



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

**MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NO ESTUDO  
DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES DE BIORRETORES DE BANCADA  
PREENCHIDOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS**

**ELDER SANDRO PORTO DOS SANTOS**

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2014

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

**MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NO ESTUDO  
DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES DE BIORREATORES DE BANCADA  
PREENCHIDOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS**

**ELDER SANDRO PORTO DOS SANTOS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo

Co-orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- S231m Santos, Elder Sandro Porto dos.  
Monitoramento dos parâmetros físico-químicos no estudo das concentrações de gases de biorreatores de bancada preenchidos com resíduos orgânicos / Elder Sandro Porto dos Santos. – Campina Grande, 2014.  
117 f. : il. Color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- "Orientação: Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo, Veruschka Escarião Dessoles Monteiro".  
Referências.
1. Parâmetros Físico-Químicos. 2. Concentração de Biogás.  
3. Biorreatores. I. Melo, Márcio Camargo de. II. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. III. Título.

CDU 628.4.042(043)

**MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NO ESTUDO  
DAS CONCENTRAÇÕES DE GASES DE BIORREATORES DE BANCADA  
PREENCHIDOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS**

**ELDER SANDRO PORTO DOS SANTOS**

Dissertação apresentada e aprovada em 28/02/2014 pela banca examinadora  
constituída dos seguintes membros

---

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo  
Orientador - UFCG

---

Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro  
Co-Orientadora - UFCG

---

Profa. Dra. Andrea Carla Lima Rodrigues  
Examinadora Interna - UFCG

---

Profa. Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk  
Examinadora Externa - EcoSolutions Consultoria

*“Podemos acreditar no futuro e trabalhar para atingi-lo e preservá-lo ou podemos andar cegamente em círculos, comportando-nos como se um dia não fossem mais existir crianças para herdar nosso legado. A escolha é nossa; a Terra está em jogo.”*

*Al Gore*

## DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus que me concedeu a vencer mais uma etapa, nessa que é minha grande jornada, depois aos meus pais, Edvaldo Pereira dos Santos e Maria Salete Porto dos Santos, e a minha família por terem me apoiado todo esse tempo e me incentivado, acreditando que eu seria capaz de alcançar mais esta vitória em minha vida.

## AGRADECIMENTOS

- ✓ Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e disposição todo esse tempo. Proporcionando-me assim, a conclusão do mestrado e abrindo novas portas no meu longo caminho;
- ✓ Aos meus pais Edvaldo Pereira dos Santos e Maria Salete Porto dos Santos, as minhas irmãs Elen Samara Porto dos Santos e Kelly Sabrina Porto dos Santos, e todo o resto da minha família, pois sem o apoio deles nada conseguiria;
- ✓ Ao meu tio Silvano Porto Pereira por está sempre a minha disposição, contribuindo, e muito, para essa minha pesquisa;
- ✓ Aos meus orientadores, professor Márcio Camargo de Melo e a professora Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pela disposição em me orientar na elaboração deste trabalho, pela oportunidade de trabalhar com o tema, pela consideração, paciência, confiança e cooperação durante todo o período de desenvolvimento do trabalho;
- ✓ Aos funcionários e professores do programa de pós-graduação de engenharia civil e ambiental, pelo apoio, orientação, amizade, paciência e conhecimentos transmitidos durante minha trajetória, que certamente contribuíram para o meu desenvolvimento intelectual e formação profissional;
- ✓ A todo o Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), a participação de todos foi de suma importância no desenvolvimento da pesquisa;
- ✓ Aos alunos e funcionários da Escola Severino Cabral, que contribuíram para a pesquisa;
- ✓ A minha querida amiga Kalina Lígia de Souza Duarte (ô baixinha arretada), por ter me aturado e me ajudado por tanto tempo, não só no mestrado, mas como em todo esse tempo que nos conhecemos;

- ✓ Ao CNPq/Vale pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa. A Capes pela bolsa concedida;
- ✓ Aos amigos que conheço de longa data;
- ✓ Por fim, a todos que cooperaram para mais essa vitória em minha vida, sem vocês nada conseguiria.

## RESUMO

O monitoramento de parâmetros físico-químicos para fins de produção de biogás em aterros de Resíduo Sólidos Urbanos (RSU) faz-se necessário para se entender os processos fermentativos, reduzir os custos e prevenir impactos ambientais. Além do mais os parâmetros físico-químicos podem direcionar o melhor caminho a se seguir de acordo com o objetivo a ser alcançado em termos de geração, produção e concentração de biogás. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar a concentração de gases em biorreatores de bancada gerados por processos bioquímicos preenchidos com resíduos orgânicos provenientes de uma Escola de Ensino Médio localizada no Município de Campina Grande-PB. Para se alcançar este objetivo construíram-se dois biorreatores de bancadas de PVC com 0,9m de altura, diâmetro de 0,2m e volume de aproximadamente  $0,028\text{m}^3$  (28L) de secção cilíndrica. Estes biorreatores foram instrumentados para permitir o monitoramento e controle das operações de fermentação. Os biorreatores foram preenchidos com resíduos sólidos orgânicos adicionados a esterco bovino e água perfazendo um total de  $0,015\text{m}^3$  (15L). Para o monitoramento dos biorreatores a fim de se verificar as concentrações dos gases gerados nos processos metabólicos em seu interior fez-se análises físico-químicas como gravimetria, volumetria, temperatura, pH umidade, ácido voláteis, sólidos voláteis, alcalinidade e nitrogênio amoniacal. Antes do preenchimento dos biorreatores com os resíduos orgânicos provenientes da escola, fez-se análise de composição gravimetria e volumétrica dos resíduos sólidos urbanos gerados na própria instituição de ensino pesquisa. Os resíduos orgânicos da escola foram gerados dos restos de alimentos fornecidos das refeições realizadas por alunos, professores e funcionário. De acordo com a literatura técnica, os parâmetros físico-químicos ditam o comportamento de processos fermentativos e, portanto, avalia-los é de suma importância, pois possíveis mudanças operacionais para um melhor desempenho de biorreatores anaeróbios só podem ser realizadas após o entendimento destes parâmetros. Nos estudos realizados nos biorreatores de bancada preenchidos com resíduos orgânicos, verificou-se que os parâmetros físico-químicos analisados isoladamente e em conjunto não favoreceram a produção de metano em concentrações ideais conforme a literatura. Diante disso concluiu-se que o monitoramento dos parâmetros físico-químicos podem, realmente, fornecer um direcionamento do processo a fim de otimizá-lo, desde que acompanhados com uma boa fundamentação teórico-prática.

Palavras chaves: parâmetros físico-químicos, concentração de biogás e biorreatores.

## ABSTRACT

Monitoring of physical- chemical parameters for production of biogas in landfills Solid Waste is necessary for understanding the fermentation processes, reduce costs and prevent environmental impacts. Besides the physical-chemical parameters can direct the best way to go according to the objective to be achieved in terms of generation, production and concentration of biogas. The aim of this study was to evaluate the gas concentration in bioreactors Bench generated by biochemical processes filled with organic waste from a High School located in the city of Campina Grande- PB. To achieve this goal two bioreactors were constructed of PVC stands 0.9 m high, 0.2 m diameter and volume of approximately 0,028 m<sup>3</sup> (28L) cylindrical section. These bioreactors were instrumented to allow monitoring and control of fermentation operations. The organic solid waste bioreactors added to bovine manure and water were filled with a total of 0,015 m<sup>3</sup> (15L). For monitoring of bioreactors in order to verify the concentrations of the gases generated in the metabolic processes inside became physical-chemical analyzes such as gravity, volume, temperature, pH, moisture, volatile acid, volatile solids, alkalinity and ammonia nitrogen. Before completing the bioreactors with organic waste from school, made sure gravimetric analysis and volumetric composition of municipal solid waste generated in the institution of education research. Organic waste from the school were generated from food scraps provided meals made by students, faculty and staff. According to the technical literature, the physical-chemical parameters dictate the behavior of fermentation processes and thus evaluates them is of paramount importance because possible operational changes for better performance of anaerobic bioreactors can be performed only after understanding these parameters. In studies in benchtop bioreactors filled with organic waste, it was found that the physical-chemical parameters analyzed separately and together did not favor the production of methane concentrations ideas according to the literature. Therefore it was concluded that the monitoring of the physical-chemical parameters can indeed provide a guide the process in order to optimize it, if accompanied with a good theoretical and practical reasons.

