



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS - CTRN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MONITORAMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES EM UMA CÉLULA
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE CAMPINA
GRANDE – PB**

KELLIANNY OLIVEIRA AIRES

Campina Grande, PB
Fevereiro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS - CTRN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MONITORAMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES EM UMA CÉLULA
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE CAMPINA
GRANDE – PB**

Kellianny Oliveira Aires

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2013

TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS - CTNR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MONITORAMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES EM UMA CÉLULA
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE CAMPINA
GRANDE - PB / KELLIANNY OLIVEIRA AIRES

Kellianny Oliveira Aires

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A298m Aires, Kellianny Oliveira.
Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande- Pb / Kellianny Oliveira Aires. – 2013.
118 f. : il. color.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo".
Referências.
1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Gases. 3. Célula Experimental.
I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Melo, Márcio Camargo de. III. Título.
CDU 628.4(043)

Campina Grande - PB

1 fevereiro de 2013

**MONITORAMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES EM UMA CÉLULA
EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE CAMPINA
GRANDE – PB**

KELLIANNY OLIVEIRA AIRES

Dissertação apresentada e aprovada em 28/02/2013 pela banca
examinadora constituída dos seguintes membros:

Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro - UFCG
Orientadora

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo – UFCG
Co-orientador

Prof. Dr. Willian de Paiva – UEPB
Examinador Interno

Prof. Dr. Joácio de Araújo Moraes Júnior – UFPB
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares que estiveram comigo ao longo dessa jornada acadêmica compreendendo as minhas dificuldades, em especial a minha mãe e as minhas irmãs, pela paciência, atenção e carinho nesses 2 anos. Vocês me ensinaram que sem luta não existe vitória.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por me conceder o dom da vida e a oportunidade de poder estar desfrutando de todas as suas maravilhas, dando-me coragem para prosseguir minha caminhada sem desistir diante dos obstáculos da vida, sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus pais Maria do Socorro Oliveira e João Bosco Aires, pelo aprendizado nos momentos difíceis, pelos valores e princípios passados, enfim, pelo o que sou. Amo vocês.

As minhas irmãs Katiana, Kessia e Karine pelo carinho, apoio e compreensão sem vocês a minha vida não teria sentido.

À minha sobrinha querida, Ana Rita que me proporciona momentos ímpares de alegria.

Aos meus tios e tias Helena, Socorro, Lourdes, Maria José, Vilani, Vânia e Manoel que contribuíram para que eu chegasse ao fim de mais uma conquista.

Aos meus orientadores Veruschka Monteiro e Márcio Melo pela acolhida, partilha e ensinamentos passados ao longo do ano.

Aos mestres que me ajudaram neste processo e que também são responsáveis pela minha formação, em especial, Carlos Galvão, Beatriz Ceballos, Annemarie Konig, Rui de Oliveira, Milton Bezerra, William Paiva, Joácio Jr. e Luiza Cirne, também aos colaboradores da UFCG Josete, Liana, Jadilson, Nildinho e Maria José que me atenderam com tanta atenção quando precisei.

Aos meus colegas de turma da UFCG Edilma, Vagner, Silvânia, Cláudia e Polyana.

Aos meus colegas de turma da UEPB Ana Maria, Lílian, Kierve, Fabiano e Izabelly

A todos os membros do GGA que colaboraram para o desenvolvimento dessa pesquisa, sem o apoio vocês não seria possível concretiza-la.

Aos queridos do GRS da UFPE, em especial a Fernando Jucá, Antônio Brito, Laís Lopes, Waldir, Sávio e Leandro pela acolhida, trocas de experiências e materiais repassados.

À minha amiga irmã Wanessa que sempre esteve comigo quando precisei e quando não precisei, me ouvindo, incentivando, me fazendo rir, chorar e me dando os melhores conselhos, muito obrigada por me emprestar seu ombro e seus ouvidos.

Aos meus queridos amigos e amigas Anderson, Silmary, Leandro, Luciano, Ricardo, Fabrício, Rafael, Beth, Edla, Renatinha, Andréia, Cleópatra, Edna, Andrezza, Juliana, Saulo, Edcarlos, Marciel, Nita, Rafaela, Amanda, Aluska, Bruninha e Ana Flávia que acompanharam esta minha trajetória, que de alguma forma me ajudaram e aguentaram nos momentos difíceis, compreendendo minhas dificuldades e me proporcionando tantas risadas, os guardarei pra sempre no coração.

Aos meus irmãos em Cristo da Paróquia de Nossa Senhora do Rosário.

Aos meus antigos e atuais colegas de trabalho Mizanne, Kareen, Jaciara, Jean, Mayara, Lucilene, Renato, Solange, Neide, Verônica, Jocélia e Lafite.

A seu Renato e D. Hosana que sempre me incentivaram e guardaram as melhores reportagens sobre meio ambiente, e a Ramom que sempre me socorreu quando meu computador dava problemas, o meu muitíssimo obrigada por tudo.

A todos os meus amigos da Família Tropeiros da Borborema Jéssica, Herton, Kayo, Filipe, Josy, Gerson, Toinho, Priscila, Danielle, Adalberto, Hildiane, Joselma, Richardson e Fabrício que sempre me recebem com um sorriso e me distraem todos os finais de semana, jamais esquecerei a solidariedade de vocês quando roubaram meu computador. Muito obrigada!!!

Enfim, a todos que estiveram presentes ao longo desta caminhada que acreditaram no meu potencial e me ensinaram que com persistência, empenho e confiança em si mesmo é possível buscar e conquistar TODO e QUALQUER objetivo.

Valeu cada noite que passei em claro, cada final de semana em casa, os empregos que deixei passar e de tudo que um dia abdiquei para realizar mais esse SONHO.

A todos vocês o meu muito obrigada por tudo que fizeram nesses 2 longos anos!!!

RESUMO

O monitoramento dos gases encontrados em aterros sanitários torna-se relevante por analisar a evolução do processo de decomposição da matéria orgânica, evitar problemas ambientais e avaliar aproveitamento do biogás para geração de energia. Com o intuito de simular o comportamento de um aterro sanitário foi construída uma célula experimental de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que permite monitorar o processo de decomposição dos resíduos de maneira controlada. Esta célula foi instrumentada de modo a permitir o monitoramento de vários parâmetros associados à produção de gases. Tendo em vista a importância de entender o comportamento da produção dos gases e seus fatores intervenientes, este trabalho teve por objetivo monitorar as concentrações de gases numa célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande-PB, analisando a relação da composição dos gases com as fases de degradação dos resíduos. A metodologia experimental contou com a etapa de construção da célula experimental, planejamento estatístico, metodologia operacional, onde as amostras foram separadas para a composição gravimétrica e volumétrica, para finalmente os resíduos serem compactados na célula experimental. Então, teve início o monitoramento dos parâmetros de pH, teor de umidade, alcalinidade total, ácidos voláteis, sólidos voláteis, micro-organismos aeróbios, temperatura dos resíduos aterrados, além dos gases encontrados na célula experimental a partir de três metodologias: o Kit Biogás com Biofoto, Drager e Cromatografia Gasosa. A determinação das concentrações dos gases foram realizadas em termos de CH_4 , CO_2 , H_2S , CO , O_2 , NH_3 e N_2 . Com base nos resultados observou-se que os parâmetros físico-químicos obtidos durante o período de monitoramento dos resíduos aterrados demonstram que estes se encontram em estágio de degradação compatível com a idade dos resíduos aterrados e as concentrações dos gases na célula experimental ficaram dentro do limite esperado para a fase metanogênica, não havendo até o final do monitoramento geração de lixiviado. Além de fornecerem resultados consistentes, esse estudo mostrou-se eficiente para o monitoramento de gases servindo de subsídio para projetos destinados a aterros em escala real.

Palavras- chave: Gases. Resíduos Sólidos Urbanos. Célula Experimental

ABSTRACT

Monitoring of gases found in landfills becomes relevant for analyzing the evolution of the process of decomposition of organic matter, avoid environmental problems e evaluate of using the biogas for power generation. With order to simulate the behavior of a landfill was built an experimental cell of Municipal Solid Waste (MSW) that allows monitor the process of decomposition of waste in a controlled manner. This cell was instrumented mode to allow the monitoring of several parameters associated with the production of gas. In view of the importance of understand the behavior of gases production and yours intervening factors, this study aimed to monitor the gas concentrations in a experimental cell of municipal solid waste in the city of Campina Grande-PB, analyzing the relation of the composition of the gases with the phases of degradation of the waste. The experimental methodology included the step the construction of the experimental cell, planning statistician, operational methodology, where the samples were separated for the gravimetric and volumetric composition, to finally the waste be compacted in the experimental cell. Then, started the monitoring of the parameters of pH, moisture content, total alkalinity, volatile acids, volatile solids, aerobic microorganisms, temperature of the waste grounded, and the gases found in the experimental cell from three methodologies: Biogas Kit with Biofoto, Drager and Gas Chromatography. The determination of concentrations of gases were realized in terms of CH_4 , CO_2 , H_2S , CO , O_2 , N_2 and NH_3 . Based on the results was observed that the physico-chemical parameters obtained during the monitoring of waste grounded these demonstrate that the MSW found in stage of degradation compatible with the age of the waste grounded and the concentrations of gases in the experimental cell were inside the expected limit for the methanogenic phase, not having until the end of the monitoring leached generation. Besides providing consistent results, the studies in the experimental cell, showed efficient for monitoring gases serving as subsidy for projects to full-scale landfills.

Keywords: Gases. Municipal Solid Waste. Experimental Cell

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Destinação dos RSU produzidos nos municípios do Brasil.....	20
Figura 2: Desenho esquemático de um aterro sanitário.....	22
Figura 3: Geração de RSU.....	26
Figura 4: Composição gravimétrica típica dos RSU no Brasil.....	27
Figura 5: Projetos energéticos.....	29
Figura 6: Projetos de MDL registrados na ONU até 12/07/2012.....	32
Figura 7: Projetos que geram créditos de carbono no Brasil.....	34
Figura 8: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica.....	45
Figura 9: Dinâmica de geração dos principais gases componentes do biogás em aterros de resíduos sólidos.....	46
Figura 10: Fases da biodegradação em aterros.....	48
Figura 11: Fatores que afetam a produção de gás em aterros.....	49
Figura 12: Célula experimental de RSU localizada na UFCG.....	55
Figura 13: Croqui da célula experimental de RSU.....	56
Figura 14: Procedimentos de coleta (a); pesagem (b); abertura das sacolas (c); homogeneização dos resíduos para preenchimento da célula experimental (d).....	58
Figura 15: Processo de quarteamento (a); pilha resultante (b); pesagem (c); descarregamento (d); preparação para a caracterização física (e); resíduos compactados na célula experimental de RSU (f).....	59
Figura 16: Composição gravimétrica dos RSU, recipientes para separação dos resíduos (a); separação física dos resíduos (b); separação de duas categorias de plástico (c) e (d).....	60
Figura 17: Composição volumétrica resíduos sólidos (a); pesagem (b); compactação dos resíduos (c); edição da altura e do diâmetro de resíduos (d).....	61
Figura 18: (a) e (b) Amostrador usado para coletar os resíduos sólidos urbanos nos diferentes níveis da célula experimental.....	62
Figura 19: Tubos de PVC perfurados.....	67
Figura 20: Dreno de gás (a); saída superior do tubo e torneira plástica com rosca para entrada do saco coletor (b).....	68

Figura 21: Equipamentos utilizados na coleta do biogás, bico acoplado a válvula de três saídas e seringa (a); saco coletor (b)	68
Figura 22: Detector portátil de gases Drager X-am 7000, aparelho ligado e calibrado (a); detecção das concentrações de gases com o saco coletor (b).....	70
Figura 23: Componentes do kit para determinação da composição do biogás.	71
Figura 24: Aparelho biofoto (a); determinação da amônia (b); amostra aguardando o tempo de reação 10 min (c); determinação de CO ₂ e CH ₄ (d).....	72
Figura 25: Modelo do cromatógrafo a gás utilizado na pesquisa.	74
Figura 26: Composição gravimétrica dos resíduos.....	76
Figura 27: Composição volumétrica (solto).	78
Figura 28: Composição volumétrica (compactado).	78
Figura 29: Temperatura em relação ao tempo de aterramento dos RSU.....	81
Figura 30: Teor de umidade em relação ao tempo de aterramento dos RSU.	83
Figura 31: Teor de sólidos voláteis em relação ao tempo de aterramento dos RSU.	86
Figura 32: Comportamento do pH ao longo do tempo	87
Figura 33: Variação da alcalinidade ao longo do tempo	90
Figura 34: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo de aterramento dos RSU.....	92
Figura 35: Comportamento de bactérias aeróbias totais ao longo do tempo e em profundidade na célula experimental de RSU.	93
Figura 36: Fissuras observadas na camada de cobertura da célula experimental	94
Figura 37: Concentração volumétrica (%) de CH ₄ e CO ₂ em função do tempo de enchimento da célula experimental.	96
Figura 38: Concentração volumétrica (ppmV) de H ₂ S e a NH ₃ em função do tempo de enchimento da célula experimental.	97
Figura 39: Concentração volumétrica (%) de CH ₄ e CO ₂ e O ₂ em função do tempo de enchimento da célula experimental.	100
Figura 40: Concentração volumétrica (ppm) de H ₂ S e CO em função do tempo de enchimento da célula experimental.	101
Figura 41: Concentração volumétrica (%) de CH ₄ e CO ₂ e N ₂ em função do tempo.	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Período médio de duração das fases de biodegradação dos RSU	46
Quadro 2: Composição típica do biogás em aterros	50
Quadro 3: Propriedades de alguns gases existentes no biogás de aterros.....	51
Quadro 4: Metodologias dos ensaios físico-químicos e microbiológico.....	63
Quadro 5: Características dos equipamentos de medição das concentrações do biogás.....	69
Quadro 6: Principais características do kit de análise de biogás com biofoto.	72
Quadro 7: Comparação entre estudos de composição gravimétrica dos RSU em Campina Grande – PB	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equivalência de créditos dos gases	31
Tabela 2: Fatores que afetam a geração de biogás e lixiviado.	35
Tabela 3: Massa de resíduos coletados e os bairros sorteados.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

CEG - Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro

DLU – Departamento de Limpeza Urbana

EPI's - Equipamentos de Proteção Individual

GEE - Gases de Efeito Estufa

GGA – Grupo de Geotecnia Ambiental

GIRSU - Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos

GRS - Grupo de Resíduos Sólidos

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

NBR – Normas Técnicas Brasileiras

NH₃ – Amônia

PCA – Ágar Contagem de Placa

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC – Policloreto de Vinila

RCE – Redução Certificada de Emissões

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SOSUR - Secretaria de Obras e Serviços Urbanos

TCD - Detector de Condutividade Térmica

TF - Tampão Fosfato

UEPB- Universidade Estadual da Paraíba

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 Considerações gerais sobre os resíduos sólidos urbanos	19
3.2 Destinação dos resíduos sólidos urbanos	20
3.3 Comportamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros	22
3.4 Células experimentais, lisímetros ou biorreatores	23
3.5 Resíduos Sólidos Urbanos e o Efeito Estufa.....	25
3.6 Geração de RSU e o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitário	26
3.6.1 Estimativa de geração de biogás em aterros sanitários de RSU.....	30
3.6.2 Mercado de créditos de carbono no Brasil	30
3.7 Fatores intervenientes na produção de biogás.....	35
3.7.1 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU.....	36
3.7.2 Temperatura.....	37
3.7.3 Teor de umidade dos RSU	38
3.7.4 Sólidos voláteis.....	39
3.7.5 Potencial hidrogeniônico (pH)	39
3.7.6 Alcalinidade	40
3.7.7 Ácidos voláteis	41
3.8 Digestão anaeróbia de RSU	41
3.8.1 Fases da digestão anaeróbia	42
3.8.2 Fases da biodegradação dos RSU.....	45
3.9 Composição do biogás.....	49
3.9.1 Monitoramento de gases	52
4 METODOLOGIA.....	54
4.1 Construção da célula experimental de RSU	54
4.2 Instrumentação da célula experimental de RSU	56
4.3 Caracterização dos resíduos e preenchimento da célula experimental.....	57
4.4 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU.....	60

4.5 Monitoramento da célula experimental de RSU	61
4.5.1 Coleta dos RSU	62
4.5.2 Caracterização físico-química e microbiológica dos resíduos	63
4.5.2.1 Teor de umidade	63
4.5.2.2 Sólidos voláteis.....	64
4.5.2.3 pH.....	64
4.5.2.4 Alcalinidade total	65
4.5.2.5 Ácidos voláteis.....	65
4.5.2.6 Análises microbiológicas – Aeróbios totais.....	66
4.5.2.7 Temperatura	66
4.6 Monitoramento de gases.....	67
4.6.1 Coleta do biogás na célula experimental.....	67
4.6.2 Métodos de análise das concentrações de gases	69
4.6.2.1 Monitoramento das concentrações de gases pelo Drager	69
4.6.2.2 Metodologia analítica do Kit de Análise de Biogás com Biofoto	71
4.6.2.3 Metodologia analítica da cromatografia gasosa	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1 Análise da composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos	75
5.2 Temperatura.....	81
5.3 Teor de umidade	83
5.4 Sólidos voláteis	85
5.5 Potencial hidrogeniônico (pH)	87
5.6 Alcalinidade	89
5.7 Ácidos voláteis	91
5.8 Micro-organismos aeróbios	93
5.9 Monitoramento de gases.....	95
5.9.1 Resultados Kit Biogás com Biofoto.....	96
5.9.2 Resultados Drager.....	100
5.9.3 Resultados Cromatografia Gasosa.....	105
6 CONCLUSÕES	108
6.1 Recomendações para futuras pesquisas	110
7 REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) depositados de maneira inadequada em aterros sanitários podem gerar inúmeros inconvenientes à saúde pública. Poluição do solo, água e ar podem ocorrer por percolação de líquidos e gases das camadas de base e cobertura do aterro. A disposição adequada dos resíduos com o aproveitamento, de gases podem além de reduzir o impacto ambiental, gerar lucros.

A emissão incontrolada do biogás pelos drenos de gases e camada de base e cobertura no aterro representa um grave problema de poluição atmosférica em nível local e global devendo, estas emissões serem mitigadas e controladas. Os efeitos da liberação dos gases localmente variam do simples mau odor até possíveis patologias na comunidade circunvizinha ao aterro. Em relação à poluição atmosférica global, o principal efeito da liberação do biogás é o aquecimento da atmosfera terrestre que vem gerando grandes discussões nos últimos anos. O gás metano (CH_4) é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global, seguido apenas do dióxido de carbono (CO_2) entre as emissões antrópicas de gases do efeito estufa (GEE). Estima-se que o CH_4 seja 21 vezes mais prejudicial que o CO_2 no aprisionamento de calor na atmosfera (MACIEL, 2003).

O biogás é formado a partir da degradação anaeróbia de resíduos orgânicos e composto por uma mistura de gases, como metano, gás carbônico, e em menor quantidade, hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis (PECORA *et al.*, 2008).

Em uma análise objetiva, o aproveitamento energético dos resíduos justifica-se por poder ofertar até 30% da eletricidade consumida no país. Entretanto, a comprovação da viabilidade do biogás possibilita a implantação de um programa para aterros sanitários e a comercialização de créditos de carbono capaz de tornar o Brasil, o principal agente internacional deste mercado. Esta viabilidade, além de inverter o fluxo internacional de capitais, pode ofertar milhões de empregos no Brasil, principalmente para pessoas de baixa qualificação profissional, em poucos anos (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Assim, alternativas para o uso ecoeficiente desses gases produzidos diminuiriam os impactos ambientais e poderiam servir de base para geração energética, suprimindo as necessidades funcionais do aterro e gerando energia sobressalente.

Portanto, o monitoramento das concentrações de gases torna-se relevante por reduzir a instabilidade dos aterros devido ao acúmulo de bolsões de gases no seu interior, minimizar a migração dos gases para as regiões circunvizinhas, evitando problemas ambientais, além de possibilitar uma melhor estimativa do potencial energético dos aterros sanitários, gerando renda aos administradores dos aterros, através da negociação dos créditos de carbono, tornando assim, a implantação e manutenção do aterro mais viável.

Tendo em vista, a grande incerteza na estimativa das emissões de gases em aterros de RSU em escala real, devido principalmente à variedade de processos que ocorre dentro da massa de resíduos, a medição das concentrações dos gases encontrados em células experimentais é de fundamental importância, por ser uma ferramenta que facilita o entendimento desses processos, inclusive, intervindo pontualmente em alguns parâmetros e fatores intervenientes como, por exemplo, temperatura, pH, umidade, composição gravimétrica e volumétrica, sólidos voláteis, ácidos voláteis, alcalinidade e micro-organismos aeróbios.

Pesquisas envolvendo aterros em escala real apresentam alguns inconvenientes, como: custo elevado, grande número de variáveis envolvidas no processo e a dinâmica de operação do aterro, o que dificulta a obtenção sistemática de dados sob condições conhecidas ou controladas. Sendo assim, células experimentais que simulam aterros sanitários, podem contribuir para a análise do comportamento de resíduos sólidos urbanos (SOUZA *et al*, 2012). Desta forma, durante esta pesquisa foi construída no Campus da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) uma célula experimental para simular um aterro sanitário em escala real. Esta célula experimental foi instrumentada de modo a permitir o monitoramento de vários parâmetros associados à produção de biogás.

Este trabalho no que se refere ao monitoramento de gases em uma célula experimental justifica-se pelo ineditismo e relevância da pesquisa que poderá fornecer subsídios para um aterro em escala real na Cidade de Campina Grande – PB, além de servir como um indicativo do potencial de poluição ambiental, ter um controle das emissões desses gases, avaliar os processos de degradação, reduzir os efeitos nocivos ao meio ambiente, como também buscar de tecnologias limpas variando assim a matriz energética.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Monitorar as concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos localizada na cidade de Campina Grande – PB analisando a relação da composição dos gases com as fases de degradação dos resíduos.

2.2 Objetivos Específicos

- Medir as concentrações de metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxigênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e nitrogênio encontrados na célula experimental.
- Analisar três diferentes técnicas de medidas de concentrações de gases.
- Estudar a relação da composição dos gases com as fases de degradação dos resíduos sólidos urbanos e o tempo de disposição na célula experimental.
- Conhecer as características da composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos sólidos urbanos, da cidade de Campina Grande – PB.
- Relacionar os dados de monitoramento de gases com os parâmetros físicos, físico-químicos e microbiológicos dos resíduos depositados na célula experimental.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Considerações gerais sobre os resíduos sólidos urbanos

Os transtornos decorrentes dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos nas grandes cidades abrangem vários aspectos, desde sua origem, produção, coleta, tratamento e destino final, como também as grandes quantidades de resíduos gerados e os consequentes problemas sociais, ambientais e de saúde pública. Os problemas ambientais incluem contaminação do solo, da água e do ar. Os problemas sociais envolvem as camadas da população que vivem como catadores nos “lixões”, e deles dependem direta ou indiretamente para sua sobrevivência. Os resíduos sólidos, como resultado das diversas atividades do homem, têm sofrido um aumento contínuo em sua geração como consequência do aumento populacional e da intensidade da industrialização, fatores básicos que regem a origem e a geração de resíduos sólidos nos centros urbanos. Diante do crescimento populacional constatado, particularmente, no hemisfério sul, acompanhado de um processo desequilibrado de industrialização e modernização, chega-se à conclusão que a quantidade de resíduos sólidos gerados diariamente tende a ser crescente (BARROS, 2004).

A excessiva concentração da população nas aglomerações urbanas não só leva a uma incessante produção de resíduos sólidos domiciliares, como também implica na geração de resíduos industriais, que são de difícil manejo. Ocorrendo da mesma forma com os resíduos comerciais e dos serviços de saúde, com os resíduos radioativos e os despejos de substâncias químicas perigosas, entre outros.

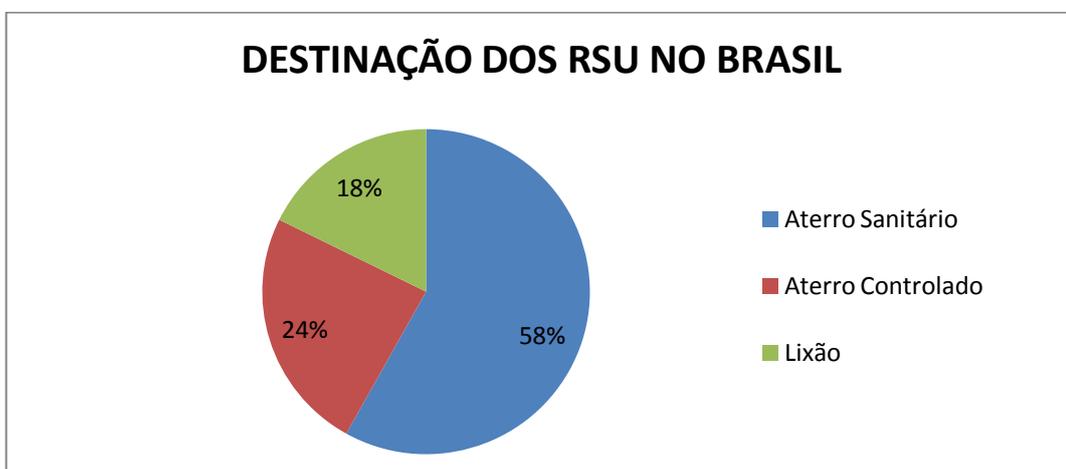
A NBR 10.004/04 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define como resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semi sólido que resultam de atividades humanas de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se, também, resíduo sólido o lodo proveniente de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, face às tecnologias disponíveis.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), através da lei 12.305/2010, em seu Art. 1º dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Essa legislação tem como objetivo garantir uma adequada gestão integrada dos resíduos sólidos, estabelecendo a responsabilidade compartilhada e fazendo com que toda a cadeia responsável pela produção de um bem ou produto de consumo se responsabilize pela destinação final do material, com isso decidiu-se como meta que, até agosto de 2014, todos os lixões sejam erradicados do país e substituídos por aterros sanitários, instalações ambientalmente adequadas para o manejo e depósito de rejeitos.

3.2 Destinação dos resíduos sólidos urbanos

Parcela considerável dos RSU produzidos no Brasil tem destinação final inadequada. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPA), em termos percentuais houve uma singela evolução na destinação final ambientalmente adequada de RSU no Brasil, destaca-se que cerca de 58% do resíduos gerados em 2011 foram dispostos de forma adequada (Figura 1). No entanto, em termos quantitativos, a destinação final inadequada cresceu 1,4%, o que representa 23,3 milhões de toneladas de resíduos dispostos em lixões e aterros controlados o que corresponde a 42%. Os dados mostram as dificuldades da administração pública municipal em gerir a destinação final dos resíduos sólidos produzidos. A Figura 1 mostra a destinação dos RSU no Brasil.

Figura 1: Destinação dos RSU produzidos nos municípios do Brasil.

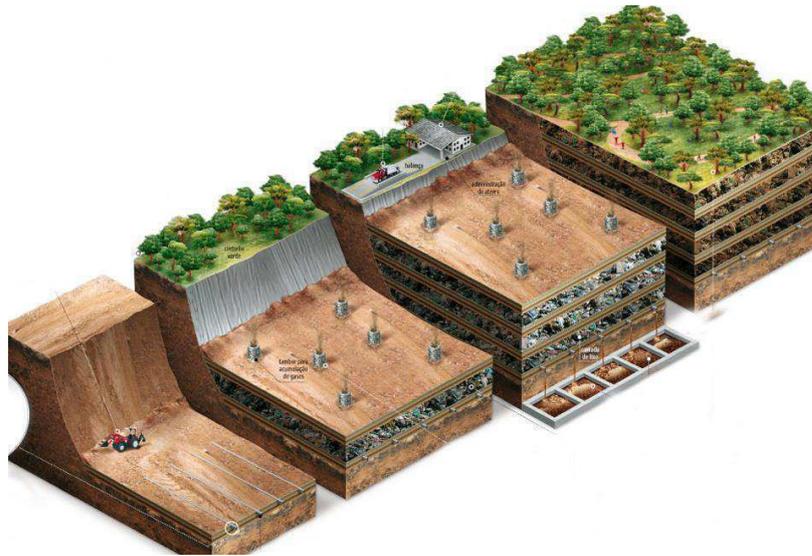


Os aterros controlados são formas de destinação dos RSU que objetivam mitigar os riscos ao meio ambiente e a saúde pública. O Manual de Gerenciamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1995) apresenta os aterros controlados como lugares de destinação onde os resíduos sólidos são depositados e cobertos por uma camada de solo ou outro material inerte ao final de cada jornada de trabalho. O procedimento de operação do aterro controlado minimiza riscos a saúde da população, diminuindo odores desagradáveis e contendo parcialmente a proliferação de vetores. Uma característica dos aterros controlados se orienta para o fato de não disporem de impermeabilização em sua base. Isso pode propiciar a contaminação do solo por meio dos subprodutos gerados na massa de RSU, sobretudo o lixiviado (também conhecido como chorume), esse contaminante pode alcançar o lençol freático, poços ou mesmo pequenas minas próximas do aterro.

Os aterros sanitários se apresentam como soluções mais completas para a disposição final dos RSU. Nesse tipo de disposição as células são impermeabilizadas com geomembranas para evitar contaminação do solo ou mesmo do lençol freático (Figura 2). Os subprodutos gerados são orientados para drenos previamente projetados, de forma a se obter maior controle sobre os mesmos.

Para que os aterros sanitários se configurem como unidades de tratamento de resíduos que não causem danos ao meio ambiente e à saúde, devem possuir o acompanhamento e monitoramento adequado da disposição de RSU, à luz das tecnologias existentes e normas previstas para tal. A disposição de resíduos em aterros sanitários requer uma série de critérios operacionais e geotécnicos, bastante complexos, devido aos mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos e que influenciam diretamente sobre o comportamento geral dos aterros. Conhecer os mecanismos que atuam sobre os aterros sanitários, bem como os parâmetros que os descrevem, é importante, principalmente porque a eficiência da disposição de RSU contribuirá com a garantia de sua segurança, principalmente da sua estabilidade estrutural. A operação dos aterros sanitários envolve inúmeras intervenções e atividades multidisciplinares, relacionadas à engenharia civil e sanitária e ao controle ambiental.

Figura 2: Desenho esquemático de um aterro sanitário.



Fonte: VEJA, 2009.

A falta de destinação final adequada no país pode ser explicada por diversos fatores tais como: falta de capacitação técnico-administrativa, baixa dotação orçamentária, pouca sensibilização da população quanto aos problemas ambientais ou mesmo a falta de estrutura organizacional das instituições públicas envolvidas com a questão, o que acaba refletindo na inexistência ou inadequação de planos de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (GIRSU). A busca de soluções para a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos tem se constituído em um grande desafio, portanto, aspectos como produção de lixiviados e biogás precisam ser melhor estudados.

Segundo Vazoller (2001) a disponibilidade de terras, aliado ao baixo custo de construção e operação, quando comparado a outros sistemas, além da utilização do biogás como fonte alternativa de energia faz dos aterros sanitários uma das soluções mais viáveis para o tratamento e disposição dos RSU no Brasil.

