, balança eletrônica, capacidade 300 kg, tipo plataforma, com precisão de 0,01 kg;
- iii. Equipamentos de proteção individual: luvas de raspas, luvas plásticas descartáveis, máscaras descartáveis;
- iv. Materiais: Duas tendas de dimensão 05x05 m, duas mesas classificadoras com aberturas circulares de diâmetro de 20 mm, coletores com capacidade de 200 litros, pás, enxadas, gadanhos, carros de mão, lona plástica.



Figura 3.4 – Local para caracterização dos resíduos montado nas imediações do aterro sanitário.

Realizada a gravimetria da amostra de bairros, foi estimado o valor para índices do município através de uma ponderação pela população, seguindo a equação:

$$\%R_n = \%p_i \times \%r_{ni}$$

(Equação 3.1)

Onde,

$\%R_n$ = percentagem do resíduo n da cidade de João Pessoa;

$\%p_i$ = percentagem da população bairro i em relação à população municipal;

$\%r_{ni}$ = percentagem do resíduo n no bairro i .

3.1.4. Histórico da Caracterização Gravimétrica dos RSU e Acompanhamento Operacional das Células

No intuito de realizar a estimativa teórica da geração de biogás do ASMJP, foi seguido o seguinte procedimento:

- i. Elaborado o levantamento bibliográfico do histórico da caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de João Pessoa;
- ii. Coletado dados do aterro sanitário referente ao processo de preenchimento das células, avaliando tempo de preenchimento e quantidade de RSU armazenado;
- iii. E por fim, associado os dados recolhidos dos itens i e ii, obtendo-se a quantidade de matéria orgânica e biodegradável por célula.

A estimativa de geração de biogás está apresentada no item 4.3.

3.2. Teste BMP

O Teste BMP acompanhou todo processo de biometanização dos resíduos, desde a escolha dos componentes do meio de reação (Inóculo + resíduo + solução nutritiva) até o estudo da estimativa da geração e produção do biogás. A metodologia do teste foi dividida em duas etapas: I. Envolveu todos os experimentos laboratoriais do processo; II. Realizada para monitoramento analítico da produção do biogás.

Etapa I - Experimento Laboratorial

3.2.1. Preparação do Inóculo

Devido à raridade de se utilizar um lodo anaeróbio oriundo de uma ETE composto de lagoas anaeróbias, optou-se em realizar uma caracterização físico-química e dessa forma, conhecer quantitativamente a matéria orgânica. Caso não houvesse uma carga orgânica ideal, haveria a possibilidade da aclimação, processo que foi estruturado através de testes com variáveis já analisadas e sugeridas por pesquisadores, com resultados a serem comparados a lodos de reatores UASB.

O lodo anaeróbio utilizado no experimento foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário de Mangabeira, João Pessoa/PB, no Módulo II, 2ª Lagoa Anaeróbia, dimensões 73x73m, profundidade aproximada de 3,7m e volume útil de 3m (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Lagoa Anaeróbia do Módulo II da ETE de Mangabeira/João Pessoa/PB.

O procedimento de coleta foi realizado em dois momentos devido ao tempo dos testes de aclimação e ao envelhecimento do lodo. O primeiro, chamado de LODO I, coletado no dia 02 de agosto de 2011 e o segundo, denominado LODO II, no dia 29 de fevereiro de 2012.

As coletas foram realizadas numa temperatura ambiente média de 29°C, com duração de aproximadamente 1h30m. Para a coleta foram utilizados: uma garrafa do tipo “pet”, volume de 5 litros, um coletor tubular em PVC e um funil (Figura 3.6). A amostra do lodo foi transportada para o laboratório de Saneamento (UFPB) e mantida em refrigeração, temperatura de (\pm) 10°C.



Figura 3.6 - Material da coleta do lodo anaeróbio.



Figura 3.7 - Ilustração do procedimento de coleta do lodo anaeróbio.

Em cada amostragem dos lodos (I e II) foram coletados aproximadamente cinco quilogramas (5 kg) do lodo anaeróbio e os mesmos demonstraram características de lodo disperso, como mostram as Figuras 3.8 e 3.9.



Figura 3.8 - Comparação das características do lodo.

Fonte: <http://www.uasb.org/discover/granules.htm>



Figura 3.9 - Lodo anaeróbio coletado.

3.2.1.1. Caracterização Físico-química do Inóculo

A caracterização foi realizada através de nove parâmetros (Tabela 3.4), apenas no LODO I, com o propósito de quantificar suas propriedades físico-químicas e verificar a qualidade em termos de pH, DQO, e série de sólidos, em particular STV. O LODO II foi coletado com a finalidade de ser utilizado nos testes de aclimação, pois o LODO I já tivera seis meses de efetiva coleta. Ao coletar o LODO II, foram analisados apenas alguns parâmetros, considerados os mais importantes, como: pH, DQO total e série de sólidos totais e suspensos, para verificar a exatidão ou aproximação com os resultados do LODO I.

Tabela 3.4 - Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos de caracterização.

PARÂMETRO	MÉTODO
pH	PHMETRO DE BANCADA - MÉTODO ELETRODO
TEMPERATURA	MÉTODO DO TERMÔMETRO DE MERCÚRIO
DENSIDADE	MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO DE AMOSTRAS FLUÍDAS DO LODO
UMIDADE	MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE AMOSTRAS FLUÍDAS DO LODO
AMÔNIA	MÉTODO FOTOMÉTRICO DA NESSLERIZAÇÃO DIRETA
DQO TOTAL & DQO FILTRADA	MÉTODO B - MÉTODO DA REFLUXAÇÃO FECHADA OU DA DIGESTÃO DE PEQUENAS AMOSTRAS – MODIFICADO

ST, STV, STF.	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS EM AMOSTRAS SEMI-SÓLIDAS
SS, SSV, SSF.	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS E NÃO FILTRÁVEIS
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	MÉTODO CONE IMHOFF

Para as análises de Amônia foram feitas diluições de 10% do lodo anaeróbio e para as análises de DQO total, foram realizadas diluições de 1%. Ressalta-se que todos os parâmetros foram realizados em triplicata.

3.2.1.2. Teste de Aclimação

Os testes de aclimação realizados no lodo anaeróbio (LODO II) foram de acordo com experiências realizadas por Aquino *et al.* (2008) e com bases nos resultados obtidos nos testes de aclimação do LODO I. Ressalta-se que os testes com o LODO I investigaram tempos de aclimação diferentes (2h, 4h, 6h e 24h). Para alimentar o lodo foram utilizados como substratos os átomos de carbono presente na glicose ($C_6H_{12}O_6$).

O teste de aclimação final analisou o tempo de aclimação (24h) em relação à razão Alimento/Micro-organismos (A/M). Essa razão se dá através da concentração da glicose e da concentração de SSV do lodo anaeróbio. A concentração de glicose foi obtida a partir da equação $A/M = Z$, onde M é dada em termos de sólidos suspensos voláteis e Z é a razão alimento/microrganismo, assumindo os valores de 0,25 (-1) e 0,5 (+1). Os testes foram realizados utilizando uma solução final de 250 mL. Foram realizados vários ensaios e o teste de aclimação que obteve o melhor resultado, tem o roteiro descrito na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Planejamento do crescimento da biomassa utilizada no experimento.

AMOSTRA	LODO (mL)	GLICOSE (mL)	SOLUÇÃO NUTRITIVA (mL)	A/M
1	45	35	170	-1
2	45	35	170	-1
3	45	65	140	+1
4	45	65	140	+1

Os testes de aclimação foram realizados utilizando frascos de DBO de 350 ml com mangueiras de borracha adaptadas, as quais mantinham mergulhadas na água para evitar contaminação externa e garantir uma purga do gás que fosse produzido, como mostra a Figura 3.10.

A aclimação foi realizada em temperatura em torno de 30°C ($\pm 0,5$), com base em Aquino *et al.* (2008). Essa faixa de temperatura propõe melhores condições de crescimento dos micro-organismos.

O equipamento utilizado para controle da temperatura dos frascos foi um Banho-Maria termostático digital AL 150 D - Gabinete: Aço 1020 c/ pintura epóxi - Cuba Estampada: Aço inox AISI 304.



Figura 3.10 - Ilustração das amostras em processo de aclimação.

Os parâmetros analisados para o acompanhamento do crescimento da biomassa foram: DQO total, série de sólidos totais, série de sólidos suspensos e pH, tendo como principal parâmetro o STV devido sua fácil determinação e relação na quantificação de matéria orgânica presente no lodo anaeróbio.

3.2.2. Preparação da Solução Nutritiva

Devido a impossibilidade da avaliação do lodo a partir da caracterização microbiológica, através da qual poderia estabelecer uma solução nutritiva ideal, optou-se por fazer uma adaptação entre soluções nutritivas já utilizadas em processos de atividade metanogênica específica (AME) por Monteggia (1997) e Souza *et al.* (2005), com a finalidade de obter apenas uma solução tamponada, com um pH mais próximo da neutralidade, conforme mostra a tabela 3.6.

Conforme Bidone e Povinelli (1999) apud Barcelos (2009), a solução tampão deve garantir que o pH do meio reação fique na faixa entre 6,5 e 7,6.

Tabela 3.6 - Solução Nutritiva adaptada utilizada no procedimento.

REAGENTE	FÓRMULA QUÍMICA	PESO (g/L)
FOSFATO DE POTÁSSIO MONOBÁSICO	KH_2PO_4	3,0
FOSFATO DE POTÁSSIO DIBÁSICO	K_2HPO_4	2,0
CLORETO DE AMÔNIO	NH_4Cl	0,5
BICARBONATO DE SÓDIO	NaHCO_3	5,0

Observações:

- ✓ A diluição deve ser feita com 50% de água destilada e 50% de água potável ou clorada urbana com baixa concentração de Cloro.
- ✓ A solução nutritiva deve ser preparada no momento que for utilizada, mantendo a temperatura ambiente e evitando a refrigeração.
- ✓ O pH das soluções nutritivas utilizadas no nosso experimento através deste procedimento resultou em pH's de 7,32 e 7,57.

3.2.3. Amostragem dos Resíduos Sólidos Urbanos

Esta etapa é parte fundamental da previsão do potencial de biometanização do resíduo sólido urbano do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa, pois ditará a confiabilidade dos resultados finais.

Os resíduos sólidos foram preparados seguindo duas amostragens:

1ª Fração orgânica - Baseada na composição FORSup adaptada de Pinto (2000). A fração orgânica representou só a parte “úmida” dos resíduos, ou seja, restos de alimentos, crus ou preparados, da alimentação humana. A fração orgânica foi representada por doze categorias, como mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Composição da Fração Orgânica Utilizada no Experimento.

CATEGORIA	ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)	PESO (Kg)
FRUTAS	Casca/Bagago de laranja	17,80	1,080
	Casca de banana	3,80	0,231
	Pedaços de tomate	4,60	0,279
	Casca de melancia	3,80	0,231
LEGUMES CRUS	Casca de batata	5,50	0,296
	Casca/Pedaços de cebola	2,30	0,140
	Casca de abobora	1,60	0,097
	Casca/Pedaços de mandioca	1,60	0,097
LEGUMES COZIDOS	Casca/Pedaços de batata	1,30	0,079
	Pedaços de mandioca	2,70	0,164
HORTALIÇAS	Alface	3,80	0,231
	Repolho	1,90	0,115
	Couve flor	1,50	0,091
PÃO/BOLO	Pão	3,00	0,182
CARNE	Pele/Pedaços de frango crus	1,30	0,079
	Pele/Pedaços de carne crus	0,70	0,164
CAFÉ	Pó	3,50	0,212
QUEIJO	Queijo	0,40	0,024
ARROZ	Arroz	11,20	0,680
FEIJÃO	Feijão	4,70	0,285
MACARRÃO	Macarrão	2,20	0,133
OUTROS	Casca de ovo	3,20	0,194
PESO TOTAL	-	-	5,094

2ª Biodegradável - Baseada na composição gravimétrica dos resíduos sólidos caracterizada neste trabalho, o qual utilizou o método MODECOM (ADEME, 1993), com exceção da categoria “higiene pessoal”, a qual não foi adicionada fraldas descartáveis e absorventes evitando um índice maior de compostos inorgânicos. A amostra biodegradável foi representada por cinco categorias, como mostra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Composição do Biodegradável Utilizado no Experimento.

CATEGORIA	ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)	PESO (Kg)
HIGIENE PESSOAL	Papel higiênico	4,00	0,312
	Guardanapo	1,04	0,081
RESÍDUO VERDE	Coco	7,73	0,603
	Folhas secas	3,87	0,302
	Folhas verdes	3,87	0,302
ORGÂNICO	Resto de alimentos	34,90	2,722
PAPELÃO	Papelão	4,63	0,361
PAPEL	Papel	4,07	0,317
PESO TOTAL	-	-	5,000

As coletas foram realizadas no mês de Janeiro de 2012, totalizando aproximadamente 20 Kg de resíduos sólidos, sendo preparados 5 kg para cada tipo de amostra (fração orgânica e biodegradável).