Key words: physical-chemical parameters, concentration of biogas and bioreactors.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Procedimentos para classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004/04 .....	26
Figura 2: Estrutura de um aterro Controlado.....	29
Figura 3: Desenho esquemático de um aterro sanitário.....	31
Figura 4: Disposição de RSU em um Lixão .....	32
Figura 5: Fases de Produção de Biogás (adaptado revista agroenergia da biomassa residual) .....	35
Figura 6: Fases de Digestão de Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários .....	36
Figura 7: Modelo de reator biológico- Lagoa Coberta .....	39
Figura 8: Biorreator Modelo Indiano.....	40
Figura 9: Biorreator Modelo Chinês .....	41
Figura 10: Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de bactériasmetanogênicas .....	45
Figura 11: Etapas do desenvolvimento da pesquisa .....	49
Figura 12: Esquema geral dos biorreatores de bancada utilizados na pesquisa .....	50
Figura 13: Desenvolvimento de construção dos biorreatores de bancada.....	52
Figura 14: Determinação da composição gravimétrica .....	53
Figura 15: Esquema do recipiente utilizado para a realização da composição volumétrica.....	54
Figura 16: (A) Composição Volumétrica dos resíduos, (B) Compactação dos resíduos,(C) resíduos compactados e (D) medição da altura dos resíduos.....	55
Figura 17: (A) Resíduos orgânicos, (B) triturador de resíduos orgânicos TR 200, (C) trituração dos resíduos orgânicos, (D) aparência dos resíduos triturados .	56
Figura 18: (A) Amostra de matéria orgânica triturada, (B) esterco bovino (inóculo), (C) mistura dos resíduos (matéria orgânica + esterco + água) e (D) enchimento dos biorreatores.....	58
Figura 19: Construção em sequencia da estufa para aumento da temperatura interna dos biorreatores .....	59
Figura 20: Coleta das amostras .....	60
Figura 21: Termômetros utilizados na medição das temperaturas: (A) temperatura interna dos biorreatores, (B) temperatura ambiente .....	62
Figura 22: Amostras para determinação do teor de umidade .....	63
Figura 23: Determinação do pH .....	65
Figura 24: Amostras da determinação de ácidos voláteis.....	67
Figura 25: Esquema de uma seringa .....	69
Figura 26: Realização da Coleta do Biogás nos Biorreatores.....	70
Figura 27: Detector portátil de gases DragerX-am 7000 (A), leituras da concentração dos gases através do saco coletor (B).....	71
Figura 28: Leitura das concentrações dos gases através do equipamento Drager .....	72
Figura 29: Esquema geral do aparato para medição do volume de biogás .....	73

Figura 30: Composição Gravimétrica da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral .....	74
Figura 31: Composição Volumétrica solta da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral .....	77
Figura 32: Composição Volumétrica compactada da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral.....	80
Figura 33: Temperatura do Biorreator 1 em relação ao tempo .....	83
Figura 34: Temperatura do Biorreator 2 em relação ao tempo .....	83
Figura 35: Teor de umidade ao longo do tempo dos resíduos orgânicos no Biorreator 1 .....	86
Figura 36: Teor de umidade ao tempo do tempo dos resíduos orgânicos no Biorreator 2 .....	86
Figura 37: Evolução da alcalinidade total no biorreator 1 .....	89
Figura 38: Evolução da alcalinidade total no biorreator 2 .....	89
Figura 39: Evolução do pH dos resíduos orgânicos durante o intervalo tempo no Biorreator 1 .....	91
Figura 40: Evolução do pH dos resíduos orgânicos durante o intervalo de tempo no Biorreator 2 .....	91
Figura 41: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo nos resíduos orgânicos do Biorreator 1 .....	93
Figura 42: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo nos resíduos orgânicos do Biorreator 2.....	94
Figura 43: Teor de sólidos voláteis do biorreator 1 .....	96
Figura 44: Teor de sólidos voláteis do biorreator 2 .....	96
Figura 45: Concentração de Nitrogênio amoniacal ao longo do tempo no Biorreator 1 .....	99
Figura 46: Concentração de Nitrogênio amoniacal ao longo do tempo no Biorreator 2 .....	100
Figura 47: Concentração volumétrica (%) de CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> ao longo tempo do Biorreator 1 .....	101
Figura 48: Concentração volumétrica (%) de O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> ao longo do tempo do Biorreator 2 .....	102
Figura 49: Concentração volumétrica (%) de CO, H <sub>2</sub> S e em função do tempo de enchimento do Biorreator 1 .....	105
Figura 50: Concentração volumétrica (%) de CO e H <sub>2</sub> S e em função do tempo de enchimento do Biorreator 2.....	105

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Percentual de resíduo coletado, por tipo de destino final, de acordo com o número de habitantes no município .....	28
Quadro 2: Principais gases que compõe o biogás .....	33
Quadro 3: Vantagens e Desvantagens nos usos da digestão anaeróbia.....	34
Quadro 4: Principais materiais dos biorreatores e monitoramento de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos .....	51
Quadro 5: Parâmetros físicos avaliados nos biorreatores.....	61
Quadro 6: Parâmetros físico – químicos avaliados nos biorreatores .....	64
Quadro 7: Características do equipamento de medição das concentrações dos gases .....	73
Quadro 8: Resíduo Total e o peso de cada material encontrado na escola.....	75
Quadro 9: Espaço total e ocupado de cada material solto encontrado no resíduo da escola.....	78
Quadro 10: Espaço total e ocupado de cada material compactado encontrado no resíduo da escola.....	80

## **LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURAS E ABREVIATÓES**

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**AT** – Alcalinidade Total

**APHA** – American Public Health Association

**CAPES**- Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal do Nível Superior

**CH<sub>4</sub>** – Metano

**CNPq** - Conselho Nacional de Pesquisa

**CO** – Monóxido de Carbono

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**DBO** – Demanda Bioquímica de Oxigênio

**DQO** – Demanda Química de Oxigênio

**FUNASA** - Fundação Nacional de Saúde

**GGA** – Grupo de Geotecnia Ambiental

**H<sub>2</sub>S** – Sulfeto de Hidrogênio

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** – Ácido Sulfúrico

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IPEA** – Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada

**NaHCO<sub>3</sub>** – Bicarbonato de Sódio

**NBR** – Normas Técnicas Brasileiras

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** – Amônia ionizável

**NH<sub>3</sub>** – Amônia Livre

**O<sub>2</sub>** – Oxigênio

**OH** - Hidróxido

**pH** – Potencial Hidrogeniônico

**PNRS** – Política Nacional de Resíduos Sólidos

**PVC** – Policloreto de Vinila

**RSU** – Resíduos Sólidos Urbanos

**SISNAMA** - Sistema Nacional do Meio Ambiente

**SNVS** - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

**UFCG** – Universidade Federal de Campina Grande

**UFPE** – Universidade Federal de Pernambuco

**UV** - Ultravioleta

**WHO** – World Health Organization

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivos .....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos .....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1 Resíduos Sólidos .....	22
2.2 Disposição Final.....	27
2.2.1 Aterros .....	28
2.2.1.1 Aterro controlado .....	29
2.2.1.2 Aterro Sanitário .....	30
2.2.2 Lixões .....	31
2.3 Produção de Biogás.....	32
2.4 Tipos de Biorreatores.....	38
2.4.1 Biorreator - Lagoas cobertas .....	38
2.4.2 Biorreator – Indiano .....	39
2.4.3 Biorreator - Chinês.....	40
2.4.4 Biorreatores de mistura completa .....	41
2.5 Parâmetros Físico-Químicos e a Geração de Biogás .....	42
2.5.1 Composição gravimétrica e volumétrica dos RSU.....	42
2.5.2 Potencial hidrogeniônico (pH).....	42
2.5.3 Alcalinidade .....	43
2.5.4 Temperatura .....	44
2.5.5 Teor de Umidade .....	45
2.5.6 Sólidos Voláteis .....	46
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>48</b>
3.1 Caracterização da área de estudo .....	48
3.2 Procedimento experimental .....	48
3.3 Construção e Instrumentação dos Biorreatores.....	49
3.3.1 Materiais, equipamentos e utensílios.....	50
3.3.2 Construção dos biorreatores .....	52
3.4 Caracterização dos resíduos .....	52
3.4.1 Composição gravimétrica .....	52