3.3 Comportamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros

Nos últimos anos, no Brasil, tem-se observado uma crescente preocupação com a segurança e estabilidade geotécnica dos aterros sanitários de RSU, principalmente devido à verticalização desses aterros, à heterogeneidade dos RSU, o que justifica a necessidade do conhecimento do comportamento e das propriedades físicas, químicas e biológicas dos resíduos. A interação entre os

diversos tipos de materiais que compõe os RSU, quando dispostos em um aterro sanitário, também ainda é pouco conhecida, devido ao fato de cada resíduo possuir uma composição e ter comportamento diferente, geralmente dependente do tempo. A forma como estes resíduos são dispostos também interfere diretamente sobre o comportamento dos aterros sanitários, podendo influenciar a sua estabilidade e na geração de biogás. Logo, o conhecimento dos aspectos operacionais da disposição dos RSU configura como um fator de importância na disposição de RSU, uma vez que, aliado às propriedades dos resíduos, permite obter maior segurança nestas obras. Dessa forma, torna-se relevante a realização de estudos que contribuam para o entendimento dos fatores que influenciam o comportamento dos aterros sanitários, notadamente a forma de disposição dos resíduos e o comportamento destes a longo prazo (CATAPRETA, 2008).

Os aterros para municípios de pequeno e médio porte devem ser projetados com base em tecnologias apropriadas que associem a simplicidade operacional, baseada em procedimentos científicos, à flexibilidade necessária para compatibilizar o projeto, a operação, os requisitos ambientais e as potencialidades locais.

Quando os resíduos são depositados em aterros inicia-se o processo de biodegradação, que compreende reações físicas, químicas e biológicas, que resultam na produção de lixiviado e de gases, devido a transformação dos resíduos orgânicos a compostos, com menor peso molecular como dióxido de carbono, metano, oxigênio, entre outros (MELO, 2003).

A decomposição da matéria orgânica e a produção de biogás podem prolongar-se de 30 a 100 anos. Mas não é fácil prever com certeza a taxa ou velocidade de decaimento na decomposição e geração de biogás, uma vez que são muitas as classes de materiais que se decompõem e são vários os fatores que influem nos processos (BARLAZ *et al.*, 1989; MONTEIRO, 2003).

3.4 Células experimentais, lisímetros ou biorreatores

Os biorreatores, lisímetros ou células experimentais representam uma técnica bastante interessante, pois permitem obter parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros. Esta técnica permite a disposição adicional de RSU ou reuso mais rápido do aterro, além de ser possível obter aproximações das condições em escala real, pois os resultados estão

incorporados à influência das condições ambientais e dos componentes e resíduos nele existentes.

Uma célula experimental consiste num sistema que permite uma aceleração induzida do processo de decomposição dos resíduos de maneira controlada. Isto está de acordo com Barlaz (1989) que diz que o estudo do comportamento de aterros tem sido facilitado através de modelos de aterros em escala experimental que simulam e, aceleram a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos (ALVES 2012).

Simular, por meio de células experimentais, o comportamento de um aterro em escala real é uma atividade de grande importância, uma vez que permite o estudo de todas as dinâmicas que ocorrem em seu interior, bem como a avaliação do comportamento dos resíduos quanto aos aspectos físicos, químicos e microbiológicos. As células experimentais executadas e controladas corretamente reduzem impactos ambientais, pois controlam a produção de lixiviado/percolado e as emissões de biogás, reduzindo assim a contaminação do solo e as emissões de gases ao meio ambiente. Além disso, normas técnicas que hoje são muitas vezes inadequadas devem ser reformuladas ou aprimoradas a partir dos estudos desenvolvidos em células experimentais (MELO, 2003; MONTEIRO, 2003).

Estudos em células experimentais foram realizados por diversos autores Medeiros (2002); Youcai *et al.* (2002); Maciel (2003); Monteiro (2003); Jonh (2004); Levine *et al.* (2005); Swati (2005); Reddy (2006); Alcântara (2007); Catapreta (2008); entre outros, visando compreender as dinâmicas ocorridas no processo de degradação dos resíduos. Na cidade de Campina Grande, local dessa pesquisa, estudos também foram e vem sendo desenvolvidos neste intuito por Leite (2008); Garcez (2009); Meira (2009); Pereira (2010); Farias (2011); Araújo (2011); Melo (2011); Silva (2012); Alves (2012) e Ribeiro (2012), todas as pesquisas desenvolvidas em células experimentais na cidade envolvem a busca de alternativas tecnológicas que poderão ser adaptadas não apenas para grandes aterros, mas também para aterros de pequeno e médio porte, como é o caso de Campina Grande.

Desta forma, o monitoramento das concentrações de gases com o emprego de células experimentais é de suma importância, uma vez que, esta é a primeira pesquisa na cidade que envolve concentrações de gases encontradas numa célula

experimental, visando projetos mais adequados à realidade de campo de um aterro sanitário.

3.5 Resíduos Sólidos Urbanos e o Efeito Estufa

Ao longo dos últimos anos, a produção e concentração de gases de efeito estufa (GEE) vêm aumentando significativamente, principalmente pelas atividades humanas no setor industrial, na produção e consumo de energia, transportes e geração de eletricidade devido à queima de combustíveis fósseis. Estima-se que 66% das emissões totais de gás metano sejam por ação humana, principalmente pela agricultura, pecuária e aterros de resíduos sólidos. A geração de biogás por um aterro pode ter uma sobrevida de vários anos após seu fechamento, dependendo dos diversos fatores envolvidos no processo anaeróbio.

O acúmulo dos gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), em menor escala o óxido nitroso (N_2O) e os hidrocarbonos (HFC), conhecidos como gases de efeito estufa, geram graves problemas, eles retêm o calor na atmosfera, impedindo que a radiação solar próxima à superfície terrestre seja liberada de volta ao espaço. A principal consequência desse processo é o aquecimento global (aumento da temperatura média da Terra), que coloca em perigo o balanço térmico terrestre. Concomitantemente a este cenário, tem-se o problema dos RSU, cuja complexidade de gerenciamento devido ao aumento da população mundial, pode produzir emissões significativas de gases que irão contribuir com o aumento do efeito estufa.

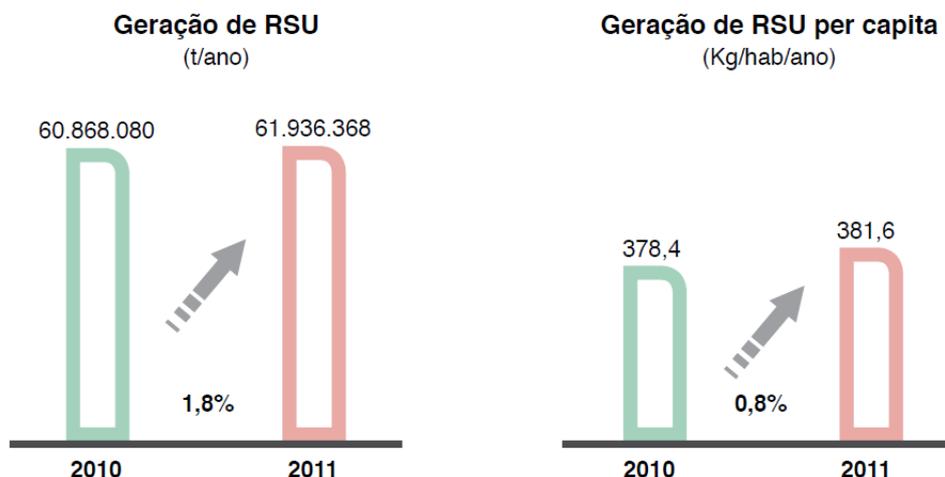
Dentre os diversos gases gerados pelo RSU, o de maior destaque é o gás metano (CH_4), não somente pela quantidade deste gás que é produzida, mas também pela sua capacidade de retenção de calor, maior do que a do CO_2 . Estima-se que o gás metano, principal componente do biogás, seja aproximadamente 21 vezes mais nocivo para o incremento do efeito estufa que o gás carbônico. A diluição da contaminação dos gases na atmosfera do planeta dificulta o crescimento da consciência da população com relação aos impactos ambientais desses gases. Como agravante, verifica-se que mesmo em países desenvolvidos ainda não se constata a priorização efetiva da diminuição da emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global (AUDIBERT, 2011).

3.6 Geração de RSU e o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários

Pesquisas sobre as diversas formas de conversão de energia tendo resíduo como insumo vem se desenvolvendo desde a década de 70. A partir daí, os resíduos sólidos urbanos passaram a ser vistos não apenas como um rejeito da população e razão de preocupação para os órgãos públicos responsáveis, mas também como matéria-prima capaz de gerar dividendos para os investidores desse segmento. Ou seja, os RSU passaram a ter valor de mercado. Além disso, viu-se uma perspectiva para minimizar os impactos negativos gerados pela sua má disposição (HENRIQUES, 2004).

Ao mesmo tempo, a problemática da geração de resíduos sólidos e o seu gerenciamento inadequado é uma constante no mundo e no Brasil, visto que a quantidade produzida de “lixo” tanto absoluta quanto *per capita* aumenta a cada dia, explicada tanto pelo crescimento populacional, quanto pelas mudanças nos hábitos de consumo e produção (padrão cultural). A geração de RSU no Brasil registrou crescimento de 1,8%, de 2010 para 2011 (Figura 3), índice percentual que é superior à taxa de crescimento populacional urbano do país, que foi de 0,9% no mesmo período (ABRELPE, 2011). É interessante ressaltar que num país como o Brasil onde a concentração de matéria orgânica varia de 50 a 70% nos RSU, dependendo da região o potencial de geração de biogás é enorme o que, sem dúvida, desafogaria o setor energético brasileiro além de variar a matriz energética.

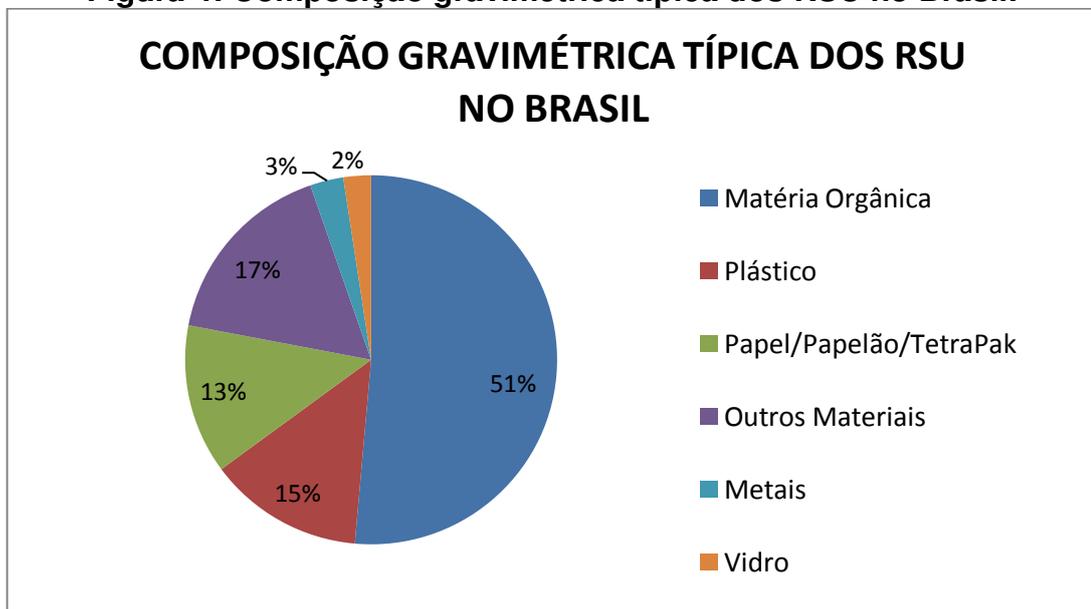
Figura 3: Geração de RSU.



Fonte: ABRELPE, 2011.

A quantidade de matéria orgânica presente nesses resíduos é fundamental na produção de subprodutos, principalmente do biogás (MACIEL, 2003). De forma geral, nos países em desenvolvimento a composição física dos resíduos sólidos urbanos tem maiores quantidades de matéria orgânica que nos países desenvolvidos. O clima de um país também influencia a produção do biogás, pois variações sazonais de temperatura e teor de umidade disponível no ar alteram significativamente o processo de biodigestão anaeróbia (AUDIBERT, 2011). A Figura 4 mostra a composição gravimétrica dos RSU no Brasil.

Figura 4: Composição gravimétrica típica dos RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2011.

Os RSU no Brasil apresentam composição gravimétrica característica, com maior parcela de matéria orgânica. A porcentagem de metais e vidro apresentam baixos percentuais o que pode ser justificado pela recuperação física por meio da reciclagem. 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.

No Estado da Paraíba são produzidos aproximadamente cerca de 28 mil toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos (CIRNE, 2012), sendo o aterro sanitário o método adequado do ponto de vista sanitário para disposição final desses resíduos. Nesse sentido, partindo do fato de que os resíduos sólidos quando dispostos em aterros sanitários sofrem um processo de degradação predominantemente anaeróbia com geração de gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3),

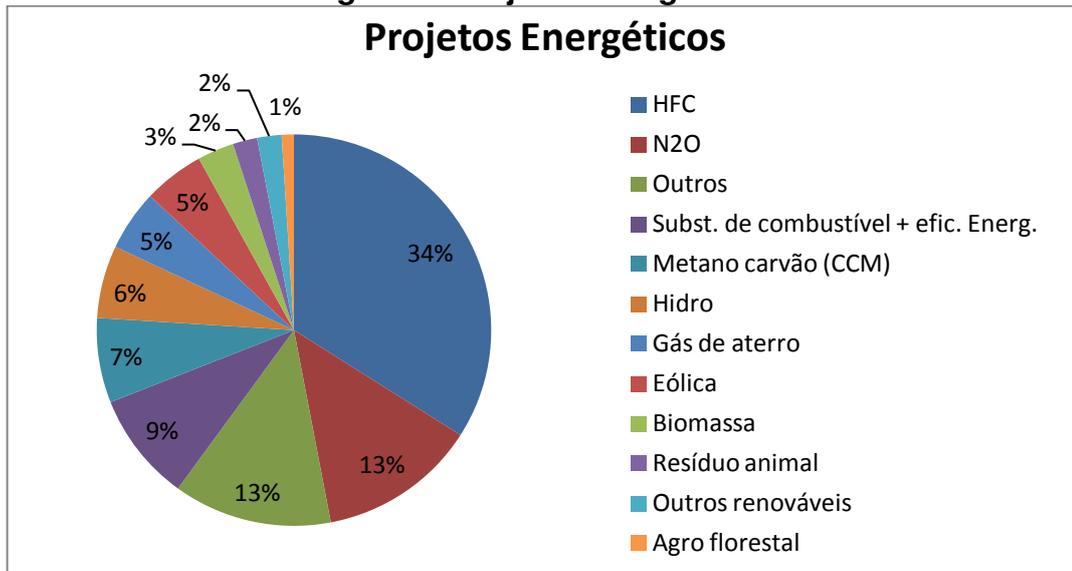
dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e outros gases, além dos líquidos percolados (chorume), o aproveitamento do biogás é uma realidade.

O biogás é um gás derivado da digestão anaeróbia das bactérias e é gerado em larga escala em aterros sanitários em função da alta atividade microbiana que atua principalmente na decomposição da matéria orgânica dos RSU. Estudos referentes à produção de gases são importantes por serem de uma fonte renovável, sendo uma alternativa para o uso com aproveitamento energético.

A geração de energia a partir de RSU tem a vantagem de prover energia elétrica e de resolver o problema das emissões de metano decorrentes da decomposição natural dos resíduos. Pois, o potencial de aquecimento global na queima do resíduo (emissão de CO_2) é menor do que o da decomposição (emissão de CH_4), que permite o balanço de CO_2 seja nulo no caso de oxidação completa (HENRIQUES, 2004).

A demanda crescente por energia e a busca por fontes alternativas são temas prioritários na agenda global. Segundo Henriques (2004), com a explosão populacional dos últimos dois séculos e com o aumento do consumo de energia *per capita*, o consumo energético total no mundo aumentou cerca de 100 vezes no referido período.

Durante a crise de oferta de petróleo, várias fontes de energia renovável, até então economicamente inviáveis, tornaram-se mais competitivas e ganharam um impulso no sentido do seu desenvolvimento. O Banco Mundial tem procurado contribuir para o desenvolvimento sustentável da sociedade de um modo geral, nisso tem financiado diversos projetos relacionados com a matriz energética brasileira, entre eles, os associados aos gases de aterros sanitários (Figura 5).

Figura 5: Projetos energéticos.

Fonte: Banco Mundial, 2007.

No Brasil, foram desenvolvidos projetos de fontes de energia eólica, solar, de pequenas centrais hidroelétricas e de biomassa, mais especificamente, do álcool de cana de açúcar para combustível veicular. Em relação ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos os escassos recursos que foram repassados para este fim, foram desenvolvidas algumas estações de reciclagem e a coleta de biogás de aterro sanitário em Natal e no Rio de Janeiro. Especificamente neste caso, a coleta de gás de RSU chegou a responder por 3% do gás natural distribuído pela CEG (Companhia Estadual de Gás do Rio de Janeiro) e por parte do abastecimento da frota da COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro) (HENRIQUES, 2004).

Alternativas de utilização do biogás são ainda incipientes em pequenos e médios aterros do Brasil. A queima do gás metano em aterros contribui para a mitigação do aquecimento global, mas o gás pode ser também aproveitado como gerador de energia elétrica. Os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), coordenados pelo Banco Mundial, tem pouca divulgação e se mostram ainda distantes da realidade dos pequenos e médios municípios. A tarefa de dominar tecnologicamente a situação dos aterros e incluir o Brasil no cenário dos países que se ocupam com a defesa do meio ambiente neste contexto depende diretamente dos resultados das pesquisas referentes à matéria em questão (AUDIBERT, 2011).

Logo, fica evidente que Brasil produz uma grande quantidade de resíduos sólidos urbanos e sua gestão encontra-se mal administrada, implicando em diversos

danos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores ligados diretamente a este tipo de serviço, os resíduos armazenados em aterros podem ser tratados de forma sustentável para produção de energia e crédito de carbono, gerando receitas através do biogás.

3.6.1 Estimativa de geração de biogás em aterros sanitários de RSU

Há uma grande incerteza na estimativa das emissões de gases por aterros de RSU, devido especialmente à variedade de processos que ocorre dentro da massa de resíduos. A falta de monitoramento dos aterros faz com que os métodos existentes para o cálculo de estimativa de emissões sejam geralmente fórmulas empíricas, contendo poucos parâmetros representativos e confiáveis nas previsões de quantidades de CH₄ (TARAZONA, 2010).

Algumas metodologias já foram desenvolvidas para quantificar a geração de gases em aterros sanitários, porém os valores são conflitantes e muitas das vezes não descrevem a situação real do Brasil, pois, foram desenvolvidas para condições diferentes das apresentadas nos aterros brasileiros. Os aterros sanitários no Brasil eram inicialmente projetados e construídos com adoção de critérios e parâmetros de projeto baseados em aterros da América do Norte e da Europa, que não possuem a mesma situação socioeconômica além de composições diferentes e submetidos a outras condições climáticas. Sendo assim, é necessário um conhecimento mais profundo, das emissões de gases em aterros, através do seu monitoramento, para enfim, poder estimar o potencial de geração de biogás.

Estudos para a estimativa de biogás em aterros sanitários foram realizados por diversos autores como Henriques (2004), Audibert (2011), Tarazona (2010), Ensinas (2003), Candiani (2011), Jucá (2009), Oliveira *et al* (2012), Britto (2006) e Bello (2010).

3.6.2 Mercado de créditos de carbono no Brasil

O homem lança mais de 35,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂), o principal gás causador do aquecimento global, por ano na atmosfera. Para diminuir este número, foram criados mecanismos de redução de emissões de gases do efeito estufa através dos mercados de carbono (ICB, 2012).

O crédito de carbono é um certificado eletrônico que é emitido quando há diminuição de emissão de gases que provocam o efeito estufa, gerador de aquecimento global. Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de CO₂ (dióxido de carbono) que deixou de ser emitido para a atmosfera. Aos outros gases reduzidos são emitidos créditos, utilizando-se uma tabela de equivalência entre cada um dos gases e o CO₂ conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Equivalência de créditos dos gases

VALOR DOS GASES
Quantos créditos rende cada gás
CO ₂ (Dióxido de carbono) = 1
CH ₄ (Metano) = 21
N ₂ O (Óxido nitroso) = 310
HFCs (Hidrofluorcarbonetos) = 140 a 11700
PFCs (Perfluorcarbonetos) = 6500 a 9200
SF ₆ (Hexafluoreto de enxofre) = 23900

Empresas que conseguem diminuir a emissão de GEE obtêm esses créditos, podendo vendê-los nos mercados financeiros. Estes créditos geralmente são comprados por empresas no exterior que, em função do Protocolo de Quioto, têm metas obrigatórias de redução de emissões de GEE, mas não conseguem atingir o patamar determinado. A compra dos créditos permite-lhes manter ou aumentar suas emissões. Ou seja, empresas que poluem acima do limite permitido pelo Protocolo de Quioto pagam pela poluição adicional que geram, remunerando as atividades que reduzem as emissões de gases (MENEGUIN, 2012).

Pelo Protocolo de Quioto, os países industrializados deverão reduzir suas emissões de GEE em relação às emissões de 1990. O Protocolo estabeleceu três mecanismos inovadores, conhecidos como Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Os dois primeiros são exclusivos dos países que possuem metas obrigatórias de redução de GEE, o que não é o caso do Brasil. Somente no caso do MDL existe a finalidade de contribuir para sustentabilidade dos países em desenvolvimento.

O comércio de emissões é um sistema global de compra e venda de emissões de carbono. As cotas ou permissões de emissão podem ser comercializadas, ou seja, aqueles países ou firmas que conseguem emitir menos do

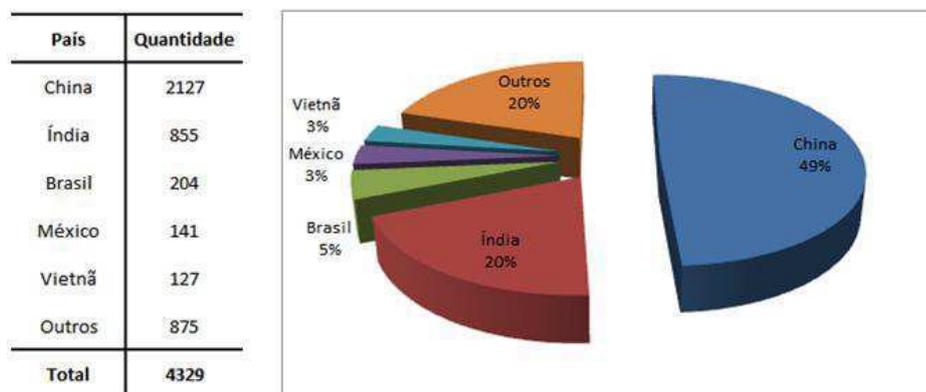
que foi estabelecido a eles, podem vender o excedente àqueles que não conseguiram limitar suas emissões ao número de cotas. Nesse ponto é que surge o interesse nos projetos de MDL realizados nos países em desenvolvimento (que não possuem metas obrigatórias), pois esses projetos dão direito aos seus idealizadores de receberem créditos de carbono para comercializar.

Há uma série de critérios para reconhecimento desses projetos, como estarem alinhados às premissas de desenvolvimento sustentável do país hospedeiro, definidos por uma Autoridade Nacional Designada. No caso do Brasil, a autoridade é a Comissão Interministerial de Mudança do Clima. Somente após a aprovação pela Comissão, é que o projeto pode ser submetido à ONU para avaliação e registro. Projetos de MDL podem ser propostos por governos, ONGs, cooperativas, associações e empresas ou outras instituições formais, mas não por indivíduos ou entidades informais (MENEQUIN, 2012).

Depois que um projeto de MDL entra em vigor, o Conselho Executivo do MDL emite a Redução Certificada de Emissões (RCE), documento eletrônico que especifica os créditos de carbono alcançados por esse projeto.

Relativamente aos números do MDL, até julho de 2012, foram aprovados e registrados na ONU 4.329 projetos oriundos de todo o mundo, desses, 49 % ocorreram na China (Figura 6). O Brasil, que já ocupou o primeiro lugar no ranking dos principais produtores de projetos de MDL, acabou perdendo o lugar para a China e a Índia.

Figura 6: Projetos de MDL registrados na ONU até 12/07/2012.



Fonte: Meneguim, 2012.

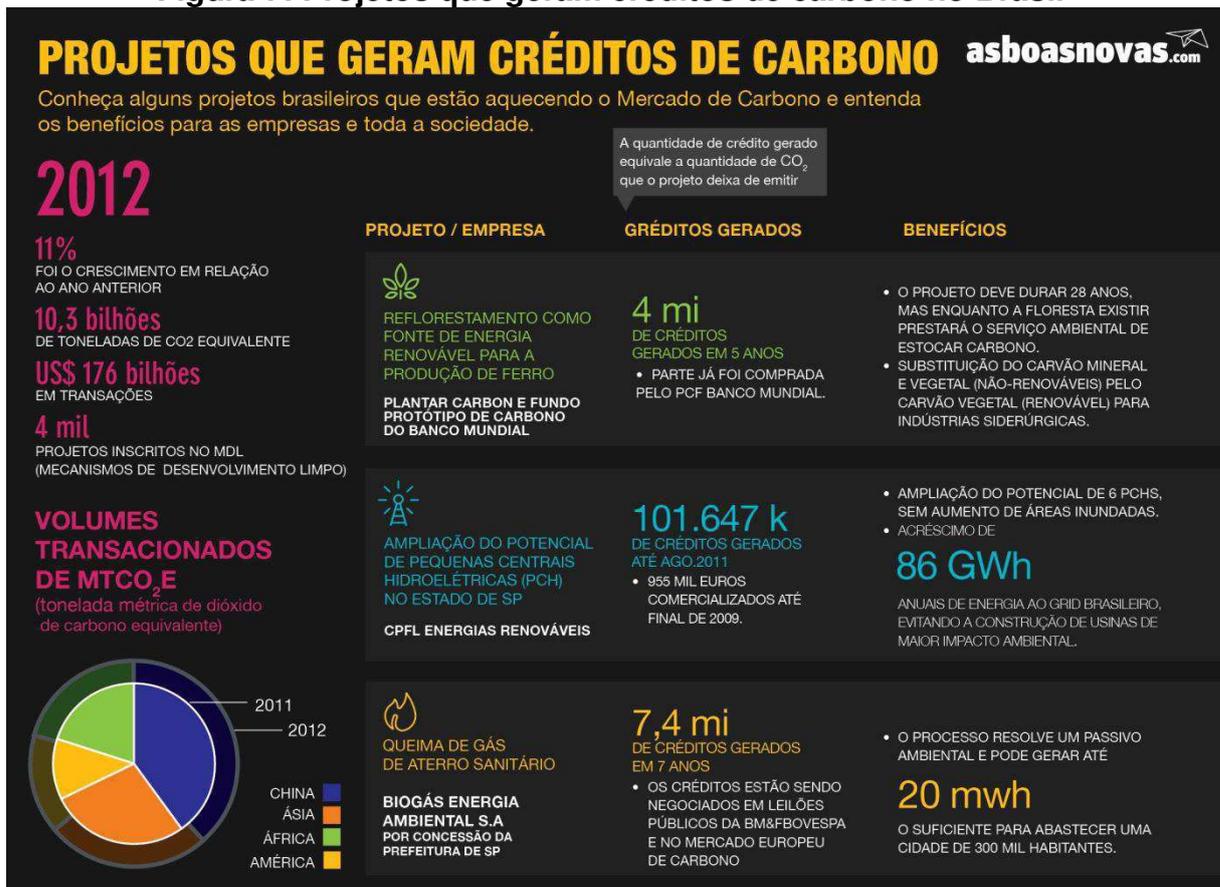
O Brasil conta com apenas 5% do total. Muitos advogam que essa pequena participação no País é fruto da falta de regulamentação do mercado de carbono no

Brasil. Por outro lado é natural que a China tenha muito mais projetos de MDL que o Brasil, pois, primeiramente, a economia chinesa é mais de três vezes maior que a brasileira. Além disso, a economia da China possui uma matriz energética baseada em combustíveis fósseis, diferente do Brasil, cuja matriz energética predominante é as hidrelétricas. Isso cria muito mais oportunidades para a China pensar em projetos de MDL.

Esse mercado não foi implementado no Brasil e os motivos não são a falta de regulamentação. O principal motivo para que o mercado não funcione é simplesmente o fato de que não existe uma demanda para créditos de carbono no País (até existe oferta, mas não demanda). As empresas brasileiras demandariam créditos de carbono se elas possuíssem metas obrigatórias de redução de emissões. Pode-se pensar então que a solução para começar a funcionar o mercado brasileiro de redução de emissões seja estabelecer metas obrigatórias internas. Mas isso geraria mais problemas para a economia brasileira, pois ter que se ajustar a uma meta gera custos e isso diminuiria a competitividade brasileira perante os outros países em desenvolvimento, que também não possuem metas.

Isso não significa que a venda de RCE não aconteça no Brasil. A BM&FBOVESPA possui um ambiente eletrônico de negociação desenvolvido para viabilizar o fechamento de negócios com créditos gerados por projetos de MDL. As operações são realizadas por meio de leilões eletrônicos, via web, e agendados pela BM&FBOVESPA a pedido de entidades públicas ou privados que desejem ofertar seus créditos de carbono no mercado. Algumas iniciativas sustentáveis desenvolvidas no Brasil, considerando o atual marco regulatório, já souberam aproveitar bem as oportunidades, beneficiando-se de créditos de carbono que foram vendidos para outros países (MENEGUIN, 2012). A Figura 7 mostra alguns projetos brasileiros que geram créditos de carbono.

Figura 7: Projetos que geram créditos de carbono no Brasil



Fonte: <http://thecityfixbrasil.com/>

Um dos casos mais conhecidos de projetos de MDL desenvolvidos no Brasil. Trata-se do Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado em Perus, na região metropolitana de São Paulo. Com uma área total de 1.400.000 m², o Aterro Bandeirantes está desativado desde março de 2007 tendo operado durante 28 anos e recebido, até 2006, cerca de 36 milhões de toneladas de resíduos.

A captação do biogás gerado no aterro foi iniciada em 2004 após uma série de estudos preliminares sobre a viabilidade do projeto e a instalação de uma usina termelétrica a biogás em 2003, onde o gás captado no aterro é tratado com a retirada da umidade é realizada uma pré-filtragem, depois transformado em energia. O Aterro Bandeirantes possui capacidade para gerar aproximadamente 170 mil MWh de energia elétrica por ano e possibilitou, até então, a comercialização pela prefeitura de São Paulo, de 1.262.793 RCEs. Os recursos arrecadados não são desprezíveis. Basta saber que, em setembro de 2007, o banco holandês Fortis Bank NV/SA desembolsou R\$ 34 milhões pelo lote de 808.450 créditos de carbono

colocados em negociação pela Prefeitura de São Paulo na Bolsa de Mercadorias (MENEGUIN, 2012).

3.7 Fatores intervenientes na produção de biogás

O processo de conversão da matéria orgânica em biogás nos aterros envolve um complexo sistema de interações físico-químicas e biológicas, em um contexto de múltiplas variáveis. Maciel (2009) apresenta quatro fatores fundamentais para o processo: geometria e operação do aterro, características iniciais dos resíduos, ambiente interno da massa de resíduo e ambiente externo da massa de resíduo (Tabela 2).

Tabela 2: Fatores que afetam a geração de biogás e lixiviado.

Geometria e operação do aterro	Características iniciais dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
Dimensão do aterro	Composição dos resíduos	Umidade da massa	Precipitação e infiltração
Impermeabilização do aterro	Umidade dos resíduos	pH na célula	Variação de pressão atmosférica
Compactação dos resíduos		Temperatura	Temperatura ambiente
Tipo de cobertura		Presença de nutrientes/bactérias	

Fonte: Maciel, 2009.