Conforme as composições descritas nas Tabelas 3.7 e 3.8 foram realizadas as amostragens através do seguinte procedimento:

- i. Os resíduos foram separados em recipientes plásticos e recortados manualmente, utilizando-se tesoura e faca, em pedaços de aproximadamente 2,5cm;
- ii. Em seguida, foram pesados conforme as categorias citadas nas Tabelas 3.7 e 3.8;
- iii. Posteriormente, foram misturados e triturados, em liquidificador industrial;
- iv. Após a mistura de todas as categorias, foi mantida em repouso por 48h, em sacos plásticos, temperatura ambiente, para simulação do tempo de espera;

- v. Após as 48h, foi retirada uma quantidade para caracterização físico-química e o restante foi colocado na estufa a 100°C durante 36h, para obtenção do material seco;
- vi. A ser retirada da estufa, a amostra foi mantida em dessecador até atingir a temperatura ambiente, mais uma vez triturada e em seguida, mantida em refrigeração a 10°C, para evitar o processo natural de biodegradação até que seja inoculada.

Observações:

- ✓ A trituração dos biodegradáveis dura em média 4 minutos a cada 300 gramas;
- ✓ As amostras devem ser retiradas do refrigerador 24h antes da inoculação.

A figura 3.11 e 3.12 ilustram alguns passos deste procedimento.

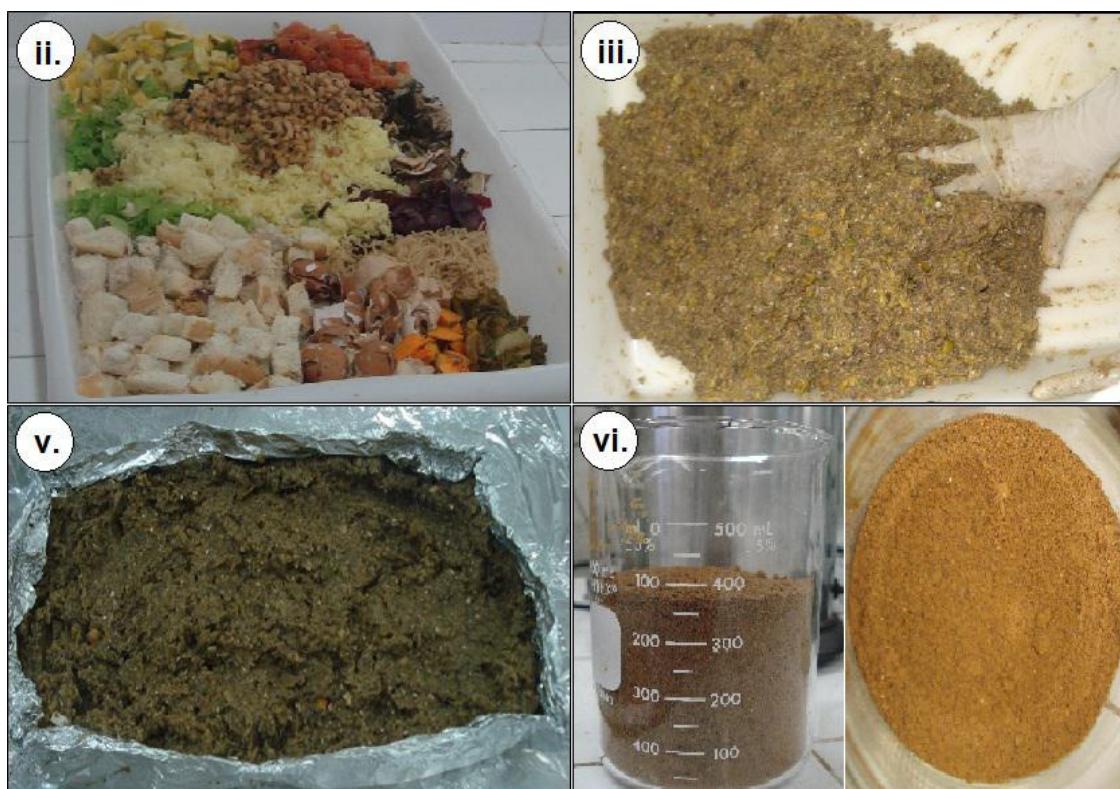


Figura 3.11 - Ilustração de algumas etapas do procedimento - Fração Orgânica.



Figura 3.12 - Ilustração de algumas etapas do procedimento – Biodegradável.

Equipamentos utilizados nas amostragens:

- Balança Analítica Eletrônica AND - 210g/0,1mg
- Balança Analítica Eletrônica BG 1000 - 500g/1mg
- Liquidificador Industrial TB 2 L Copo Inox - BERMAR
- Faca Peixeira Lâmina em Aço Inox 8 com fio liso e cabo de madeira.
- Tesoura mundial 660 (8 1/2")
- Bandeja Plástica Multiuso 40,7 x 60,8 x 9,8 cm
- Bandeja Plástica Multiuso 19,5 x 31 x 6,5 cm
- Tábua de Cozinha - 39,5 x 24 cm



Figura 3.13 - Material utilizado nas amostragens.

Após as amostragens foi realizada a caracterização físico-química das amostras (fração orgânica e biodegradável), com a finalidade de identificar quantitativamente e qualitativamente os compostos orgânicos e inorgânicos. Os parâmetros analisados estão expostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos de caracterização.

PARÂMETRO	MÉTODO
pH	PHMETRO DE BANCADA - MÉTODO ELETRODO
DENSIDADE	MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MATERIAIS BETUMINOSOS
UMIDADE	MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE AMOSTRAS FLUÍDAS DO LODO
ST, STV, STF.	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE SÓLIDOS EM AMOSTRAS SEMI-SÓLIDAS
GRANULOMETRIA	MÉTODO DA PENEIRAÇÃO

Todos os parâmetros físico-químicos foram analisados de acordo com o “Manual de análise físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias (Silva *et al.*, 2001), baseado no "Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater" - APHA - AWWA - WPCF (1999), com exceção da granulometria que foi realizado através de Dias (2004).

3.2.4. Inoculação dos Meios de Reação nos Reatores BMP

Para o teste BMP foram planejadas formulações a serem inoculadas nos reatores, as quais foram divididas em duas séries.

A 1ª série, seguiu a composição de acordo com De Araújo Moraes (2006) adaptada de Wang et al. (1994). Foi iniciada no dia 11 de maio de 2012 e finalizada no dia 31 de agosto do mesmo ano, totalizando 111 dias.

A 2ª série, adaptou a composição devido aos resultados já notados na 1ª série e foi acrescentada uma amostra de biodegradável com o lodo anaeróbio aclimatado, inclusive com a mesma formulação da 1ª série, para que houvesse a possibilidade de uma comparação e avaliação. Foi iniciada no dia 06 de julho de 2012 e finalizada no dia 10 de setembro do referente ano, totalizando 66 dias.

As composições dos reatores inoculados estão descritas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Composição dos Reatores BMP.

Série	Meio de Reação	Solução Nutritiva (g)	Fração Orgânica (g)	Biodegradável (g)	Lodo Anaeróbio Bruto (g)	Lodo Anaeróbio Aclimatado (g)
1ª	OS1	150	05	-	10	-
1ª	OS2	150	10	-	20	-
2ª	OS3	150	05	-	10	-
2ª	OS4	150	05	-	05	-
1ª	BS1	150	-	05	10	-
1ª	BS2	150	-	10	20	-
2ª	BS3	150	-	10	05	-
2ª	BS4	-	-	05	-	160
1ª	B1	150	-	-	10	-
2ª	B2	150	-	-	20	-

*OS = Fração orgânica seca / BS = Biodegradável seco / B = Branco

Os reatores utilizados foram frascos de vidro Schott de 250 mL com septo e tampa de rosca, hermeticamente fechado para garantir uma vedação de gás perfeito (Figura 3.14). Os frascos foram envolvidos com papel alumínio para evitar a influência da luz durante o processo de biodegradação.



Figura 3.14 - Desenho ilustrativo do reator (frasco).

O procedimento para preparação do meio de reação do Teste BMP foi o mesmo para as duas séries, com exceção da circulação do gás nitrogênio, que só aconteceu na 2ª série, e devido a isto se acrescentou uma amostra de biodegradável com a mesma dosagem da 1ª série, prevendo uma possível observação em relação a introdução do gás. A circulação do gás nitrogênio no reator inoculado tem como objetivo eliminar o oxigênio da atmosfera aeróbia estabelecida no frasco. A seguir, a descrição do procedimento adaptado de Gachet (2004).

- i. Separaram-se os frascos Schott + septos + tampas de acordo com suas amostras;
- ii. Envolveu-o, um por um, com papel alumínio para evitar a penetração de luz;
- iii. Etiquetas foram colocadas em cada frasco de acordo com a nomeação, para não serem confundidos durante as análises;
- iv. Pesaram-se todos os frascos (frasco + tampa + septo);
- v. Em cada frasco, pesou-se o inóculo;
- vi. Logo após a amostra da fração orgânica ou biodegradável;

- vii. Em seguida, adicionou a solução nutritiva, com agitação lenta durante aproximadamente 10 segundos;
- viii. Após a agitação, inseriu-se o gás nitrogênio no frasco durante 1 minuto;
- ix. Finalmente, vedou e pesou cada frasco;
- x. Foi posto na estufa em temperatura de 35 °C;
- xi. Após uma hora, registrou-se a pressão como pressão inicial.

A Figura 3.14, ilustra o procedimento da inoculação dos reatores.

Todos os frascos foram incubados na estufa em condições mesófilas de 35 °C.

Tabela 3.11 - Esquema geral dos procedimentos experimentais do Teste BMP na 1ª Série.

Reator (triplicata)	Peso do Frasco (g)	Peso do Frasco + MR* (g)	Volume de Gás* (mL)	Circulação do N2 (min)
OS11	252,40	416,71	144	00
OS12	252,03	414,78	144	00
OS13	252,87	417,28	144	00
OS21	252,94	433,00	129	00
OS22	252,25	432,32	129	00
OS23	252,83	432,94	129	00
BS11	251,56	414,73	144	00
BS12	251,72	414,40	144	00
BS13	252,37	416,23	144	00
BS21	251,07	429,58	129	00
BS22	251,89	429,93	129	00
BS23	250,92	429,34	129	00
B11	251,74	411,58	149	00
B12	252,80	413,23	149	00
B13	252,47	411,69	149	00

* Volume disponível para produção de gás no frasco (Figura 3.14) / **MR = meio de reação

Tabela 3.12 - Esquema geral dos procedimentos experimentais do teste BMP na 2ª Série.

Reator (triplicata)	Peso do Frasco (g)	Peso do Frasco + MR* (g)	Volume de Gás* (mL)	Circulação do N ₂ (min)
OS31	252,79	416,73	144	01
OS32	251,93	417,39	144	01
OS33	253,46	417,59	144	01
OS41	253,06	412,40	149	01
OS42	253,19	412,66	149	01
OS43	253,34	413,05	149	01
BS31	251,33	415,90	144	01
BS32	253,26	419,61	144	01
BS33	252,08	417,81	144	01
BS41	252,78	415,83	144	01
BS42	252,85	416,77	144	01
B21	252,40	421,67	144	01
B22	251,90	422,33	139	01

* Volume disponível para produção de gás no frasco (Figura 3.14) / **MR = meio de reação

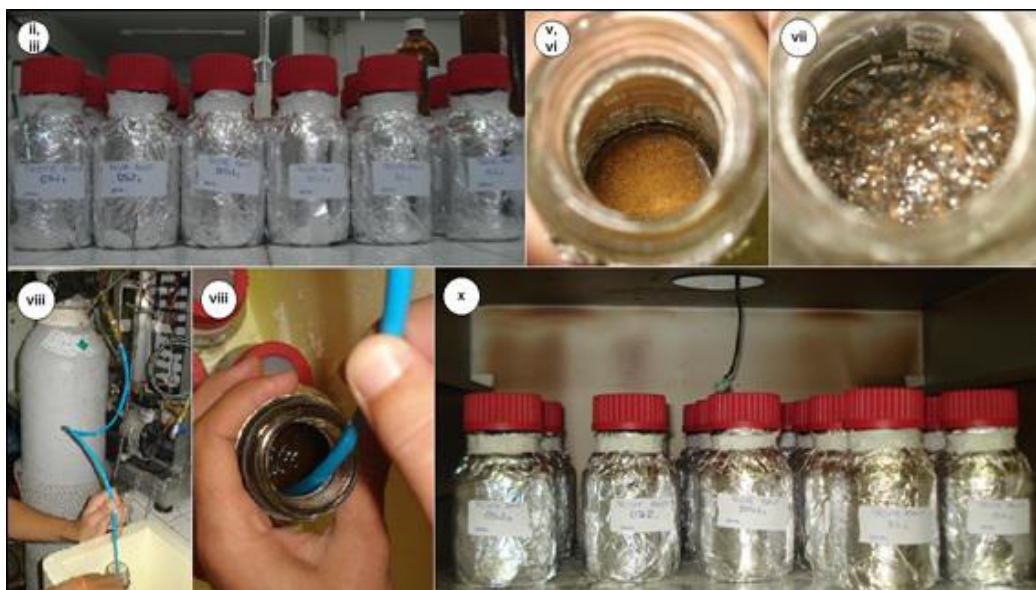


Figura 3.15 - Ilustração das fases (numeradas) do procedimento da inoculação dos Reatores BMP.