3.4.2 Composição volumétrica .....	54
3.5 Trituração da matéria orgânica .....	55
3.6 Enchimentos dos Biorreatores de Bancada .....	57
3.7 Construção da Estufa .....	58
3.8 Monitoramento dos biorreatores .....	59
3.8.1 Coleta das amostras semi-sólidas .....	60
3.8.2 Análises in situ e laboratoriais .....	60
3.8.3 Parâmetros físicos .....	61
3.8.3.1 Temperatura .....	61
3.8.3.2 Teor de umidade .....	62
3.8.4 Parâmetros físico-químicos .....	63
3.8.4.1 Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	64
3.8.4.2 Alcalinidade total .....	65
3.8.4.3 Ácidos voláteis .....	66
3.8.4.4 Sólidos Voláteis .....	67
3.8.4.5 Nitrogênio Amoniacal .....	68
3.8.5 Monitoramento de análise de gases .....	68
3.8.5.1 Monitoramento das concentrações de gases pelo Drager .....	69
3.8.5.2 Monitoramento do volume do Biogás .....	73
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>74</b>
4.1 Caracterização e composição dos resíduos sólidos da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral .....	74
4.1.1 Composição Gravimétrica .....	74
4.1.2 Composição Volumétrica .....	77
4.2 Parâmetros físico-químicos .....	81
4.2.1 Parâmetros físicos .....	81
4.2.1.1 Temperatura .....	81
4.2.1.2 Teor de Umidade .....	85
4.2.2 Parâmetros físico-químicos .....	88
4.2.2.1 Alcalinidade .....	88
4.2.2.2 Potencial Hidrogeniônico – pH .....	90
4.2.2.3 Ácidos voláteis .....	93
4.2.2.4 Sólidos Voláteis .....	95
4.2.2.5 Nitrogênio Amoniacal .....	97

4.3 Monitoramento dos Gases.....	100
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>108</b>
5.1 Conclusões .....	108
5.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	109
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de parâmetros físico-químicos para fins de produção de biogás em aterros de Resíduo Sólidos Urbanos (RSU) faz-se necessário para se entender os processos fermentativos, reduzir os custos e prevenir impactos ambientais. Entretanto, a produção de biogás em aterros continua de forma ainda deficiente, uma vez que, a falta de incentivos públicos para o desenvolvimento de tecnologias apropriadas ao tema, junto com o próprio desconhecimento do assunto, prejudicam a inserção desse produto ao mercado.

O aproveitamento do biogás pode ser um aliado na redução dos impactos ambientais gerados do mau acondicionamento de resíduos e, ainda, por consequência, aumentar a matriz energética do país.

O metano oriundo da decomposição anaeróbia deixa de ser um passivo ambiental, como era considerado há alguns anos atrás, e passa a ser um produto de valor agregado ao descarte de resíduos orgânicos, os créditos de carbono podem ser um exemplo disso.

Os RSU's podem ser uma fonte de produção de biogás, por conter, geralmente, mais de 50% de matéria orgânica na sua composição (Barcelos 2009). E segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA 2012), a matéria orgânica representa 51,4% do resíduo diário no país, e apenas 31,9% é composto de material reciclável (alumínio, plásticos, papel, aço, metais e vidro). Segundo Bley Jr. (2009) o biogás é um Composto gasoso, constituído em média por 59% de gás Metano ( $\text{CH}_4$ ), 40% de gás Carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e 1% de outros gases, entre eles o gás Sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), resultante da degradação anaeróbia (ausência de oxigênio) da matéria orgânica, por colônias mistas de microrganismos. De um modo geral, o metano corresponde em cerca de 60% dos gases gerados em um aterro, e, portanto, pode ser aproveitado como fonte de energia para diversos fins. Se for analisado que o aproveitamento de biogás a partir de resíduos orgânicos é uma realidade, a matéria orgânica que é lançada nos aterros sem aproveitamento é um passivo ambiental e, ainda, recurso financeiro desprezado.

A forma mais usada no mundo para o destino final dos RSU's são aterros, devido a sua praticidade e baixo custo. Mas a compreensão do seu funcionamento, dos quais a interferência do meio ambiente, condições operacionais, aspectos físico-químicos e microbiológicos no tratamento dos resíduos e produção do biogás é complexa e de difícil análise. Sobretudo os aspectos físico-químicos como o pH, temperatura, quantidade de matéria orgânica entre outros, influenciam o comportamento de aterros em diversos fatores o que implica na produção de biogás.

Diante da importância do monitoramento dos parâmetros físico-químicos para entender o comportamento das concentrações do biogás gerado, estudos foram desenvolvidos a partir da construção de dois reatores de bancadas anaeróbios hermeticamente fechados, afim de estudar e compreender como os parâmetros físico-químicos atuam na geração e produção de biogás.

A pesquisa foi realizada com os resíduos de uma escola de ensino médio da cidade de Campina Grande - Paraíba, onde toda a parte de construção dos biorreatores, monitoramento e análises físico-químicas e microbiológicas foram realizadas nas dependências da Universidade Federal de Campina Grande, no laboratório de Geotecnia Ambiental do Departamento de Engenharia Civil.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Monitorar parâmetros físico-químicos e sua relação com a concentração de biogás a partir de resíduos orgânicos em reatores de bancada preenchidos com resíduos orgânicos da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral situada na cidade de Campina Grande - PB

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Construir dois reatores de bancadas anaeróbios hermeticamente fechados para preencher com a matéria orgânica proveniente dos RSU's da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral, situada na cidade de Campina Grande - PB;
- Realizar a composição gravimétrica e volumétrica dos RSU's oriundos da escola;

- Monitorar parâmetros físico-químicos nos biorreatores de bancada preenchidos com resíduos orgânicos;
- Verificar as concentrações de biogás em função dos parâmetros físico-químicos durante o monitoramento da degradação dos resíduos presentes nos biorreatores.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Resíduos Sólidos

A sociedade moderna identifica-se com um modelo de desenvolvimento que gera um elevado padrão de produção e consumo, associado ao crescimento populacional e ao processo de urbanização intenso e desordenado, resultando em problemas graves de saneamento básico, principalmente esgoto doméstico e resíduos sólidos urbanos (BRAGA *et al*, 2002).

Diariamente, diante das inúmeras e complexas atividades humanas, milhares de toneladas de resíduos, de várias fontes (industrial, comercial, nuclear, séptico, domiciliar, agrícola, etc), tem sido gerado, sendo que os principais fatores de incremento têm sido o aumento populacional e a intensidade da industrialização. Entretanto, é o resíduo domiciliar o que representa o maior percentual gerado, contribuindo com cerca de 50% do total gerado constituindo, por isso, num sério problema a ser enfrentado nos dias atuais. O crescente aumento da contribuição “per capita”, como também a mudança na composição da massa de resíduo, ocorrida nos últimos anos, tem exigido não só uma reflexão sobre antigos conceitos, como também, uma mudança de paradigmas que preconizam o gerenciamento desses resíduos (MAGALHÃES *et al*, 2004).

Para Fonseca (2001), a geração de resíduos depende de fatores culturais, incluindo as condições e hábitos de consumo, além de serem influenciados pela renda e padrões da sociedade, no qual está envolvido o poder aquisitivo, como também os fatores climáticos e das características de sexo e idade dos grupos sociais. No entanto, de todos os pontos listados, o que mais gera impacto é o poder aquisitivo, pois, quando ocorre uma alteração desse poder o comportamento na procedência e constituição do lixo é sentida de imediato.

Existem vários tipos de definições e normas para resíduos sólidos, no entanto, serão abordados algumas das mais importantes no decorrer da revisão para o melhor entendimento da pesquisa.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) - PNRS, os resíduos sólidos são materiais, substâncias, objetos

ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, ao qual, a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder.

Já a NBR 10.004 da ABNT (2004), fala que resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços de saúde e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

No entanto, os resíduos são fruto do progresso econômico e dos avanços da tecnologia que mais se aproxima do cidadão urbano. Os resíduos estão presentes no cotidiano, são onipresentes e visíveis, especialmente nas metrópoles. No mundo ocidental, segundo a revista Veja (2011), estima-se que uma pessoa produza 500 quilos de resíduos urbanos por ano. No Brasil a taxa é de 378 quilos por ano. Quanto mais rico um país, mais detrito ele gera, a visão dos resíduos sólidos como problema a ser enfrentado só se firmou no século XIX e agora no século XXI é o assunto mais abordado e um grande entrave da sociedade como um todo.

A Fundação Nacional de Saúde (FUNASA 2007) diz que os resíduos sólidos são materiais heterogêneo, (inertes, minerais e orgânicos) resultante das atividades humanas e da natureza, os quais podem ser parcialmente utilizados, gerando, entre outros aspectos, proteção à saúde pública e economia de recursos naturais. Os resíduos sólidos constituem problemas sanitário, econômico e estético.

De modo geral, os resíduos sólidos são constituídos de substâncias (FUNASA 2007):

- Facilmente degradáveis: resto de comidas, sobras de cozinha, folhas, capim, casca de frutas, animais mortos e excremento;
- Moderadamente degradáveis: papel, papelão e outros produtos celulósicos;

- Dificilmente degradáveis: trapo, couro, pano, madeira, borracha, cabelo, pena de galinha, osso, plástico;
- Não degradáveis: metal não ferroso, vidro, pedras, cinzas, terra, areia, cerâmica.