A geometria do aterro influencia diretamente os processos anaeróbios. Na maior parte dos aterros a vedação da massa de resíduos é realizada por meio de uma fina camada de solo compactado, principalmente pela dificuldade de obtenção e custos de transporte desse material. A fina camada de solo pode permitir a entrada de oxigênio para o interior dos resíduos, inibindo a ação dos micro-organismos anaeróbios no processo de biodegradação.

A compactação do aterro também influencia diretamente a biodegradação da massa de resíduos, pois sua maximização diminui consideravelmente a presença de oxigênio no interior do aterro. Além da compactação da massa de resíduos sólidos, a compactação da camada de cobertura bem como a granulometria do solo utilizado

corroboram para a minimização da infiltração de águas pluviais, evitando que o oxigênio dissolvido nestas águas seja carregado para o interior dos RSU.

Quanto a características dos RSU depositados no aterro, a composição gravimétrica e a umidade são fatores primordiais na geração dos gases e na geração do lixiviado. Fundamentalmente, um aterro opera como um grande biodigestor, onde os resíduos sólidos são depositados com sua umidade característica e a biodigestão gera seus subprodutos: o lixiviado e o biogás. Quanto maior a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável nos RSU, maior a quantidade dos subprodutos.

No ambiente interno da célula de resíduos sólidos existem vários fatores de grande importância na geração de gases e lixiviado. Além da umidade e da disponibilidade de nutrientes, o potencial hidrogeniônico (pH) da massa de RSU e a temperatura interna, podem influenciar na caracterização e na quantificação dos subprodutos gerados. A influência dos fatores citados esta diretamente relacionada ao delicado processo biológico dos micro-organismos e suas múltiplas inter-relações (AUDIBERT, 2011).

3.7.1 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU

Segundo Pereira *et al* (2010) a caracterização gravimétrica e volumétrica dos RSU é uma ferramenta importante dentro de uma estrutura de gestão desses resíduos. Quando dispostos em aterros sanitários a caracterização dos resíduos, passa há ter uma maior importância, pois o conhecimento individual de cada constituinte, em peso e em volume, informa a quantidade da fração biodegradável existente dentro da massa de resíduos, o que contribui para o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem e tratamento de líquidos lixiviados, além de avaliar o potencial de geração de biogás.

Define-se como composição gravimétrica a razão entre o peso – expressa em percentual de cada componente – e peso total dos resíduos. Dessa forma, expressa em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra dos resíduos (SILVA, 2012).

O conhecimento da composição gravimétrica permite uma avaliação preliminar da degradabilidade, do poder de contaminação ambiental e das possibilidades de reutilização, reciclagem e valorização energética e orgânica dos

resíduos sólidos urbanos. Sendo, portanto, de grande importância na definição das tecnologias mais adequadas ao tratamento e disposição final dos resíduos (ALCÂNTARA, 2007).

3.7.2 Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros que desempenha um dos papéis mais importantes dentre os fatores que condicionam o ambiente e a sobrevivência dos seres vivos. De maneira geral, existe uma faixa de tolerância ótima para que cada organismo possa crescer e desenvolver-se dentro do padrão da normalidade. A temperatura é um dos fatores de grande influência na anaerobiose, pois os microorganismos não possuem meio para controlar sua temperatura corporal e dependem da temperatura do meio. Existem três faixas de temperatura associadas ao crescimento microbiano:

- Faixa psicrófila: entre 0°C e 20°C;
- Faixa mesófila: entre 20°C e 45°C;
- Faixa termófila: entre 45°C e 70°C.

Os valores acima são parâmetros aproximados e supõem ainda picos de crescimento bacteriano máximo em pontos de temperatura ótima. Pequenas oscilações de temperatura em torno da temperatura ótima podem reduzir abruptamente as populações microbianas (CHERNICHARO, 2000).

A termodinâmica das reações bioquímicas também é afetada fortemente pela temperatura, alterando as taxas das reações químicas enzimáticas e a própria difusão na massa de resíduos. Comumente observa-se crescimento das taxas de reações com o aumento de temperatura até atingirem um máximo, a partir do qual começam a serem observadas quedas nas taxas.

As bactérias geradoras de gases atuam na faixa mesófila de temperatura, comumente em valores que variam de 30°C e 40°C. Temperaturas inferiores a 15°C sugerem pequena atividade de bactérias metanogênicas (BORBA, 2006). As bactérias metanogênicas aumentam de população até a temperatura de 44°C. Poucos graus acima e o crescimento é inibido, com a taxa de conversão biológica caindo bruscamente. A maximização da atividade biológica pressupõe uma

estabilização da temperatura em parâmetros próximos da temperatura ótima (LIMA, 1995).

As diferenças de temperatura existentes entre o ambiente externo e o ambiente interno podem fornecer calor ou extrair calor da massa de resíduos. Comumente há perda de calor para o exterior, situação típica de invernos prolongados e a baixas temperaturas, tendem a inibir os processos de biodecomposição pela inibição da ação das bactérias mesofílicas. Tem-se assim uma situação de dormência nos processos de biodecomposição anaeróbios. Em regiões de clima tropical, onde a amplitude de variação da temperatura entre o exterior e o interior se mostra menor, essas condições tendem a ser amenizadas (AUDIBERT, 2011).

3.7.3 Teor de umidade dos RSU

Segundo Melo (2011) o teor de umidade é a relação entre o peso de água e o peso dos sólidos contido num volume de material. Sua determinação é de fundamental importância para a vida dos micro-organismos que decompõem a matéria orgânica existente nos RSU.

A umidade é um fator limitante no processo de digestão anaeróbia em aterros sanitários, seu teor em um aterro é influenciado por três fatores: a composição dos resíduos, as condições climáticas e as práticas de coleta de líquidos. Os valores de umidade considerados mais adequados para biodecomposição dos RSU nos aterros se estabelecem entre 40% e 60%, esse percentual determina uma melhor produção de metano. Valores de umidade fora dessa faixa prejudicam a atividade metabólica dos micro-organismos, podendo, desestabilizar célula de resíduos (OLIVEIRA, 2001).

A umidade exerce papel importante na metanogênese de aterros sanitários, pois além de suprir as necessidades dos micro-organismos através da mobilização de nutrientes e substratos, possibilita o transporte de enzimas e micro-organismos por todo o sistema. Até um determinado nível de umidade pode haver estímulo de produção de gás. No entanto, infiltrações excessivas podem causar retardamento da produção. Isso pode ser devido à fermentação ácida da matéria orgânica, com liberação de grandes quantidades de ácidos voláteis, determinando a inibição do processo metanogênico (PAES, 2003).

3.7.4 Sólidos voláteis

A composição dos RSU é extremamente diversificada e heterogênea, variando em função de fatores como nível socioeconômico da população, época do ano e tipo de coleta existente. Os sólidos voláteis em RSU são o resultado da subtração dos sólidos totais e das cinzas obtidas após combustão completa dos resíduos (CATAPRETA, 2008).

Este parâmetro pode ser considerado como um indicador de degradabilidade dos resíduos ao longo do tempo. Altos teores de sólidos voláteis indicam a presença de muita matéria orgânica a ser degradada e baixos valores indicam que a matéria orgânica já passou por um processo acentuado de degradação.

É um parâmetro de grande importância para o acompanhamento das alterações de propriedades químicas, biológicas e físicas da massa de RSU. Os sólidos voláteis presentes na fração líquida resultante do processo de decomposição representam a parcela facilmente degradável, ou seja, os primeiros resultados da atividade microbiana (MONTEIRO, 2003).

Logo, o conhecimento da fração de sólidos voláteis ajuda na melhor definição da biodegradabilidade dos resíduos, da geração de biogás e da taxa de carga orgânica presente num aterro sanitário.

3.7.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

A concentração de íons de hidrogênio, representada pelo pH, é usada, universalmente, para expressar o grau de acidez ou basicidade de uma solução, ou seja, é o modo de expressar a concentração de íons de hidrogênio nessa solução. Esse parâmetro influencia muitas reações químicas e bioquímicas e, portanto, é muito utilizado no monitoramento de diversos ambientes.

O pH é um dos parâmetros mais importantes para entendimento das reações ocorridas em aterros. Ele está relacionado com as fases de degradação da matéria orgânica nos sistemas aeróbios e anaeróbios, podendo variar com o tempo de degradação dos resíduos (SILVA, 2012).

As bactérias produtoras de ácido atingem alta taxa de crescimento em faixas de pH variando entre 5,0 e 6,0. Essas bactérias são tolerantes a grandes variações de pH, podendo atuar em valores de pH próximos a 4,5 (CHERNICHARO, 2000).

Por outro lado, bactérias do tipo metanogênicas atingem maximização de população e de produção de metano em parâmetros de pH entre 6,5 e 7,6 (MONTEIRO, 2003).

De forma geral, o pH no processo de biodecomposição dos resíduos sólidos em aterros varia em suas diversas fases entre 6,0 e 8,0. Valores fora dessas faixas podem acarretar severa inibição na produção de metano. Lima (1995) define as seguintes condições de contorno para o processo de digestão, em termos de pH:

- Fase aeróbia: pH (neutro/alcalino) acima de 7,0
- Fase acetogênica: pH na faixa de 5,2 a 6,5
- Fase metânica instável: pH na faixa de 6,8 a 7,2
- Fase metânica estável: pH na faixa de 7,0 a 7,2

3.7.6 Alcalinidade

A alcalinidade é a medida de uma propriedade do líquido associada à sua capacidade de tamponação e só pode ser interpretada em função de substâncias específicas, quando a composição química da amostra analisada é conhecida. O valor determinado pode variar significativamente, dependendo do valor do pH final usado como referência (LEITE, 2008).

Alguns autores têm sugerido que o monitoramento da alcalinidade em sistemas de digestão anaeróbia é muito mais eficaz que o monitoramento do pH, pois enquanto a escala do pH é logarítmica, a escala da alcalinidade é linear (CATAPRETA, 2008).

A alcalinidade provoca a neutralização da acidez aumentando o pH e tende a precipitar os metais fora da solução. Desta maneira, a alcalinidade pode minimizar a ação inibidora dos metais pesados ao processo degradativo, sendo um elemento antagonista (POLVINELLI, 1987). Entretanto, em altos níveis de pH, o íon hidroxila pode se tornar inibidor e, portanto, a acidez atuaria como antagonista reduzindo a alcalinidade do meio e, conseqüentemente, os íons OH. Os metais alcalinos e alcalinos-terrosos controlam a acidez, particularmente na fase metanogênica, pois atuam como estimuladores do processo. Segundo Lima, (1995), na fase metanogênica há uma tendência de alcalinização do meio. Após a fase metanogênica a alcalinidade tende a subir, podendo variar de 6.000 a 14.000mg/L.

3.7.7 Ácidos voláteis

Dillenburg (2006) reporta que os ácidos voláteis estão entre os compostos mais importantes para a digestão anaeróbia e seu estudo é de fundamental importância para melhor compreensão desse processo. Os ácidos voláteis possuem até seis carbonos e apresentam baixo peso molecular. Podem ser definidos como ácidos graxos solúveis em água, que podem ser destilados a pressão atmosférica.

De acordo com Leite (2008) na decomposição bioquímica da matéria orgânica, uma variedade de bactérias saprófitas hidrolisam e convertem o material complexo em compostos de menor peso molecular como os ácidos graxos (ácido acético, propiônico e butírico). Estes ácidos são chamados de voláteis porque podem ser destilados sob pressão atmosférica. O acúmulo destes ácidos pode prejudicar a digestão anaeróbia se a capacidade de tamponamento extrapolar e o pH baixar.

A instabilidade do processo anaeróbio pode ocorrer quando a produção de ácidos voláteis é maior que seu consumo, provocando queda do pH e inibição das atividades de bactérias metanogênicas.

3.8 Digestão anaeróbia de RSU

O processo de biodecomposição se inicia dentro dos próprios sacos de lixo utilizados para recolherem a matéria orgânica dissolvida no contexto dos RSU. Em algumas situações, os sacos ficam depositados nas calçadas públicas por mais de um dia, até serem recolhidos pelo sistema de coleta municipal, e transportados ao local de destino final. Os resíduos sólidos nessa dinâmica estão participando do processo de decomposição aeróbia, em meio a grande quantidade de oxigênio presente na massa de resíduo e pelo próprio oxigênio atmosférico.

A transformação da matéria orgânica dos RSU em biogás e outros subprodutos se realizam pelo metabolismo bacteriano, tendo uma participação pequena de fungos e outros micro-organismos. As bactérias (do grego *bakteria*, traduzido como bastão) são micro-organismo unicelulares que não apresentam seu material genético compartimentado por membranas (procariontes), podendo existir isoladamente ou em colônias. Alguns tipos de bactérias necessitam do oxigênio para realizar seu metabolismo, e são chamadas aeróbias. Outras não suportam a

presença de oxigênio e são chamadas anaeróbias. Existe ainda um terceiro tipo de bactérias capaz de sobreviver e operar suas atribuições tanto em presença como em ausência de oxigênio, sendo chamadas facultativas (AUDIBERT, 2011).

A biodegradação pelo processo anaeróbio pode ser subdividida em etapas ou fases. Em cada fase prevalece o trabalho de determinado tipo de bactéria, no entanto essa prevalência não é absoluta, o que torna as inter-relações complexas. As interações entre os diversos grupos de bactérias participantes da decomposição anaeróbia tem múltiplas variáveis, que vão desde a dependência comensal entre elas até variáveis externas como temperatura e pH do meio, por exemplo (AUDIBERT, 2011).

3.8.1 Fases da digestão anaeróbia

O processo de decomposição da fração orgânica dos RSU inicia-se pelo ataque dos micro-organismos a matéria orgânica sólida presente. Na fase aeróbia podem ser verificados certos fungos, protozoários, além das bactérias.

Alguns autores descrevem a decomposição da fração orgânica dos RSU em duas fases fundamentais: aeróbia e anaeróbia. A aerobiose no processo de biodecomposição dos RSU ocorre em grande velocidade até a extinção do oxigênio disponível. Isto porque as bactérias aeróbias consomem grande quantidade de oxigênio e se desenvolvem rapidamente. As condições comumente encontradas na massa em biodigestão para esta fase são: temperatura entre 30°C e 70°C e pH acima de 7,0 (LIMA, 1995).

A decomposição anaeróbia dos RSU é a etapa mais complexa e demanda mais tempo. Engloba no mínimo quatro fases de decomposição, iniciando com a Hidrólise, passando pelas fases Acidogênica e Acetogênica, chegando à fase Metanogênica. Alguns autores sugerem a inclusão de uma quinta fase, dependendo da presença de enxofre nos resíduos: Sulfetogênese. Comumente nas caracterizações do biogás produzido em aterros encontram-se quantidades pequenas de gás sulfídrico.

Hidrólise: é uma reação química em que a água efetua a troca de seus componentes com outro composto, propiciando o surgimento de novos compostos. Na bioquímica do processo, esta fase envolve um grupo de bactérias denominadas fermentativas. A matéria orgânica grande e complexa não pode ser absorvida

diretamente, necessitando ser particulada. Esse processo acontece pela excreção de enzimas pelas bactérias fermentativas, propiciando a hidrólise de polímeros em monômeros.

Acidogênese: nesta fase ocorrem reações nas quais são formados ácidos pela ação de um grupo de bactérias denominadas fermentativas acidogênicas. Essas bactérias são capazes de metabolizar os monômeros resultantes da hidrólise e excretar compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia. A grande maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, não suportando a presença de oxigênio. As poucas bactérias facultativas existentes no meio (cerca de 1%) atuam como proteção das bactérias anaeróbias estritas, pois consomem o oxigênio que porventura exista (CHERNICHARO, 2000).

Acetogênese: nas interações comensais existentes na anaerobiose, os produtos excretados pelas bactérias fermentativas (açúcares, ácidos orgânicos, alcoóis e aminoácidos) são metabolizados por um grupo de bactérias acetogênicas, as quais os convertem em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Essas bactérias fazem parte de um grupo intermediário de bactérias, pois o substrato delas será metabolizado pelas bactérias metanogênicas. A acetogênese é essencial no processo de geração de gases e uma superpopulação dessas bactérias poderá desequilibrar o processo anaeróbio através da geração excessiva de hidrogênio. O hidrogênio em excesso procede a diminuição do pH no meio, tornando-o excessivamente ácido. Caso as bactérias metanogênicas não estejam em quantidade suficiente ou estejam em condições desfavoráveis de metabolização, a produção de gases será alterada. O hidrogênio produzido pelas bactérias acetogênicas pode ser consumido diretamente pelas bactérias metanogênicas na produção de metano e dióxido de carbono, ou ainda pode reagir com o dióxido de carbono e com o ácido acético, produzindo outros ácidos orgânicos, como o propiônico e o butírico. As condições de contorno ideais para a maximização da fase acetogênica são: temperatura entre 29°C e 45°C e pH na faixa de 5,2 a 6,5.

Metanogênese: é a fase final do processo anaeróbio de formação de gases. Nas fases anteriores são gerados substratos como monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio, metanol e ácido acético. Existem dois grupos principais de bactérias que atuam nesta fase. Um grupo metaboliza o acetato oriundo da fase anterior da anaerobiose e recebe o nome de bactérias acetoclásticas. Outro grupo utiliza o

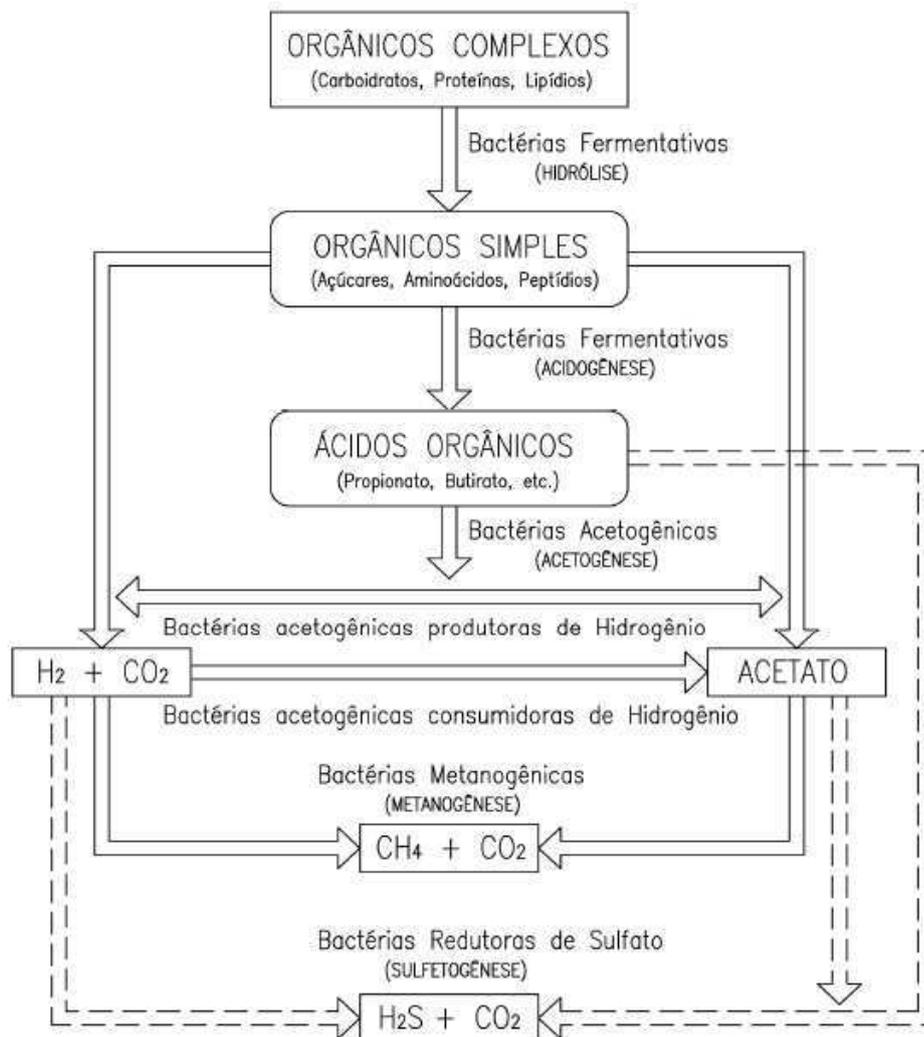
hidrogênio para redução do dióxido de carbono e são denominadas hidrogenotróficas. As condições aproximadas em que ocorre a fase metanogênica comumente apresenta temperatura entre 22°C e 37°C e pH na faixa de 6,8 a 7,2.

Metanogênicas acetoclásticas: grande parte da produção de metano na fase metanogênica é responsabilidade deste gênero de bactérias (60% a 70%), sendo também o gênero predominante nessa fase. Existem dois tipos principais de bactérias acetoclásticas: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*. O primeiro se desenvolve na forma de cocos e são as mais versáteis por utilizarem inclusive o hidrogênio. O segundo grupo utiliza exclusivamente o acetato no seu metabolismo. De forma geral, na bioquímica da atuação dessas bactérias, o metano é produzido a partir da redução do ácido acético.

Metanogênicas hidrogenotróficas: a grande maioria das bactérias metanogênicas é capaz de utilizar o hidrogênio para produzir metano. No entanto, existem em menor quantidade na fase metanogênica que as bactérias acetoclásticas. São responsáveis por consumir o hidrogênio existente no meio e propiciar a produção de ácidos pelas bactérias acidogênicas e acetogênicas.

Sulfetogênese: nesta fase os compostos a base de enxofre, como os sulfatos, são reduzidos a sulfetos por um grupo de bactérias denominadas bactérias sulforedutoras. Podem utilizar diversos substratos de outras fases da digestão anaeróbia como metanol, etanol, os açúcares, o hidrogênio, ácidos graxos entre outros. O resultado final é a produção de gás sulfídrico e dióxido de carbono. Na ausência de sulfatos na massa de resíduos o gás sulfídrico não é produzido. A Figura 8 exhibe as rotas metabólicas características e os grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica.

Figura 8: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica

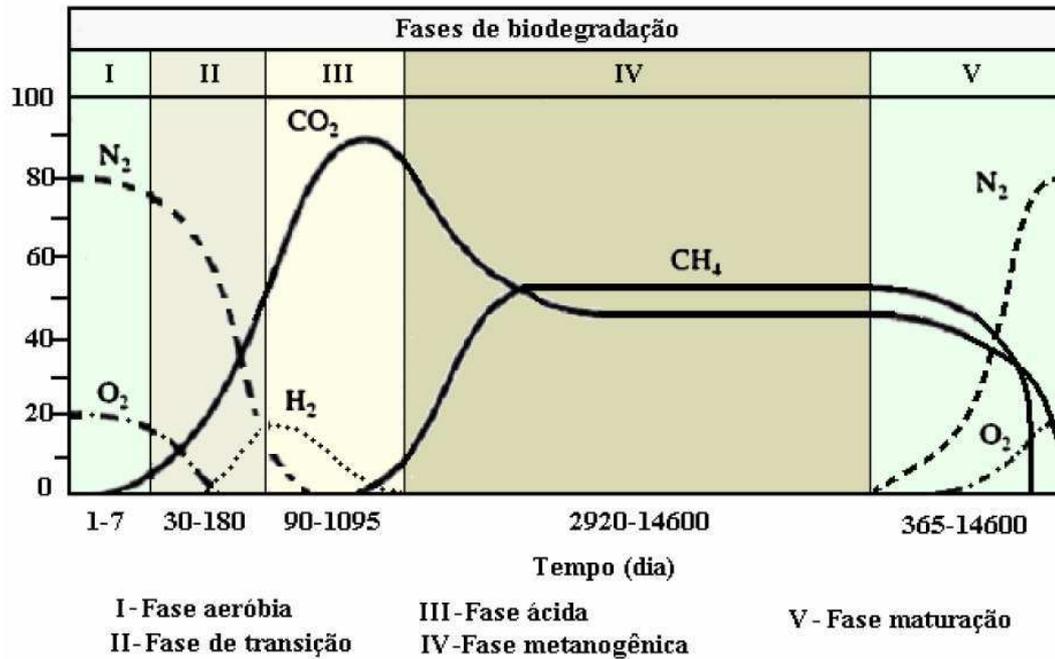


Fonte: Chernicharo, 2000.

3.8.2 Fases da biodegradação dos RSU

As tentativas de aproximar os modelos teóricos da realidade da biodegradação dos RSU nos aterros se intensificaram nas décadas de 1980 e 1990. Os motivos se relacionam com o despertar para a participação ativa dos gases de aterro no efeito estufa. Um dos estudos mais aceitos foi apresentado na década de 1990, e sugeriu cinco fases na biodecomposição dos RSU: Ajuste Inicial (fase I), Transição (fase II), Ácida (fase III), Metanogênica (fase IV) e Maturação (fase V) (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993). A Figura 9 mostra as diversas fases da biodegradação em aterros segundo Tchobanoglous *et al*. (1993).

Figura 9: Dinâmica de geração dos principais gases componentes do biogás em aterros de resíduos sólidos



Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1993.

O período de duração das fases de biodegradação dos RSU pode sofrer alterações intensas, provenientes das diversas variáveis envolvidas no processo. O Quadro 1 sugere o intervalo de tempo para cada fase da biodegradação que ocorre em aterros.

Quadro 1: Período médio de duração das fases de biodegradação dos RSU

FASES	CONDIÇÃO	PERÍODO TÍPICO
I	Aeróbia	Algumas horas a 1 semana
II	Anóxica	1 a 6 meses
III	Anaeróbia, Metanogênica Instável	3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbia, Metanogênica Estável	8 a 40 anos
V	Anaeróbia, Metanogênica Declinante	1 ano a mais de 40 anos

Fonte: Banco Mundial, 2003.

Ajuste Inicial (fase I): é a fase em que os RSU começam a ser decompostos, com presença predominante de bactérias aeróbias pela exposição da massa de resíduo ao ar e conseqüente existência de oxigênio em quantidade atmosférica (21%). O tempo de duração dessa fase pode variar de algumas horas, dias a poucas semanas, pois após a cobertura da massa de resíduo em aterros a quantidade de oxigênio começa a diminuir rapidamente pelo consumo exacerbado por parte das bactérias aeróbias.

Transição (fase II): nesta fase os níveis de gases atmosféricos, como o nitrogênio e o oxigênio começam a cair bruscamente, iniciando-se a fase anaeróbia da biodecomposição. Não existe ainda a produção de metano, pela presença residual de oxigênio puro ou nas formas de nitratos e sulfatos disponíveis como aceptores de elétrons. O ácido acético e o propiônico são os mais importantes para a formação futura do metano. Na fase de transição intensifica-se a produção de gás carbônico, por ser gerado como um subproduto da fermentação da matéria orgânica (AUDIBERT, 2011).

Ácida (fase III): na fase ácida intensifica-se a formação de ácidos orgânicos e sua conversão em compostos intermediários, como o ácido acético, que serão grandes geradores de metano. Inicia-se a formação de metano, mas ainda em quantidades mínimas. No entanto, o dióxido de carbono atinge seu pico de produção, proveniente da quebra de compostos orgânicos simples. O gás hidrogênio se apresenta em maior quantidade no início da fase III, mas tende a decrescer com o incremento da produção de metano. O pH do meio tende a decrescer a valores próximos de 5,0 (AUDIBERT, 2011).

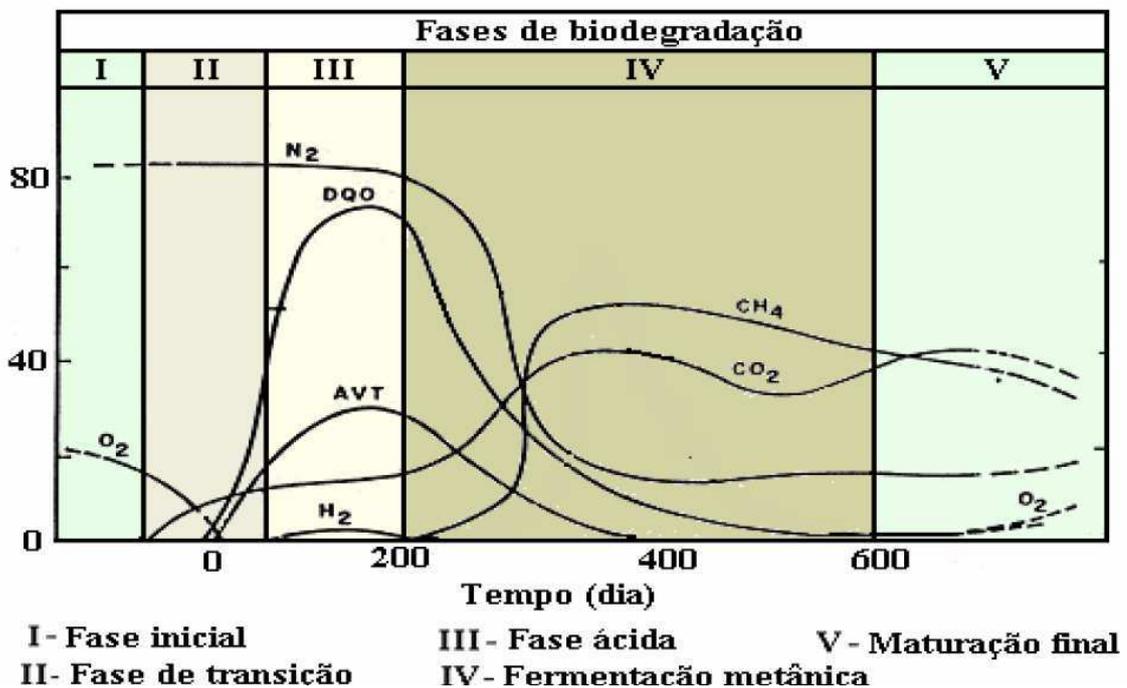
Metanogênica (fase IV): a fase metanogênica é também chamada de fase metanogênica estável, pela estabilização da produção de metano. Nessa fase diminui consideravelmente a presença de bactérias aeróbias ou facultativas e predominam os micro-organismos estritamente anaeróbios, chamados bactérias metanogênicas. A produção de dióxido de carbono decai até se estabilizar em valores entre 35% a 50% do gás gerado no aterro. A produção de gás metano tende a crescer no início da fase e se estabilizar na faixa de 45% a 60% da parcela do biogás gerado (AUDIBERT, 2011).

Maturação (fase V): com a diminuição dos nutrientes, cai a produção de metano e gás carbônico. Restaram na massa de resíduos os substratos de difícil biodegradação, e a decomposição microbiológica torna-se lenta. A pressão interna

da célula de RSU diminui, propiciando novamente o aparecimento de gases atmosféricos como o nitrogênio e o oxigênio.

A Figura 10 retrata um modelo que foi sugerido por Pohland & Harper (1985), que consideraram também cinco fases de degradação, porém, a evolução dos percentuais de metano e dióxido de carbono apresenta um comportamento inicial bem diferente do que foi ilustrado na Figura 09 por Tchobanoglous *et al.* (1993).