3.2.4.1. Caracterização Físico-química do Meio de Reação

A caracterização físico-química do meio de reação foi realizada no início e no final do teste BMP, no intuito de analisar o quanto de solução foi degradada e principalmente, através dos SSV, analisar a proporção de matéria orgânica consumida.

Tabela 3.13 - Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos de caracterização.

PARÂMETRO	MÉTODO
pH	PHMETRO DE BANCADA - MÉTODO ELETRODO
DQO TOTAL	MÉTODO B - MÉTODO DA REFLUXAÇÃO FECHADA OU DA DIGESTÃO DE PEQUENAS AMOSTRAS – MODIFICADO
SS, SSV, SSF.	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DOS SÓLIDOS SUSPENSOS E NÃO FILTRÁVEIS

Etapa II - Monitoramento Analítico

3.2.5. Monitoramento dos Reatores BMP

O monitoramento da produção de metano é efetuado através das análises de temperatura, as pressões, interna e ambiente, bem como as concentrações dos gases CO₂ (%), CH₄ (%) e N₂ (%). Os gases eram analisados de acordo com a pressão interna atingida nos frascos, ou seja, de acordo com o volume acumulado de biogás.

O produto deve ser expresso em litros, temperatura em condição normal, pressão em milésimos de bar (mbar), por grama de matéria seca (NL.g)¹MS). A análise dos gases (CH₄, N₂ e CO₂) é realizada por cromatografia gasosa (GC).

O monitoramento do biogás, comumente, é realizado até atingir o equilíbrio da digestão anaeróbia e, por isso, é de primordial importância, pois indica a produção estável do metano.

3.2.5.1. Temperatura

A temperatura a ser analisada é do ambiente da amostra e não propriamente da amostra, até porque a reação é anaeróbia.

O equipamento mostrado na Figura 3.16 é o termo higrômetro 4x1 MT-241 MINIPA, o qual efetua medição de temperatura interna e externa da estufa, e umidade. O método é digital, a resolução é de 0,1 °C e registra valores de máximos e mínimos atingidos.



Figura 3.16 - Demonstração da medição de temperatura do ambiente da amostra (estufa).

O acompanhamento da temperatura é muito importante devido ao crescimento dos micro-organismos na reação. Caso a temperatura esteja abaixo de 30°C poderá haver morte dos micro-organismos (reação lenta) e caso a temperatura esteja acima de 45°C poderá acontecer a morte dos micro-organismos mesófilos, por não suportarem altas temperaturas.

As análises de temperatura foram realizadas constantemente durante o período da inoculação, com um tempo máximo de 72 horas de uma medição a outra, para não ocorrer qualquer eventualidade que chegasse a atingir negativamente o sistema.

Durante o transporte dos reatores, de um laboratório ao outro, para análise dos gases, foi montado um esquema para controle e monitoramento da temperatura. As etapas seguidas estão mostradas na Figura 3.17.



Figura 3.17 - Isopor adaptado para o monitoramento da temperatura durante as análises de cromatografia.

3.2.5.2. Pressão Interna

A pressão interna foi realizada através do Manômetro Diferencial 2023P7 DIGITRON acoplado a uma agulha de 0,30 x 13 mm (carbox / Ares). O método é digital, a precisão de 2 mbar com medição máxima de 2000 mbar (Figura 3.18).



Figura 3.18 - Manômetro utilizado na pesquisa.

O manômetro utilizado efetua a medição da diferença de pressão, a pressão interna é calculada através da equação 3.2 com a unidade em milibar (mbar)

$$P_{\text{interna}} = P_{\text{atmosfera}} + \#P$$

(equação 3.2)

Onde:

P_{interna} = Pressão interna

P_{atm} = Pressão atmosférica

$\#P$ = Diferença de pressão

O acompanhamento da pressão interna é importante devido ao controle de risco do ambiente anaeróbio, caso essa pressão não seja acompanhada pode haver ruptura do septo, ou até mesmo perda total da amostra, devido à pequena explosão que venha a ocorrer com a formação do gás.

A quantidade e o tempo de cada análise dependem do volume que o gás possa atingir no reator. O importante é saber a pressão para poder definir a sequência e programação das análises de cromatografia. A Figura 3.19 mostra um septo em risco de ruptura.



Figura 3.19 - Amostra com alta pressão, septo com risco de ruptura.

O procedimento para medição é simples, basta ligar o aparelho, inserir a agulha no frasco através do septo e esperar o resultado estabilizar, como mostra a Figura 3.20.



Figura 3.20 - Demonstração da medição da pressão.

Uma observação importante sobre a adaptação da agulha no manômetro é em relação à mangueira de ligação. Nas primeiras medições, foi utilizada uma mangueira de aproximadamente 15 cm, o que facilitava as medições dentro da estufa devido a uma melhor mobilidade em consequência do tamanho da mangueira, porém percebeu-se uma considerável perda de gás, contida na mangueira, durante a medição, havendo,

portanto a substituição da mesma por uma de aproximadamente três centímetros, evitando assim, a perda de gás durante o procedimento de medição da pressão (Figura 3.21).



Figura 3.21 - Ilustração da medição de pressão com a mangueira de 15 e 3 cm.

Outra observação importante é que nas primeiras medições a amostra era retirada da estufa para a realização da medição de pressão, o que resultava numa pequena perda de temperatura. Isto foi logo percebido e o procedimento foi reformulado, as medições passaram a ser na própria estufa, já adaptada com a mangueira de três centímetros, como mostra a Figura 3.21.

3.2.5.3. Cromatografia Gasosa

A composição foi determinada através da cromatografia gasosa, com detecção por ionização em chama (FID) e condutividade térmica (TCD). O cromatógrafo utilizado nessa pesquisa foi o *Gás Chromatograph GC - 2014 - SHIMADZU* (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Cromatógrafo utilizado na pesquisa.

O procedimento da análise cromatográfica ocorreu da seguinte forma: através de uma seringa de 100 μL , eram coletados 100 μL do biogás no reator anaeróbio, desprezando 50% do biogás para o ambiente e injetando 50 μL do biogás no cromatógrafo gasoso (Figura 3.23), em seguida, um gás inerte, normalmente chamado de gás de arraste, neste caso, o hélio, conduzia a amostra para a coluna cromatográfica que tinham a função de separar os gases: CH_4 , CO_2 e N_2 . Após o tempo de retenção do(s) gás(s) na coluna, o registro da análise era apontado pelo detector, através do registro em um cromatograma. Cada pico era identificado pelo seu tempo de retenção e comparado com seu respectivo cromatógrafo.

A eliminação dos 50 μL de amostra no procedimento de amostragem foi adotada para se obter um melhor equilíbrio termodinâmico, ou seja, para garantir uma amostra mais pura, sem interferência da pressão do ambiente e/ou do vácuo provocado pela seringa no momento da coleta.

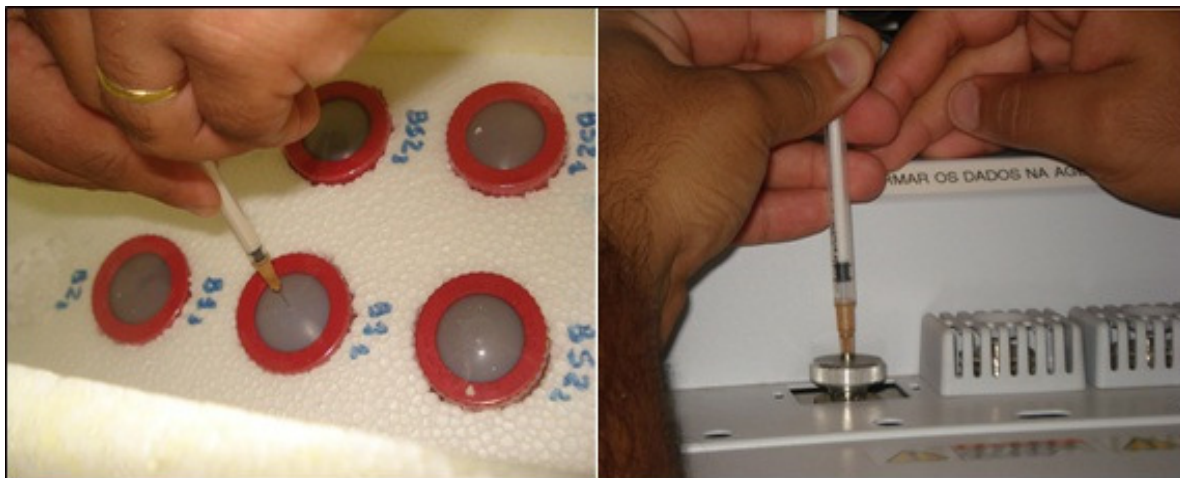


Figura 3.23 - Coleta do Biogás no reator anaeróbio com injeção no cromatógrafo gasoso.

As programações das colunas foram definidas pelo Me. Analista, como mostra a tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Programação DFID e DTCD utilizada no experimento.

	COLUNA DFID	COLUNA DTCD
CARACTERÍSTICA DA COLUNA	GASPRO 30 m 32 mm	CORAPAC Q 2 m 4 mm
TEMP. DE INJEÇÃO (°C)	240	50
TEMP. DA COLUNA (°C)	90	30
TEMP. DO DETECTOR (°C)	250	150
FLUXO DA COLUNA (ml/min)	1,40	20
TEMPO DE RETENÇÃO (min)	04	07
PARTIÇÃO	SPLITLESS	SPLITLESS

A composição da amostra foi determinada comparando a área do pico de cada gás com a área do pico do gás puro (padrão). A percentagem do biogás, em cada amostra, foi dada pela soma das áreas dos gases analisados.

3.2.6. Produção de Biogás CNTP (NL.kg)¹MS)

Para os resultados expressos em Litros Normais de biogás por quilograma de Massa Seca em Condições Normais de temperatura e Pressão (CNTP), seguiu-se um roteiro o qual se iniciou pelos resultados das leituras das pressões obtidas no Teste BMP. Essas pressões geram o volume de biogás produzido em cada reator, que através dos cálculos propostos por Harries *et al.* (2001) e De Araújo Moraes (2006), tem-se os valores produzidos de biogás em NL.kg⁻¹MS. Com o resultados de biogás em NL.kg⁻¹MS, foi relacionado o resultado da cromatografia do Metano, em percentagem, e obteve-se o BMP em NLCH₄.kg⁻¹MS. Para tanto, foram utilizadas planilhas do programa Microsoft Works.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

4.1. Composição Gravimétrica dos RSU do Aterro Sanitário

De acordo com a metodologia seguida para o levantamento dos bairros, conforme os dados do Censo 2010 (IBGE) foram encontrados as seguintes correlações:

Tabela 4.1 - Relação dos bairros e seus correlacionados.

BAIRRO	CORRESPONDENTE
ÁGUA FRIA	JD. CIDADE UNIVERSITÁRIA
ALTIPLANO	ANATÓLIA
INDÚSTRIAS	JARDIM VENEZA
IPÊS	ESTADO
BRISAMAR	MIRAMAR
CIDADE DOS COLIBRIS	JOSÉ AMÉRICO
CRISTO REDENTOR	ERNESTO GEISEL
CUIÁ	ERNESTO GEISEL
DISTRITO INDUSTRIAL	COSTA E SILVA
ERNANI SÁTIRO	ROGER
FUNCIONÁRIOS	OITIZEIRO
ILHA DO BISPO	ALTO DO MATEUS
JOÃO AGRIPINO	BESSA
JARDIM SÃO PAULO	JD. CIDADE UNIVERSITÁRIA
PARATIBE	MUÇUMAGO
PENHA	COSTA E SILVA
PEDRO GONDIM	BESSA
PLANALTO DA BOA ESPERANÇA	ERNESTO GEISEL
PONTA DOS SEIXAS	AERoclUBE
PORTAL DO SOL	MUÇUMAGO
TAMBIÁ	CENTRO
TRINCHEIRAS	ALTO DO MATEUS
COSTA DO SOL	JARDIM VENEZA
GRAMAME	VALENTINA
MUMBABA	VALENTINA
VARADOURO	JOÃO PAULO II
BARRA DE GRAMAME	ROGER

A tabela produzida com os dados referentes à população, renda familiar, geografia e classe social sobre os residentes da cidade de João Pessoa encontram-se no apêndice.