Sua composição varia de comunidade para comunidade, de acordo com os hábitos e costumes da população, número de habitantes do local, poder aquisitivo, variações sazonais, clima, desenvolvimento, nível educacional, variando ainda para a mesma comunidade com as estações do ano.

A PNRS estabelece princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações, e importantes instrumentos, tais como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que está em processo, que contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes.

Ainda de acordo com a PNRS, os resíduos sólidos são classificados quanto à origem e à periculosidade.

- **Quanto à origem podem ser:**

a) resíduos domiciliares: são resíduos originários das atividades domésticas em residências urbanas;

b) resíduos de limpeza urbana: são resíduos originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

c) resíduos sólidos urbanos: quando compreendem os resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana;

d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: são resíduos gerados nessas atividades, excetuados os resíduos de limpeza urbana, os resíduos de serviços públicos de saneamento básico, de serviço de saúde, serviços de transporte e de construção civil. Se os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços forem caracterizados como não perigosos, os mesmos podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: são resíduos gerados nessas atividades, excetuados os resíduos sólidos urbanos;

f) resíduos industriais: são resíduos gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

g) resíduos de serviços de saúde: são resíduos gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);

h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

i) resíduos agrossilvopastoris: são resíduos gerados nas atividades agropecuárias e silvicultoras, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

j) resíduos de serviços de transportes: são resíduos originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

k) resíduos de mineração: são resíduos gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

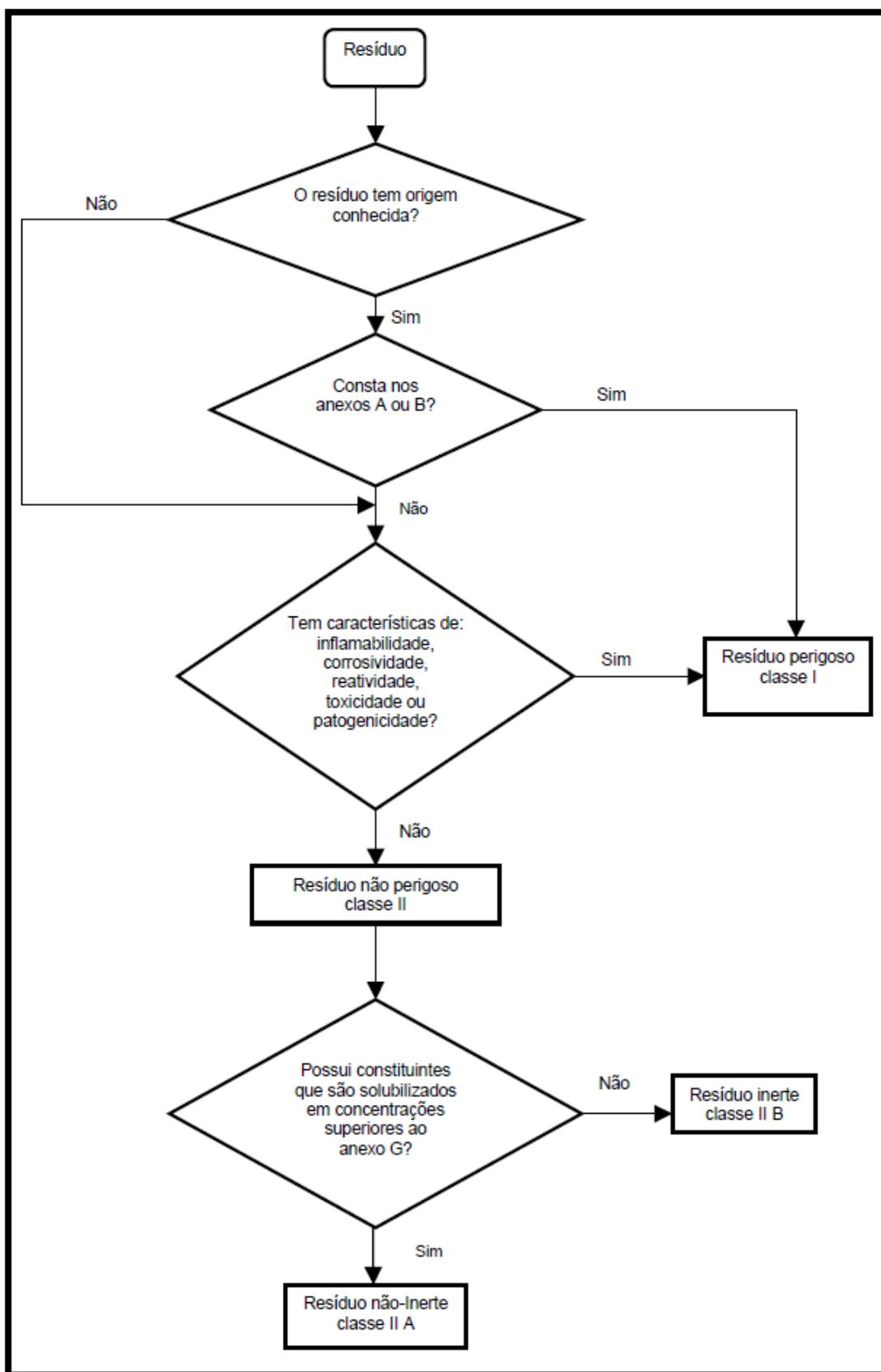
- **Quanto à periculosidade podem ser:**

a) resíduos perigosos: são resíduos inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos, patogênicos, cancerígenos, teratogênicos e mutagênicos, que apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com Lei, regulamento ou norma técnica;

b) resíduos não perigosos: são aqueles não enquadrados como resíduos perigosos.

A Figura 1 mostra como pode ser feita a classificação dos resíduos e a suas respectivas classes de periculosidade, de acordo com a NBR 10.004 da ABNT (2004).

Figura 1: Procedimentos para classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004/04



(FONTE: ABNT-NBR 10.004/04)

A NBR 10.004 da ABNT (2004) por sua vez, faz uma classificação mais detalhada da periculosidade dos resíduos quanto aos riscos potenciais de contaminação que eles podem trazer ao meio ambiente, em diferentes classes:

a) Classe I ou perigosos: São aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

b) Classe II A ou não-inertes: São os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I ou Perigosos.

c) Classe II B ou inertes: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente.

## **2.2 Disposição Final**

Ao analisar o destino final dos resíduos em outros países, como no caso da Holanda, Japão e ainda a Cingapura, percebe-se que estes usam com método preferencial a incineração, sendo encaminhado para os aterros apenas as cinzas geradas pelo processo. Já em outros países que se encontram em desenvolvimento, como Quênia, Índia, México e até mesmo o Brasil, constata-se a disposição de resíduos sólidos a céu aberto, fato esse que acarreta no mal para o próprio homem.

O Quadro 1, mostra o resultado de uma pesquisa do IBGE em 2010 e os respectivos destinos finais dos resíduos de acordo, com o número de habitantes, nos municípios brasileiros. Nota-se que a maior parte dos resíduos tem como destino, ainda, os lixões, principalmente em cidades consideradas pequenas, e de população abaixo dos 100.000.

**Quadro 1: Percentual de resíduo coletado, por tipo de destino final, de acordo com o número de habitantes no município**

<b>Número de Habitantes</b>	<b>Lixão</b>	<b>Controlado</b>	<b>Sanitário</b>
<b>Até 9.999</b>	64,00%	16,30%	19,80%
<b>10.000 até 19.999</b>	72,30%	14,60%	13,00%
<b>20.000 até 49.999</b>	63,00%	20,40%	16,30%
<b>50.000 até 99.999</b>	51,90%	24,50%	23,40%
<b>100.000 até 199.999</b>	25,50%	30,20%	44,00%
<b>200.000 até 499.999</b>	22,40%	27,80%	49,80%
<b>500.000 até 999.999</b>	22,70%	37,10%	40,10%
<b>Acima de 1.000.000</b>	1,80%	15,20%	83,00%
<b>Total</b>	30,50%	22,30%	47,10%

Fonte: IBGE (2010)

### **2.2.1 Aterros**

De acordo com Alcântara (2007) aterros de resíduos sólidos são ambientes dinâmicos onde acontecem reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físico-químicas e suas inter-relações formando um sistema complexo. Um aterro de RSU é um sistema que possui características próprias, mas mutável de acordo com o local de instalação. Por exemplo, ambientes com mais precipitações podem afetar a umidade interna dos resíduos e por consequência influenciar na biota microbiana, biodegradação, toxicidade e parâmetros físicos e químicos. Assim, quando se estuda um aterro de RSU, tem-se que levar em consideração o local de instalação.

A FUNASA (2007) refere-se aos aterros como o enterramento planejado dos resíduos sólidos e controlado tecnicamente, de modo a evitar a proliferação de vetores e roedores e outros riscos à saúde.