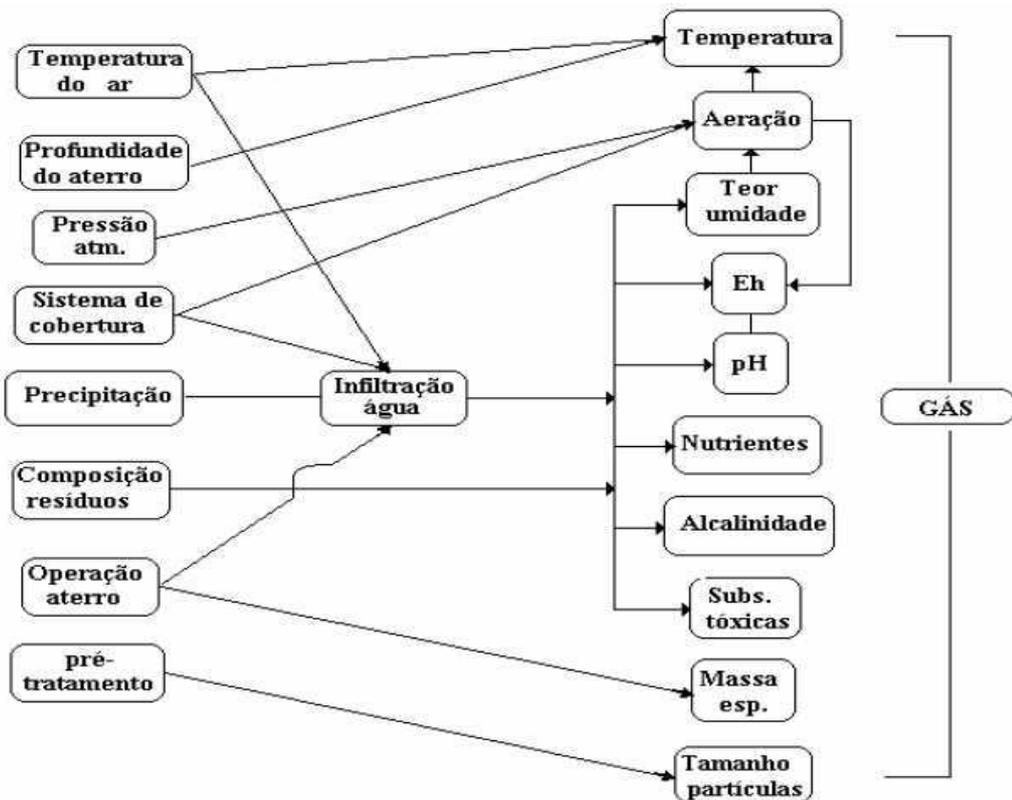
Figura 10: Fases da biodegradação em aterros.



Fonte: Pohland & Harper, 1985.

O potencial de geração de gás depende, principalmente, da composição dos resíduos, mas, como mostra a Figura 11, a taxa de bioconversão do material orgânico em biogás pode ser influenciada por diversos outros fatores que incluem aspectos ambientais, de manejo do aterro e parâmetros físico-químicos que estão na maioria das vezes relacionados entre si.

Figura 11: Fatores que afetam a produção de gás em aterros.



Fonte: Alcântara, 2007.

Os processos de biodegradação dos RSU confinados em aterros sanitários podem se estender por muitos anos, fazendo-se necessário o monitoramento por até mais 30 anos após o encerramento das operações de aterramento, período durante o qual ainda se pode detectar alguma produção de biogás (GONZÁLEZ *et al.*, 1996).

3.9 Composição do biogás

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), oxigênio (O₂) e amônia (NH₃) além de diversos outros gases traço ou oligogases, assim denominados por estarem presentes em quantidades muito pequenas.

A composição do biogás resultante da biodegradação anaeróbia dos resíduos sólidos em aterros depende da composição química dos resíduos depositados e de vários fatores influentes. A parcela de participação na composição pode sofrer

variação, dependendo inclusive da fase da biodecomposição ou, diretamente, da idade dos RSU depositados no aterro.

Tchobanoglous *et al.* (1993) apresentam uma composição típica para o biogás gerado em aterros conforme mostra o Quadro 2, onde se observa que, em termos quantitativos, o metano e o dióxido de carbono são os principais gases resultantes do processo de bioestabilização da matéria orgânica sob condições anaeróbias.

Quadro 2: Composição típica do biogás em aterros

Gás Gerado	Porcentagem (base seca)
Metano	45% - 60%
Dióxido de Carbono	40% - 60%
Nitrogênio	2% - 5%
Oxigênio	0,1% - 1,0%
Enxofre, Mercaptanas	0% - 1,0%
Amônia	0,1% - 1,0%
Hidrogênio	0% - 0,2%
Monóxido de Carbono	0% - 0,2%
Gases em menor concentração	0,01% - 0,6%

Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1993.

Verifica-se que a composição típica do biogás tem como parcelas predominantes o gás metano (45% a 60%) e o dióxido de carbono (40% a 60%). Essas médias podem sofrer alterações dependendo de oscilações de clima e costumes da região, ou mesmo dependendo da fase de decomposição dos resíduos em estudos. Real (2005) obteve porcentagens de gás metano variando entre 64% e 72% no aterro de Pacarambi/RJ, que podem ser consideradas elevadas. Pesquisas realizadas no aterro de Nova Iguaçu/RJ apresentaram valores de metano variando entre 44% e 76% (BORBA, 2006). No aterro da Muribeca/Pe, Juca *et al* (2001) apresentam valores diversos para os furos de sondagem realizados, variando de forma geral de 20% a 42% para valores de dióxido de carbono e de 30% a 58% para o gás metano.

As diferenças existentes entre as concentrações de gás metano e dióxido de carbono, principais gases gerados da biodecomposição dos resíduos sólidos, estão

ligadas também as características dos gases conforme é mostrado no Quadro 3. O dióxido de carbono tem como propriedade a grande solubilidade, ao contrário do gás metano. Assim, uma parcela considerável de gás carbônico permanece dissolvida na fração aquosa da massa de RSU (ENSINAS, 2003). Outra observação importante a respeito do metano está em seu limite de explosividade, pois, quando está presente no ar em concentrações de 5% a 15% ele torna-se explosivo, o que pode acarretar uma série de desastres ambientais, além de causar risco à saúde pública.

Quadro 3: Propriedades de alguns gases existentes no biogás de aterros

Gás	Concentração típica no biogás	Limite de explosividade	Solubilidade em água (g/l)	Propriedades gerais
CH ₄	45%-60%	5%-15%	0,0645	Inodoro, incolor, não tóxico, asfixiante e inflamável
CO ₂	35%-60%	-	1,688	Inodoro, incolor, asfixiante
N ₂	0-10%	-	0,019	Inodoro, incolor
O ₂	0-4%	-	0,043	Inodoro, incolor
CO	<0,1%	12,5%-74%	0,028	Inodoro, incolor, tóxico, inflamável
H ₂	<0,1%	4%-74%	0,001	Inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
H ₂ S	0-70 ppm	4,3%-45,5%	3,846	Incolor, muito tóxico

A composição do biogás pode conter mais de 300 gases, alguns presentes em grande quantidade e outros em traços. Os gases encontrados em traços na composição do biogás geralmente não ultrapassam 1% da composição total. No rol desses gases encontram-se compostos orgânicos e inorgânicos, sendo que os primeiros geralmente são maioria.

A proporção destes gases no biogás gerado em aterros depende das condições de biodigestão existentes, como presença de substratos, populações de bactérias específicas e equilíbrio entre os grupos de micro-organismos, entre outros, todos sendo variáveis ao longo do tempo, de acordo com a sucessão das fases de degradação dos RSU.

A evolução das concentrações desses gases durante a vida do aterro pode durar de 10 a 80 anos ou mais (AUGENSTEIN & PACEY, 1991) e geralmente admite-se que esteja associada as cinco fases de degradação e a natureza dos

resíduos. O estágio de decomposição é um fator determinante da composição do biogás com o tempo.

3.9.1 Monitoramento de gases

Ao longo das últimas décadas, verificou-se que a humanidade vem sendo exposta cada vez mais, a ação danosa de substâncias tóxicas e dentre elas figuram muitas espécies gasosas. Este incremento no uso de gases e de materiais altamente voláteis em não raras situações representam sérios perigos à vida. Muitos gases causam doenças, paralisia ou mesmo a morte quando presentes na atmosfera, ainda que em diminutas concentrações (PROCHNOW, 2003).

O efeito dos gases tóxicos pode ser sentido pelo contato com a pele, ingestão ou pela inalação, sendo esta última forma de contaminação a mais comumente observada. O monitoramento contínuo de gases é possível ser realizado através de equipamentos detectores que fazem uso de sensores capazes de identificá-los no ambiente. Para que um monitoramento seja o mais otimizado possível, ou seja, para que o equipamento escolhido retorne medições confiáveis dentro das condições ambientais às quais está exposto e com custo compatível, há a necessidade de um conhecimento prévio das características dos sensores e do ambiente a ser monitorado. Acrescenta-se ainda em um monitoramento de gases tóxicos, além da resposta rápida, a sensibilidade do equipamento deve ser maior. Isto porque as medições são normalmente expressas em ppm (parte por milhão).

Segundo Maciel (2003) o monitoramento dos gases gerados em aterros sanitários serve para analisar a evolução do processo de decomposição da matéria orgânica, avaliar possibilidade de aproveitamento do biogás para geração de energia e estimar a emissão de gases liberados para atmosfera. O monitoramento da concentração de gases no interior da massa de resíduos juntamente com outros parâmetros (composição gravimétrica e volumétrica, temperatura, umidade, pH, alcalinidade, ácidos voláteis e sólidos voláteis) permite acompanhar o processo de degradação da matéria orgânica. Esse monitoramento pode ser realizado através de medições periódicas *in situ* e/ou coleta de amostras para análise em laboratório.

Neste trabalho o monitoramento dos gases se deu por três métodos, o Kit Biogás com Biofoto, Drager e o Cromatógrafo a gás.

O kit desenvolvido pela Embrapa e a Afakit possui baixo custo e permite monitorar de forma simples e rápida as concentrações de amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Porém, de acordo com Bello (2010) que estudou o monitoramento de gases em três pontos do aterro sanitário de Rio Claro – SP este equipamento mostrou-se fora da curva de calibração, ocasionando medidas muito distintas para uma mesma amostra.

O detector portátil de gases, também conhecido como Drager é unanimidade quanto se trata de na detecção de gases, porque permite o monitoramento de gases *in situ* de forma rápida e precisa, sendo possíveis várias medições durante o dia, além de monitorar vários gases ao mesmo tempo. Diversos autores como Catapreta (2008), Alcântara (2007), Monteiro (2003), Mariano (2010), Jucá (2001) realizaram o monitoramento de gases em aterros e células experimentais com esse tipo de equipamento e obtiveram bons resultados.

A cromatografia gasosa é o método mais preciso na detecção de gases, porém, o custo elevado desse tipo de equipamento muitas vezes impede a realização de um monitoramento constante de gases. A cromatografia possui um alto poder de resolução e sua detecção acontece em escala de nano a picogramas. Diversos trabalhos relatam o monitoramento de gases por esse método como Brito Filho (2005), Silva (2010) e Candiani (2011) todos buscando estudar a geração de biogás em aterros sanitários.

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida em Campina Grande-PB, que de acordo com os dados do IBGE (2010), tem uma população de 385.213 habitantes, com área de aproximadamente 594km² (área urbana de aproximadamente 96km²) e encontra-se a 120km da capital do Estado, João Pessoa. O clima da região é do tipo semiárido apresentando temperatura do ar média anual em torno de 23,3 °C e com precipitação anual em torno de 758,7mm (AESAs, 2012).

O desenvolvimento do projeto teve como ponto de partida a construção, instrumentação e monitoramento de uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos, localizada na Universidade Federal de Campina Grande, com início no ano de 2010, sendo desenvolvido pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) que é formado por alunos de iniciação científica, mestrandos e doutorandos, e por voluntários das Universidades Federal de Campina Grande e Estadual de Paraíba.

Os resíduos coletados na cidade de Campina Grande – PB foram confinados em células experimentais que simulam um aterro sanitário em escala experimental. Estas células experimentais são relativamente fáceis de operar, podendo ser construídas com maior rapidez e com o custo relativamente baixo, além de se ter condições operacionais conhecidas e/ou controladas.

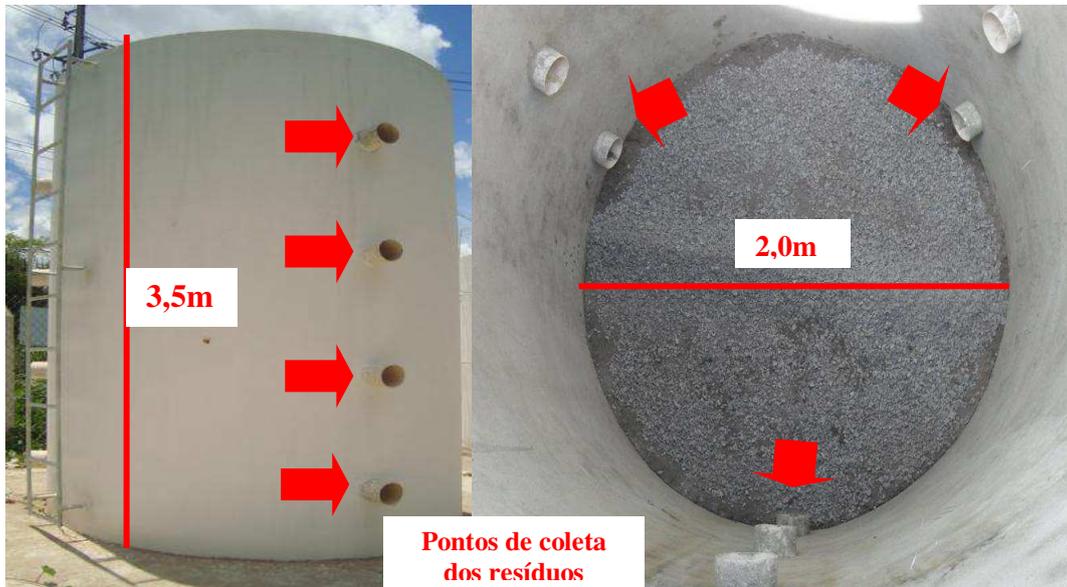
A célula experimental estudada consta de uma estrutura cilíndrica rígida, com seção transversal circular. Aterros simulados com seção transversal circular visam facilitar a distribuição e a compactação dos resíduos, uniformizar a distribuição das pressões laterais na parede interna da célula experimental, evitar caminhos preferenciais de percolação do lixiviado e reduzir a área de superfície lateral interna diminuindo o contato entre os resíduos e a parede da estrutura. As dimensões foram definidas com os objetivos de atingir uma altura de resíduos suficiente, para facilitar o estabelecimento de condições anaeróbias, levando em consideração também o custo para construção e preenchimento com resíduos.

4.1 Construção da célula experimental de RSU

A célula experimental estudada apresenta uma estrutura cilíndrica e foi construída em alvenaria de tijolos manuais, com 2,0m de diâmetro interno e 3,5m de

altura possuindo volume aproximado de 11m^3 , está localizada na UFCG e possui ao longo de sua altura doze orifícios de 100 mm de diâmetro que permitem a coleta dos resíduos (Figura12).

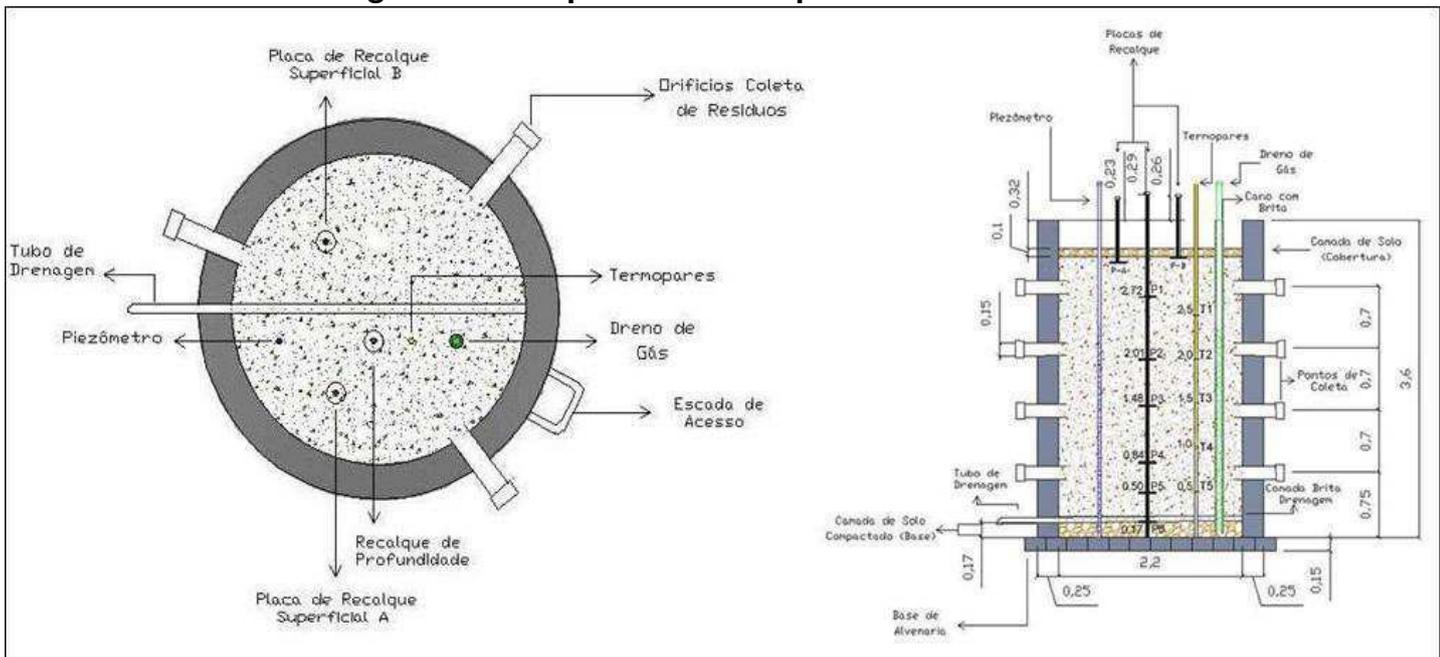
Figura 12: Célula experimental de RSU localizada na UFCG.



Antes do preenchimento dos resíduos na célula, foram feitos ensaios com o solo a ser utilizado na camada de base e cobertura, a fim de evitar sua contaminação por meio da lixiviação e para impedir que ocorra o fluxo de gás para a atmosfera. Acima da camada de base, foi colocada uma camada de brita para auxiliar na percolação de líquidos, só depois foi instalada a instrumentação. A célula experimental é dotada de um sistema de drenagem de líquidos e gases, medidores de nível dos líquidos, medidores de recalque superficiais e profundos e medidores de temperatura ao longo da profundidade (Figura 13). O sistema de drenagem de lixiviados é constituído por um tubo de PVC perfurado apoiado diretamente sobre o solo compactado e por uma camada de pedra britada que promoverá a drenagem de toda área do fundo da célula. Nas camadas de base e de cobertura foi escolhido um solo com características de baixa permeabilidade. Na célula experimental foram acondicionados RSU provenientes de Campina Grande-PB, representando nove bairros das quatro diferentes zonas da cidade norte, sul, leste e oeste, obtendo assim uma amostra representativa dos resíduos produzidos na cidade.

A Figura 13 ilustra o croqui da célula experimental de resíduos sólidos urbanos localizada na UFCG com detalhes da instrumentação interna.

Figura 13: Croqui da célula experimental de RSU.



4.2 Instrumentação da célula experimental de RSU

A célula experimental é dotada da instrumentação descrita a seguir:

- **Piezômetro:** para o monitoramento do nível de líquidos, consiste em um tubo de PVC de 25mm, com furos nas paredes do tubo e coberto com tela de nylon. As variações do nível de lixiviado serão medidas com um sensor de nível de água.
- **Termopares:** para o monitoramento das temperaturas no interior da célula. Os termopares consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma corrente elétrica proporcional à temperatura.
- **Tubo para drenagem de gases:** o dreno de gás, instalado no centro geométrico da célula, consiste em dois tubos de PVC um de 100mm e outro de 40 mm de diâmetro, ambos perfurados e preenchidos com brita para evitar a obstrução dos furos.
- **Pontos de coleta das amostras dos resíduos sólidos:** são doze aberturas na parede da célula experimental, sendo quatro a cada 0,7m de altura distribuída em quatro pontos diferentes. Cada abertura tem diâmetro de 150 mm.

4.3 Caracterização dos resíduos e preenchimento da célula experimental

Visando obter amostras representativas dos RSU da Cidade de Campina Grande verificou-se a necessidade de se estabelecer um plano de amostragem, através de um planejamento estatístico. Este plano baseou-se nas informações obtidas junto a Diretoria de Limpeza Urbana (DLU) e ao Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Para isso, foram utilizados dados do censo populacional do IBGE 2010, juntamente com dados da geração de resíduos na cidade e assim foi desenvolvida uma metodologia para amostragem, com o intuito de representar a composição dos resíduos sólidos gerados na cidade. O plano de amostragem foi realizado a partir do planejamento estatístico utilizando as quatro zonas da cidade de Campina Grande, Norte, Sul, Leste e Oeste. A partir dessa divisão foi realizado um sorteio aleatório dos bairros, a fim de selecionar os locais de coleta dos resíduos.

A coleta nos bairros sorteados foi realizada em um caminhão basculante cedido pela Prefeitura Municipal de Campina Grande – PMCG de acordo com as rotas definidas juntamente com Secretaria de Obras e Serviços Urbanos (SOSUR). Num período de três dias os resíduos coletados foram pesados de imediato e de acordo com a quantidade específica para cada bairro encaminhados até a UFCG, a quantidade pesada e coletada em cada um dos nove bairros foi previamente estabelecida por meio de cálculos estatísticos e está representada na Tabela 3.

Tabela 3: Massa de resíduos coletados e os bairros sorteados

Zona	Bairro	Resíduos (Kg)
Norte	Centro	752,86
	Lauritzen	298,47
	Palmeira	636,03
Sul	Católé	1.975,21
	Sandra Cavalcante	710,05
	Tambor	872,75
Leste	José Pinheiro	1.753,40
Oeste	Prata	426,79
	Pedregal	974,46

No dia 10 de setembro de 2011, após recolher aproximadamente 9 toneladas de resíduos da cidade, a área de amostragem localizada próxima à célula experimental na UFCG, teve início o processo de homogeneização, triagem do material coletado e o enchimento da célula. A abertura das sacolas plásticas foi realizada manualmente pelos membros do GGA e mais quatro agentes de limpeza cedidos pela PMCG, todos estavam usando os Equipamentos de Proteção Individual - EPI's. Na Figura 14 estão representados os procedimentos de coleta, pesagem, abertura das sacolas e homogeneização dos resíduos para preenchimento da célula experimental.

Figura 14: Procedimentos de coleta (a); pesagem (b); abertura das sacolas (c); homogeneização dos resíduos para preenchimento da célula experimental (d).



Após a homogeneização dos resíduos com o veículo trator enchedeira, teve início o processo de quarteamento, que consistiu em dividir os resíduos em quatro

pilhas, das quais duas foram descartadas e as outras duas homogêneas novamente, formando uma única pilha. Após esse procedimento, foram retiradas amostras sólidas para a caracterização física dos RSU, conforme NBR 10.007/04.

O preenchimento também foi realizado com o auxílio do trator enchedeira que levou os resíduos previamente pesados, até a célula a fim de ser descarregados manualmente. Ao serem colocados na célula, os resíduos eram distribuídos em camadas e compactados com o auxílio de um soquete manual até atingirem o nível de 3,20m (Figura15). Em seguida, foi colocada a camada de cobertura de solo, igual a amostra usada na base.

Figura 15: Processo de quarteamento (a); pilha resultante (b); pesagem (c); descarregamento (d); preparação para a caracterização física (e); resíduos compactados na célula experimental de RSU (f).



4.4 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU

A composição gravimétrica de um aterro de resíduos sólidos é uma informação básica para o monitoramento e avaliação de projetos ambientais. A obtenção dessa informação é dificultada pela inexistência de procedimentos padrões de amostragem, pela heterogeneidade dos RSU e pela forma de disposição desses resíduos ou tipo de aterro, entre outros fatores (LEITE, 2000).

Seguindo a metodologia de Lipor (2000) para realização da composição gravimétrica, na célula experimental foram retirados aproximadamente 160kg da pilha resultante (Figura 15b) de RSU com o auxílio de 9 recipientes de 65 litros. O material retirado foi pesado em seguida disposto em local previamente preparado com lona plástica para o processo de caracterização gravimétrica (Figura 16). A classificação dos resíduos foi realizada segundo os procedimentos adotados Leite (2008) e Garcez (2009), onde houve a separação das seguintes categorias: plásticos, metais, vidros, compósitos, têxteis sanitários, papel e papelão, matéria orgânica e outros. Em recipientes etiquetados, foram realizadas as medições do peso dos RSU já separados nas categorias e anotados os dados em planilhas.

Figura 16: Composição gravimétrica dos RSU, recipientes para separação dos resíduos (a); separação física dos resíduos (b); separação de duas categorias de plástico (c) e (d).



Após o procedimento de composição gravimétrica iniciou-se a composição volumétrica, onde foram realizadas leituras de volume do mesmo material utilizado na composição gravimétrica. Realizou-se a compactação dos resíduos com um soquete manual confeccionado pelo GGA. O soquete possuía uma área aproximadamente de $0,503\text{m}^2$, volume $0,075\text{m}^3$ e peso 26kg. Após compactar os resíduos, foram medidos a altura e o diâmetro, obtendo-se o volume destes resíduos (Figura 17). Os procedimentos para determinação da composição volumétrica foram realizados baseados na metodologia de Catapreta e Simões (2008) e Mariano *et al* (2009). Ainda foi realizada a triagem e caracterização dos diferentes tipos de plásticos presentes na amostra.

Figura 17: Composição volumétrica resíduos sólidos (a); pesagem (b); compactação dos resíduos (c); edição da altura e do diâmetro de resíduos (d).



4.5 Monitoramento da célula experimental de RSU

O monitoramento da célula experimental de RSU é uma ferramenta importante para entender a dinâmica de um aterro sanitário, tendo a vantagem de ser em escala reduzida. Concluída a etapas de construção, instrumentação, coleta,

composição gravimétrica, volumétrica e enchimento da célula, teve início o monitoramento dos principais parâmetros relacionados aos resíduos sólidos com o objetivo de analisar aspectos físicos, físico-químicos e microbiológicos, além do monitoramento de gases, principal objetivo desse estudo.

4.5.1 Coleta dos RSU

As coletas foram realizadas no período de setembro de 2011 a janeiro de 2013. Para coletar amostras representativas dos resíduos, foi usado um amostrador, instrumento com uma altura de 1,5m e uma hélice de 120mm de diâmetro (Figura 18), confeccionado pelo GGA.

Figura 18: (a) e (b) Amostrador usado para coletar os resíduos sólidos urbanos nos diferentes níveis da célula experimental



Fonte: Araújo, 2011.

As amostras foram coletadas mensalmente para avaliação dos processos de biodegradação dos resíduos. Durante o monitoramento da célula experimental, as amostras foram coletadas e levadas ao laboratório, para realização dos diversos tipos de experimentos microbiológicos, físicos, físico-químicos e geotécnicos.

4.5.2 Caracterização físico-química e microbiológica dos resíduos

As metodologias utilizadas para determinação da caracterização físico-químicas e microbiológicas dos resíduos estão descritas no Quadro 4, referente às etapas de caracterização e de monitoramento.

Quadro 4: Metodologias dos ensaios físico-químicos e microbiológico.

Parâmetros	Método
Teor de Umidade	NBR 6457 (ABNT, 1986a); Manassero <i>et al.</i> (1996)
Sólidos Voláteis	Who (1979)
pH, Alcalinidade Total, Ácidos Voláteis	<i>Standard Methods</i> (AWWA/APHA/WEF, 1998) Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias (Silva & Oliveira, 2001).
Micro-organismos aeróbios	<i>Standard Methods</i> (AWWA/APHA/WEF, 1998); Melo (2003)
Temperatura	Metodologia própria

As amostras sólidas dos resíduos coletados através dos pontos de coletas presentes em três níveis de profundidade (nível superior, intermediário e inferior) foram levadas ao laboratório, passaram por um processo de picotagem e destinadas à determinação dos parâmetros de pH, teor de umidade, alcalinidade total, ácidos voláteis, sólidos voláteis e micro-organismos aeróbios.

4.5.2.1 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método de base úmida, segundo Manassero *et al.* (1996) o mais comumente utilizado em resíduos sólidos. Para isso, 10g da amostra dos resíduos foram pesadas, em balança digital, e encaminhadas para secagem em estufa à 60°C por 24 horas. O teor de umidade foi expresso pela quantidade de água perdida durante o processo de secagem. Todas as análises foram realizadas em duplicata. Os cálculos para determinação do teor de umidade foram expressos na Equação (1).

Equação (1)

$$w = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Onde:

w: teor de umidade (%);

P_i: peso inicial (g);

P_f: peso final (g).

4.5.2.2 Sólidos voláteis

A determinação da percentagem de sólidos voláteis presentes nos resíduos sólidos foi realizada segundo (WHO, 1979). Depois do processo de teor de umidade, o material foi levado a mufla até atingir gradativamente 550^o C pelo período de duas horas, e em seguida foi resfriada, para encontrar o peso seco do material. Segundo Lima (1995) a fração de matéria que se volatiliza no processo é definida como sólidos voláteis. Podem-se considerar como sólidos voláteis o total de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos. O teor de sólidos voláteis da amostra foi determinado de acordo com a Equação (2).

Equação (2)

$$\%SV = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Onde:

%SV = Sólidos Voláteis (%);

P_i = peso inicial (g);

P_f = peso final (g).

4.5.2.3 pH

Para a determinação do pH foram coletados RSU no interior da célula experimental, as amostras desses resíduos foram diluídas e peneiradas para se obter um extrato líquido (SOUSA *et al*, 2012). O pH do extrato líquido foi determinado com a metodologia do Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 1998). A obtenção do pH foi feita eletrometricamente com a utilização de um potenciômetro e eletrodos. O princípio da medição eletrométrica do pH é a determinação da atividade iônica do hidrogênio, utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio, que consiste de

uma haste de platina sobre o qual o gás hidrogênio flui a uma pressão de 101kPa. Para realização do ensaio adicionou-se em um béquer 25 ml de amostra, agitando-a levemente com o auxílio de um agitador magnético. Em seguida introduziu-se o eletrodo na amostra e, quando estabelecido o equilíbrio, fez-se a leitura do pH.

4.5.2.4 Alcalinidade total

A alcalinidade total foi determinada segundo a metodologia do Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 1998). Anotado o valor do pH foi adicionado à amostra, ácido sulfídrico (H_2SO_4) de normalidade 0,1N (diluição de 2,8ml de ácido sulfídrico para 1l de água destilada) a amostra sob discreta agitação até atingir pH = 4,0, depois de estabilizado anota-se o volume de ácido gasto na titulação. A Equação (3) foi utilizada para o cálculo da alcalinidade total.

Equação (3)

$$AT = \frac{(N \times V_{\text{ácido}} \times 50000)}{V_A}$$

Onde:

AT: alcalinidade total (mgCaCO₃/l);

V_{ácido}: volume de ácido sulfídrico gasto na titulação (ml);

V_A: volume da amostra (ml);

N: normalidade do titulante.

4.5.2.5 Ácidos voláteis

Os ácidos voláteis foram determinados utilizando-se a metodologia do Standard Methods (APHA, 1998), na qual se calibrou o pH para 3,0 e em seguida a amostra foi levada a fervura até reduzir o seu volume à metade. Após esfriar, novamente sobre agitação, elevou-se o pH para 4,0 com NaOH. Por fim, foi medido o volume de hidróxido de sódio necessário para calibrar o pH a 7,0. Desta forma os ácidos voláteis foram calculados a partir da Equação (4).