Através dos dados levantados para essa correlação dos bairros, foram encontrados extremos como, maior e menor população. Por exemplo, Barra de Gramame com 347 habitantes, Mangabeira com 75.988 habitantes; renda familiar domiciliar variando entre 232,00 reais e 3.127,00 reais, dos bairros São José e Cabo Branco, respectivamente.

Levando em consideração a representatividade dos setores e seguindo o procedimento MODECOM em campo, chegou-se aos resultados expostos na Tabela 4.2, a qual descreve a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro sanitários de João Pessoa no ano de 2011.

Tabela 4.2 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos depositados no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa – ASMJP.

CATEGORIAS MODECOM	COMPOSIÇÃO (%)
FRAÇÃO ORGÂNICA	34,90
RESÍDUO VERDE	15,46
PLÁSTICO	14,36
HIGIENE PESSOAL	10,08
PAPELÃO	4,63
FINOS	4,28
PAPEL	4,07
TECIDO	3,53
INFLAMÁVEIS	3,20
INERTE	1,87
METAL	1,31
VIDRO	1,30
ESPECIAIS	1,01

Uma observação considerada relevante para caracterização gravimétrica foi o fato de o aterro sanitário atender, além dos resíduos produzidos nos próprios bairros pessoenses, setores com características especiais de produção, tais como: orla marítima, cemitérios, feiras, matadouros e corredores. Nestes casos a produção de

resíduo restringiu-se às características peculiares do setor e, portanto, não puderam ser analisadas com o mesmo padrão de geração residual domiciliar/comercial. Para estes setores especiais e das cidades vizinhas atendidas pela ASMJP, foram selecionados um caminhão de cada cidade e setor, seguindo os procedimentos amostrais e de gravimetria da caracterização do município de João Pessoa.

Nota-se que a fração orgânica obteve um resultado muito abaixo da média, isto porque essa categoria representou apenas “restos de alimentos”, podendo ser considerado 50,36% com a junção da categoria “resíduos verdes” (podas e cocos), devido ao grande consumo nessa região.

Para o Teste BMP foi utilizada a fração orgânica de 34,90%, enquanto que, para o levantamento e atualização do histórico do ASMJP a matéria orgânica foi considerada 50,36%. A figura 4.1 ilustra a atual composição gravimétrica dos RSU do ASMJP.

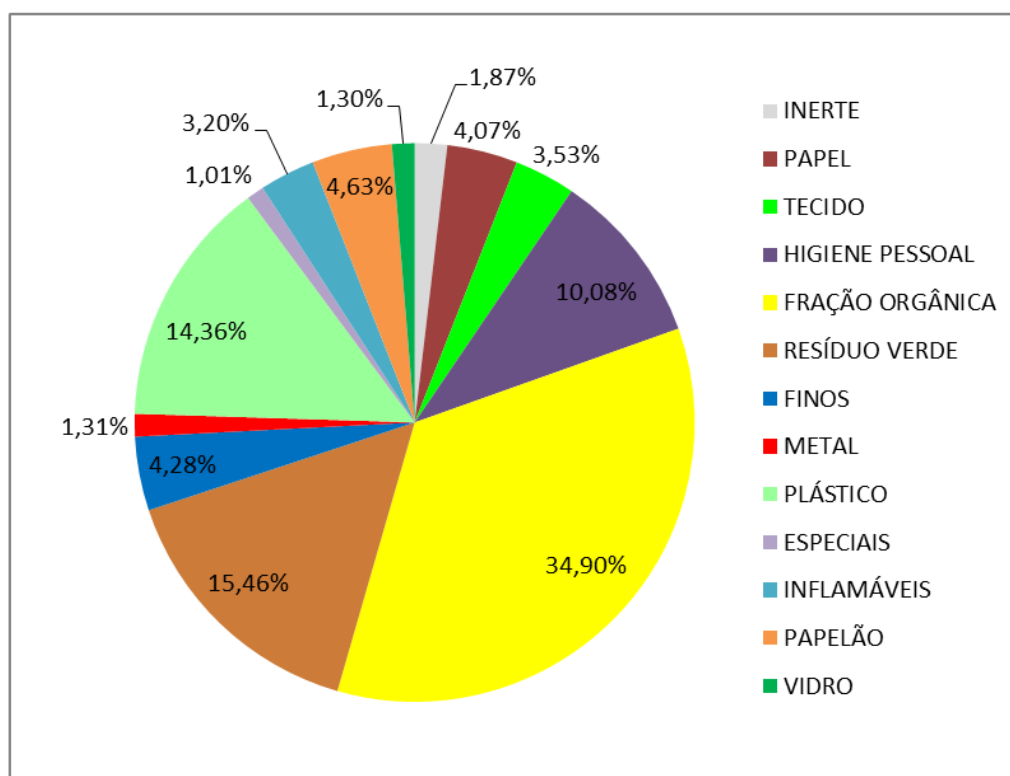


Figura 4.1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro municipal de João Pessoa – ASMJP.

Deve ser ressaltado também o potencial de valorização de materiais recicláveis como plástico, metal e vidro que representam juntos aproximadamente 17% (Figura 4.1.).

A fração representativa dos biodegradáveis usado no Teste BMP, faixa composta pela fração orgânica, papel, papelão, higiene pessoal e resíduos verdes, foi de 69,14%.

4.1.1. Histórico da Caracterização Gravimétrica dos RSU e Acompanhamento Operacional das Células

A Tabela 4.3 apresenta a série histórica da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do ASMJP, já incluindo valores da caracterização realizada nesta pesquisa. Devido à inexistência de um padrão metodológico para a caracterização gravimétrica dos RSU e para uma comparação fidedigna da série histórica dos RSU de João Pessoa, foi generalizado o resultado desta caracterização a um conjunto de componentes, que seguiu as seguintes classes: Matéria orgânica, papel/papelão, plástico, metal, vidro e outros.

Tabela 4.3 – Série histórica da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do ASMJP (em percentagem).

Matéria Orgânica	Papel/Papelão	Plástico	Metal	Vidro	Outros	Caracterização Gravimétrica
68,26	4,36	9,06	1,89	0,89	15,54	Flores Neto, Lima e Nóbrega (1998)
59,56	6,15	13,95	1,89	1,30	17,15	Flores Neto (2001)
60,08	13,46	13,40	1,44	0,23	11,39	GRS (2003)
61,34	6,00	14,13	1,23	1,11	16,19	Flores Neto (2006)
50,52	9,29	14,61	1,28	1,33	22,96	Albuquerque, R. M. Y (2011)

Percebeu-se que, pelo fato do ASMJP ter sido inaugurado no ano de 2003, as duas primeiras caracterizações gravimétricas representadas na Tabela 4.3, foram realizadas no antigo lixão do Roger, porém trás resultados próximos aos realizados nos anos de 2003, 2006 e o atual 2011.

Através da Tabela 4.3, nota-se o crescimento dos percentuais de plásticos, evidenciando que há falhas na coleta seletiva em via urbana, por ser realizado em apenas 22 dos 64 bairros de João Pessoa, o que equivale a 34,3% do total, indo de encontro à sua grande utilização na sociedade. Embalagens ainda são pouco aproveitadas, além de muitos polímeros não serem alvo dos catadores.

Para uma análise do comportamento dos resíduos orgânicos e biodegradáveis dentro desta série histórica do ASMJP, foi elaborada uma tabela (4.4) e plotado um gráfico que está ilustrado na Figura 4.2. A matéria orgânica foi representada através das categorias de fração orgânica (restos de alimentos) e resíduos verdes (podas e cocos). O biodegradável foi representado por matéria orgânica e papel/papelão.

Tabela 4.4 - Série histórica da composição gravimétrica dos resíduos orgânicos e biodegradáveis de João Pessoa/ASMJP.

Matéria orgânica (%)	Biodegradável (%)	Caracterizações gravimétricas
68,26	72,62	Flores Neto e Nóbrega (1998)
59,56	65,71	Flores Neto (2001)
60,08	73,54	GRS (2003)
61,34	67,34	Flores Neto (2006)
50,52	59,81	Albuquerque, R. M. Y (2011)

Percebe-se, através da Tabela 4.4 e da Figura 4.2, que a matéria orgânica era mantida numa média de 62% e teve uma queda em torno de 10% em relação à caracterização realizada neste experimento, fato que reflete a falta de uma metodologia a ser seguida com as mesmas definições de categorias ou reflete a um maior aproveitamento desses resíduos.

Os resíduos biodegradáveis saíram da faixa média de 70% para uma média de 63% nas duas últimas caracterizações, mesmo evidenciando pouco aproveitamento dos materiais recicláveis, atribuindo o crescimento das taxas de papel/papelão.

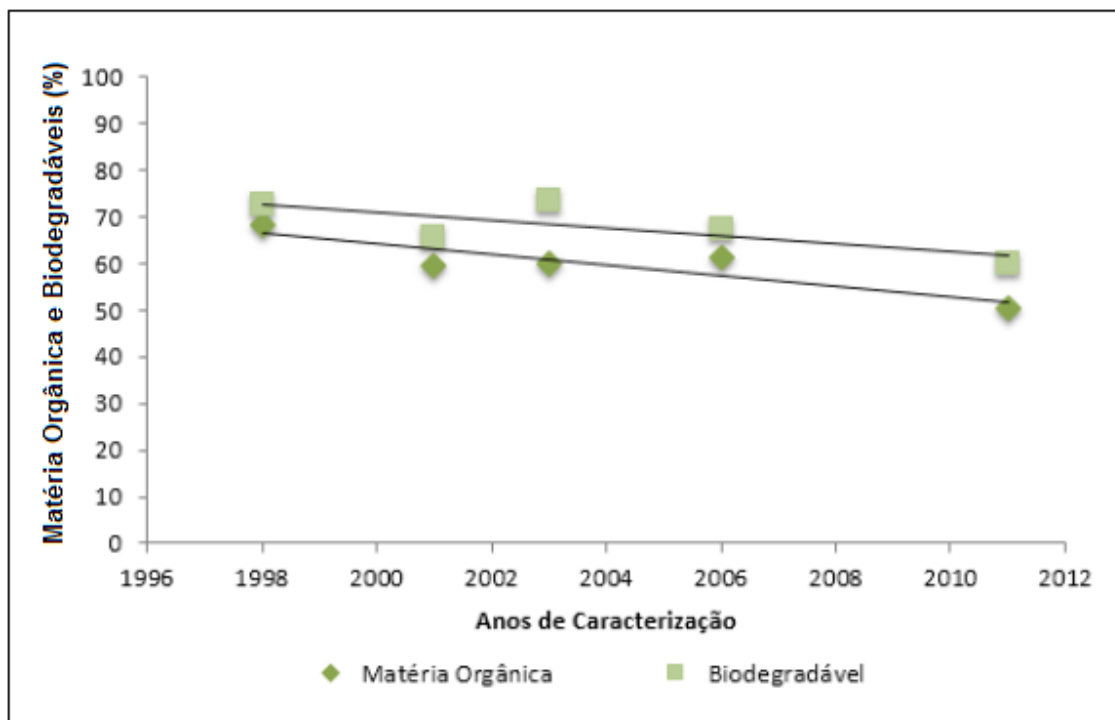


Figura 4.2 – Comportamento dos resíduos orgânico e biodegradável da série histórica do aterro metropolitano de João Pessoa – ASMJP.

O monitoramento da operação das células, foi realizado com base nas quantidades de resíduos depositados e no tempo, início e fim, do funcionamento das células (Tabela 4.5).

O plano de gerenciamento do aterro dividiu o preenchimento das células em fases e módulos. A atual fase do aterro é a primeira e consiste no preenchimento de quatro módulos de células: Módulo 1 (4 células); Módulo 2 (6 células); Módulo 3 (6 células) e o Módulo 4 (8 células), que estão representados na Figura 4.3. Dos módulos mostrados na Figura 4.3, foi concluído apenas o Módulo 1. O Módulo 2, formado por 6 células, encontra-se em funcionamento, das quais três e parte da 25ª célula foram preenchidas até o ano de 2011. A célula C25, foi formada para aproveitamento do espaço e fechamento total do Módulo 1.