O seu planejamento envolve estudo de localização quanto à proximidade de habitações, possibilidade de contaminação de água, distâncias dos locais que são produzidos até o destino final, acesso local, obras de drenagem,

planejamento da própria operação e das sucessivas frentes a serem atacadas. Podendo ser classificados com:

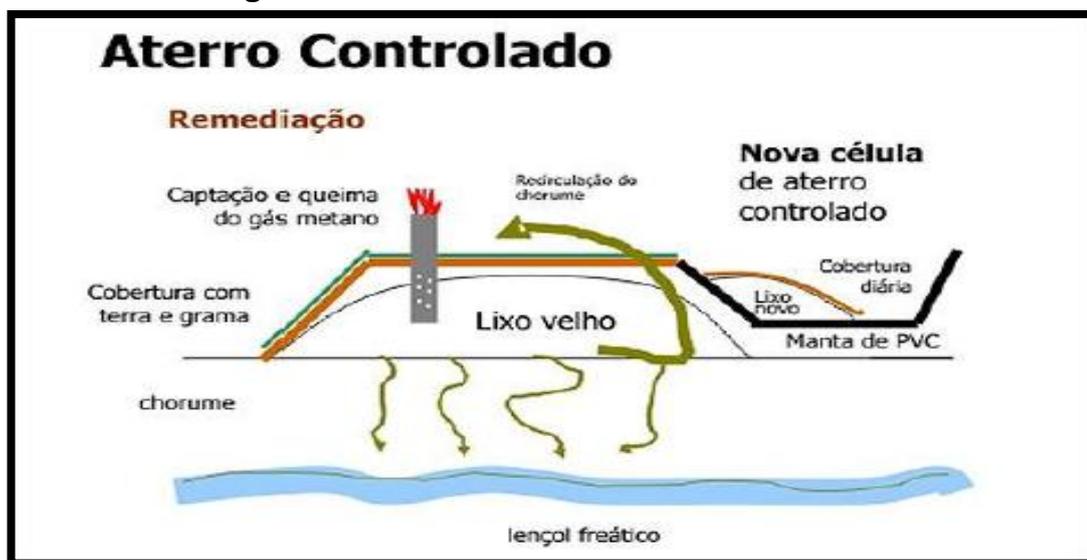
- Aterros de superfície;
- Aterros com depressões e ondulações;
- Método de rampa;
- Método de trincheira;
- Método de área;
- Aterros em valas.

### 2.2.1.1 Aterro controlado

A FUNASA (2007) menciona que é uma técnica de disposição de resíduos sólidos no solo visando à minimização dos impactos ambientais (Figura 2). Esse método utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Esse método de disposição produz poluição, porém de forma controlada, geralmente, não dispõe de impermeabilização de base, podendo comprometer a qualidade das águas subterrâneas, nem sistemas de tratamento do percolato e do biogás gerado.

Ainda de acordo com a FUNASA (2007) esse método é mais indicado que o lixão, mas em virtudes dos problemas ambientais que causa e aos seus custos de operação, é de qualidade técnica bem inferior ao aterro sanitário.

Figura 2: Estrutura de um aterro Controlado



### **2.2.1.2 Aterro Sanitário**

O aterro sanitário é a técnica de disposição de resíduos no solo, visando a minimização dos impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

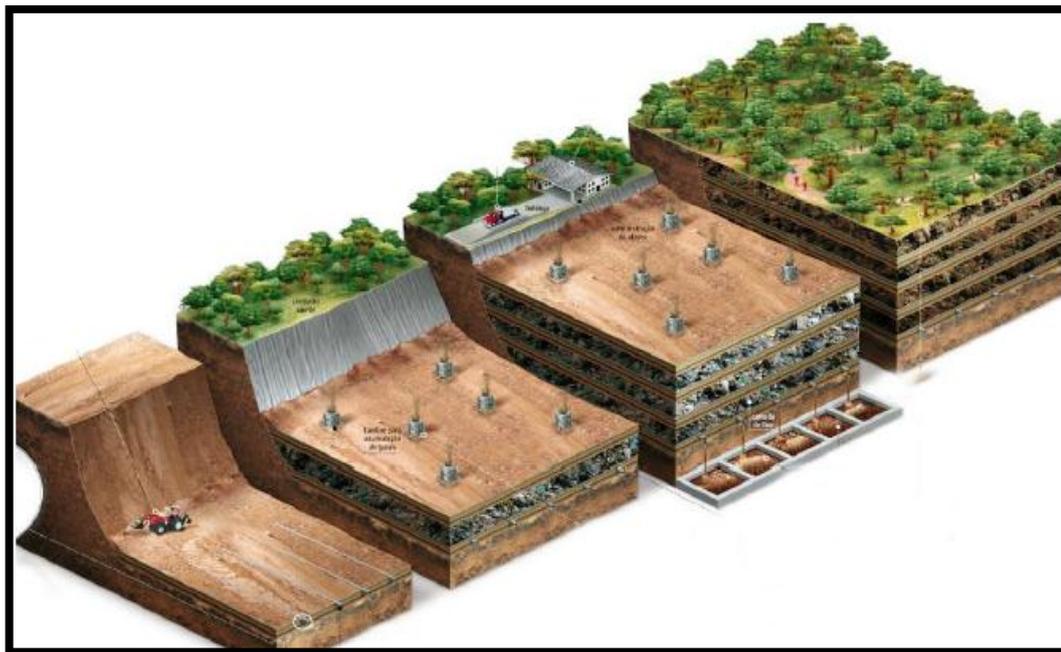
O processo de compactação deve ser realizado de maneira adequada, a fim de que não interfira nos processos de biodegradação. Esse procedimento visa reduzir a área disponível prolongando a vida útil do aterro, ao mesmo tempo em que o propicia a firmeza do terreno possibilitando seu uso futuro para outros fins.

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.

Assim como qualquer outro projeto, antes de se fazer um aterro sanitário, há estudos que devem ser feitos, a fim de se encontrar a melhor área para sua instalação, de modo que não comprometa o meio ambiente. Após a escolha criteriosa da área, que não deve ser construída em locais sujeitos a inundação e deve estar localizada a no mínimo 200 metros de qualquer curso d'água, é feita a impermeabilização do solo com materiais geosintéticos, além de sistemas de drenagem e tratamento dos líquidos percolados e dos gases produzidos durante o processo de degradação dos resíduos (ABNT - NBR 13.896/97).

A Figura 3 mostra um desenho esquemático de um aterro sanitário que deve ter um projeto executivo que deverá ser, obrigatoriamente, constituído das seguintes partes: memorial descritivo; memorial técnico; cronograma de execução e estimativa de custos; desenhos ou plantas e eventuais anexos.

**Figura 3: Desenho esquemático de um aterro sanitário.**



Fonte Veja – 2009

### 2.2.2 Lixões

Os resíduos sólidos são dispostos a céu aberto, o que favorecem a proliferação de mosquitos, moscas, baratas e ratos, os quais são vetores de inúmeras doenças ao homem, tais como a febre tifóide, salmonelose, desinterias e outras infecções. Além destes insetos e roedores, constata-se a presença de animais domésticos nessas áreas, como cachorros e gatos que, junto com as aves, podem transmitir a toxoplasmose (ROUQUAYROL; ALMEIDA FILHO, 1999)

.Consiste numa forma de disposição final inadequada dos RSU caracterizada pela descarga no solo, sem critérios técnicos e medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública, sendo considerada ilegal segundo a legislação brasileira.

Além da liberação de gases, a decomposição do resíduo gera o lixiviado, que contamina o solo e a água por compostos orgânicos e íons metálicos (BRAGA *et al.* 2002)

Essa é a forma mais equivocada de disposição final dos resíduos, mas esse tipo de destino, ainda é muito utilizado, nos dias de atuais (Quadro 1). Municípios com baixa população geralmente não tem condições de arcar com o investimento para a mudança de destinação final dos seus resíduos, a falta de

fiscalização e punição é um dos indícios para que essa prática continue. Muitas pessoas vivem nos lixões fazendo coletas e revendendo, sempre trabalhando de forma insalubre (Figura 4).

**Figura 4: Disposição de RSU em um Lixão**



Fonte: EIGENHEER (2009)

### **2.3 Produção de Biogás**

Kunz (2010) fala que o entendimento do processo de obtenção do biogás é de grande importância para o sucesso da tecnologia de aproveitamento do biogás, haja vista que são complementares e, caso não se

tenha os devidos cuidados na geração, os processos de utilização poderão estar seriamente prejudicados ou até inviabilizados.

Segundo Bley Jr. (2009) o biogás é um composto gasoso, constituído em média por 59% de gás Metano ( $\text{CH}_4$ ), 40% de gás Carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e 1% de outros gases, entre eles o gás Sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), resultante da degradação anaeróbia (ausência de oxigênio) da matéria orgânica, por colônias mistas de microrganismos. É considerado assim, um recurso renovável (Quadro 2).