Equação (4)

$$AV = \frac{N \times VT}{V_A} \times 60000$$

Onde:

AV = ácidos voláteis (mgH_{AC}/L);

VT = volume de NaOH gasto na titulação (mL);

VA = volume da amostra (mL);

N = normalidade do NaOH (N)

4.5.2.6 Análises microbiológicas – Aeróbios totais

A determinação dos aeróbios totais acontece em duas etapas. A primeira denominada Preparação do Tampão Fosfato e a segunda Inoculação.

- **Preparação do Tampão Fosfato (TF)**

Para a determinação de bactérias aeróbias totais, utilizou-se tubos de ensaio pequenos 18 x 180 mm com 9ml de TF, dos quais foram autoclavados por 15min a 121°C.

- **Inóculo**

As amostras de resíduos sólidos urbanos, coletadas nas diferentes camadas da célula foram picotadas e 10g de amostra de cada camada foi diluída em 90 ml de água destilada em recipientes separados. Para determinação dos aeróbios totais foi utilizada a diluição 10⁻⁵ das quais foram retiradas 0,1ml da amostra de resíduos diluída com o auxílio de uma alça de Drigalski esta amostra foi espalhada em toda a superfície das placas de petri (3 repetições para cada tubo selecionado) contendo o meio “Plate Count Agar (PCA)”. Após este procedimento as placas foram colocadas em estufa a 36,5°C, durante 48 horas. Em seguida foi realizada a contagem do número de colônia (APHA, 1998).

4.5.2.7 Temperatura

O monitoramento das temperaturas no interior da célula experimental foi realizado *in situ* a partir de 5 termopares com conectores do tipo K, numerados de 1 a 5, e o auxílio do termômetro digital. Os termopares, distribuídos uniformemente em toda a altura da massa de resíduos, foram posicionados antes de iniciar o

preenchimento da célula em diferentes profundidades. O termômetro portátil utilizado é do tipo digital com dois canais (T1 e T2), com capacidade de medir temperaturas na faixa de (-100°C a 1300°C) e apresenta resolução de 0,5°C e precisão de $\pm(0,1\%$ da leitura $\pm 0,7^\circ\text{C}$) para a faixa de leitura utilizada.

4.6 Monitoramento de gases

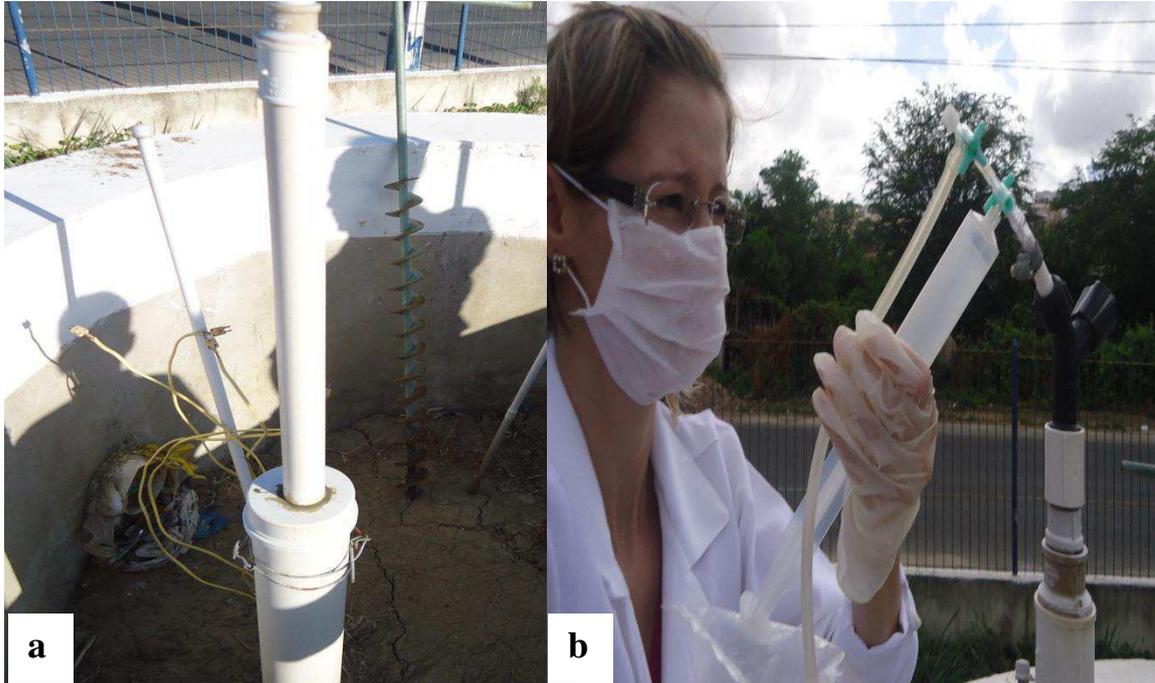
4.6.1 Coleta do biogás na célula experimental

A coleta do biogás gerado no interior da célula experimental foi realizada por meio de um dreno do qual é formado por tubos de PVC. O tubo mais externo possui de 100mm ele é utilizado para proteção de um segundo tubo de 40mm localizado no interior do primeiro tubo. Ambos possuem pequenos orifícios por toda extensão para entrada do biogás (Figura 19). O espaço entre eles é preenchido com pedregulhos (brita) para minimizar obstrução dos furos do tubo interior e, assim obter entrada de biogás de todas as alturas da célula. A saída superior do tubo de biogás é formada por uma torneira plástica com rosca para entrada da mangueira do saco coletor (Figura 20).

Figura 19: Tubos de PVC perfurados.

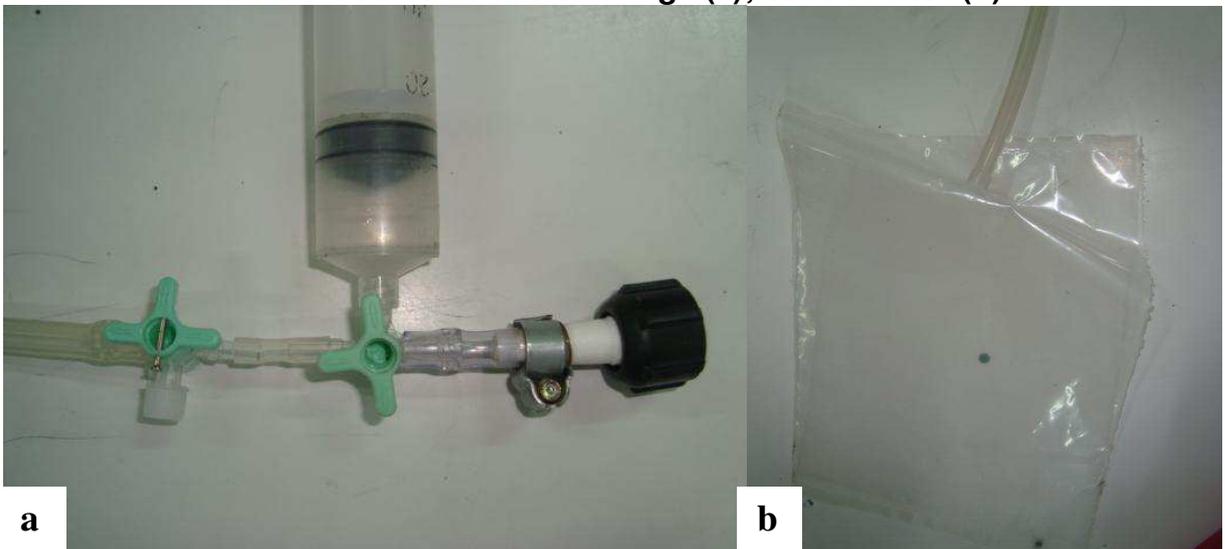


Figura 20: Dreno de gás (a); saída superior do tubo e torneira plástica com rosca para entrada do saco coletor (b).



A metodologia de coleta de gás foi desenvolvida pelo GGA e os equipamentos utilizados constam de um bico de mangueira acoplado a uma válvula de três saídas que será enroscado na torneira plástica, uma seringa plástica de 50 ml para sucção do biogás e um saco coletor acoplado a outra válvula de três saídas (Figura 21), onde será armazenado o biogás e travado pela válvula, impedindo que os gases escapem até a condução ao laboratório para as devidas análises.

Figura 21: Equipamentos utilizados na coleta do biogás, bico acoplado a válvula de três saídas e seringa (a); saco coletor (b)



Para coleta do biogás do interior da célula experimental abre-se a torneira plástica, enrosca-se o bico da mangueira a uma seringa que está conectada ao saco coletor. Em seguida, com a seringa plástica realizaram-se movimentos de sucção do biogás, mudando a posição da válvula aberta da seringa para o saco coletor e pressionando-se o êmbolo da seringa, empurrando o biogás para o saco coletor. Esse processo foi repetido diversas vezes até que a quantidade de biogás no interior do saco coletor fosse o suficiente para a análise laboratorial.

4.6.2 Métodos de análise das concentrações de gases

O monitoramento das concentrações dos gases na célula experimental foi realizado através de análises em laboratório, basicamente por três métodos: equipamento Drager X-am 7000, Kit de Análise de Biogás com Biofoto e a Cromatografia Gasosa, cujas características estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5: Características dos equipamentos de medição das concentrações do biogás

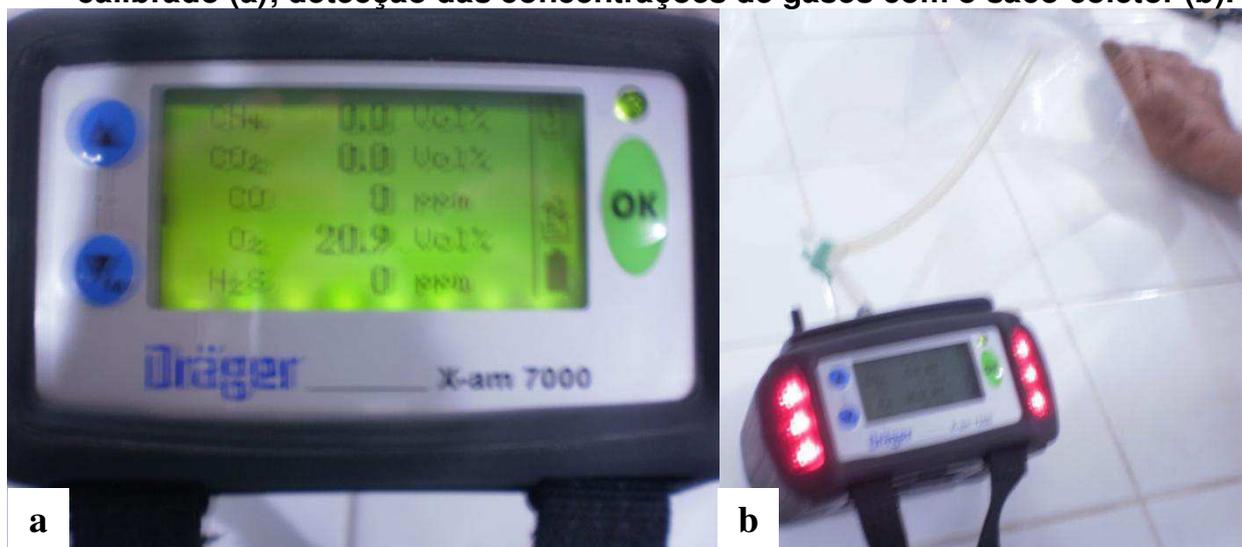
Equipamentos	Gases	Parâmetro	Faixa de medição
Drager X-am 7000	CO ₂	Concentração	0 – 100%
	CH ₄		0 – 100%
	O ₂		0 – 25 %
	H ₂ S		0 – 100 ppm
	CO		0 – 200 ppm
Kit Analisador de Biogás com Biofoto	CO ₂	Concentração	0 – 100%
	CH ₄		0 – 100%
	H ₂ S		20 – 230 ppmV
	NH ₃		15 – 350 ppmV
Cromatógrafo a Gás	CO ₂	Concentração	0 – 100%
	CH ₄		0 – 100%
	N ₂		0 – 100%

4.6.2.1 Monitoramento das concentrações de gases pelo Drager

Inicialmente realizou-se a coleta do biogás na célula experimental de resíduos sólidos localizada na UFCG. O biogás succionado, foi armazenado no saco coletor,

e devidamente travado para evitar a fuga do gás, garantindo assim o transporte seguro da UFCG até a UFPE, onde foram realizadas as análises com o Dräger. As leituras da concentração dos gases (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S e CO) na célula experimental foram realizadas pelo detector portátil e automático de gases com infravermelho Dräger modelo X-am 7000 (Figura 22).

Figura 22: Detector portátil de gases Dräger X-am 7000, aparelho ligado e calibrado (a); detecção das concentrações de gases com o saco coletor (b).



O equipamento é dotado de uma pequena bomba que faz a sucção do gás e direciona o fluxo para os sensores de leitura. O procedimento de leitura da concentração consiste em:

- ligar o aparelho e verificar a calibração
- acoplar a mangueira do saco coletor com o biogás coletado no Dräger;
- abrir a válvula de três saídas para início da leitura;
- pressionar o saco coletor
- tempo de estabilização de 2 minutos;
- leitura das concentrações;
- fechamento da válvula de três saídas para finalização da leitura;
- retirada do equipamento

O resultado das concentrações é obtido por esse método em torno de 3 minutos com as faixas de medição de acordo com a Quadro 5 para esse tipo de equipamento, o que torna as análises viáveis pela praticidade, rapidez e pela margem de erro que é de 5%, além de possibilitar medições *in situ*. É considerado

na leitura das concentrações para os gases CH₄, CO₂, H₂S e CO o maior percentual acusado no equipamento. Porém, a faixa de medição para o oxigênio é de 0 – 25%, e ao contrário dos outros componentes, ele detecta o menor valor detectado de O₂.

4.6.2.2 Metodologia analítica do Kit de Análise de Biogás com Biofoto

Outro método analítico que foi utilizado para monitorar as concentrações de gases na célula experimental é denominado Kit de Análise de Biogás com Biofoto (Figura 23), ele foi desenvolvido por meio de uma parceria entre a *Embrapa Suínos e Aves* e a empresa *Alfakit Ltda.* Este “Kit” permite determinar de forma simples e rápida as concentrações de amônia (NH₃), sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄).

Figura 23: Componentes do kit para determinação da composição do biogás.

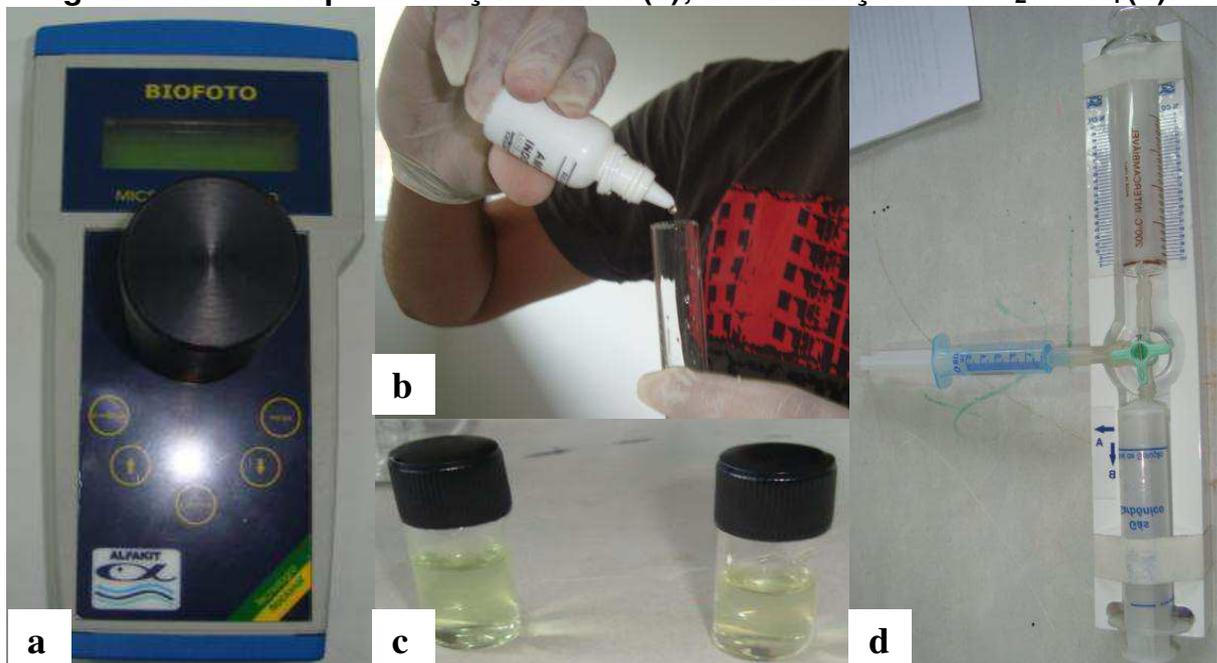


O Kit é composto por uma maleta para transporte, amostrador de biogás, seringas coletoras, mini-orsat, reagentes para 100 testes de cada parâmetro, cartelas em material resistente, manual de instruções e acessórios. Devido ao baixo custo, ao tempo de análise que é em torno de 30 minutos e ao fácil manuseio do Kit, as análises podem ser feitas diariamente, ou sempre que se julgar necessário. Desta forma, permite a avaliação do funcionamento de todo o sistema implantado. Isto não impede de análises por outros equipamentos ou cromatografia serem feitas rotineiramente.

O gás coletado pelo dreno de gases foi transportado no saco coletor para o laboratório de Geotecnia Ambiental da UFCG permitindo a leitura dos principais constituintes do biogás encontrados na célula experimental de RSU.

Para a determinação da amônia e do gás sulfídrico, a técnica consiste em borbulhar o biogás em uma solução analisando colorimetricamente e em seguida fazendo a leitura no aparelho de Biofoto, o resultado da concentração dos gases é dada em ppmV (mL m^{-3}). Para análise de metano e gás carbônico, o biogás também é borbulhado em uma solução e com o auxílio de um suporte com duas seringas uma de vidro e outra de plástico é dada concentração (% volume) pela diferença entre o volume de gás inicial e final (Figura 24). No Quadro 6 estão apresentadas as principais características do Kit de análise de biogás com biofoto.

Figura 24: Aparelho biofoto (a); determinação da amônia (b); amostra aguardando o tempo de reação 10 min (c); determinação de CO_2 e CH_4 (d).



Quadro 6: Principais características do kit de análise de biogás com biofoto.

PARÂMETROS	MÉTODO	INFORMAÇÃO
Amônia	Azul de indofenol	Curva de calibração de 15 a 875 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 de 15 a 350 ppmV NH_3 - Faixa 2 de 45 a 875 ppmV NH_3
Gás Sulfídrico	Azul de metileno	Curva de calibração de 20 a 380 ppmV em 2 faixas: - Faixa 1 de 20 a 230 ppmV H_2S - Faixa 2 de 30 a 380 ppmV H_2S
Dióxido de Carbono	Orsat	0 – 100% resolução 2,5%
Metano	Orsat	0 – 100% resolução 2,5%

4.6.2.3 Metodologia analítica da cromatografia gasosa

Quando se deseja uma caracterização mais detalhada da composição do biogás o método analítico com maior precisão é a cromatografia gasosa. Esse método possui grande poder de resolução, boa velocidade de separação, além de permitir o monitoramento contínuo e fluente na coluna, a medição quantitativa exata, análises com reprodutibilidade e repetibilidade, automação do processo analítico e tratamento de dados (PROCHNOW, 2003).

Para realizar a análise cromatográfica, o biogás retirado da célula experimental foi armazenado no saco coletor, identificado e encaminhado para o laboratório da UFPE do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), onde foi determinada a composição do gás produzido, em termos de metano, dióxido de carbono e nitrogênio.

O cromatógrafo a gás utilizado na pesquisa é um Appa modelo Gold, devidamente calibrado e acoplado a um computador. Esse modelo possui detector de condutividade térmica (TCD) próprio à análise de biogás (Figura 25). A coluna cromatográfica (empacotada) de aço inoxidável possui de 3m de comprimento e é preenchida com Porapak N, 80/100. As temperaturas do injetor, detector e forno foram de 120°C, 150 °C e 50 °C, respectivamente. O fluxo de hidrogênio (gás de arraste) possui uma vazão pela coluna de 30 mL.min⁻¹.

Para realizar a análise das concentrações de biogás no cromatógrafo foi utilizada uma seringa de 1mL e recolhido o gás do saco coletor. Em seguida foi injetado no cromatógrafo 1ml da amostra. Os cromatogramas fornecerão as áreas dos picos de CH₄, CO₂ e N₂. A área de cada pico foi convertida por uma curva de calibração para valores em mL. De posse do volume de biogás injetado (1 mL) e fazendo a razão entre esses valores obteve-se o percentual (volumétrico) de cada tipo e gás da amostra. O procedimento de análise do cromatógrafo é bastante simples, pois a maior parte é feita no programa do computador. Os maiores cuidados, em relação à vida útil, estão ao ligar e desligar o equipamento, onde o procedimento deve ser seguido rigorosamente (JESUS, 2012).

Figura 25: Modelo do cromatógrafo a gás utilizado na pesquisa.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o monitoramento da célula experimental. Inicialmente será feita uma abordagem das características iniciais dos resíduos sólidos urbanos (RSU) por meio da composição gravimétrica e volumétrica os resíduos soltos e compactados. Posteriormente serão apresentados em forma de Figuras, os parâmetros físicos, físico-químicos e microbiológicos relacionados com o comportamento dos gases.

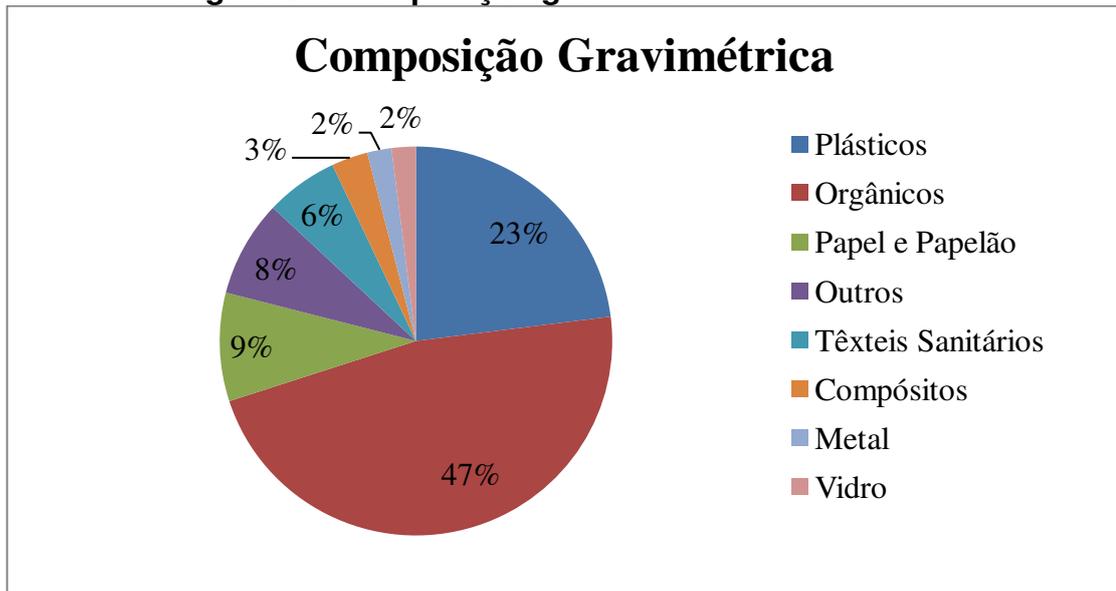
5.1 Análise da composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos

A composição gravimétrica consiste na obtenção dos percentuais em peso dos principais componentes dos resíduos. O conhecimento dessa composição permite uma avaliação da degradabilidade, do poder de contaminação ambiental e das possibilidades e reutilização, reciclagem, valorização energética e orgânica dos RSU, além de ser um dos fatores principais no monitoramento de gases.

As composições dos resíduos utilizados na célula experimental estão representadas nas Figuras 26, 27 e 28. Os dados obtidos inferem que a maior parte dos RSU de Campina Grande – PB é composto por matéria orgânica, atingindo um valor de 47% (percentagem em peso) do total dos resíduos recolhidos na cidade. É importante, também, salientar que o percentual de plástico, papéis e papelão (Figura 26) tiveram valores significativos.

Observando a Figura 26, pode-se facilmente notar que as três maiores categorias, por ordem percentual em peso são matéria orgânica, plásticos, papel e papelão que correspondem, conjuntamente, a 79% do peso total dos resíduos preenchidos na célula experimental. Pode-se observar, ainda, que o percentual de matéria orgânica de 47% é inferior àquele usualmente reportado para os padrões brasileiros. Segundo Colmanetti *et al.* (2000), a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos compõe cerca de 50% a 60% em peso da massa total dos resíduos.

Figura 26: Composição gravimétrica dos resíduos.



No Quadro 7, podem ser observados dados históricos de estudos de composição gravimétrica dos RSU de Campina Grande-PB, que demonstram a sua evolução com o tempo.

Quadro 7: Comparação entre estudos de composição gravimétrica dos RSU em Campina Grande – PB

Parâmetro	Ano de realização do Estudo		
	2008 ⁽¹⁾	2011 ⁽²⁾	2013
Plásticos	11,44%	11%	23%
Matéria orgânica	69,53%	66%	47%
Papel e papelão	6,23%	5%	9%
Outros	3,16%	6%	8%
Têxteis sanitários	6,71%	4%	6%
Compósitos	0,95%	1%	3%
Metal	0,71%	3%	2%
Vidro	1,18%	4%	2%
TOTAL	99,91%	100%	100%

1) Leite, 2008; 2) Alves, 2012

Quando os dados da caracterização gravimétrica são comparados com os de outras caracterizações realizadas em Campina Grande (Quadro 7), percebe-se que

o teor de matéria orgânica total variou de um percentual de 69% no estudo realizado por Leite (2008) para 66% no estudo realizado por Alves (2011), tendo um percentual de 47% na última composição gravimétrica realizada pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Universidade Federal de Campina Grande em células experimentais. É válido considerar que o alto percentual de matéria orgânica pode indicar uma maior geração de biogás, o que justificaria a utilização para a matriz energética.

Nota-se que o percentual de plástico presente na massa de resíduos sólidos domiciliares aumentou significativamente, sendo observado um percentual de 11% no estudo realizado em 2008, para 23% no realizado em 2013. O aumento da quantidade de plásticos, de certa maneira, faz sentido, já que se observa um aumento nos percentuais desse material nas grandes cidades nos últimos anos, devido o acelerado consumo e descarte de plásticos usados em aplicações efêmeras, tais como embalagens, o que está induzindo um alarmante acúmulo nos depósitos de lixo de materiais que podem levar centenas de anos para se decompor. No entanto, estes resultados devem ser observados com cautela, devido ao curto espaço de tempo entre a realização dos estudos de composição gravimétrica.

Em relação ao papel, foi observada uma variação significativa. Em 2008, o percentual de papel representava cerca de 6%, e em 2013, 9%, incluindo o papelão. No caso dos papéis, não se esperava que houvesse um aumento significativo em seu percentual, já que a última caracterização realizada em células experimentais (2011) não mostrou uma tendência de elevação nos percentuais. Os demais componentes não apresentaram grande variação em relação à última caracterização realizada em células experimentais.

A composição volumétrica dos RSU que foram dispostos na célula experimental teve como objetivo classificar e quantificar em volume cada componente da massa de resíduos, além de permitir conhecer qual a fração biodegradável existente. Tal estudo permite, a princípio, inferir se necessário, qual o espaço poderia estar sendo ocupado por cada componente dentro do aterro. A Figura 27 apresenta os resultados obtidos por meio da composição volumétrica dos resíduos sólidos soltos e a Figura 28 apresenta os resultados obtidos da composição volumétrica dos resíduos compactados de Campina Grande, dispostos na célula experimental.

Figura 27: Composição volumétrica (solto).

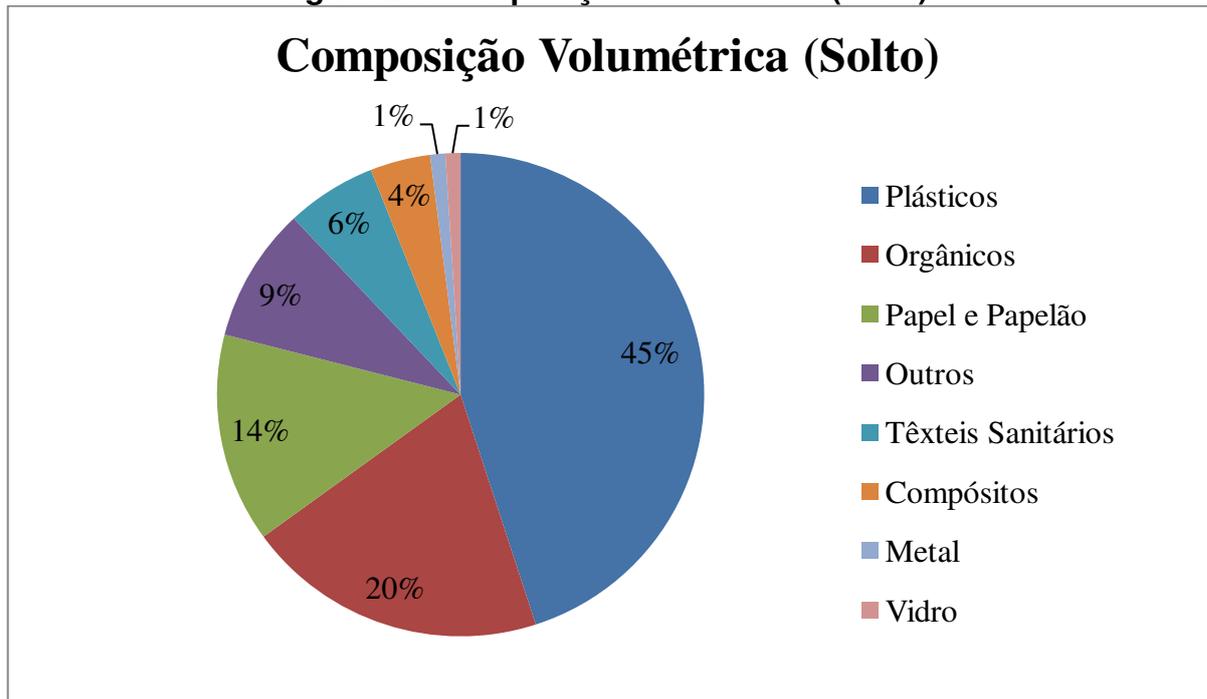
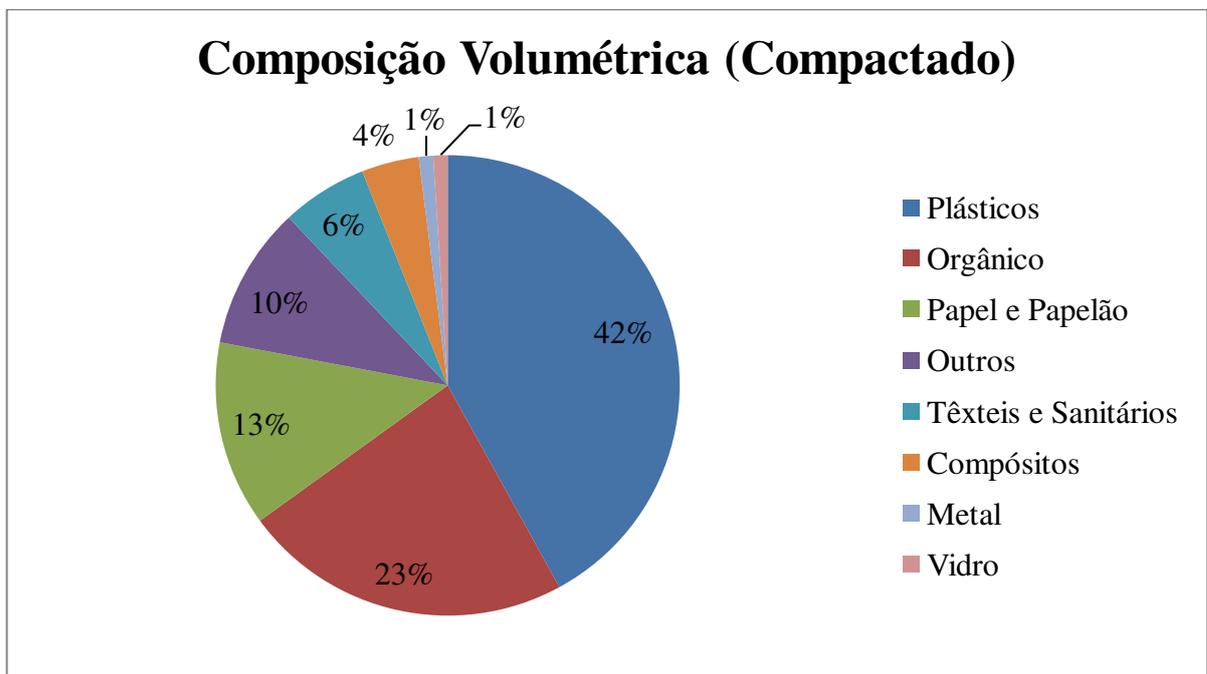


Figura 28: Composição volumétrica (compactado).