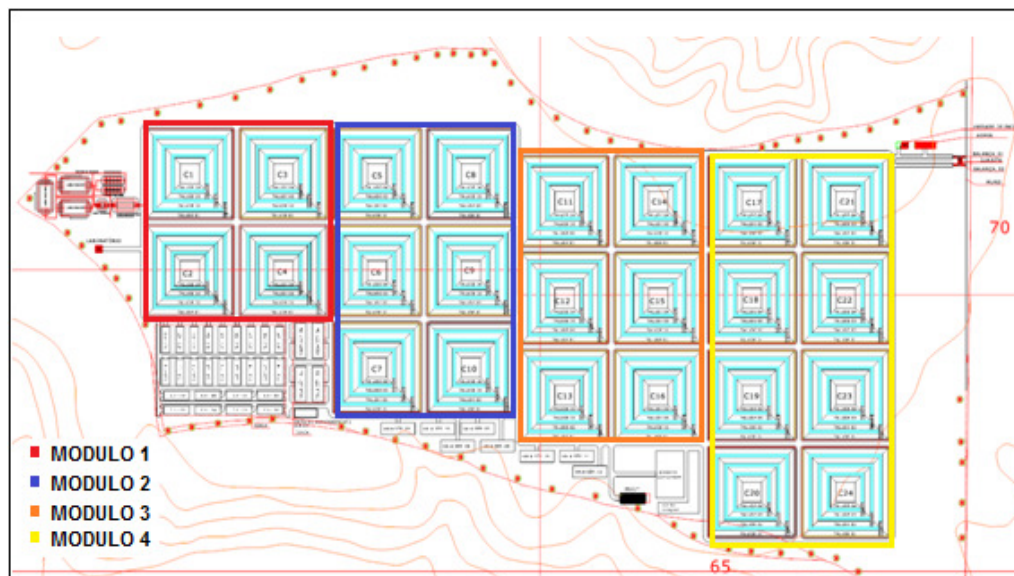


Figura 4.3 - Adaptação do projeto de instalação do ASMJP. Fonte SUDEMA (2003).

A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos neste levantamento, que serão utilizados para estimar a produção de biogás do aterro sanitário em estudo (item 4.3).

Tabela 4.5 - Dados das células utilizadas até dezembro de 2011.

Célula	Início *	Término*	Dias	RSU (ton/MU**)	%Fração Orgânica	% Fração Biodegradável
C1***	05/08/2003	04/04/2004	385	240.866	60,60	69,41
C2***	05/04/2004	08/03/2005	340	272.811	58,33	67,69
C4	09/03/2005	06/03/2006	336	388.961	56,06	65,97
C3	07/03/2006	12/02/2007	344	337.276	57,20	66,83
C5	12/02/2007	12/01/2008	336	401.639	54,93	65,10
C6	13/01/2008	30/12/2008	351	411.826	54,92	65,10
C7	30/12/2008	02/12/2009	336	362.866	53,80	64,24
C25	26/11/2009	30/04/2011	400	601.597	51,53	62,52
C6/C7	02/05/2011	31/12/2011	243	171.158	51,53	62,52
C4/C6	04/08/2011	31/12/2011	150	67.391	51,53	62,52
C3/C5	20/12/2011	31/12/2011	12	11.638	51,53	62,52

*Início e fim de operação da célula / ** Massa Úmida / ***Relatório GRS

4.2. Teste BMP

Os resultados a serem apresentados tornam-se amplos de detalhes devido às quantidades de análises realizadas durante todo processo, porém necessárias para avaliação e conclusão de um Teste BMP eficiente. Serão discriminados os resultados passo a passo, seguindo o seguinte roteiro: Avaliação do Inóculo; Apresentação da caracterização dos RSU; Avaliação da degradação anaeróbia do meio de reação; Avaliação da produção do biogás através do BMP e da cromatografia gasosa; Estimativa de geração do biogás do aterro ASMJP.

4.2.1. Avaliação do Inóculo

Os resultados da caracterização físico-química e da aclimação mostrados abaixo nas Tabelas 4.6 e 4.7, favoreceram o uso do lodo anaeróbio no meio de reação do Teste BMP.

Na tabela 4.6 estão descritos, o resultado de cada parâmetro analisado no lodo anaeróbio. O valor é exibido em média, pois todas as análises foram realizadas em triplicatas, para melhor exatidão dos resultados. Todos os resultados foram analisados e avaliados conforme a Tabela 2.8 (pag. 33).

Diante dos resultados encontrados, constatou-se que o pH, o UMIDADE e a densidade tiveram resultados similares aos de Cassini *et al.* (2003), Ramos (2008) e Von Sperling *et al.* (2001). Observou-se uma alta concentração de amônia (361 mg/L NH_3) ao relacionar com a faixa de efeito da toxicidade mais aceita que é de 100 a 200 mg/L na biodegradação anaeróbia (Aquino *et al.* 2008). Porém alguns autores estabelecem diferentes limites de inibição. Koster *et al.* (1984) observaram em sua pesquisa inibição com concentração de amônia livre, superior a 700 mg/L, já em pesquisas de Hansen *et al.* (1998), a inibição foi observada somente para concentrações superiores a 1.100 mg/L. Cassini *et al.* (2003) mostram uma variação entre 36 e 278 mg/L de amônia em lodos de tanques sépticos (Tabela 2.8).

Tabela 4.6 - Caracterização físico-química do lodo anaeróbio da ETE Mangabeira.

PARÂMETRO	LODO I	DESVIO PADRÃO
pH (dia da coleta ~ 27°C)	6,86	0,01
pH (conservação à 10°C)	7,27	0,01
UMIDADE (%)	98,95	0,46
DENSIDADE (g/L)	1.035	4,56
AMÔNIA (mg/L NH ₃)	361,00	-
DQO TOTAL (mgO ₂ /L)	66.746	8,41
DQO FILTRADA (mgO ₂ /L)	395,52	-
DQO DISSOLVIDA (mgO ₂ /L)	66.350	8,41
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS(mg/L)	950	-
SÓLIDOS TOTAIS (mg/L)	113.658	5,34
SÓLIDOS TOTAIS (%)	10,92	0,29
SÓLIDOS T. VOLÁTEIS (mg/L)	52.940	36,20
SÓLIDOS T. VOLÁTEIS (%)	47,37	0,36
SÓLIDOS T. FIXOS (mg/L)	59.486	16,33
SÓLIDOS T. FIXOS (%)	52,62	0,22
STV/ST (%)	47	0,47
DQOtotal/ST (%)	59	0,47
STV/DQOtotal (%)	79	0,37
DQOfiltrada/DQOtotal (%)	59	0,01
DQOfiltrada/STV (%)	75	0,25

O parâmetro mais utilizado para a avaliação dos teores de matéria orgânica no lodo é a sua concentração de sólidos voláteis. Vários resultados foram encontrados na literatura, principalmente em relação a reatores UASB. Pesquisadores como Abreu (2003) e Ramos (2008), apresentaram valores de STV/ST iguais a 77% e 74%, respectivamente, bem superiores ao lodo analisado na pesquisa que foi de 47%, (Tabela 4.6). Porém observou-se que as concentrações em miligramas por litros de sólidos totais voláteis não eram tão elevados, pois Abreu (2003) mostrou uma concentração de STV igual a 31.499 mg/L, Ramos (2008) apresentou uma concentração de STV igual a 16.325 mg/L, enquanto que o lodo anaeróbio analisado neste trabalho foi de 52.999 mg/L, indicando concentrações em proporções maiores de matéria inorgânica (STF) nos lodos de Abreu (2003) e Ramos (2008), como mostra a Tabelas 2.8.

Cassini *et al.* (2003) utilizaram em seus experimentos lodos provenientes de um reator UASB e observaram que o lodo continha variação de 60% a 69% na relação de $DQO_{\text{filt}}/DQO_{\text{total}}$. A relação de $DQO_{\text{filtrado}}/DQO_{\text{total}}$ obtida foi de 59%, indicando um resultado favorável para seu uso como inóculo (Tabela 4.6).

Franci *et al.* (2000), em estudo com lodo de esgoto da ETE de Eldorado/ES, apresentou resultados de STV de 37,2% e ST de 18,3%, enquanto os resultados encontrados neste trabalho foram 47,2% de STV e 10,8% de ST, indicando um lodo anaeróbio com menor percentual de sólidos totais fixos, ou seja, com um percentual menor de matéria inorgânica (Tabelas 4.6).

Quanto à relação de STV/DQO_{total} , foi obtido um valor médio de $79 \pm 0,37\%$. A relação entre os sólidos totais e DQO (ST/DQO_{total}) foi de $59 \pm 0,37\%$, indicando condições favoráveis para o uso do lodo proveniente de lagoa anaeróbia da ETE Mangabeira ser usado como inóculo (Tabela 4.6).

Como observações durante as análises físico-químicas destaca-se que foram feitas repetições das análises de DQO totais e Sólidos totais (ST), fixos (STF) e voláteis (STV) para verificar alguma alteração no comportamento do lodo, porém os resultados foram aproximados. A única alteração observada foi devido à densidade, que no intervalo de 24 horas apresentou decaimento, sendo assim, os volumes das amostras para as análises DQO e série de sólidos (ST, STF, STV) foram corrigidos conforme o valor da densidade, evitando que o resultado final contivesse informações errôneas.

Diante do resultado da concentração de STV ($\sim 53.000 \text{ mg/L}$) obtida, optou-se a realizar testes de aclimação para que o lodo anaeróbio tendesse a acelerar o processo de digestão. A Tabela 4.7, expõe os resultados encontrados na aclimação realizada com o planejamento de 24h de duração em relação às razões estudadas de alimento/micro-organismo (A/M).

Tabela 4.7 - Resultados dos Parâmetros da Aclimação.

PARÂMETRO FÍSICO-QUÍMICO	LODO II	AMOSTRA A/M 0,25	AMOSTRA A/M 0,50
pH	6,92	6,63	6,07
DQO Total (mgO ₂ /l)	7,062*	6.489	5.115
ST (%)	4,94	1,55	1,54
STV (%)	58,68	56,79	68,54
STF (%)	41,32	43,21	31,46
SS (%)	4,86	0,66	0,55
SSV (%)	58,89	62,86	73,33
SSF (%)	41,11	37,14	26,66

*Concentração inicial da DQO total do LODO II

Diante dos resultados mostrados na Tabela 4.7, pode-se perceber que o melhor efeito da aclimação com glicose aconteceu na amostra 0,5 A/M, pois manteve o pH neutro e obteve uma eficiência na redução de aproximadamente 28% na DQO total. A glicose é um composto facilmente biodegradável que aumenta a velocidade específica do consumo de oxigênio e consequentemente a degradação do meio.

Em termos de sólidos totais e suspensos, observou-se após o período de aclimação um percentual de 68,54% de STV e 73% de SSV, indicando uma eficiência de 20%, em relação a concentração inicial, aumentando em torno de 15% a matéria orgânica a ser consumida pelos micro-organismos durante a degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, no processo de biometanização.

Para uma avaliação mais correta o ideal seria determinar o carbono através do ensaio de COT (carbono orgânico total), mas não houve a oportunidade, ou seja, equipamento necessário. O mesmo em relação à caracterização microbiológica do lodo anaeróbio.

Na inoculação dos reatores do teste BMP foi utilizado o lodo anaeróbio bruto (Lodo II), devido às características positivas ao meio de reação, entre elas, altas concentrações de sólidos voláteis (Tabela 4.7) e, principalmente, pelo fato dos testes de aclimação ainda estarem em andamento no período do lançamento da 1ª série do Teste BMP.

Contudo, o lodo aclimatado (A/M 0,5) foi inoculado em um reator da 2ª série composto de resíduo biodegradável. Selecionou-se esse tipo de resíduo, devido à existência de um reator inoculado na 1ª série já apresentar resultados positivos para produção de biogás. O reator com o lodo aclimatado será referenciado e comparado com os outros reatores a partir no item 4.2.3.

4.2.2. Caracterização Físico-química da Fração Orgânica (OS) e Biodegradável (BS) do ASMJP

A caracterização físico-química foi realizada em amostras da fração orgânica e biodegradável secos, com o propósito de verificar o pH, a umidade e quantificar os sólidos voláteis totais, a fim de fazer uma avaliação prévia do resíduo a ser inoculado para o Teste BMP.

A análise de granulometria foi indispensável. Pressupõe-se que, devido à espessura da amostra de fração orgânica apresentar 59% da sua composição numa mesma classificação de diâmetro, espessura de 0,42 mm, a mesma terá uma reação de degradação anaeróbia mais rápida do que a biodegradável, pelo fato da homogeneização acontecer em um período de tempo menor. Porém, Catelli (1996) apud Alcântara (2007), diz que a redução da granulometria poderá aumentar a taxa de hidrólise, resultando em grande acumulação de ácido orgânicos, baixando muito o pH, o que inibiria a metanogênese.