**Quadro 2: Principais gases que compõe o biogás**

Gás	Concentração no Biogás (%)
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50-80
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	20 – 40
Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )	1 – 3
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	0,5 – 3
Gás Sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e Outros ( $\text{CO}$ , $\text{NH}_3$ )	1 – 5

Fonte: COLDEBELLA, (2006)

Bley Jr. (2009) ainda descreve que a biodigestão anaeróbica consiste em submeter um volume diário de biomassa residual em estado líquido ou pastoso, no interior de dispositivos de engenharia sanitária conhecidos como biodigestores ou biorreatores, durante um determinado tempo de retenção hidráulica, sob condições ideais de temperatura e agitação. Neste dispositivo, em ausência total de oxigênio atuam colônias mistas de microrganismos, que encontram condições ideais para proliferar, alimentando-se dos sólidos voláteis solúvel na biomassa em tratamento, o que provoca a degradação da matéria orgânica.

Outra definição desse termo é empregado pela Revista Agroenergia Biomassa Residual (2009), segundo ela, que a digestão anaeróbica consiste num processo em que os resíduos orgânicos sofrem uma degradação, por ação de microrganismos anaeróbios, na total ausência de oxigênio. O processo ocorre naturalmente quando as condições envolvidas o proporcionam.

O uso da digestão anaeróbica no tratamento de resíduos apresenta algumas vantagens e desvantagens. Que são mostrados no Quadro 3.

**Quadro 3: Vantagens e Desvantagens nos usos da digestão anaeróbia**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes menor à que ocorre nos processos aeróbios;	As bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos;
Baixo consumo de energia. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos;	A partida do processo pode ser lenta na ausência do lodo de semeadura adaptado;
Baixa demanda de área;	Alguma forma de pré-tratamento é usualmente necessária;
Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico;	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas;
Tolerância a elevadas cargas orgânicas;	Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis;
Aplicabilidade em pequena e grande escala;	Remoção de nitrogênio, fósforo, e patogênicos insatisfatória;

Fonte: Adaptado de Chernicharo, (2007)

O mecanismo de decomposição anaeróbia se desenvolve pela ação de um consórcio de microrganismos que acontecem de maneira, ou seja, são interdependentes, em que um dos produtos finais da degradação, e no qual recai maior interesse, é o metano (KUNZ, 2010).

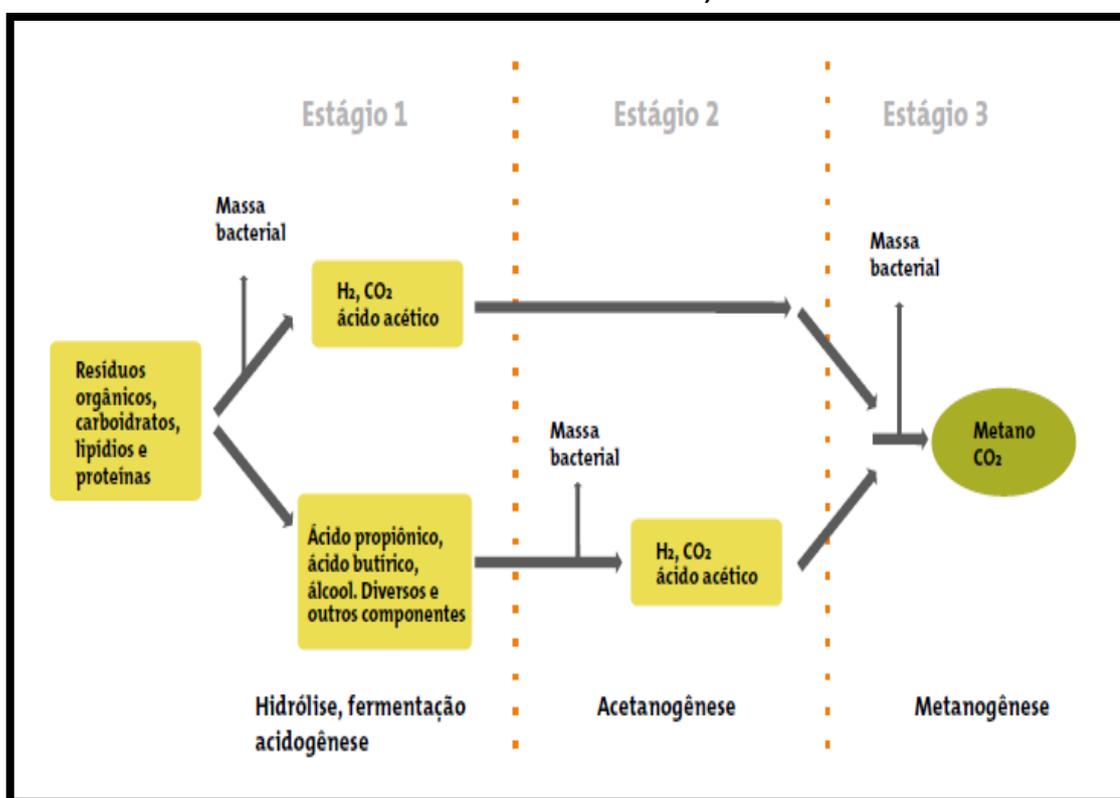
De acordo com a Revista Agroenergia Biomassa Residual (2009), a geração de biogás na biodegradação anaeróbia se dá em três fases, como mostrado na Figura 5:

- **Hidrólise:** as bactérias liberam enzimas extracelulares, para promover a hidrólise das partículas e degradar os sólidos em suspensão maiores em moléculas menores, solúveis no meio;
- **Acetogênese:** as bactérias produzem ácidos para transformar as moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos existentes na

biomassa, em ácidos orgânicos (ácido láctico, ácido butílico), etanol, amônia, hidrogênio e dióxido de carbono, entre outros;

- **Metanogênese:** as bactérias metanogênicas atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em metano ( $\text{CH}_4$ ). Essa fase limita a velocidade da cadeia de reações devido, principalmente, à formação de microbolhas de metano e dióxido de carbono em torno da bactéria metanogênica, isolando-a do contato direto com a mistura em digestão, razão pela qual a agitação da massa contida no digestor é prática sempre recomendável.

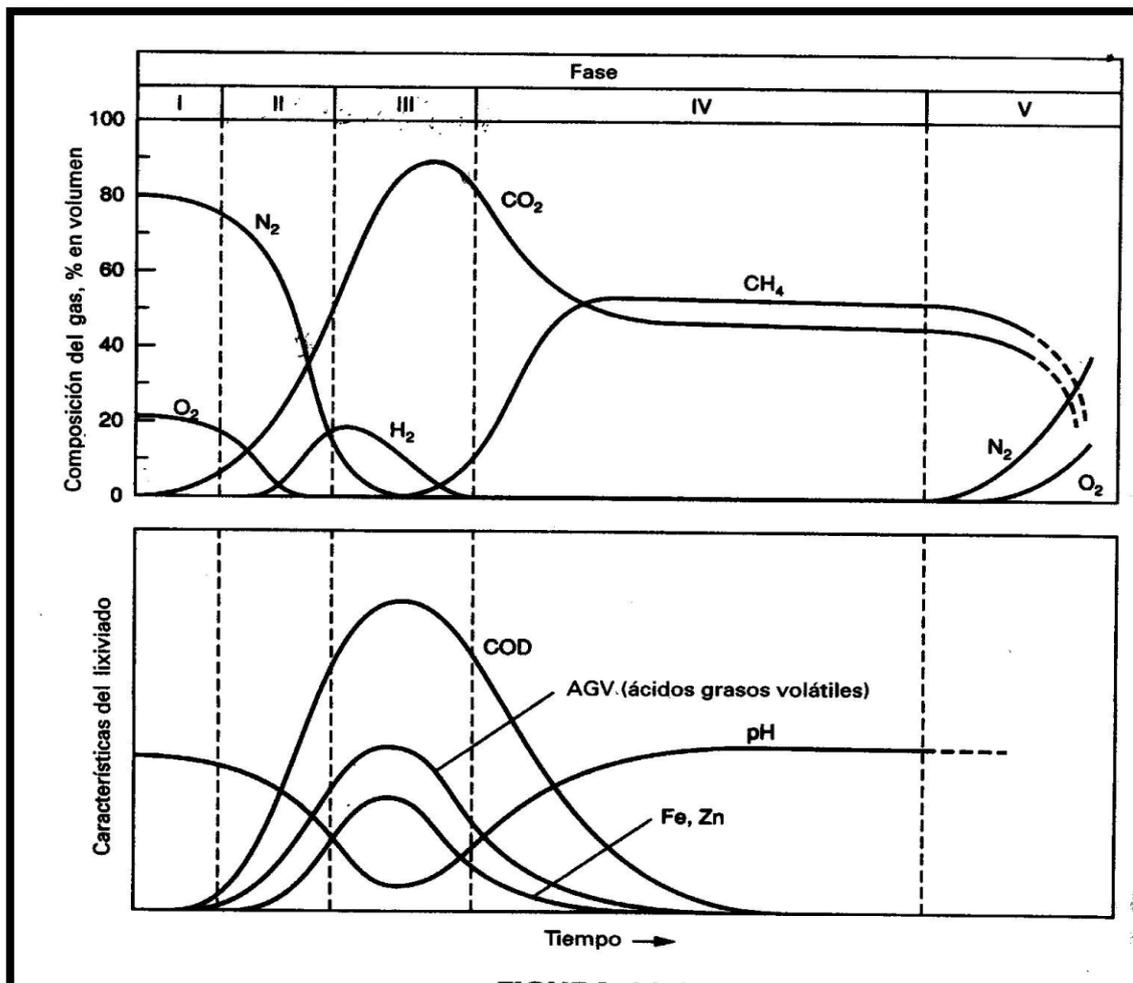
**Figura 5: Fases de Produção de Biogás (adaptado revista agroenergia da biomassa residual)**