Os resultados demonstram que a quantidade de plásticos, papéis e matéria orgânica tiveram variações significativas, indicando que estes materiais podem exercer grande influência no comportamento de um aterro sanitário. A quantidade de matéria orgânica disposta no aterro representa 47% em peso dos resíduos, porém

ocupa apenas 23% do volume compactado. Segundo Leite (2008) estes percentuais elevados muitas vezes estão relacionados à falta de programas de reciclagem na cidade e à falta de sensibilização da população local, fatos estes que poderão levar a uma diminuição do tempo de vida útil de um aterro sanitário local.

Já os papéis, possuem 9% em peso, enquanto ocupam cerca de 13% do volume. A quantidade de plástico representa 23% em peso dos resíduos, e ocupa 42% do volume. Isto, do ponto de vista operacional de um aterro sanitário pode ser prejudicial, pois acaba por exercer influência sobre o seu comportamento, principalmente quanto à compactação dos resíduos, levando o aterro a funcionar como um “colchão”, onde após as máquinas compactadoras passarem sobre as camadas de resíduos, podem proporcionar uma falsa impressão de que os resíduos teriam sido adequadamente compactados.

Nos períodos de chuva, esta grande quantidade de plásticos também prejudica a operação de compactação, pois dependendo da umidade da massa de resíduos, faz com que as máquinas compactadoras deslizem, não permitindo que estes possam trabalhar em uma inclinação ideal para que se possa atingir uma compactação adequada dos resíduos. Essa grande quantidade de plásticos também demonstra que eles podem exercer efeito negativo sobre o sistema de drenagem de líquidos de um aterro sanitário, pois, se a proteção proporcionada a esse sistema não for adequada e o acúmulo de plásticos for elevado pode dificultar o escoamento dos líquidos lixiviados, contribuindo para o aumento do nível desses líquidos em seu interior e, conseqüentemente, para a instabilidade da massa de resíduos (CATAPRETA & SIMÕES, 2008).

Ao serem lançados nos aterros, os plásticos, também prejudicam a decomposição dos materiais putrescíveis, pois criam camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases gerados no processo de biodegradação da matéria orgânica, portanto, a triagem dos plásticos é de extrema importância e deve ser valorizada, para que as condições de aterro sejam melhoradas. Isso pôde ser observado nesta pesquisa, pois o excessivo percentual de plástico dificultou, algumas vezes, a coleta de resíduos com o uso do amostrador, devido à dificuldade de corte dos plásticos que enroscavam na estrutura do amostrador. Esse fato também foi observado por Leite (2008), Garcez (2009), Araújo (2011) e Melo (2011) com estudos em células experimentais em Campina Grande-PB.

Os plásticos, por outro lado, também proporcionam importante efeito estrutural aos aterros sanitários, pois acabam atuando como fibras que possuem, aparentemente, elevada capacidade de resistência à tração, que aliada a sua forma de disposição, configura como elemento estruturante. Alguns autores, como Martins (2006) e Fucale & Jucá (2007), descrevem a influência dos plásticos e outros componentes fibrosos da massa de resíduos como elementos que proporcionam o aumento da resistência dos RSU.

A quantidade de plásticos e papéis verificada, em termos de volume, demonstra o potencial de reciclagem que esses materiais representam na massa de RSU. Os demais materiais avaliados ocorrem em quantidades menores, tanto em relação ao peso quanto ao volume, podendo-se supor que eles exercem pouca influência sobre o comportamento da célula experimental.

Pode-se dizer que esses dados são importantes para direcionar a gestão de resíduos em Campina Grande e têm grande significância quando se fala em potencial de reciclagem. Assim, evidencia-se através dos dados, que o programa de coleta seletiva e reciclagem não estão sendo eficazes na cidade, devido o grande volume de plásticos, papel e papelão que poderia ser reciclado e está sendo descartado. Mas, talvez o mais importante é que a vida útil de um aterro de resíduos sólidos pode ser aumentada se dados como esses forem usados por responsáveis pela gestão de resíduos sólidos urbanos da cidade segundo Pereira *et. al.* (2010); Araujo (2011) e Melo (2011).

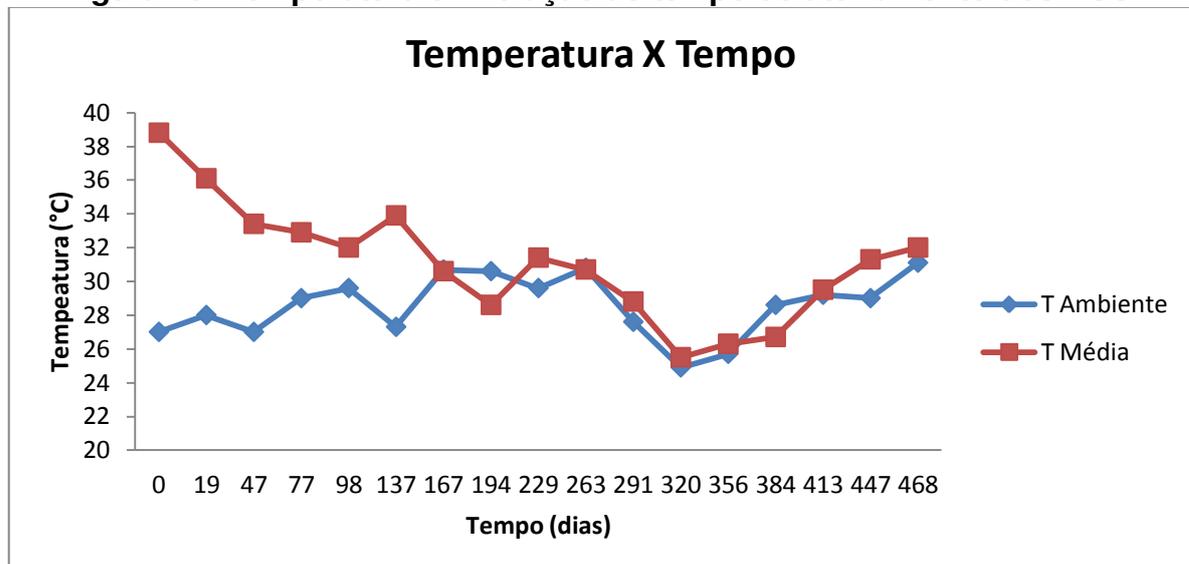
Com os dados da composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos, e com a determinação do potencial de geração de biogás a partir da degradação de cada componente dos resíduos sólidos urbanos é possível estimar a geração de biogás total em um aterro de RSU, pois cada tipo de material contribui quantitativamente de forma diferenciada na geração de biogás. Portanto, os resultados se mostraram eficientes, na produção de biogás pelo alto percentual de matéria orgânica encontrado nos RSU e sugere a viabilidade, do ponto de vista de tratamento dos resíduos, através de tecnologias como a compostagem e aproveitamento energético do biogás. O estudo dos RSU de Campina Grande demonstra que há potencial tanto para reduzir a quantidade de resíduos gerados como também para aumentar emprego e renda para a população.

5.2 Temperatura

Segundo Alcântara (2007) a evolução da temperatura dos RSU fornece informações sobre a atividade microbiana no processo de degradação da matéria orgânica sendo, portanto, um parâmetro relevante no monitoramento de aterros.

A Figura 29 apresenta o comportamento da temperatura em relação ao tempo de aterramento dos RSU na célula experimental.

Figura 29: Temperatura em relação ao tempo de aterramento dos RSU.



A temperatura no interior da célula experimental no início do monitoramento registrou 38,8°C, podendo ser observado em seguida, um decréscimo nesse valor. Esta temperatura na fase inicial foi a mais elevada e pode estar relacionada aos micro-organismos aeróbios que, ao degradarem a matéria orgânica a compostos mais simples como H₂O e CO₂ liberam calor, sendo um processo é exotérmico. Ao longo do tempo, o oxigênio do meio é consumido rapidamente e os grupos predominantemente aeróbios dão lugar a organismos anaeróbios. Contudo estes novos grupos microbianos têm que se adaptar enzimaticamente a este meio.

Nesta mudança de fase há um decréscimo na temperatura devido aos micro-organismos anaeróbios gerarem menos calor durante o processo de degradação. Observa-se que após 42 dias de monitoramento os micro-organismos aeróbios diminuíram em ordem de grandeza no ponto inferior conforme a Figura 35, contudo, só esse fato não permitiria diminuir a temperatura, pois os micro-organismos

aeróbios permaneceram no meio interno de resíduos e com valores altos. O que pode ter ocorrido para que as temperaturas apresentassem mudanças e diminuíssem seriam as intervenções com o ambiente externo como umidade, temperatura ambiente, precipitações, fissuras na camada de cobertura e a entrada de ar pelos pontos de coleta, esse fato também foi observado por Leite (2008), Meira (2009), Melo (2011) e Alves (2012) em células experimentais na cidade de Campina Grande.

Por volta do dia 167 foi observado um equilíbrio entre a temperatura média interna de 30,7°C e a temperatura ambiente com valor de 30,6°C. Percebe-se que essa foi a primeira vez durante o monitoramento que a temperatura ambiente foi mais elevada que a média no interior da célula experimental, fato que se repetiu nos dias 194, 263 e 384 atingindo temperaturas de 30,6°C, 30,8°C e 28,6°C, respectivamente. Com a redução na temperatura média e nas concentrações de oxigênio molecular, ocorre a fase de transição, na qual começam a se desenvolver condições anaeróbias no interior da massa de resíduos. É possível perceber na Figura 29 que por volta do dia 263 o comportamento geral da temperatura média no interior da célula experimental segue uma tendência da temperatura média ambiente. Segundo Melo (2011) um fato que pode contribuir para essa equivalência nas temperaturas interna e externa é a falta de isolamento térmico nas paredes da célula experimental, devido ao material que a constitui.

Na maior parte do período de monitoramento a temperatura média no interior da célula experimental foi maior que a temperatura ambiente. De uma maneira geral, as temperaturas externas influenciam o meio interno principalmente se a célula tiver uma grande área de superfície em relação ao volume. Segundo Melo (2011) embora, no caso da célula experimental, a sua área de superfície em relação ao volume seja bem menor. Diante disto analisou-se com mais profundidade a relação área de superfície/volume e constatou-se que o meio externo é bem maior que o meio interno e isso afeta as temperaturas internas e como os materiais que constituem as paredes da célula experimental não são isolantes a calor e energia acabam facilitando essa transferência de ambiente externo e interno.

A média dos valores apresentou-se dentro de uma faixa de limites aceitáveis para que a degradação microbiana dos resíduos sólidos ocorra normalmente, ficando a maioria dos valores dentro da faixa mesofílica, que são consideradas ótimas para geração de metano. Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993) para uma

maior eficiência do processo de digestão anaeróbia, os níveis de temperatura ótima são os mesofílicos (20°C a 40°C) e termofílicos (50°C a 55°C). Temperaturas abaixo do ótimo normalmente têm efeito mais significativo no crescimento microbiano do que temperaturas acima do ótimo.

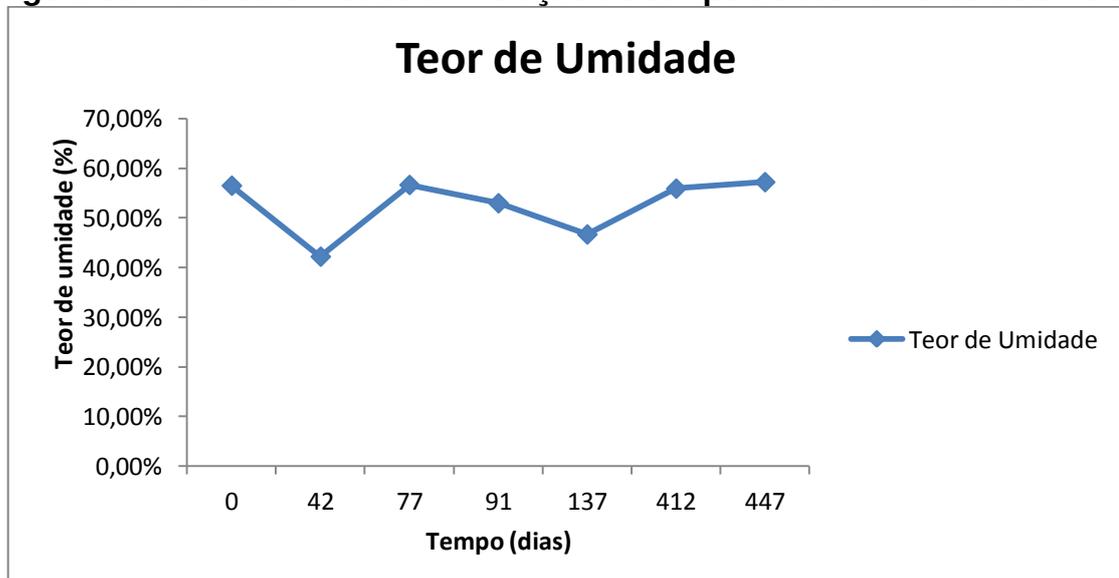
Temperaturas abaixo ou acima do valor considerado ótimo podem alterar, de forma negativa, a eficiência do processo. Portanto, monitorá-la pode ser de grande utilidade para se determinar o comportamento biológico, físico e químico de um aterro, além de auxiliar no monitoramento da geração de biogás.

5.3 Teor de umidade

Segundo Paes (2003) o monitoramento do teor de umidade tem como objetivo descobrir o quanto de água esta presente na amostra, pois a umidade presente nas amostras de RSU pode estimular ou prejudicar a produção de biogás pelos microorganismos. Até um determinado nível de umidade pode haver estímulo da produção de biogás, no entanto, infiltrações excessivas podem causar retardamento da sua produção. É importante ressaltar que a falta de umidade também impede uma degradação satisfatória e, conseqüentemente, a produção de biogás não ocorre adequadamente.

A Figura 30 ilustra o teor de umidade encontrado na célula experimental ao longo dos dias de monitoramento.

Figura 30: Teor de umidade em relação ao tempo de aterramento dos RSU.



Como característica inicial, o teor de umidade teve um percentual de 56,51%, semelhante ao teor de umidade analisado por Alcântara (2007) que foi de 53% e Leite (2008) que obteve um valor de 57%, ambos em pesquisas com células experimentais. Esses valores, segundo Palmisano & Barlaz (1996) são relativamente elevados para processos biodegradativos, mas segundo Bidone & Povinelli (1999), são valores dentro da normalidade para as condições brasileiras.

O valor do teor de umidade encontrado pode ser atribuído à presença elevada de matéria orgânica dentro da célula estudada, pois, de acordo com Marques (2001) matéria orgânica como restos de alimentos, papéis, madeira e tecidos absorvem água ocasionando um valor excessivo dessa variável. Melo (2003) cita que o teor de umidade e de matéria orgânica são os fatores essenciais para o processo inicial da biodegradação.

De acordo com Palmisano & Barlaz (1996) e Bidone & Povinelli (1999), a faixa média para a degradação dos resíduos é em torno de 40 a 60%, semelhantes aos resultados obtidos nesse estudo. Nos primeiros 42 dias houve uma queda da umidade para um valor de 42%, essa redução foi a menor encontrada durante período de monitoramento e pode ser justificada, devido à perda de água por evaporação, haja vista que a camada de cobertura da célula experimental não é completamente impermeável havendo passagem de líquidos e gases, permitindo assim trocas entre o meio interno e externo. Além disso, deve ocorrer um período de adaptação dos micro-organismos degradadores devido ao aterramento dos resíduos, passando de um meio aeróbio para anaeróbio. É importante ressaltar que, além da parte de água perdida em forma de vapor, outra fração também é consumida na formação de biogás. De acordo com Tchobanoglous *et al.* (1993), é consumida cerca de 0,165kg de água para cada metro cúbico de gás emitido.

As pequenas oscilações de umidade que ocorreram na célula experimental podem ser justificadas pela heterogeneidade do material, bem como a qualidade/quantidade do material coletado, visto que esse material pode ter maior ou menor capacidade de retenção de líquidos. Valores elevados de umidade nesta célula experimental chegaram a 57% em 447 dias de monitoramento, podendo estar associado ao elevado teor de matéria orgânica observado na composição gravimétrica dos resíduos, cerca de 47% conforme apresentado na Figura 26. Segundo Monteiro (2003), a matéria orgânica contém uma quantidade de água que fornece nutrientes requeridos pelos micro-organismos, além de possibilitar sua

rápida propagação no meio sólido, como também, a água possibilita o transporte de enzimas e de outros metabólitos importantes no processo de decomposição. Melo (2011) afirma também que a presença de água na célula além de estar associada ao elevado teor de matéria orgânica, também pode ser ocasionada pelos subprodutos da biodegradação dos resíduos, bem como a entrada de águas de chuva na célula.

De acordo com Audibert (2011), as maiores taxas de metano são obtidas na faixa entre 40% e 80% de umidade. Interessante ressaltar que a umidade no interior da célula experimental sempre esteve acima de 40%, chegando até próximo de 60%, que segundo Lima (1995) indica que o valor médio do teor de umidade dos RSU no Brasil é da ordem de 60%. Observa-se que a umidade da massa de resíduos no período monitorado foi propícia para garantir a evolução do processo de degradação e estabelecimento da fase metanogênica.

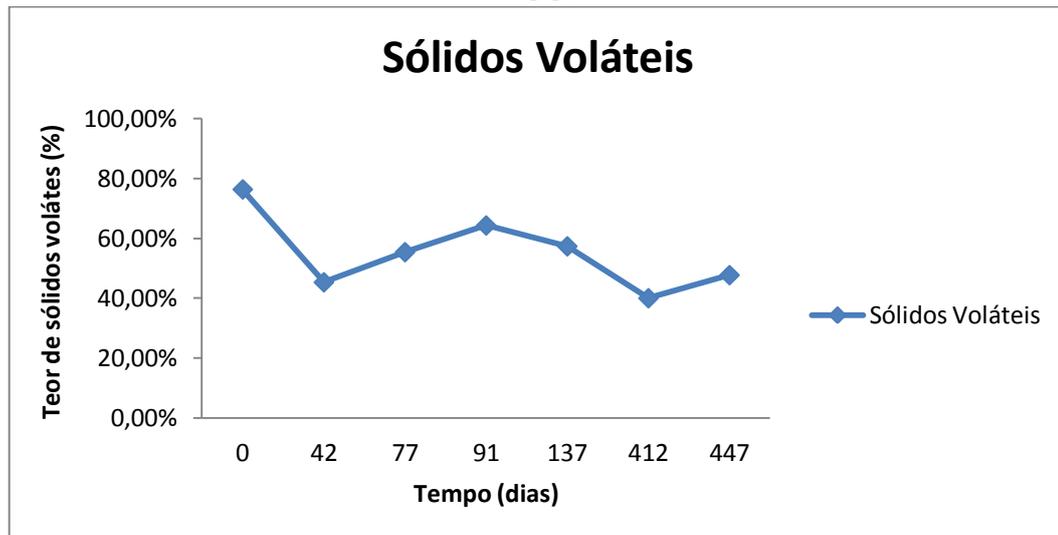
Embora a presença de água na célula experimental tenha sido associada aos subprodutos da biodegradação, não foi possível detectar a presença de lixiviado, podendo estar relacionado a problemas como infiltração, retenção de líquido formando espaços vazios (bolsões), altas taxas de evaporação ou ao baixo déficit hídrico da cidade conforme Melo (2011).

Logo, conhecer tal parâmetro, torna-se extremamente importante, pois, pode-se conhecer o comportamento dos RSU durante as diferentes condições climáticas da região de Campina Grande, podendo fornecer informações que poderão ser utilizadas para um aterro em escala real, além de estimar a geração de biogás e a capacidade de biodegradação dos resíduos, uma vez que, a presença de água no meio é um fator de extrema importância para a atividade bacteriana.

5.4 Sólidos voláteis

O teor de sólidos voláteis determina de forma indireta a quantidade de matéria orgânica a ser degradada nos resíduos. Desta forma, quanto maior for o teor de sólidos voláteis maior é a quantidade de matéria orgânica a ser degradada (ARAÚJO, 2011). A Figura 31 apresenta o teor de sólidos voláteis encontrados na célula experimental.

Figura 31: Teor de sólidos voláteis em relação ao tempo de aterramento dos RSU.



Observa-se que os elevados índices desse parâmetro na fase inicial de monitoramento da célula, pode estar associado ao grande teor de matéria orgânica disponível a ser degradado. Segundo Alcântara (2007), o elevado teor de sólidos voláteis confirma a fase inicial de decomposição dos resíduos e aponta para uma grande quantidade de matéria orgânica.

Para os sólidos voláteis, observaram-se valores variando entre 40% e 76%, com média de 55%. Valores semelhantes a estes foram encontrados por Leite (2008), Araújo (2011) e Silva (2012) com estudos em célula experimentais na cidade de Campina Grande.

O teor de matéria orgânica bem como o teor de sólidos voláteis, pode ser um indicador da degradabilidade dos RSU ao longo do tempo, pois um alto percentual de matéria orgânica indica a presença de matéria a ser degradada e baixos valores indicam que o resíduo já passou por um relevante processo de degradação (GARCEZ, 2009). Portanto, é possível verificar que após determinado tempo de monitoramento existe a tendência de decréscimo dos teores de sólidos voláteis.

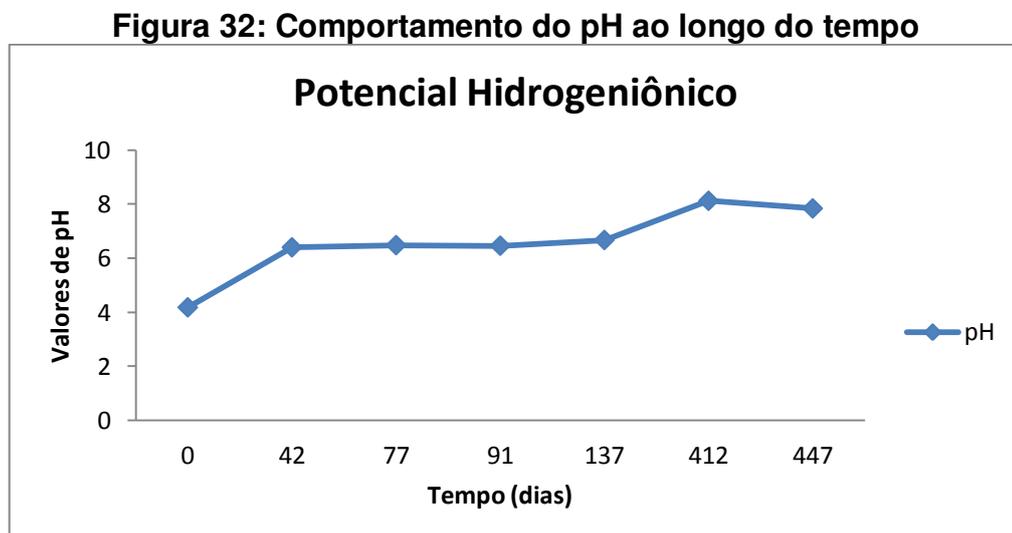
Observa-se que existe uma variabilidade no teor de sólidos voláteis, que pode ter ocorrido em função da grande heterogeneidade dos resíduos, fato que dificulta a obtenção de uma amostra mais representativa, principalmente, no caso das células experimentais, em que as amostras coletadas eram relativamente pequenas. Alcântara (2007) em seu trabalho com células experimentais com

resíduos da cidade do Recife-PE também relata que ainda que teor de sólidos voláteis tenha diminuído ao longo do tempo, eles apresentaram grande variabilidade.

Pode-se afirmar com estes resultados que a matéria orgânica vem sendo degradada ao longo do tempo, já que ocorreu a diminuição dos sólidos voláteis. Durante os primeiros 137 dias, ocorreu o maior decréscimo de sólidos voláteis, onde seu percentual chegou a diminuir 19%, indicando uma degradação mais acelerada nesse período. O menor decréscimo ocorreu entre os dias 137 e 447 dias, indicando um período mais lento de degradação o que geralmente caracteriza a fase metanogênica. Observou-se pela percentagem de sólidos voláteis que a biodegradação na célula experimental ocorreu de maneira satisfatória, o que coincidiu com o aumento da produção de metano ao final do monitoramento onde o percentual de sólidos chegou a 47%.

5.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

Segundo Garcez (2009), o pH é um parâmetro que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. O pH tem importância fundamental na digestão dos resíduos, pois suas variações podem acelerar ou inibir o processo de biodegradação dos RSU (MONTEIRO, 2003). O comportamento do pH no interior da massa do resíduo está diretamente relacionado aos produtos formados a partir das várias fases de degradação da matéria orgânica e com o monitoramento de gases. A Figura 32 apresenta a variação do pH ao longo do tempo.



Analisando a Figura 32, observa-se que o pH inicial foi de 4,1. Que de acordo com a literatura técnica não é um valor comumente encontrado para resíduos frescos. Segundo Alcântara (2007) o pH 6,0 estaria entorno dos padrões normais devido a maior fração dos resíduos ser composta de resíduos orgânicos. O valor inicial ácido pode ter sido decorrente do acúmulo de ácidos orgânicos em quantidade suficiente para alterar o pH, devido à fermentação inicial dos RSU que ocorre durante o tempo decorrido de disposição dos resíduos nas lixeiras, a coleta e o transporte até a disposição final. Ao longo do tempo, esse ácidos tendem a ser consumidos pelas bactérias metanogênicas, nesta fase o pH sofre um aumento, elevando assim a produção de biogás. Estudos realizados por Leite (2008), Maciel (2009) e Araújo (2011) também demonstraram esse mesmo comportamento ácido no início do monitoramento.

De acordo com a Figura 32, os valores de pH oscilaram em uma faixa de 4,1 à 8,1. Observa-se que entre os dias 42 e 137 o valor do pH permaneceu de certa forma estável passando de 6,4 a 6,6 e indica que o processo de degradação dos RSU, teve uma rápida transição para a fase ácida. Isto se deve, provavelmente em função do acúmulo de ácidos voláteis, uma vez que até o dia 137 ainda não havia produção de metano, indicando, portanto, a fase acidogênica. De acordo com Oliveira (2005) as bactérias produtoras de ácidos têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5,0 e 6,5. Na Figura 37 percebe-se que as concentrações dos gases encontrados estão de acordo com os dados esperados para essa fase e se mostram semelhantes ao modelo padrão de produção de biogás proposto por Tchobanoglous *et al.* (1993), conforme a Figura 9.

Posteriormente, verificaram-se valores mais elevados, com pH acima de 7, caracterizando um ambiente alcalino e indicando a transição da fase ácida para a fase metanogênica. Segundo Silva (2007), o valor de pH em torno de 7,0 é condição indispensável para o bom desempenho da atividade metanogênica.

O pH atinge aos 412 dias um valor de 8,2 sendo também propício a atividade dos micro-organismos metanogênicos o que pode ser comprovado pela Figura 41 onde demonstra o percentual de metano em torno de 33% neste mesmo período. Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993) os valores de pH na faixa de 6,8 a 8,0 são compatíveis com essa fase e coincidem com os valores encontrados durante o monitoramento.

Alcântara (2007) em seus estudos com células experimentais encontrou valores em torno de 6,0 para a fase aeróbia e anóxica, a maioria dos valores entre de 6,0 e 7,0 para a fase ácida e uma faixa de variação entre 7,0 e 8,0 na fase metanogênica conforme os padrões da literatura técnica, e portanto, semelhantes aos ocorridos nesta pesquisa.

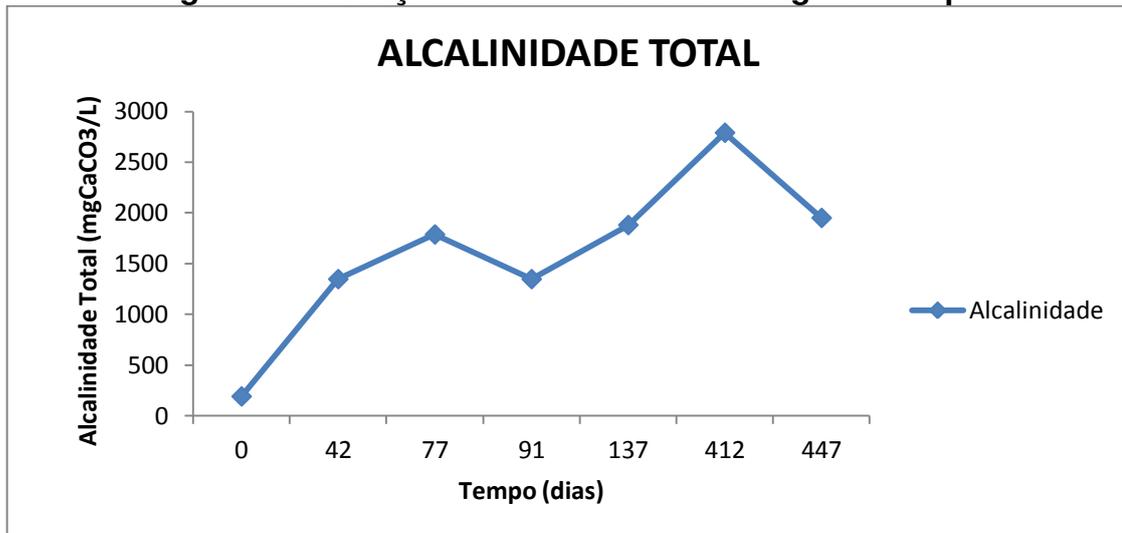
O comportamento das fases de decomposição aliado a sucessão microbiana e ao pH é de extrema importância para o monitoramento dos gases na célula experimental facilitando assim estabelecer os limites das fases do processo de degradação dos RSU. Vale ressaltar, que Melo (2011) nos seus estudos na célula experimental monitorada em Campina Grande, afirma que as fases de degradação ocorreram de maneira mais rápida se comparadas a aterros em escala real, provavelmente pela área de superfície ser bem maior que o volume dos resíduos depositados em aterros sanitários, o que facilitou as trocas de calor e energia com o ambiente, aumentando desta forma o metabolismo dos micro-organismos.