Assim como no lodo anaeróbio, nas amostras de resíduos orgânicos (restos de alimentos) e biodegradáveis (matéria orgânica), deveria ser realizada a caracterização microbiológica para determinação da quantidade de celulose e o carbono orgânico total para determinação da quantidade de carbono que os micro-organismos conseguiriam degradar, porém não houve equipamento e laboratório disponibilizado para a realização das mesmas.

Tabela 4.8 - Caracterização Físico-química das Amostras Orgânica e Biodegradável após a sua preparação, em estado sólido (seco).

PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	FRAÇÃO ORGÂNICA (OS)	BIODEGRADÁVEL (BS)
pH	5,10	7,35
Umidade (%)	30,10	36,33
Densidade (g/cm ³)	0,906	2,388
ST (%)	24,15	76,32
STV (%)	82,36	94,76
STF (%)	17,64	5,24
STV/ST (%)	82	95
Granulometria (%)		
D = 0,42mm	59,00	-
D = 0,59mm	12,23	-
D = 1,18mm	23,95	-
D = 2,00mm	4,62	55,77
D = 4,00mm	0,22	44,43

D = diâmetro

4.2.3. Degradação Anaeróbia dos Meios de Reação

Com a abertura dos reatores observou-se que, de modo geral, todos os meios de reação apresentaram coloração escura, próximo ao marrom. Em alguns reatores biodegradáveis (BS) foram observadas presenças de materiais não degradados, como por exemplo, pedaços de cascas.

Presenças de fungos foram observadas nos reatores OS2 e BS2, os quais foram descartados durante o teste BMP por motivo de retardo da pressão em relação aos outros reatores (Figura 4.4).

Os reatores da 1ª série tiveram um odor característico ao estado de decomposição maior que os reatores da 2ª série, isso talvez, devido ao tempo de inoculação que foi de 111 e 66 dias, respectivamente.



Figura 4.4 - Reator OS2 da 1ª Série.

Com o reator OS2 descartado do teste BMP, foi realizado um teste de vedação, o qual utilizou um balde contendo água para imergir o reator, resultando no não surgimento de princípios de vazamento. Diante deste teste, torna-se positivo o método utilizado para medir a pressão interna dos reatores, cujo aparelho usado foi um manômetro acoplado a uma agulha de 0,30 x 13 mm (Figura 3.20). A importância na escolha dos equipamentos e materiais utilizados no teste BMP traz confiabilidade para a elaboração do protocolo do teste BMP.

Cada composição do meio de reação foi realizada em triplicata, como mostra a Tabela 3.11 e 3.12. Para a avaliação dos resultados foram selecionados os reatores que obtiveram pressões mais altas, principalmente devido as análises de cromatografia, que necessitavam de altas pressões para uma coleta padronizada e, possivelmente, resultados mais precisos.

Os resultados das caracterizações físico-químicas, iniciais e finais, dos meios de reação, tanto da 1ª como 2ª série do Teste BMP, estão expostos nas Tabelas 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12.

Tabela 4.9 - Balanço de massa e umidade dos meios de reação.

SÉRIE	REATOR	MEIO DE REAÇÃO INICIAL(g)	MEIO DE REAÇÃO FINAL (g)	MEIO DEGRADADO (g)	UMIDADE INICIAL (%)	UMIDADE FINAL (%)
1ª	OS1	162,75	159,55	3,20	99,72	99,90
1ª	BS1	163,86	161,02	2,84	99,76	99,88
1ª	B1	159,84	159,30	0,54	99,94	99,95
1ª	B2	169,27	169,06	0,21	99,96	99,96
2ª	OS3	165,46	163,75	1,71	99,90	99,92
2ª	OS4	159,47	157,94	1,53	99,91	99,92
2ª	BS3	164,57	161,51	3,06	99,63	99,85
2ª	BS4	163,92	162,88	1,04	99,60	99,85

Conforme a Tabela 4.9, observou-se que os reatores da 1ª série obtiveram uma quantidade maior degradada, porém o reator BS3 mostrou um resultado médio da degradação da 1ª série, provando o quanto influencia, fundamentalmente na degradação, à composição do meio de reação.

Os reatores “brancos”, ou seja, compostos apenas por lodo anaeróbio (sem aclimação) e solução nutritiva, tiveram uma reação muito baixa em relação aos reatores que contiveram resíduos sólidos urbanos, mostrando que a degradação do resíduo, por si só, já obteve uma boa eficiência.

Em relação aos reatores biodegradáveis (BS), o que obteve uma menor quantidade degradada foi o inoculado com lodo aclimatado (BS4), o qual resultou num pH final de 4,97, fato que justifica a acidificação do meio, prejudicando o crescimento microbiano.

Em relação aos reatores com frações orgânicas (OS), pôde-se observar que o mais degradado foi o OS1, enquanto que o OS3 e OS4 se diferenciaram apenas pela

quantidade de inóculo e mesmo assim se mantiveram com degradações próximas, podendo chegar a degradações aproximadas do OS1, conforme o tempo da inoculação.

Com os resultados apresentados na Tabela 4.10, verificou-se que a maioria dos reatores mantiveram os valores de pH neutros. Segundo Foresti (1993) apud Barcelos (2009), o pH ótimo para a digestão anaeróbia é de 6,8 a 7,5, porém o processo ainda continua bem sucedido num limite de 6,0 a 8,0, embora numa taxa mais baixa.

Os reatores, OS3 e OS4, concluíram com o pH em torno de 5, provavelmente acidificaram. O reator BS4 iniciou com o pH 6,10 e finalizou com o pH 4,97, talvez pelo fato da presença da glicose retardar a reação, pois pôde ter ocorrido a oxidação sem a fermentação da glicose, acontecendo, desta forma, a acidificação do meio de reação.

De acordo com Berthe (2006), estes valores de pH que estão abaixo de 7 tem características de estágios iniciais de degradação. O pH diminui até 5-6 depois volta para as próximas fases e estabiliza em torno 7-8 durante metanogênese.

Segundo experimentos de De Araújo Moraes (2006), o aumento nos valores de pH acima da neutralidade, são promovidos pela dissolução do carbono inorgânico, provavelmente no forma de íons de carbonato de hidrogênio (HCO_3^-), predominando o carbono inorgânico em pH entre 7,1 e 9,0.

As soluções tamponadas utilizadas na 1ª e 2ª série tiveram pH de 7,32 e 7,57, respectivamente. Tal fato indica que embora tenha ocorrido a degradação, com provável formação de ácidos, o tampão mostrou-se eficiente mantendo o pH dos meios de reação acima de 5,0, próximo da neutralidade.

Tabela 4.10 - pH dos meios de reação no início e fim do experimento.

SÉRIE	REATOR	PH INICIAL	PH FINAL
1ª	OS1	6,56	7,97
1ª	BS1	7,07	8,17
1ª	B1	7,66	8,14
1ª	B2	7,59	7,86
2ª	OS3	6,59	5,29
2ª	OS4	6,55	5,13
2ª	BS3	6,92	7,79
2ª	BS4	6,10	4,97

De acordo com a Tabela 4.11 foi possível verificar que a eficiência de remoção da DQO total nos reatores da 1ª Série foi entre 8% e 45%, implicando uma possível produção do metano nesses reatores. Já os reatores da 2ª Série estavam com a DQO final maior que a DQO inicial, reação que ocorre geralmente entre as fases II e III da digestão anaeróbia (Figura 2.10).

Tabela 4.11 - DQO total dos meios de reação no início e fim do experimento.

SÉRIE	REATOR	DQO _{INICIAL} (mg/l O ₂)	DQO _{FINAL} (mg/l O ₂)	TEMPO (dias)	DEGRADADO (%)
1ª	OS1	14.341	10.811	111	24,61
1ª	BS1	11.835	6.564	111	44,54
1ª	B1	5.113	2.703	111	47,13
1ª	B2	8.102	4.822	111	40,48
2ª	OS3	21.165	36.538	66	-
2ª	OS4	14.724	27.308	66	-
2ª	BS3	16.654	19.615	66	-
2ª	BS4	13.497	32.308	66	-

Segundo Chernicharo (1997) *apud* Sprenger (2009), no processo de avaliação da DQO é oxidada, tanto a fração biodegradável quanto a fração inerte do meio de reação, o que leva a uma superestimação do oxigênio consumido. Portanto, nem toda a DQO que foi produzida nas fases II e III poderia estar disponível para as bactérias metanogênicas, pois parte da DQO era recalcitrante e essa parcela de substrato

orgânico não pode ser degradada pelos micro-organismos fermentativos, devido à biomassa ainda não adaptada aos reatores anaeróbios ou aos substratos biologicamente inertes.

Os reatores brancos (B1 e B2) tiveram resultados de eficiência de remoção da DQO próximos, ou seja, o lodo anaeróbio, possivelmente, se degrada mais rápido que os resíduos, porém com valores inferiores de produção de metano devido a maior parcela de DQO recalcitrante, fato ocasionado pelo aumento nos sólidos suspensos fixos, ou seja, do material inorgânico. Segundo Souto (2005), picos de SSF correspondem aos momentos em que o pH atinge uma faixa de 8,0.

Em relação aos resultados de STV descritos na Tabela 4.12, obteve-se uma média de degradação da matéria orgânica em torno de 15%, confirmando as avaliações anteriores de pH e DQO total, que alega os baixos índices de eficiência ao fato de não ter estabilizado o processo de degradação.

Tabela 4.12 - STV dos meios de reação no início e fim do experimento.

SÉRIE	REATOR	STV _{INICIAL} (%)	STV _{FINAL} (%)	TEMPO (dias)	DEGRADADO (%)
1ª	OS1	71,99	59,32	111	17,60
1ª	BS1	83,21	73,07	111	12,19
1ª	B1	61,89	58,87	111	4,88
1ª	B2	63,63	59,93	111	5,82
2ª	OS3	80,00	64,80	66	14,00
2ª	OS4	82,93	71,24	66	14,10
2ª	BS3	80,17	70,77	66	11,73
2ª	BS4	95,12	80,18	66	15,71

Observou-se que os resultados de STV finais, tanto da primeira como da segunda série, continuaram altos, entre 59 e 80%, evidenciando a existência de uma boa parte matéria orgânica a ser degradada. Segundo Kelly (2002) *apud* Alves (2008), os resíduos só podem ser considerados estabilizados, com teor de ST abaixo de 20%. Possivelmente, esses reatores, nestas condições de composição e temperatura, precisariam de um

tempo maior para estabilização da degradação e biometanização.

4.2.4. Produção de Biogás

A produção de biogás está diretamente relacionada às medições periódicas de pressão e temperatura do reator. Para o cálculo do volume acumulado de biogás no instante “t”, foi considerada a temperatura interna de 35°C. Os tempos (t) estão relacionados diretamente com a duração dos testes BMP, que foram de 111 e 66 dias, chamados de 1ª e 2ª série, respectivamente. Através destes cálculos foram obtidas as curvas de produção de biogás em todos os reatores do teste BMP, com o intuito de visualizar e destacar as diferenças de comportamento, composição e produção de biogás. As curvas estão graficamente representadas na Figura 4.5.

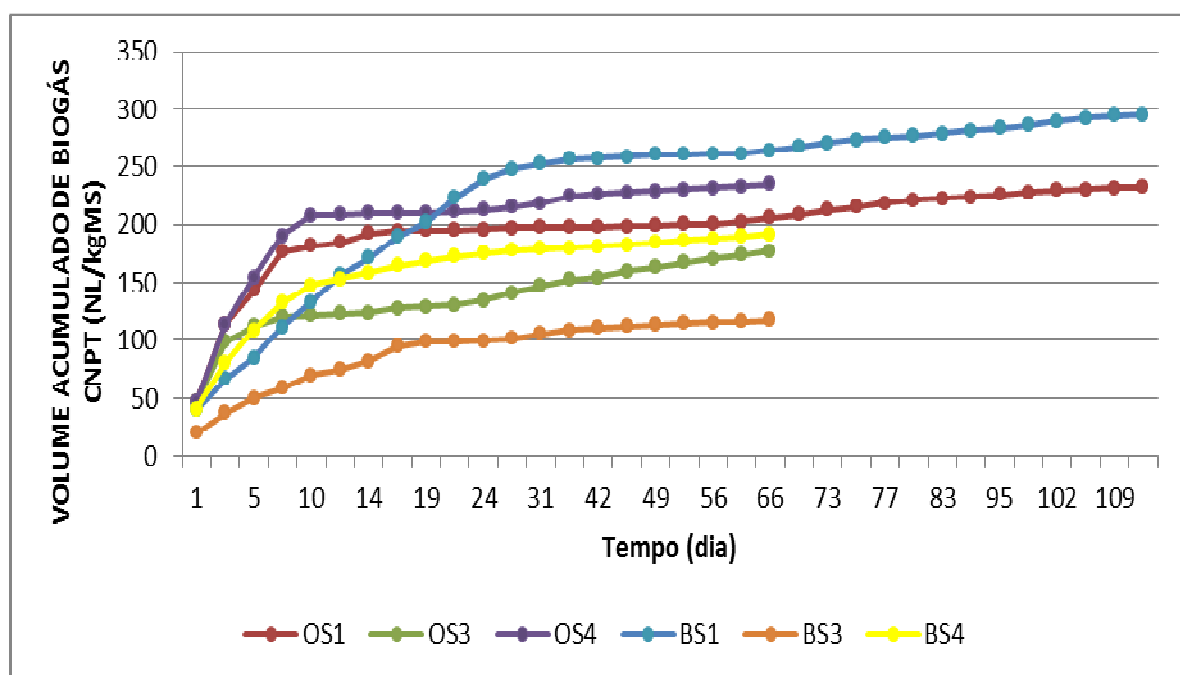


Figura 4.5 - Curvas da produção de biogás nos reatores OS e BS do Teste BMP.