Fonte: Bley Jr. (2009)

Tchobanoglous *et al.* (1994) descrevem a digestão dos resíduos sólidos em cinco fases, ou quatro se for desconsiderada a segunda, por ser uma fase de transição. Como se observa na Figura 6 há produção de gases e líquidos lixiviados, com características bem peculiares a cada fase:

Figura 6: Fases de Digestão de Resíduos Sólidos em Aterros Sanitários



Fonte: Tchobanoglous *et al.* (1994)

Na Fase I (ajuste inicial), os resíduos são depositados no aterro e sua fração biodegradável sofre a decomposição biológica em condições aeróbias. A fonte principal de microrganismos é o solo empregado na cobertura diária e final e/ou o lodo de estações de tratamento, depositado em alguns aterros, e a recirculação do chorume. Esta fase, em que a decomposição é aeróbia, se estende por um período de poucos dias após a execução da camada de cobertura, diminuindo a presença de oxigênio.

Na Fase II (transição), decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. Enquanto o aterro é convertido em anaeróbio, o nitrato e o sulfato, que podem servir como receptores de elétrons em reações de conversão biológica, frequentemente são reduzidos a gás nitrogênio e sulfeto de hidrogênio. Os microrganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material

orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase o pH do chorume começa a cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$  dentro do aterro.

A Fase III (ácida) antecede a formação de metano e envolve a conversão microbiológica dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários com baixa massa molecular, como o ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante a fase III. Também serão produzidas quantidades menores de hidrogênio. Os microrganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias e facultativas. A DBO, DQO e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. O pH do chorume é muito baixo (4-5), devido à presença de ácidos orgânicos e pelas elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$  dentro do aterro. Também devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados.

Na Fase IV (metanogênica) predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase ascenderá a valores na faixa de 6,8 a 8,0 e as concentrações de DBO e DQO e o valor da condutividade do chorume reduzem. Menos constituintes inorgânicos permanecerão dissolvidos, tendo como consequência a redução da concentração de metais pesados no chorume.

Na Fase V (maturação) a umidade continua migrando pela massa de lixo e porções de material biodegradável até então não disponíveis acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

## 2.4 Tipos de Biorreatores

A aplicação do processo da digestão anaeróbia passa pela escolha de um tipo de reator adequado ao tratamento de um determinado resíduo. Assim, é necessário conhecer as propriedades físicas e químicas do resíduo a tratar para que se possa ter o melhor rendimento possível no processo (ANASTÁCIO, 2010).

Existem vários tipos de biorreatores, fruto da longa experiência de alguns países, especialmente China e Índia. Os biodigestores são construídos de maneira a isolar entradas de ar dentro dos dispositivos, podendo-se empregar para isso várias formas construtivas, sendo as mais comuns:

### 2.4.1 Biorreator - Lagoas cobertas

Kunz (2010) fala que este modelo de biorreator, também é conhecido como modelo canadense ou da marinha, aproveita a geometria das lagoas anaeróbias de tratamento com a sua cobertura visando a captura do biogás gerado.

Revista Agroenergia Biomassa Residual (2009), descreve esse tipo de biorreator como lagoas escavadas no solo, impermeabilizadas e recobertas com lonas plásticas para isolamento e contenção do biogás. São muito utilizadas no Brasil, pois desempenham melhor sua função em regiões de temperaturas mais altas. São usadas para tratamento de efluentes líquidos geralmente com menos de 2% de sólidos em suspensão. As lagoas cobertas constituem-se na forma menos técnica de biorreator, o que não significa equipamento menos eficiente. Essa característica pode ser determinante quando se depara com a necessidade de eleger qual seria o modelo mais adequado para atividades com menos recursos disponíveis para investimentos. Outro aspecto relevante é que para atender ao tempo de detenção do efluente no interior do biodigestor, a forma “lagoas cobertas” demanda grande disponibilidade de área para ser instalada.

Estes biorreatores tiveram um grande interesse pela sua utilização nos últimos anos motivado pela evolução na tecnologia de geomembranas. O mercado de créditos de carbono também contribuiu para a popularização de sua utilização, uma vez que captura o biogás que seria emitido pelas lagoas anaeróbias Kunz (2010). A Figura 7, mostra o modelo de lagoa coberta.

**Figura 7: Modelo de reator biológico- Lagoa Coberta**

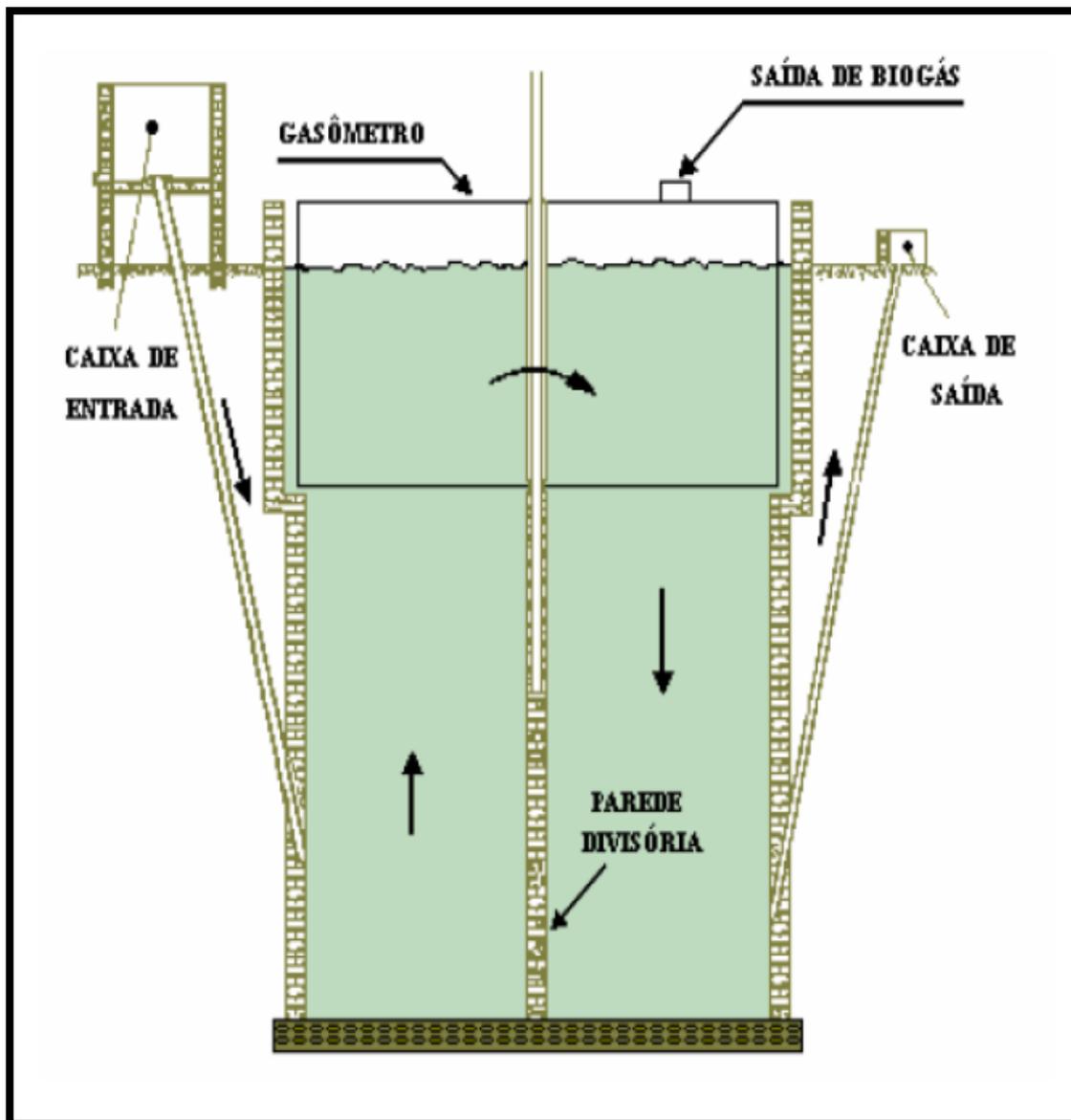


Fonte: PECORA 2006

#### **2.4.2 Biorreator – Indiano**

Possui uma campânula como gasômetro, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. Nesse biodigestor a fermentação é mais rápida, pois aproveita a temperatura do solo, que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias. Já que fica no solo, é imprescindível o cuidado com infiltrações no lençol freático (KUNZ, 2010). A Figura 8, mostra um biorreator Indiano e seu respectivo funcionamento.