5.6 Alcalinidade

Devido à capacidade de tamponamento de um meio ácido, a alcalinidade tem sido um parâmetro muito utilizado na prática do monitoramento de gases. Na digestão anaeróbia de resíduos, a alcalinidade é importante para a manutenção do equilíbrio entre as fases de produção de ácidos e a metanogênese (CATAPRETA & SIMÕES, 2008).

A Figura 33 ilustra o comportamento da alcalinidade ao longo do tempo, sendo os valores apresentados expressos em mgCaCO_3/l (miligramas de carbonato de cálcio por litro).

Figura 33: Variação da alcalinidade ao longo do tempo



Analisando a Figura 33, percebe-se que no momento inicial a alcalinidade obtém um valor de baixo de 190mg/L CaCO₃, fato que já era esperado devido a elevada concentração de ácidos voláteis, neste período.

Após 42 dias, nota-se que a alcalinidade tende a aumentar, devido à degradação de certos compostos orgânicos como a conversão de ácidos graxos voláteis, proteínas e aminoácidos que resultam no incremento de alcalinidade na massa de resíduos (CHERNICHARO, 2007). Observa-se que a variação da alcalinidade durante o período de monitoramento a partir do dia 42 a amostra apresentou valores de aproximadamente 1.346 mg/L CaCO₃ o que está de acordo com a literatura para aterros com menos de 1 ano, cujos valores devem pertencer a uma faixa de 800 à 4000 mg/L CaCO₃.

A maioria dos valores para alcalinidade se manteve entre 1.000mg/l a 2.800mg/l durante os dias de monitoramento. De acordo com Metcalf & Eddy (1991) quando o processo de digestão ocorre de forma satisfatória, as substâncias alcalinas deverão ter concentrações entre 1000 e 5000 mg/L CaCO₃. Para o processo de biodegradação de resíduos sólidos estudos realizados por Barlaz *et al.* (1989) mostraram que concentrações variando de 6.900mg/l a 8.000mg/l não provocaram inibição no sistema anaeróbio.

De um modo geral, verifica-se que os menores valores para a alcalinidade ocorreram nos primeiros dias enquanto o sistema apresentava valores ácidos, o que interferiu diretamente nas concentrações de gases encontrados na célula experimental, pois, segundo Sousa (2012) o meio ácido que é consequência da

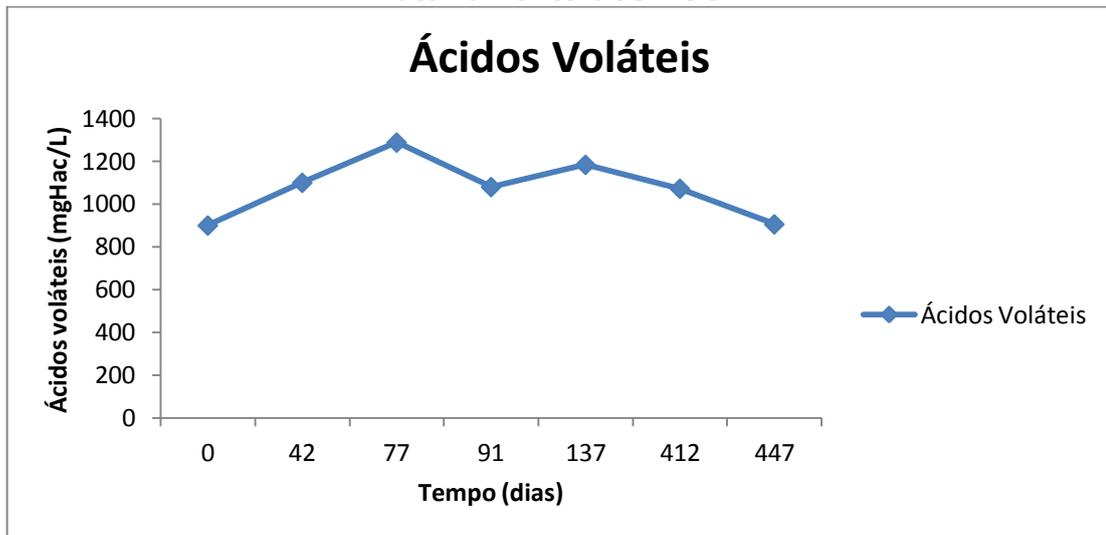
baixa resistência da capacidade de neutralização do sistema, não fornecerá meios para a presença de metano até os primeiros 137 dias. Garcez (2009) cita que a faixa média de variação para alcalinidade em aterros de até dois anos pode ser de 1.000mg/l a 10.000mg/l, sendo mais típicos valores próximos a 3.000mg/l. Com base nesses valores pode-se verificar que os valores da alcalinidade dentro da célula experimental estavam dentro da faixa de variação, sendo relativamente baixos quando comparados com os máximos valores registrados por diversos autores para aterros sanitários.

5.7 Ácidos voláteis

De acordo com Libânio (2002) a instabilidade do processo de digestão anaeróbia, que ocorre quando há predominância da fermentação ácida sobre a metanogênica, reflete-se em variações de parâmetros como o pH, concentração de ácidos voláteis e alcalinidade. Dessa forma, medidas de ácidos voláteis totais influenciam o processo de degradação dos RSU e, portanto, fornecem dados fundamentais para o monitoramento de gases.

Segundo Leite (2008) os ácidos voláteis advêm da solubilização do material particulado e passam a ser substratos ou material tóxico para algumas espécies bacterianas responsáveis pela bioestabilização da matéria orgânica. Os ácidos voláteis são tóxicos para bactérias metanogênicas, segundo Kroeker (1979), a uma concentração em torno de 2000 mgHAC/ L. A Figura 34 apresenta as concentrações de ácidos voláteis durante o período de monitoramento dos resíduos aterrados.

Figura 34: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo de aterramento dos RSU



A primeira análise indicou uma elevada concentração de ácidos voláteis 900 mgHAC/L, provavelmente em função da idade da célula experimental, cuja característica do meio tende a ser ácida inicialmente. Os resultados para os ácidos voláteis variaram de 900 a 1288 mgHAC/L, indicando boas concentrações de gases para o desenvolvimento da fase metanogênica ao final do monitoramento a partir dos 137 dias. Esses resultados quando comparados com os de pH parecem estar coerentes, podendo ser observadas altas concentrações de ácidos durante o início do processo até 137 dias o que favorece a produção de CO₂, de acordo com Sousa (2012) a produção de CO₂ é proporcional ao acúmulo de ácidos

O pH do meio pode ser afetado pela produção de ácidos voláteis, nota-se que a partir do dia 137 houve uma redução da concentração de ácidos voláteis e aumento de pH, o que pode estar indicando que estas variações estão relacionadas com o processo de digestão anaeróbia, assim como sugerem que a produção de ácidos foi reduzida no interior da célula experimental.

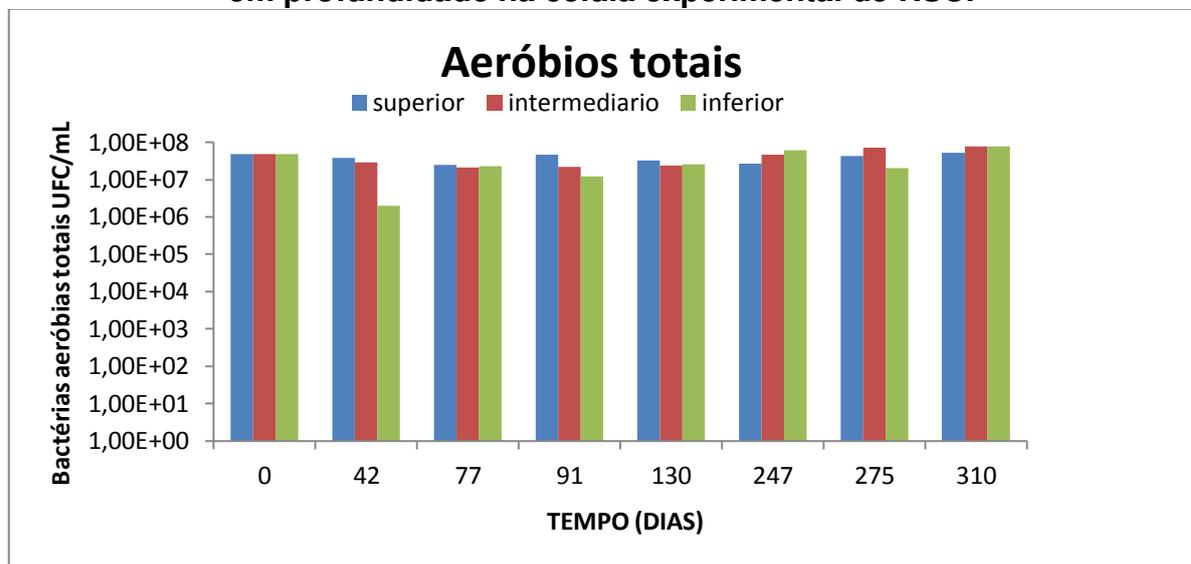
A partir dos dados apresentados na Figura 32, pode-se observar que o pH apresentou valores abaixo da neutralidade pH = 7, até o dia 137 de monitoramento, aproximadamente, caracterizando um ambiente ácido no interior da massa de resíduos. Isto se deve, provavelmente em função do acúmulo de ácidos voláteis, devido à fase acidogênica. Posteriormente, verificaram-se valores mais elevados, com pH acima de 7, caracterizando um ambiente alcalino e indicando a transição da fase ácida para a fase metanogênica.

Segundo Araújo (2011) o monitoramento desta variável serve para avaliar o bom desempenho das bactérias mesmo quando ocorrem flutuações em seus valores. Os resultados obtidos desta pesquisa assemelham-se aos que foram encontrados nos estudos de Leite (2008) e Araújo (2011) realizados em células experimentais em Campina Grande, indicando o bom desenvolvimento da biota microbiana e conseqüentemente a geração de gases.

5.8 Micro-organismos aeróbios

Os micro-organismos presentes numa célula de resíduos sólidos podem indicar a evolução do comportamento biodegradativo. Desta maneira, o número de micro-organismos pode ser um indicador da fase em que o aterro de RSU se encontra (MONTEIRO, 2003). A Figura 35 apresenta os resultados do comportamento das bactérias aeróbias totais na célula experimental.

Figura 35: Comportamento de bactérias aeróbias totais ao longo do tempo e em profundidade na célula experimental de RSU.



De acordo com a Figura 35 as bactérias aeróbias totais apresentam um comportamento semelhante durante o todo o monitoramento da célula experimental. A maioria do processo de degradação dos RSU é anaeróbico o que implica em baixas concentrações de O_2 , porém a presença de micro-organismos aeróbios é verificada durante todo o processo de degradação. É provável que exista um grande número de bactérias facultativas na célula experimental que são capazes de sobreviver e operar suas atribuições tanto em presença como em ausência de oxigênio.

Segundo Santos (2012) os micro-organismos aeróbios sofrem menos influência do meio, quando comparados aos micro-organismos anaeróbios, uma vez que eles são menos sensíveis a mudanças ambientais, fato que permite pequenas variações na contagem de suas colônias ao longo do tempo.

Nos estudos em células experimentais na cidade de Campina Grande, Alves (2012) afirma que as bactérias aeróbias sofrem interferência das condições meteorológicas como trocas gasosas e energéticas com o meio externo da célula através dos pontos de coletas e fissuras na camada de cobertura, a umidade do ar, a temperatura ambiente, a infiltração de água nos períodos chuvosos que transporta para seu interior oxigênio dissolvido, no entanto, todos esses fatores contribuíram para a entrada de O_2 no interior da célula seja no estado gasoso ou líquido. A Figura 36 ilustra as fissuras encontradas na célula experimental.

Poucas variações nas bactérias aeróbias são observadas em todas as profundidades da célula, não havendo diferenciação significativa em sua contagem. Resultados semelhantes foram obtidos por Leite (2008); Garcez (2009), Araújo (2011) e Alves (2012) que relataram que as camadas inferiores de resíduos em alguns casos podem apresentar um número de bactérias aeróbias consideráveis mesmo que, nestas camadas haja menor quantidade de oxigênio dissolvido.

Figura 36: Fissuras observadas na camada de cobertura da célula experimental



Percebe-se a ausência dos ensaios de quantificação de anaeróbios totais, que seriam fundamentais para esta pesquisa. Porém, devido problemas operacionais não foi possível a determinação desse grupo de micro-organismos.

5.9 Monitoramento de gases

Em aterros de RSU, a produção de gases acontece por etapas ou fases. Na fase aeróbia inicial, o CO_2 é produzido numa taxa proporcional ao consumo de oxigênio (O_2), enquanto a redução do nitrogênio é relativamente pequena. Após o consumo de O_2 e o estabelecimento inicial de condições anaeróbias, verifica-se uma redução brusca das concentrações de N_2 e já são produzidas quantidades relativamente altas de CO_2 . Apesar da redução de N_2 e da produção de hidrogênio (H_2), o metano ainda não é produzido na fase de transição. Na fase ácida, intensifica-se a atividade microbiana, e o CO_2 é o principal gás gerado. Também são produzidas pequenas quantidades de H_2 e, em alguns casos, já se verifica o início da produção de metano. Com a evolução do processo de degradação intensifica-se na Fase IV, a atividade dos micro-organismos metanogênicos que convertem ácido acético, CO_2 e H_2 em CH_4 e CO_2 . Após a conversão em CH_4 e CO_2 de praticamente todo o material biodegradável, segue a fase e maturação final caracterizada pela redução considerável da taxa de geração de gás e pelo ressurgimento de N_2 e O_2 (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Conforme já abordado a análise de gases gerados no processo de decomposição anaeróbia é importante, uma vez que, se pode inferir o grau de degradação ou estabilização dos resíduos orgânicos em um aterro sanitário, além de auxiliar a compreender as etapas em que o processo de decomposição anaeróbia se encontra. As concentrações dos gases podem também indicar o potencial de utilização destes para geração de energia.

No caso da célula experimental em estudo, foi realizado um acompanhamento dos gases gerados, de forma a auxiliar na caracterização das fases de degradação dos RSU dispostos. O monitoramento das concentrações de gases foi realizado de três equipamentos diferentes, cujas metodologias de análise e coleta foram descritas no item 4, entre os gases que tiveram suas concentrações monitoradas estão à amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2). Os resultados serão apresentados em forma de Figuras, mostrando o comportamento dos gases ao longo do período de monitoramento.

5.9.1 Resultados Kit Biogás com Biofoto

As concentrações de biogás na célula experimental foram iniciadas com o uso do kit de análise de biogás com biofoto. No princípio, a frequência das análises foi semanal para todos os gases analisados, porém, por problemas técnicos e operacionais passaram a ser mensais para o H_2S e a NH_3 . Outro agravante sobre o Kit é que infelizmente as análises de metano e dióxido de carbono tiveram que ser interrompidas após 151 dias de monitoramento, pois o equipamento mini-orsat sofreu avaria interrompendo as leituras das composições desses dois gases.

Os resultados obtidos pela análise do Kit Biogás são apresentados nas Figuras 37 e 38, ilustrando a evolução das concentrações de CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3 .

Figura 37: Concentração volumétrica (%) de CH_4 e CO_2 em função do tempo de enchimento da célula experimental.

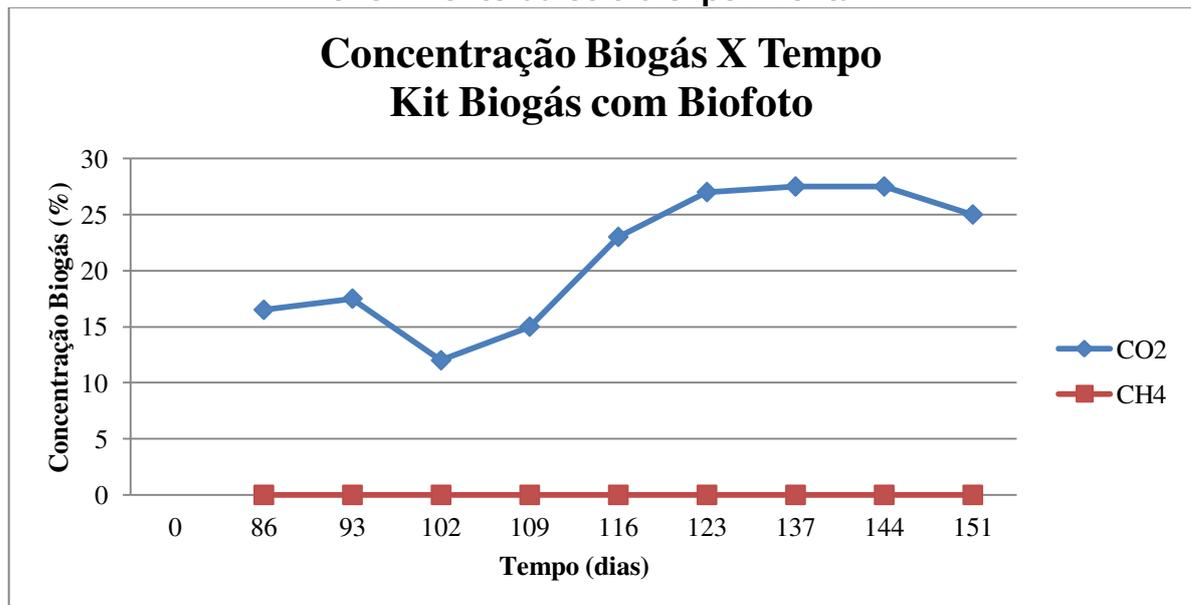
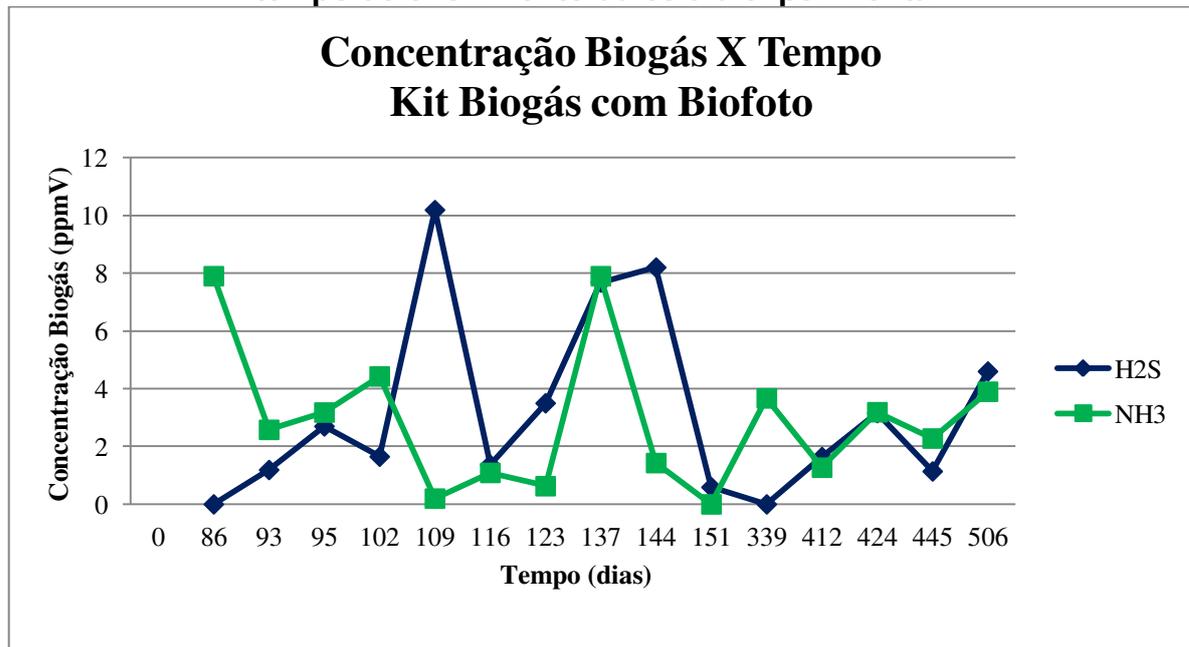


Figura 38: Concentração volumétrica (ppmV) de H₂S e a NH₃ em função do tempo de enchimento da célula experimental.



Os resultados apresentados na Figura 37 ilustram a evolução das concentrações de CH₄ e CO₂. As concentrações de CO₂ observadas no período do monitoramento variaram entre 12% e 27,5% e a presença do metano até o dia 151 não foi detectada na célula experimental. Por volta do dia 137, o pH dos resíduos já estava em torno de 6,7 e a temperatura em torno de 30°C e portanto, adequado ao final da fase de transição do processo de degradação. Nessa fase intensifica-se a produção de CO₂, por ser gerado como um subproduto da fermentação da matéria orgânica, essa fase também é caracterizada pelo aumento do pH, passando por valores ácidos até atingir a neutralidade, isso ocorre devido ao acúmulo de ácidos orgânicos, e às elevadas concentrações de CO₂ no interior da massa de resíduos, em virtude da intensa atividade de micro-organismos hidrolíticos-fermentativos e da baixa atividade das bactérias metanogênicas. O aumento de CO₂ é comprovado analisando a Figura 37, na qual mostra a produção de CO₂ a níveis dentro do limite esperado para a fase de transição do processo de digestão dos RSU.

Considerando a maioria dos modelos conceituais que procuram estabelecer tendências de geração de gás em função das fases de degradação, como mostra a Figura 9 e 10 apresentados por Tchobanoglous *et al.* (1993) e Pohland & Harper (1985), a concentração de CO₂ cresce rapidamente nas fases iniciais, até atingir um pico máximo, decrescendo depois, à medida que aumenta a concentração de CH₄.

Portanto, as concentrações de CH_4 e CO_2 , durante o período compreendido entre os dias 86 e 151, tendem a seguir uma trajetória próxima da curva teórica indicadas nas Figuras 9 e 10.

Em condições anaeróbias, o metano e o dióxido de carbono são os principais gases gerados durante a biodegradação de RSU. Normalmente, a soma das concentrações desses gases, representa, em volume, mais de 95% do biogás (USEPA, 1995). A produção de CO_2 e CH_4 e a proporção entre eles dependem do equilíbrio dinâmico entre os diversos grupos microbianos que atuam na degradação dos resíduos e de diversos parâmetros físicos e químicos. Além disso, a formação de metano é considerada a etapa final do processo de bioconversão da matéria orgânica sob condições anaeróbias.

Além do CO_2 e CH_4 , foram medidas as concentrações de H_2S e a NH_3 que são encontrados em menores percentuais na composição do biogás. Os resultados apresentados na Figura 38 ilustram a evolução das concentrações desses gases.

De um modo geral, observa-se que, na maioria das medições, as concentrações de H_2S observadas no período do monitoramento variaram bastante, porém, ficaram abaixo de 10ppmV. As concentrações de amônia também tiveram valores variáveis no decorrer do tempo das análises e atingiu a concentração máxima de aproximadamente 8ppmV após 137 dias de monitoramento.

Embora os gases mais abundantes encontrados em aterros sejam o CO_2 e o CH_4 que, atuam como sumidouros do oxigênio do solo. A NH_3 e o H_2S desempenham um papel importante, pois são responsáveis pelo forte odor característico de material em decomposição.

Segundo Alcântara (2007), em ambientes predominantemente anaeróbios, na presença de uma fonte de carbono e sob condições favoráveis de pH, as denominadas bactérias redutoras de sulfato utilizam o sulfato e sulfito como receptor final de elétrons, produzindo o gás sulfídrico. Esse gás, além de ser um dos principais responsáveis pelo odor desagradável proveniente de aterros de RSU, pode causar danos à saúde e ao meio ambiente. Devido a sua ação corrosiva, pode provocar desgaste precoce nos sistemas de coleta, adução e beneficiamento do biogás para fins energéticos, pois danifica peças de aço e borracha.

Castilhos (2003), afirma que valores baixos de pH favorecem, o aparecimento de maus odores, com a liberação de gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e outros gases causadores de maus odores. Segundo a Norma Regulamentadora (NR-15),

aprovada pela Lei nº 6.514 de 22 de dezembro de 1977 e regulamentada pela Portaria nº 3.214 de 8 de junho de 1978, estabelece que são consideradas atividades ou operações insalubres, por exposição ao agente físico. A NR-15 considera “Limite de Tolerância”, a concentração ou intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará dano à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral, o limite máximo permitido de tolerância, da exposição do homem ao gás sulfídrico, não deve ultrapassar 8ppm ou 12 mg/m^3 até 48 horas por semana. Durante as análises observou-se que o comportamento do gás sulfídrico ultrapassou um pouco o valor permitido de tolerância a exposição, variando muito e atingindo o valor máximo de 10ppmV o que pode ocasionar risco a saúde pública.

Por outro lado, a amônia é uma molécula polar, o que justifica sua grande solubilidade em água. Nos aterros sanitários, quase todo nitrogênio orgânico é convertido a nitrogênio amoniacal e essa amônia é oriunda da degradação da matéria orgânica.

A amônia conforme a Figura 38 apresentou nas leituras um comportamento variável, com concentrações que também oscilaram bastante no tempo das análises, possivelmente porque no meio anaeróbico quando a amônia é formada pela decomposição da matéria orgânica, ela é neutralizada pelo ácido carbônico que foi formado pela reação entre o resíduo e o dióxido de carbono que também é resultante da decomposição da matéria orgânica, observa-se que esse comportamento está também relacionado à fase anóxica de transição.

Apesar das análises terem sido interrompidas por algum tempo, ao serem retomadas, não foram observados grandes picos, nem valores muito abaixo do que já se tinha sido verificado nas concentrações anteriores. Um dado importante é que o equipamento mostrou-se inadequado para estes gases, em função da faixa de concentração que encontrarem-se abaixo da curva de calibração do equipamento (amônia 15–350 ppmV e gás sulfídrico 20–230 ppmV), ocasionando medidas muito distintas para uma mesma amostra. Fato que pode ser explicado devido o Kit ser desenvolvido preferencialmente para analisar o biogás gerado por dejetos suínos que apresentam concentrações de CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3 bem mais elevadas.

5.9.2 Resultados Drager

As leituras das concentrações de biogás na célula experimental com o detector portátil de gases Drager X-am 7000, só tiveram início depois da parceria entre o Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A primeira análise realizada com o equipamento só foi possível após 264 dias do enchimento da célula experimental. O monitoramento das concentrações de CH₄, CO₂, O₂, H₂S e CO, estão ilustrados nas Figuras 39 e 40.

Figura 39: Concentração volumétrica (%) de CH₄ e CO₂ e O₂ em função do tempo de enchimento da célula experimental.

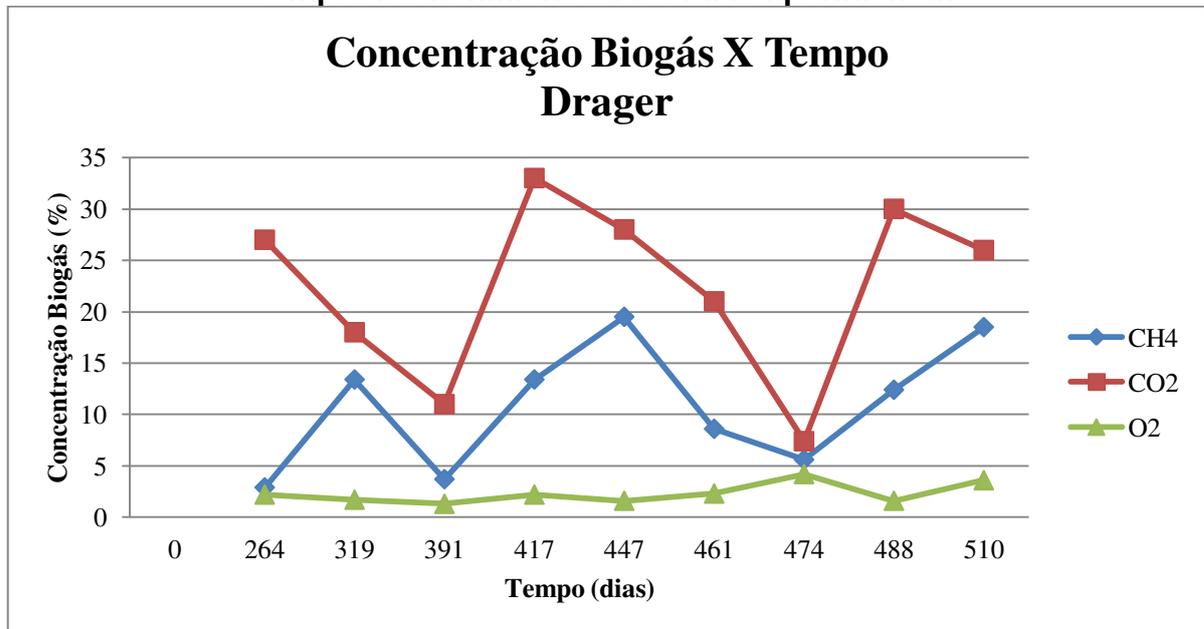
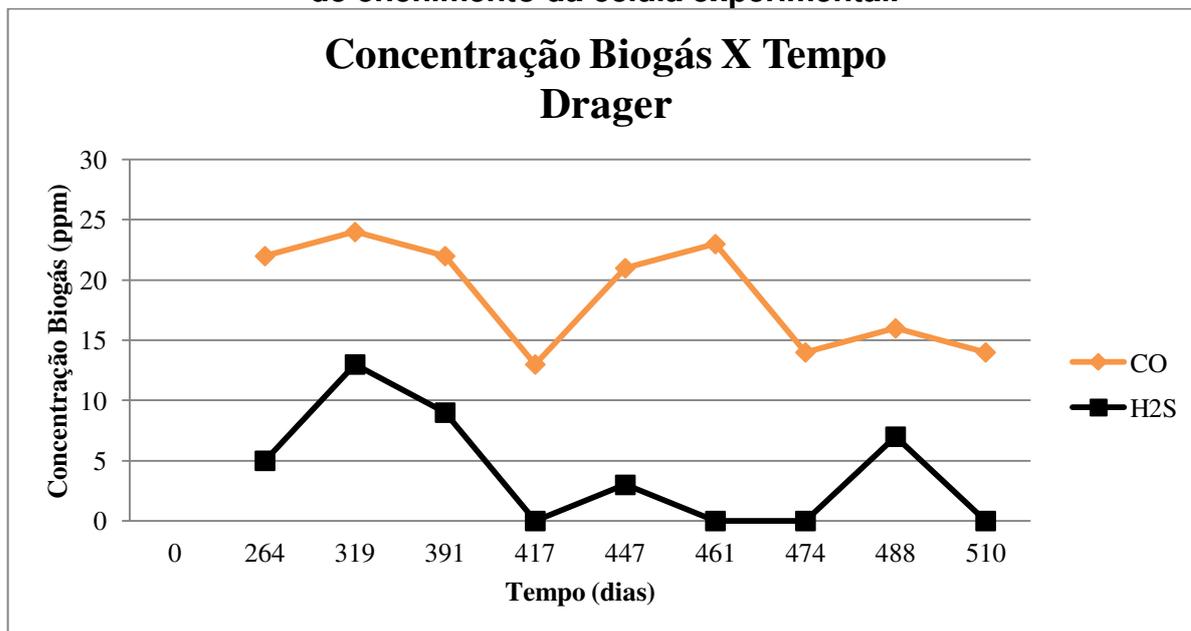


Figura 40: Concentração volumétrica (ppm) de H₂S e CO em função do tempo de enchimento da célula experimental.