Através da Figura 4.5 pode-se observar que os reatores OS1 e BS1 são os únicos que atingiram 90 dias, tempo pré-oficial do Teste BMP, isto porque permaneceram inoculados por 111 dias. Os demais reatores só permaneceram inoculados 66 dias, devido a impossibilidades de continuação do trabalho.

Analisando as curvas de produção (Figura 4.5), em termos de comportamento e composição, tem-se que, os reatores OS1, BS1, OS3 e BS4 obtiveram a mesma proporção na composição, sendo de 1:2 resíduo/lodo, resultando em volumes de produção aproximados, principalmente os reatores OS3 e BS4 que tendem a produção de biogás obtida no reator OS1. Já o reator OS4, único com proporção de 1:1, obteve uma cinética de reação diferenciada nos dez primeiros dias, pois produziu mais do que todos os reatores e manteve-se entre OS1 e BS1 até o final do teste, resultando na maior produção de biogás referente aos demais reatores da 2ª série.

O reator BS3 obteve a menor produção, fato que pôde ter ocorrido devido à proporção de 2:1 lodo/resíduo na sua composição (Tabela 3.10). A quantidade duplicada de lodo anaeróbio pode ter possibilitado o sinergismo, reação bioquímica que se dá pelo efeito retroativo da reação, provocando a incapacidade catalítica das enzimas, devido às substâncias que interagem formando toxinas.

O comportamento dos reatores B1 e B2, chamados de brancos por conterem apenas o lodo anaeróbio e a solução nutriente, não foram representados graficamente devido às produções baixas de biogás, acentuando, portanto, apenas a função de catalisador na degradação dos meios de reação.

Os valores das produções de biogás obtidos em cada reator, nos tempos de 66, 90 e 111 dias, estão expostos na Tabela 4.13. As planilhas decorrentes do teste BMP encontram-se no apêndice.

Tabela 4.13 – Volume Acumulado de Biogás CNPT (NL.kg⁻¹MS)

SÉRIE	REATOR	66 DIAS	90 DIAS	111 DIAS
1ª	OS1	205,95	224,90	232,74
1ª	BS1	264,22	282,66	295,15
2ª	OS3	177,57	-	-
2ª	OS4	235,63	-	-
2ª	BS3	117,47	-	-
2ª	BS4	192,24	-	-

O reator BS1, *composto de resíduo biodegradável*, foi o que obteve a maior produção, fato que chama atenção por produzir 20,43% de biogás a mais que o reator da *fração orgânica* (OS), atingindo uma produção de 282,66 NL.kg⁻¹MS em 90 dias, próximo ao resultado de 287,5 NL.kg⁻¹MS obtido por De Araújo Moraes (2006). O reator OS1 obteve um volume de 224,90 NL.kg⁻¹MS em 90 dias, dentro da faixa de 194 a 229 NL.Kg⁻¹MS obtida por Bayard et al. (2005) (Tabelas 3.10 e 4.13).

4.2.5. Cromatografia Gasosa

As análises de cromatografia gasosa mostraram resultados de 60,98 e 67,4% de metano (CNTP), em 90 dias, nos reatores BS1 e OS1, respectivamente. Segundo El-fadel *et al.* (1997) *apud* Aljarallah (2002) a composição típica de gás metano em aterros é de 40 a 70%.

Os reatores da 2ª série tiveram suas produções desconsideradas, devido o tempo de produção ser inferior a 90 dias.

4.3. Estimativa da Produção de Biogás

Para a estimativa da produção de biogás do ASMJP foram utilizados os resultados obtidos na caracterização gravimétrica (Tabela 4.5) e no teste BMP desta pesquisa.

Sabe-se que o Teste BMP foi realizado tanto com resíduos de fração orgânica (resto de alimentos) quanto resíduos biodegradáveis (matéria orgânica), porém apenas os resultados do reator biodegradável BS1 serão utilizados, perante coerência junto ao projeto do ASMJP, já que o aterro é composto por células de resíduos biodegradáveis. O volume de biogás e a percentagem de metano do reator BS1 foram de 282,66 NL.kg⁻¹MS e 60,98% CH₄, respectivamente.

Na Tabela 4.14 estão expostos os resultados teóricos da estimativa de produção de biogás e metano do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB.

Tabela 4.14 - Estimativa da Produção de Biogás do ASMJP.

Célula do ASMJP	Resíduo Biodegradável (ton/MS)*	m³ de Biogás	m³ de Metano
C1	66.878	18.903.704	11.527.478
C2	73.866	20.879.050	12.732.044
C3	88.995	25.155.325	15.339.717
C4	103.974	29.389.275	17.921.579
C5	104.593	29.564.320	18.028.322
C6	107.246	30.314.177	18.485.585
C7	93.245	26.356.618	16.072.265
C25	150.443	42.524.095	25.931.193
C6/C7	42.802	12.098.363	7.377.582
C4/C6	16.853	4.763.557	2.904.816
C3/C5	2.910	822.636	501.643
Total	851.805	240.771.120	146.822.229

* Parcela biodegradável do RSU em Massa Seca

Portanto, foi obtida uma produção teórica de 240.771.120 m³ de biogás no ASMJP (Tabela 4.14), quantificando em 92% maior que a produção real, a qual segundo informações do ASMJP foi de 18.020.193 m³ de biogás, captada entre o ano de 2003 a 2011.

É importante salientar que a produção teórica jamais será atingida devido a alguns fatores, tais como: Tempo de preenchimento das células; Microfissuras na camada de cobertura dos platôs e taludes; Vazamentos nas canalizações. Esses fatores representam a fuga do biogás para a atmosfera.

5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos concluiu-se que:

A caracterização gravimétrica dos RSU, com o uso da ferramenta MODECOM, trouxe definições de resultados mais precisos, dando confiabilidade à composição dos resíduos. A série histórica mostrou que a atual caracterização resultou em percentagens de matéria orgânica e biodegradáveis inferiores aos anos anteriores, de forma positiva, devido ao aproveitamento dos materiais recicláveis referente à implantação e atuação da coleta seletiva;

O lodo de lagoa anaeróbia, através da caracterização físico-química e da aclimação, teve efeito positivo e constatou que seu uso como inóculo em reatores BMP é possível e favorável, visto que colabora positivamente no processo de degradação dos resíduos;

O Teste BMP obteve em seus principais reatores de fração orgânica e biodegradável, volumes de biogás de 224,90 NL.kg⁻¹MS e 282,66 NL.kg⁻¹MS, em 90 dias, com 67,4 e 60,98 de metano (CNTP), respectivamente, e estimativa de produção de 240.771.120 m³ de biogás e 146.822.229 m³ de metano. Oitenta e três por cento (83%) dos reatores obtiveram produções de biogás dentro da média bibliográfica, mostrando o quanto é viável a produção e consequentemente, a coleta de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa – ASMJP.

Os resultados globais deste trabalho mostram que os objetivos iniciais foram alcançados e enfatiza a credibilidade no procedimento do Teste BMP, o qual viabiliza a elaboração para um procedimento oficial. No entanto, seria particularmente interessante dá continuidade a esse trabalho, tanto em análises de laboratório como em campo, em diferentes escalas.

6. PERSPECTIVAS

Estudar uma melhor relação de inóculo versus resíduo, utilizando soluções de micro e macro nutrientes, visto que favorecem consideravelmente ao equilíbrio do processo de digestão;

Realizar análises de NPK (nitrogênio de Kjeldahl total), o qual indica o grau de incorporação do nitrogênio e por consequência, o nível de fertilidade do material; análise de COT, o qual determina o carbono orgânico total e por ultimo, a caracterização microbiológica, para determinação da quantidade de celulose;

Realizar o teste BMP por batelada a fim de monitorar os principais parâmetros físico-químicos, como: pH, SSV e DQO, durante a degradação anaeróbia do meio de reação;

Utilizar reatores de maior escala para avaliar de forma mais precisa e eficiente a produção de biogás dos resíduos e a influência do volume da amostragem no potencial de geração de biogás;

Realizar análises de cromatografia gasosa com agulha adaptada ao cromatógrafo, evitando a coleta com seringas, impedindo assim, possíveis vazamentos ou entrada de ar atmosférico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2009). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 9ª ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2010). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 10ª ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2011). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 11ª ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2012). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. 12ª ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1987). NBR10004: Resíduos Sólidos – classificação.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (2012). Relatório Preliminar Ano Base 2011. <https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf> Acesso em: Julho de 2011.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PNRS (2010) - LEI FEDERAL Nº 12.305/2010 - Normas, criação, política nacional, resíduo, objetivo, defesa, preservação, meio ambiente.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). 2010. <<http://www.onu.org.br/onu-no-brasil/pnud/>> Acesso em: agosto, 2011.

REGULAMENTO DE LIMPEZA URBANA DO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA – (1997). Decreto LEI 3.316 (03/11/1997).

SUPERINTENDENCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE (SUDEMA) -
<<http://www.sudema.pb.gov.br/>> - Acesso em: Maio de 2011.

ABREU, F. C; PECORA, V; VELÁZQUES, S; COELHO, S. T. (2006). “Biogás De Aterro Para Geração De Eletricidade E Iluminação”. USP – Universidade de São Paulo. IEE/CENBIO – Instituto de Eletrotécnica e Energia / Centro Nacional de Referência em Biomassa.

ALBUQUERQUE, R. M. Y; DE ARAÚJO MORAIS Jr (2011). “Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de João Pessoa – PB”. XV SILUBESA – Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – Belo Horizonte/MG.

ALCÂNTARA, P. B. (2007). “Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados”. Tese de Doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

ALJARALLAH, R. (1997). “Denitrification in a landfill bioreactor with the use of methane as a source of carbon and/or electron donor for denitrification”. Thesis (doctor of philosophy) - The Faculty of Graduate Studies - Departament of Civil Engineering.

ALVES, I. R. F. S. (2008). “Análise experimental do potencial de geração do biogás em resíduos sólidos urbanos”. Dissertação de mestrado, Engenharia civil, UFPE.

AMARAL, M. C. S.; FERREIRA, C. F. A.; LANGE, L. C. e AQUINO, S. F. (2008). “Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lixiviados de aterro sanitários” - *Eng. Sanitária Ambiental*, vol.13, n.1, pp. 38-45. ISSN 1413-4152.

ANDRADE, M. R; FERREIRA, A. J. (2011). “A Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil Frente às Questões da Globalização”. REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA, Fortaleza, v. 6, n.1, p. 7-22, mar. 2011. ISSN 1982-5528.

BARCELOS, B. R. (2009). "Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos" Dissertação (mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) Brasília. Universidade de Brasília.

BARLAZ, M; LOUGHLIN, D. (2005). "Recycling worldwide: policies to strengthen markets for recyclables". Waste Management World, p. 31-40. July-August.

BARLAZ, M. A; ELEAZER, W. E; ODLE, W. S; QIAN, X. Y; WANG, Y. S. (2004). "Biodegradative Analysis of Municipal Solid Waste in Laboratory-Scale Landfills". Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/wywd/waste/downloads/Barlaz_Biodegradative_analysis_in_laboratory_scale_landfills.pdf>. Acesso em: Fevereiro de 2010.

BAYARD, R; GACHET, C; ARCHOUR, F; BRAUER, C; GOURDON, R. (2005). "Organic matter stabilization of sorted MSW under leachate recirculation". Proceedings Sardinia. Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italy.

BERTHE, C. (2006). "Etude de la Matière Organique contenue dans des lixívias issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés" - Université de Limoges - Ecole doctorale Science – Technique – Santé.

CASSINI, S. T. (2003). "Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás" - Rio de Janeiro. ABES.

COSTA, M. D; SOBRAL, M. C. M; OLIVEIRA, A. G; MELO I. V. (2010). "Avaliação Dos Instrumentos De Gestão Ambiental Do Aterro Sanitário Metropolitano De João Pessoa – PB". 3º Simpósio Ibero-americano de Engenharia de Resíduos - 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos – João Pessoa/PB.

DANTAS, H. V. (2010). "Triagem da qualidade de amostras de GNV e GLP usando espectrometria NIR e quimiometria" - Dissertação - João Pessoa – PB – UFPB.

DE ARAUJO MORAIS, Jr. (2006). "Influence des pré-traitements mécaniques et biologiques des Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) sur leur comportement biophysico-chimique en Installation de Stockage de Déchets (*ISD*)". Tese de doutorado : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006, 219 p.

FRANCI, R. (2000). "Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas" - Rio de Janeiro - ABES, 95p, projeto PROSAB.

HARRIES C.R; CROSS C.J; SMITH R. (2001). "Development of a biochemical methane potential (BMP) test and application to testing of municipal solid waste samples". In: Proceedings Sardinia, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italy. Cagliari: CISA. v. 1, p. 579-588. (2001a)

HENRIQUES, R.M. (2004). "Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica". Dissertação de Mestrado - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ. 189 p.

JARDIM, N.S. (1995). "Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado". São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), 1995. 278p.

JUCÁ, J. F. T. (2003). "Disposição final dos resíduos sólidos no Brasil". Anais do 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

MACIEL, F. J; JUCÁ, J. F. T; CODECEIRA, A. N; CARVALHO, P. B. N. (2002). "Recuperação de Biogás em Aterros de Resíduos sólidos Urbanos". Projeto Piloto da Muribeca, Pernambuco, Brasil.

MENDES, L. G, G; SOBRINHO, P. M. (2005). "Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário". Revista Ciências Exatas Vol. II, N°2, Pag. 71 - 76. Faculdade de Engenharia - Campus Guaratinguetá - FEG.

MILLER Jr, G. T. (2007). "Ciência Ambiental". 11ª ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

MODECOM TM – "Méthode de Caractérisation des Ordures Ménagères" (ADEME, 1993).

PINTO, D. M. C. L. (2000). "Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado". São Carlos, 192 p. Tese de Doutorado. EESC-USP.

RAMOS, R. A. (2008). "Avaliação da influência da operação de descarte de lodo no desempenho de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal" - Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM - 117/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p.

SILVA, S. A; OLIVEIRA, R. (2001). "Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias" – UFCG - Campina Grande, Paraíba.

TCHOBANOGLIOUS, G; THEISEIN, H; VIGIL, S. (1993). "Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues" - New York :Mcgraw-Hill. 975p.

ÍNDICE DE APÊNDICE

APÊNDECE I - Planilha de produção de biogás	109
APÊNDECE II - Planilhas de renda família e classe social	110
APÊNDECE III - Cromatografia.....	111 e 112

Dias	1	3	04/05	7	10	12	14	17	19	20	24	26	31	35	42	45	49	
OS1	1.016	2.493	2.449	2.205	2.091	2.042	2.061	2.102	-	-	-	2.002	-	-	2.910	3.015	3.050	3.
OS3	1.023	2.149	2.630	2.911	3.004	-	3.075	3.101	3.158	3.295	3.359	3.415	3.464	3.509	3.557	3.604	3.648	3.
OS4	1.023	2.493	3.553	4.434	4.920	-	4.955	4.957	4.963	4.985	5.019	5.074	5.153	5.276	5.331	5.352	5.378	5.
BS1	1.075	1.407	1.511	1.957	2.450	2.881	3.235	4.078	4.957	5.392	6.661	7.113	7.185	7.177	7.081	7.054	7.069	7.
BS2	966	2.227	1.392	1.418	1.404	1.677	1.875	2.279	2.412	2.597	2.851	2.979	2.560	2.543	2.543	2.546	2.510	2.
BS3	961	1.781	2.553	3.091	3.709	-	4.731	4.904	4.949	4.965	4.984	5.083	5.262	5.417	5.542	5.589	5.647	5.
BS4	971	1.923	2.777	3.420	3.892	-	4.843	5.698	6.341	6.813	6.813	7.067	7.207	7.312	7.399	7.467	7.523	7.
B1																		
B2																		
Potencial de Geração do Biogás																		
Dias	1	3	04/05	7	10	12	14	17	19	20	24	26	31	35	42	45	49	
OS1	144,42	210,08	-6,30	-34,66	-16,26	-6,93	2,65	5,80	-	-	-	-14,11	-	-	129,05	15,00	4,91	
OS3	145,43	160,05	68,43	39,95	13,23	-	10,08	3,78	8,07	19,41	9,20	7,94	6,93	6,43	6,81	6,68	6,30	5
OS4	145,43	209,07	150,60	125,39	69,06	-	4,91	0,25	0,88	3,15	4,91	7,69	11,34	17,39	7,94	2,90	3,78	5
BS1	135,47	47,13	14,87	63,39	70,07	61,37	50,28	119,85	125,01	61,88	180,34	64,27	10,21	-1,13	-13,61	-3,78	2,02	-4
BS2	123,05	160,65	-106,46	3,39	-1,81	34,77	25,18	51,48	16,93	23,59	32,40	16,26	-53,40	-2,14	0,00	0,34	-4,52	15
BS3	136,61	116,67	109,76	76,49	87,84	-	145,43	24,57	6,30	2,27	2,77	14,11	25,46	22,05	17,77	6,55	8,32	8
BS4	138,12	135,22	121,48	91,49	67,04	-	36,17	19,91	14,87	12,48	9,58	8,07	4,54	3,28	4,79	4,54	5,17	7
Volume Acumulado de Biogás (mL)																		
Dias	1	3	04/05	7	10	12	14	17	19	20	24	26	31	35	42	45	49	
OS1	144,42	354,50	348,20	313,54	297,28	290,35	293,00	298,80	-	-	-	284,68	-	-	413,73	428,72	433,64	43
OS3	145,43	305,48	373,90	413,85	427,09	-	437,17	440,95	449,01	468,42	477,62	448,89	455,82	462,25	469,05	475,73	482,03	48
OS4	145,43	354,50	505,09	630,48	699,54	-	704,46	704,71	705,59	708,74	713,66	712,40	723,74	741,13	749,07	751,97	755,75	76
BS1	135,47	182,60	197,48	260,86	330,93	392,30	442,59	562,43	687,45	749,32	929,66	993,93	1.004,14	1.003,00	989,39	985,61	987,63	98
BS2	123,05	283,70	177,24	180,63	178,82	213,60	238,77	290,25	307,18	330,78	363,18	379,44	326,04	323,89	323,89	324,23	319,72	33
BS3	136,61	253,18	362,94	439,44	527,27	-	672,70	697,28	703,58	705,84	708,62	711,39	736,85	758,90	776,67	783,22	791,54	79
BS4	138,12	273,34	394,82	486,32	553,36	-	589,53	609,44	624,31	636,79	646,36	617,50	622,04	625,32	630,11	634,64	639,81	64
Volume Acumulado de Biogás CNPT (NmL)																		
Dias	1	3	04/05	7	10	12	14	17	19	20	24	26	31	35	42	45	49	
OS1	163,55	401,45	394,31	355,07	336,66	328,81	331,81	338,37	-	-	-	322,39	-	-	468,52	485,51	491,07	49
OS3	164,69	345,93	423,43	468,67	483,65	-	495,07	499,35	508,48	530,46	540,88	508,34	516,19	523,47	531,17	538,74	545,87	55
OS4	164,69	401,45	571,99	713,99	792,20	-	797,76	798,05	799,05	802,61	808,18	806,75	819,60	839,29	848,28	851,56	855,85	86
BS1	153,42	206,79	223,63	295,41	374,76	444,26	501,21	636,92	778,50	848,57	1.052,79	1.125,57	1.137,13	1.135,85	1.120,43	1.116,15	1.118,44	1.1
BS2	139,35	321,28	200,72	204,55	202,51	241,89	270,40	328,69	347,87	374,59	411,28	429,69	369,22	366,79	366,79	367,17	362,06	37
BS3	154,70	298,74	444,04	497,84	597,44	-	764,00	790,80	798,78	799,33	803,47	805,64	834,44	850,44	870,54	888,08	898,30	90

	AMOSTRAS BMP	SEMANA	ÁREA CH4	ÁREA N2	ÁREA CO2		AMOSTRAS BMP	SEMANA	% CH4	% N2	% CO2	% TOTAL					
2	OS12	2	0	-	-		OS12	2	0	-	-	#VALOR!					
3		9	15019697,7	39554,7	128292,2			9	66,25197053	14,44440387	40,37192641	121,0683					
4		10	16659604,7	-	-			10	73,48560948	-	-	#VALOR!					
5		11	16307208,9	-	-			11	71,93118964	-	-	#VALOR!					
6		12	8420685,2	64109,7	33147,3			12	37,1436895	23,41128611	10,43103444	70,98601					
7		13	15332933,7	-	-			13	67,63365628	-	-	#VALOR!					
8		14	14199465,2	66109,9	0			14	62,63392039	24,14170997	0	86,77563					
9		15	16333443,1	74096,6	0			15	72,04690884	27,05825643	0	99,10517					
10	BS13	16	12921899,3	94314,3	0		BS13	16	56,99857006	34,44126336	0	91,43983					
11		2	15673,4	-	-			2	11,08693469	-	-	#VALOR!					
12		9	6883784,2	-	-			9	30,3644106	-	-	#VALOR!					
13		10	10954840,1	-	-			10	48,32186093	-	-	#VALOR!					
14		11	8504894,8	-	-			11	37,51513852	-	-	#VALOR!					
15		12	8231215,4	138694,1	0			12	36,30793715	50,64767511	0	86,95561					
16		13	7874745,1	-	-			13	34,73554467	-	-	#VALOR!					
17		14	5425229,5	198614,8	0			14	23,93071766	72,52924142	0	96,45996					
18	BS22	15	3422440,6	216119,5	0		BS22	15	15,09640462	78,92152746	0	94,01793					
19		16	2297242,1	235541,2	0			16	10,13314775	86,01385476	0	96,147					
20		2	20008,9	-	-			2	14,15374886	-	-	#VALOR!					
21		2	22869,8	-	-			2	16,17747131	-	-	#VALOR!					
22		9	3582854	-	-			9	15,80398903	-	-	#VALOR!					
23		10	8070939,1	-	-			10	35,6009575	-	-	#VALOR!					
24		11	9004863,1	-	-			11	39,72050148	-	-	#VALOR!					
25		12	9041646,7	122222,2	26701,5			12	38,89275415	44,88908782	8,40262018	92,28246					

AMOSTRAS BMP	SEMANA	ÁREA CH4	ÁREA N2	ÁREA CO2	AMOSTRAS BMP	SEMANA	% CH4	% N2	% CO2	% TOTAL
OS3	1	4009,6	173513,1	8324,8	OS3	1	0,0176864	63,362718	2,61970886	66,00011
	2	1125234,2	-	-		2	4,9634143	-	-	#VALOR!
	3	2842531,8	-	-		3	12,538424	-	-	#VALOR!
	4	3788645	147779,7	6232,1		4	16,711734	53,965513	1,96116274	72,63841
	5	1974744,3	-	-		5	8,7106081	-	-	#VALOR!
	6	1838665,8	225309,4	29502,2		6	8,1103651	82,277453	9,28396775	99,67179
	7	1302182,2	243368,5	0		7	5,743933	88,872192	0	94,61613
	8	852578,7	236247	0		8	3,7607294	86,271596	0	90,03232
	10	431913,8	249070,4	0		10	1,9051742	90,954386	0	92,85956
	1	1123,9	151063,1	3340,9	OS4	1	0,0049575	55,16453	1,05133881	56,22083
OS4	2	1361526	-	-		2	6,0056988	-	-	#VALOR!
	3	3709646,7	-	-		3	16,363272	-	-	#VALOR!
	4	3246458,9	159147,8	75234,9		4	14,320148	58,116863	23,6754678	96,11248
	5	2444085,3	-	-		5	10,780874	-	-	#VALOR!
	6	2776381,2	206447,2	28780,4		6	12,246633	75,389441	9,05682645	96,6929
	7	1320023,8	245676,3	0		7	5,8226324	89,714944	0	95,53758
	8	903733,4	248395,2	0		8	3,9863731	90,70782	0	94,69419
	10	443509,7	256557,6	0		10	1,9563238	93,688527	0	95,64485
	1	206387,5	99289,4	47357,2	BS3	1	0,9103764	36,258048	14,9027095	52,07113
BS3	2	12758702,4	-	-		2	56,278708	-	-	#VALOR!
	3	16091795,1	-	-		3	70,980998	-	-	#VALOR!
	4	16036689,8	38178,6	61871,5		4	70,737928	13,941886	19,4701755	104,15
	5	16001387,4	-	-		5	70,582209	-	-	#VALOR!
	6	11909661,1	79356,9	30721,3		6	52,533582	28,979189	9,66760304	91,18037

Dados
Gráficos em percentagem
Gráficos
Gráficos com Marcadores