Observa-se na Figura 39 que, nos períodos em que foi possível mensurar a concentração dos gases, verificou-se uma tendência ao aparecimento do metano, indicando um possível processo de metanização dos RSU dispostos na célula experimental.

As concentrações observadas no período do monitoramento com Drager variaram entre aproximadamente 3% e 19,5 % para CH₄, com média de 11%, e 7,4% a 33% para CO₂, com média de 22%. O oxigênio ficou, com média, em torno de 2,3%, com uma concentração máxima de 4,2% e mínima de 1,3% ao longo do período monitorado.

Até o dia 151, não foi detectada a presença de metano na célula experimental com o método analítico do Kit biogás, porém, com 264 dias de monitoramento, foi registrada uma concentração de apenas 3% com o Drager. A partir daí, verifica-se um aumento, relativamente lento até o dia 510. A temperatura média foi de 31°C no interior da célula experimental com temperatura média ambiente de 30°C. Normalmente os dados da literatura indicam uma pequena atividade metanogênica na acidogênese, com um percentual de metano muito baixo, como ilustra a Figura 10. Conforme essa análise nota-se que a fase ácida ocorreu rapidamente.

Por volta do dia 447, verificam-se valores mais elevados, o pH dos resíduos já estava em torno de 7,8, caracterizando um ambiente alcalino, a temperatura em

torno de 32°C, o teor de sólidos voláteis com 48% e o aumento da umidade para valores médios acima de 50% indicando que houve a transição da fase ácida, dessa forma, os valores estão adequados à fase metanogênica, onde as concentrações de metano atingiram o valor máximo de 19,5% utilizando esse método analítico.

Durante o período das análises, os valores de CO₂ tiveram média de 22% o que não é típico de aterros de RSU na fase metanogênica, pois, sugere-se um patamar de 40%, mas, como é possível perceber ainda na Figura 39, as concentrações de CO₂ tendem a estabilização à medida que o CH₄ cresce, apresentando um comportamento diferente dos modelos propostos por Tchobanoglous *et al.* (1993) e Pohland & Harper (1985). Nota-se que as concentrações de CH₄ oscilaram muito mais que as de CO₂, esse comportamento pode ser explicado pelas características dos grupos microbianos envolvidos na produção desses gases. Como se sabe as bactérias metanogênicas são bem mais sensíveis as variações das condições do meio, como mudanças de pH, temperatura, teor de umidade e de oxigênio. Já o grupo dos micro-organismos fermentativos, possui espécies bem mais versáteis que podem crescer em faixas mais amplas de pH, temperatura e na presença ou ausência de oxigênio molecular.

Analisando os resultados do comportamento dos gases gerados na célula experimental, nota-se que eles sugerem que a fase metanogênica do processo de digestão anaeróbia dos resíduos foi atingida a partir do dia 417, uma vez que se verificaram elevadas concentrações de metano e dióxido de carbono.

Segundo Alcântara (2007), o oxigênio normalmente proveniente do ar atmosférico também está presente na fase gasosa dos resíduos, e a medida de sua concentração pode ser útil como indicador de entrada de ar no sistema e, portanto, das condições de anaerobiose do meio.

Considerando todo o período de monitoramento foi observada uma leitura atípica realizada no dia 474, indicando que pode ter ocorrido vazamento na amostra durante o percurso até a UFPE, pois, as concentrações verificadas foram 5,6% para o CH₄, 7,4% para CO₂, e 4,2 para o O₂, diferentemente do que vinha sendo observado. O saco coletor que possui aproximadamente 2 litros e conduzia a amostra chegou para análise quase vazio, um detalhe importante é que a mesma amostra era conduzida para verificar as concentrações com duas metodologias com o Drager e o Cromatógrafo, neste método devido ao seu grande poder de resolução e precisão não houve interferência nos resultados por ser utilizado apenas 1ml,

podendo ser necessário ou não repetir o experimento. O problema foi solucionado com a utilização de outro saco coletor que deu prosseguimento as análises.

Com relação às concentrações de O_2 na célula experimental, pode-se dizer que elas permaneceram na maioria do tempo em níveis baixos, com média de 2,30%. Entretanto, por não ter dados iniciais, não foi possível verificar as concentrações de O_2 decrescer à medida que se estabelece o meio anaeróbio. Nos dias 461 e 474, percebe-se que o aumento da concentração de O_2 corresponde a uma redução de CH_4 , indicando, possivelmente, o efeito do oxigênio na redução da atividade metanogênica. Elevadas concentrações de O_2 podem ser prejudiciais ao sistema, mas pequenas concentrações podem até ser úteis, desde que não afetem o metabolismo dos anaeróbios estritos, pois poderia otimizar a taxa de hidrólise da celulose, criando microambientes aeróbios (ALCÂNTARA, 2007).

A Figura 40, ilustra a concentração volumétrica (ppm) de CO e H_2S em função do tempo de enchimento da célula experimental. As concentrações observadas no período do monitoramento com Drager variaram entre 13 ppm e 24 ppm para CO, com média entorno de 19 ppm, e 0 ppm a 13 ppm para H_2S , com média de 4 ppm.

O monóxido de carbono (CO) é um gás poluente, que é gerado durante o processo de degradação de RSU, e a medida de sua concentração serve como indicativo da qualidade do ar atmosférico, pois pode provocar diversos problemas a saúde. O CO, dependendo das concentrações e do tempo de exposição, pode, por exemplo, afetar a capacidade de trabalho de pessoas saudáveis ou mesmo causar problemas graves, inclusive à morte. De acordo com o CONAMA (1990), que trata do padrão de qualidade do ar, os limites das concentrações de CO são de 9 ppm e 35 ppm para um tempo de monitoramento de 8h e 1h, respectivamente e não devem ser excedidos mais de uma vez por ano. As concentrações na faixa de 9-15 ppm indicam ar de qualidade inadequada (CETESB, 2006), e concentrações acima de 400 ppm seriam potencialmente mortais.

O CO é um gás inodoro, incolor, tóxico, e inflamável que faz parte da decomposição do biogás em aterros e aparece em pequenas proporções. O valor máximo encontrado na célula experimental de 24 ppm pode ser considerado alto, tendo em vista os padrões de qualidade do ar CETESB (2006).

Existem poucas informações sobre a concentração desse gás no Brasil. Em várias amostras de gás coletadas no aterro Delta na cidade de Campinas (SP), não

foi detectada a presença de CO (ENSINAS, 2003). No aterro da Muribeca (PE), leituras indicaram concentrações de 10-28 ppm (MACIEL, 2003).

Assim como o CO, o H₂S é um gás incolor e muito tóxico, e pode ser considerado relevante do ponto de vista sanitário, devido à possibilidade de causar danos a saúde. Este gás apresenta um enorme impacto na poluição local em aterros de RSU devido à sua elevada toxicidade ao ser humano (gás carcinogênico). Valores na faixa de 500-1000 ppm, podem ser letais para seres humanos, podendo provocar inconsistência imediata e morte (USEPA, 2003). Valores de 100-200 ppm já causa tosse, inflamação nos olhos e irritação no sistema respiratório (CÉSAR, 2004), concentrações entre 200-500 ppm estão associadas com edema pulmonar (USEPA, 2003), e valor de 500 ppm já provocaria perda da consciência e possível morte em 30 a 60 minutos (CÉSAR, 2004). De acordo com Alcântara (2007), concentrações na ordem de 600 ppm por 30 minutos, e de 800 ppm por 5 minutos de exposição, são consideradas letais para seres humanos.

As medidas das concentrações de H₂S em alguns aterros indicaram concentrações bem maiores que as observadas na célula experimental. No aterro da Muribeca em Pernambuco foram verificados nos lisímetros estudados por Alcântara (2007) concentrações de 150-448 ppm. No Aterro Metropolitano de Salvador as concentrações foram semelhantes às da célula experimental estudada variando de 6 a 14 ppm. Nos aterros Vila Albertina, Santo Amaro e Bandeirantes de São Paulo, 39 ppm, 29 ppm e 30 ppm, respectivamente (ENSINAS, 2003).

A concentração típica no biogás de H₂S é em torno de 0-70 ppm, com limites de explosividade entre 4,3%-45,5%. Nota-se que o valor máximo de 13 ppm ficou dentro do limite. Segundo Maciel (2003) um fato importante a respeito do CO e do H₂S, é que a camada de cobertura age distintamente na percolação dos dois gases. Enquanto a cobertura praticamente não minimizou as emissões de CO, o gás H₂S ficou completamente retido no solo. Uma das características físico-química dos gases que pode ter diferenciado o comportamento de retenção é o coeficiente de solubilidade. A solubilidade do H₂S em água é de 3,846 g/l, enquanto o CO apresenta solubilidade de 0,028 g/l, ou seja, o gás sulfídrico é 130 vezes mais solúvel que o CO na água presente na estrutura do solo em aterros. Vale ressaltar que a medição do CO em equipamentos portáteis tipo Drager está susceptível a erros devido às dificuldades de mensuração de gases reativos a baixíssimas concentrações (ppm).

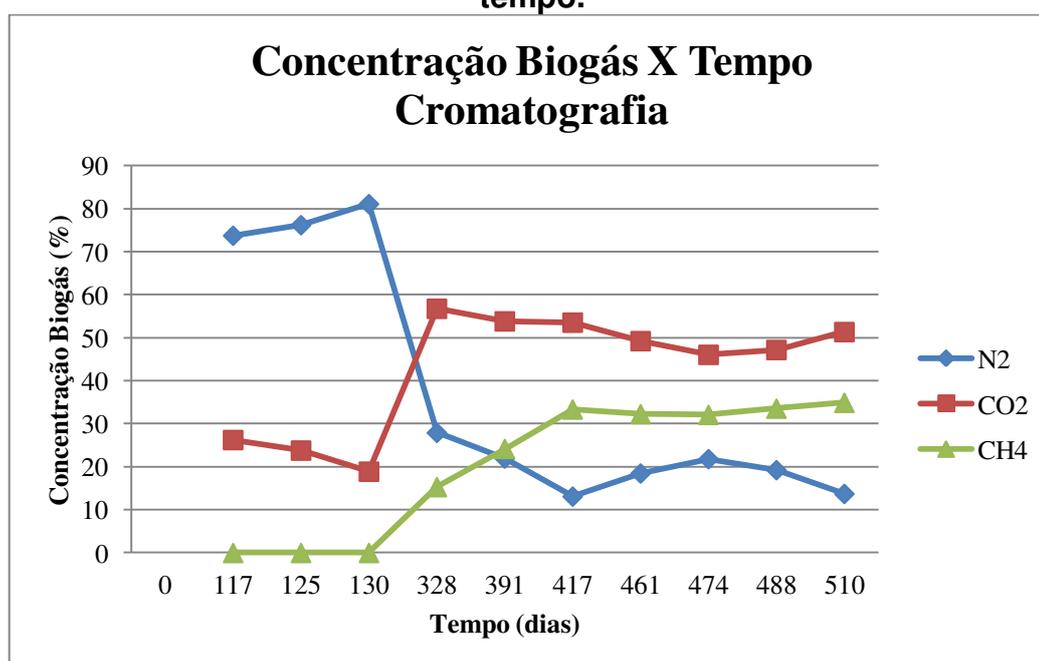
Logo, o CO possui uma participação pequena no processo de degradação dos RSU. Segundo Tchobanoglous (1993) a composição típica desse gás em aterros é menor que 0,1%, as concentrações desse gás estão mais associadas aos riscos causados pela exposição. Por outro lado, o H₂S mesmo tendo uma baixa composição no biogás acredita-se que esteja participando principalmente na fase metanogênica, pois, algumas medidas de concentrações de gases sugerem que um aumento ou diminuição do metano implica, respectivamente, na diminuição e aumento de gás sulfídrico, o que confirmaria a competição das bactérias redutoras de sulfato com as metanogênicas pelo acetato e o H₂.

5.9.3 Resultados Cromatografia Gasosa

As análises das concentrações de biogás na célula experimental tiveram início 117 dias decorridos do enchimento. A frequência das análises a princípio foi semanal para os gases CH₄, CO₂, N₂. Porém, por problemas técnicos e operacionais foram interrompidas e voltaram a ser realizadas mensalmente na UFPE.

Os resultados obtidos pela cromatografia gasosa são apresentados na Figura 41, ilustrando a concentração volumétrica de CH₄ e CO₂ e N₂ em função do tempo de enchimento da célula experimental.

Figura 41: Concentração volumétrica (%) de CH₄ e CO₂ e N₂ em função do tempo.



Inicialmente não é observada a presença de metano no processo de degradação dos RSU. As concentrações observadas até o dia 130 são de 0% para o CH₄ e diversos fatores podem ter contribuído para que isso aconteça, tais como, pH ácido, temperatura e umidade inadequada e a ausência de bactérias metanogênicas. Com o passar do tempo, nota-se que entre os dias 328 e 510, ou seja, em 6 meses as concentrações duplicaram, variando de 15% a 35% para o CH₄.

As baixas concentrações de CH₄ verificadas nas leituras iniciais podem estar indicando uma dinâmica de reação mais lenta, do processo de degradação dos RSU no interior da célula experimental. Observa-se que as concentrações estão sendo crescentes indicando que a fase metanogênica esteja próxima de atingir 40%, uma vez que, as condições de pH a 7,8, umidade a 57%, teor de sólidos voláteis a 47%, temperatura a 30°C podem contribuir para que isso aconteça. Com esses dados pode-se ter uma comprovação que a degradação está acontecendo em valores considerados ótimos. Entretanto, é preciso aguardar leituras subsequentes para comprovar essa tendência.

As concentrações de CO₂ verificadas estão dentro do esperado, com média entorno de 43%, atingindo no dia 328 seu ponto máximo com 57%. Considerando o modelo apresentado por Tchobanoglous *et al.* (1993) e Pohland & Harper (1985) que demonstra as tendências da geração de gás em função das fases de degradação, é possível perceber ainda na Figura 41 que o comportamento da célula experimental segue o modelo proposto onde as concentrações de CO₂ crescem rapidamente nas fases iniciais, atingem um ponto máximo, decrescendo depois, à medida que o CH₄ aumenta, o que é típico da fase metanogênica.

Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993) as concentrações típicas de N₂ em aterros variam de 2 a 5%. De acordo ainda com a Figura 41, o comportamento do nitrogênio seguiu quase que fielmente ao modelo proposto por Tchobanoglous *et al.* (1993) e Pohland & Harper (1985). As concentrações desse gás atingiu o pico máximo em torno do dia 130 após o preenchimento da célula com 81%, caracterizando a fase acidogênica que apresenta valores máximos de nitrogênio. Com a evolução do processo degradativo estes valores tendem a diminuir e as concentrações de dióxido de carbono aumentar. Após, 510 dias o comportamento do N₂ indica a fase metanogênica, pois, apresenta um valor relativamente baixo de 14% se comparado ao início do processo. Segundo Garcez (2009) concentrações elevadas de nitrogênio podem afetar o processo de degradação, deixando o meio

tóxico para as bactérias metanogênicas inibindo suas atividades. Deve-se ressaltar que as condições aeróbias do início do processo podem reaparecer na fase final chamada de maturação com pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio, dependendo da susceptibilidade do aterro a condições atmosféricas.

O estudo do monitoramento de gases pela cromatografia gasosa, associado ao tempo de disposição dos resíduos indicou que a célula experimental entrou na fase metanogênica 391 dias após o final da aterragem. Portanto, o monitoramento das concentrações do biogás é de fundamental importância, para estabelecer as etapas do processo de degradação dos RSU em células experimentais, considerando válidos os dois modelos conceituais apresentados nesse estudo por Tchobanoglous *et al.* (1993) e Pohland & Harper (1985). Por outro lado, as concentrações desses gases em escala experimental podem fornecer, também, um indicativo dos potenciais de poluição ambiental e de utilização do biogás, para fins de geração de energia em escala real.

6 CONCLUSÕES

- Os valores dos parâmetros físicos, físico-químicos e microbiológicos dos RSU, foram consistentes com os valores encontrados na literatura nacional e internacional consultada.
- O teor de matéria orgânica foi quantificado como a maior parcela dos RSU da cidade de Campina Grande-PB, destacando também o elevado percentual de papéis e plásticos. É válido considerar que o alto percentual de matéria orgânica pode indicar uma maior geração de biogás.
- A temperatura interna na célula experimental oscilou dentro da faixa mesofílica, ressaltando que, estes valores estão dentro da variação considerada ótima para o processo de degradação em aterros, pois possibilita o desenvolvimento dos micro-organismos.
- O valor da umidade inicial encontra-se dentro dos padrões para resíduos sólidos frescos e a variação desse parâmetro no decorrer do período de monitoramento manteve-se dentro dos padrões de umidade favorável ao processo de bioestabilização da fração orgânica dos resíduos aterrados.
- Houve uma redução dos teores de sólidos voláteis, o que se pode concluir que a matéria orgânica foi degradada de maneira satisfatória, e que coincidiu com o aumento da produção de metano ao final do monitoramento.
- Pode ser observado que há uma influência significativa do pH na evolução do percentual de metano. Tomando-se como base o aspecto qualitativo da composição do biogás, os resultados sugerem que os valores ótimos de pH para metanogênese foram em torno de 7,8. Nota-se também que a maioria dos valores de pH ficaram entre 6,0 e 8,0, portanto, a faixa de variação favoreceu a atividade microbiana, já que esse intervalo é considerado ótimo para a digestão anaeróbia.
- Os valores da alcalinidade foram baixos ao serem comparados com valores registrados em aterros sanitários, mas se mantiveram dentro da faixa de variação para aterros com idade de até 2 anos.
- Os ácidos voláteis foram importantes para acompanhar o processo de degradação dos resíduos, indicando o bom desenvolvimento da biota microbiana e a geração de gases, pois, concentrações elevadas de ácidos

voláteis interferem o processo de geração de biogás, por serem tóxicos as bactérias metanogênicas, caso ultrapassem a concentração de 2000 mgHAC/L. Durante todo o período de monitoramento as célula experimental os valores encontrados estavam abaixo desse limite.

- Observou-se durante todo o período de monitoramento o desenvolvimento de micro-organismos aeróbios, não havendo grandes variações na contagem de bactérias na célula experimental. Provavelmente, o crescimento de micro-organismos aeróbios independem da produção de metano, esses micro-organismos estão presentes em todos os níveis de profundidade, ao passo que, no mesmo período não foi detectada a presença de CH₄.
- De um modo geral, a concentração de gases medidos na célula experimental ficaram dentro dos valores esperados para aterros de RSU com idades semelhantes. Entretanto, observaram-se alguns picos de concentrações de H₂S atingindo valor máximo de 13 ppm, indicando, a possibilidade e acidentes, devido a inalação desse gás, caso ultrapasse o limite de exposição permitido de 48 horas semanais. As concentrações de CO também mostraram valores que comprometem a qualidade do ar. Porém, o tempo de exposição para coleta e análise estão dentro dos padrões de segurança.
- Algumas medidas de concentrações de gases sugerem que um aumento ou diminuição do metano implica, respectivamente, na diminuição e aumento de gás sulfídrico, o que confirmaria a competição das bactérias redutoras de sulfato com as metanogênicas pelo acetato e o H₂.
- Comparando-se os modelos conceituais encontrados na literatura, que estabelecem uma relação entre as concentrações desses gases com as etapas de degradação, pode-se dizer que, os valores foram compatíveis com o esperado para aterros de RSU. Indicando que a célula experimental estudada encontra-se na fase metanogênica.
- De um modo geral, as três diferentes técnicas de medidas de concentrações de gases se mostraram eficientes para o monitoramento da célula experimental, sendo o kit biogás com biofoto o método menos acurado para análises com RSU e a cromatografia gasosa a metodologia mais precisa para monitorar os gases encontrados na célula experimental. Com relação ao detector portátil de gases - Dragger sugere-se esse tipo de equipamento

esteja melhor adaptado a medições *in situ*, evitando assim que concentrações de biogás sejam perdidas ao serem armazenadas.

- Os ensaios realizados forneceram resultados consistentes e mostraram que as metodologias utilizadas nessa pesquisa para quantificar os gases encontrados na célula experimental são eficientes e economicamente viáveis para estudos com monitoramento de gases de RSU, servindo de subsídio para projetos destinados a aterros em escala real.
- As concentrações dos gases encontrados na célula experimental de RSU foram propícias para a degradação da matéria orgânica estando compatível com a idade dos resíduos. As condições da cidade de Campina Grande para os resíduos aterrados também foram favoráveis ao desenvolvimento de gases, mostrando a importância relativa que o biogás poderia ocupar na matriz energética de modo a tornar a gestão dos RSU mais eficiente.
- O monitoramento de gases é de fundamental importância, para estabelecer as etapas do processo de degradação dos RSU em células experimentais, podendo fornecer, um indicativo dos potenciais de poluição ambiental e de utilização do biogás, para fins de geração de energia em escala real. Além de ser uma forma viável de melhorar a condição de vida e proteger o meio ambiente o monitoramento de gases pode também gerar novas oportunidades de empregos e criar novos ramos de pesquisa.

6.1 Recomendações para futuras pesquisas

- Incluir o acompanhamento de outros gases encontrados na composição do biogás da célula experimental, como o H₂.
- Estudar as emissões de gases pela camada de cobertura.
- Estudar o potencial de geração de biogás da célula experimental.
- Dar continuidade ao monitoramento do experimento por um período de tempo que possibilite a efetiva conversão da grande quantidade de matéria orgânica ainda remanescente em metano e dióxido de carbono.
- Acompanhar o comportamento dos micro-organismos anaeróbios ao longo do tempo numa célula experimental para obter correlações com os gases gerados durante o processo de degradação dos resíduos aterrados.

7 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos Sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 74p.

_____. NBR 10007: **Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos**. Rio de Janeiro, 2004c.

_____. NBR 6457: **Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ABRELPE. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2011.

AESA, disponível em: <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/sort.do?layoutCollection=0&layoutCollectionProperty=&layoutCollectionState=3&pagerPage=0>>. Acessado em: 12/12/2012.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. 2007. 366 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

ALVES, F. S. **Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande – PB**. 2012. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 th edition. Washington: APHA, 1998. 1203p.

ARAÚJO, E. P. **Estudo do Comportamento de Bactérias Aeróbias e Anaeróbias Totais na Biodegradabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB**. 2011. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

AUDIBERT. J. L. **Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina. Universidade Estadual de Londrina**. 2011. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

AUGENSTEIN, D. e PACEY, J. **Modelling landfill methane generation, Proceedings of The Third International Landfill**. Sardinia, Itália, vol.1, 1991.

BANCO MUNDIAL. **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe**. Disponível em: <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_po.htm>. Acesso em Julho/2012.

BARLAZ M. A.; SCHAEFER D. M.; HAM R. K. **Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill**. Applied Environmental Microbiology. London, v. 55. 1989. 55-65p.

BARROS, H. L. **Estudo de balanço hídrico em aterro sanitário por meio de lisímetros de grandes dimensões**. 2004. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

BELLO, P. P. G. **Estudo da variação da porcentagem e da estimativa de Geração de gás metano para o aterro sanitário do município de Rio Claro – SP**. 2010. 67 p. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo,

BIDONE, F. R. A & POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP, 1999.

BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. **Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils**. FEMS Microbiology Ecology, 2004.

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários – Estudo de Caso**. 2006. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos- PNRS. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. Segurança e Medicina do Trabalho, Lei n. 6.514, de 22 de dezembro de 1977. **Norma Regulamentadora 15 (NR-15)**, Aprovada pela Portaria n. 3.214, de 8 de junho de 1978. 61. ed. São Paulo, 2007.

CASTILHOS JR, A. B. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. 3 Resíduos Sólidos. PROSAB Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro sustentável para cidade de pequeno porte**. Projeto PROSAB - RIMA, ABES. Rio de Janeiro 294 p. 2003.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. 337 p. Tese

(Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Caracterização volumétrica dos resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro sanitário experimental**. In: XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.

CHERNICHARO C. A. L. **Reatores Anaeróbios - Cap. 2 - Fundamentos da Digestão Anaeróbia**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2000.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 2001

CIRNE, L. E. M. R. **A Coleta Seletiva como Subsídio à Criação de um Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) em Campina Grande-PB: Implicações Ambientais, Econômicas e Sociais**. 2010. 212 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande.

CESAR, M. **H₂S o gás da morte**. Disponível em: <<http://www.clickmacae.com.br/?sec=47&cod=559&pag=coluna>> Acesso em: dez 2012.

COLMANETTI, J. P.; BERNARDES, R. S.; PALMEIRA, E. M. **Uso de Reatores de Batelada para Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Municipais**. Anais... XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 03 de 28/06/90, estabelece os padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos**, 1990.

DILLENBURG, M. E. **Variação da Taxa de Recirculação de Lixiviado Determinada pela Concentração de Ácidos Voláteis no Tratamento da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos domésticos**. 2006. 135 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Suínos e Aves e Alfakit. Disponível em: <<http://www.alfakit.com.br>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2011.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 2003. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

FARIAS, R. M. S.; VIEIRA NETO, J. de M.; Ribeiro, L. S ; MONTEIRO, V. E. D. **Estudo de parâmetros de resíduos sólidos urbanos em uma célula experimental**. In: VII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFCG, 2010.

FUCALE, S. P.; JUCÁ, J. F. T. **Investigação laboratorial sobre a resistência de resíduos sólidos velhos e pré-tratados mecânica e biologicamente**. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, **Anais** Recife: ABMS, 2007.

FUNASA. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Orientações técnicas para apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos**. Brasília: Funasa, 2004.

GARCEZ, L, R. **Estudo dos componentes tóxicos em um biorreator de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB**. 2009. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

GONZÁLEZ, L. G. I.; SÁNCHEZ, G. J. E. **Estabilización Acelerada do lós Resíduos Sólidos em un Relleno Sanitario**. Anais... XXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. México, 1996.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. 2004. 204 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. 2010.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. IPT/CEMPRE. São Paulo, 1995.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. **Mercado de Carbono**. Disponível em: <http://www.institutocarbonobrasil.org.br/#mercado_de_carbono> Acesso em: dez 2012.

JESUS, L. L. **Relatório de estágio curricular**. IFPE. Pernambuco, Ipojuca, 2012.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – “REGEO”. Porto Alegre, 2003.

JUCA, J. F. T; FUCALE, S. P.; MACIEL, F. J. **Monitoramento Ambiental de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos**. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001.

KROEKER, E. J. **Anaerobic treatment process stability**. Journal WPCF, London, v 51, n.4, 1979. 178p.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB.** 2008. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume.** 2002. 175 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: Tratamento e Biorremediação.** Hemus. 3. ed. Campinas. Brasil. 1995

LIPOR. **Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande porto.** Caderno técnico. 2000.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca.** 2003. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos.** 2009. 354 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. **Waste disposal and containment.** Proc. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japão. Balkema, v. 3. 1996. 1425–1474p.

MARIANO, G. L.; MOURA, M. A. L. **Comportamento da temperatura do lixo em duas épocas distintas (seca e chuvosa) no lixão da cidade de Maceió-AL.** Revista Ciência e Natura, UFSM, v. 31, n. 2, p. 57 - 70, 2009.

MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.** 267 p. 2001. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARTINS, H. L. **Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões.** 2006. 116 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados.** 2011. 148 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. 2003. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MENEGUIN, F. **O que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil?** Disponível em: <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/wp-content/uploads/2012/08/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele-opera-no-brasil.pdf>> Acesso em: dez 2012.

METCALF, L.; EDDY, P. H. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill Int., 1991.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do Aterro da Muribeca**. 2003. 246 p. Tese (Doutorado e Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C.; ALCÂNTARA, P. B.; ARAÚJO, J. M.; ALVES, I. R. F. S.; JUCÁ, J. F. T. **Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v.11, n.3, p. 223-230, 2006.

OLIVEIRA, K. T. L. L.; GOMES, R. A. **Contribuições da recuperação do biogás de aterro sanitário: uma análise para goiânia**. 2001.

OLIVEIRA, Z. L.; OLIVEIRA, S. L.; LYRA, M. C. **Aproveitamento Energético do biogás em aterros sanitários e a comercialização de créditos de carbono: o caso do aterro sanitário de Ceará Mirim-RN Natal**. In: IV Seminário Regional Nordeste de Resíduos Sólidos. São Cristóvão: Sergipe, 2012.

PAES, R. F. C. **Caracterização do chorume produzido no aterro da Muribeca - PE**. 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

PEREIRA, F. T. G.; LEITE, H. E. A.; GARCEZ, L. R.; ARAUJO, E. P.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB**. In: SINRES - 2º Simpósio Nordestino de Resíduos Sólidos. 2010.

PALMISANO, A.C. & BARLAZ, M.A, **Microbiology of Solid Waste**. In: Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz (eds). 1996. 224 p.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário**. Disponível em: <www.periodicosapes.com.br> Acesso em: 10 de outubro de 2012.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás.** In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas, 2008. 5p.

PELCZAR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia: Conceitos e aplicações.** 2. ed. v. I. Makron do Brasil, São Paulo, 1997.

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfill.** Cincinnati, OH: USEPA, 1985. 212 p.

POLVINELLI, J. **Ação dos Metais Pesados nos Processos Biológicos de Tratamento de Águas Residuárias.** 1987. Tese (Livre Docência). Universidade de São Paulo, São Paulo.

PROCHNOW, M. A. **Monitoramento de gases – Estudo comparativo das principais tecnologias de sensores e aspectos relacionados.** 2003. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

REAL, J. L. G. **Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases.** 2005. 183 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANCHEZ, P. S. **Atualização em Técnicas para o Controle Microbiológico de Águas Minerais.** Universidade Mackenzie – Pós Graduação em Ciências Ambientais, SP, 1999.

SANTOS, S. M. **Propriedades geotécnicas de um aterro de resíduos sólidos.** 1997. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SILVA, A. S. **Avaliação da toxicidade dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB.** 2012. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias.** Campina Grande-PB: O Autor, 2001. 265p.

SILVA, V. G. **Monitoramento de parâmetros físico, químicos e biológicos em um reator anaeróbio híbrido (RAH) em escala piloto, tratando água residuária do café produzido por via úmida.** 2007. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

SOUSA, R. B. A. **Geração de biogás: perspectivas com relação aos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB.** In: IX Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: Paraíba, 2012.

SOUSA, R. B. A.; AIRES, K. O.; DANTAS, E. R. B.; BATISTA, P. I. B.; MONTEIRO, V. E. D. **Análise da composição de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos e sua relação com o ph do meio.** In: IV Seminário Regional Nordeste de Resíduos Sólidos. São Cristovão: Sergipe, 2012.

TARAZONA, C. F. **Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2010. 210 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management.** Engineering principles and management issues. New York. 1993.

TRABULSI, L. R.. **Microbiologia.** 4 Ed. São Paulo. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA, 1998). AP 42 Section 2.4 –Municipal Solid Waste Landfills, Related Information. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/related/c02s04.html>> Acesso em Agosto 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA, 2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. May 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttantw01/landfill/landflpg.html>> Acesso em Setembro, 2012.

VAZOLLER, R. F. **Biodiversidade: perspectivas e oportunidades tecnológicas.** Microbiologia e Saneamento Ambiental. USP. São Paulo, 2001.

VEJA, Revista Veja – **Banco de Imagens**, São Paulo – SP: Editora Abril; dez, 2009.

WHO. International Reference Center for Wastes Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost.** Switzerland, 1979.