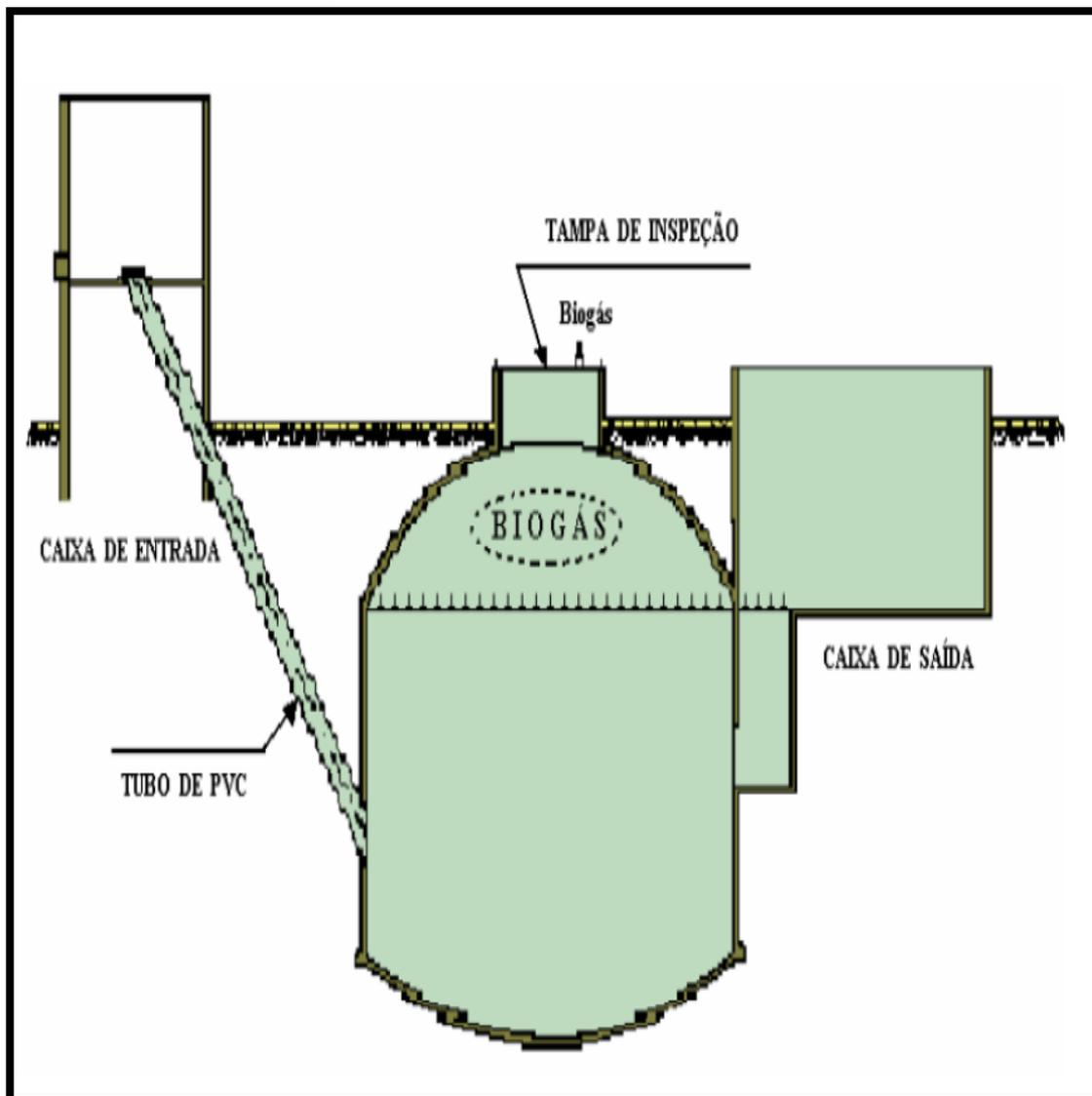
Figura 8: Biorreator Modelo Indiano



Fonte: PECORA (2006)

### 2.4.3 Biorreator - Chinês

É formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação, com teto impermeável, servindo para o armazenamento do biogás. Funciona com base no princípio de prensa hidráulica, ou seja, se houver aumento de pressão em seu interior, devido ao acúmulo de biogás, ocorrerão deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída e, em sentido contrário, se houver descompressão (KUNZ, 2010). A Figura 9 mostra a vista frontal de um biodigestor modelo chinês.

**Figura 9: Biorreator Modelo Chinês**

Fonte: PECORA (2006)

#### 2.4.4 Biorreatores de mistura completa

São tanques em concreto, construídos acima ou abaixo do nível do terreno, com cobertura em lonas plásticas. São utilizados para tratamento de efluentes com altas concentrações de sólidos, entre 3 e 40%. Requerem menos área do que as lagoas (Revista Agroenergia Biomassa Residual – 2009);

## **2.5 Parâmetros Físico-Químicos e a Geração 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 (AIRES 2013).

Melo (2011) salienta que a decomposição da matéria orgânica é um processo complexo e para que ocorra um crescimento das bactérias de forma satisfatória, todos os microrganismos necessitam de condições mínimas para sobrevivência e posterior reprodução. Fontes nutricionais, oxigênio, pH, umidade são alguns exemplos de fatores essenciais para o desenvolvimento bacteriano.

### **2.5.1 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 a 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, além de avaliar o potencial de geração de biogás.

Define-se, então, 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).

### **2.5.2 Potencial hidrogeniônico (pH)**

O pH é usado para expressar o grau ácido/básico de uma solução, ou seja, expressa a concentração de íons hidrogênio e hidroxilas nessa solução. Este parâmetro é muito importante, pois influencia muitas reações químicas e bioquímicas, o que pode afetar várias populações de microrganismos (ALCÂNTARA, 2007); (SILVA, 2011).

Segundo Oliveira (2004) a massa dos resíduos sólidos domiciliares costuma ser ácida, com pH inicial na faixa de 4,5 a 5,5. No processo de bioestabilização desta massa de resíduos, o pH tende a se neutralizar, situando-se entre 7,0 - 8,0. Em função do pH e sua capacidade de crescimento

no meio, os microrganismos podem ser classificados em acidófilos, neutrófilos e basófilos.

Os primeiros microrganismos apresentam crescimento ótimo em pH baixo, enquanto o último a taxa de crescimento ocorre em meios alcalinos. Boa parte dos microrganismos são neutrófilos com crescimento na faixa de pH próximo a 7 (MEIRA, 2009).

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 metanogênica instável: pH na faixa de 6,8 a 7,2
- Fase metanogênica estável: pH na faixa de 7,0 a 7,2

A maioria das bactérias adapta-se a um meio cujo pH ótimo é em torno da neutralidade, pois é o mais adequado para absorção de nutrientes (SILVA E RIBEIRO, 2011).

### **2.5.3 Alcalinidade**

A alcalinidade é a medida de uma propriedade do líquido associada à sua capacidade de tamponamento 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.

#### **2.5.4 Temperatura**

A atividade biológica, ou seja, a atividade enzimática dos microrganismos depende de uma faixa ótima de temperatura. Cada classe de microrganismos tem um intervalo tolerável para sua sobrevivência. As bactérias mesofílicas trabalham em uma temperatura mínima entre 10-15°C, um valor ótimo de 35-38°C e uma temperatura máxima aproximada de 45°C. Já as bactérias termofílicas, trabalham numa temperatura mínima de 35-38°C, um valor ótimo de 50-55°C e temperatura máxima de 70-75°C. A faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30°C a 40°C, sendo que temperaturas abaixo dos 15°C propiciam severas limitações para a atividade metanogênica.

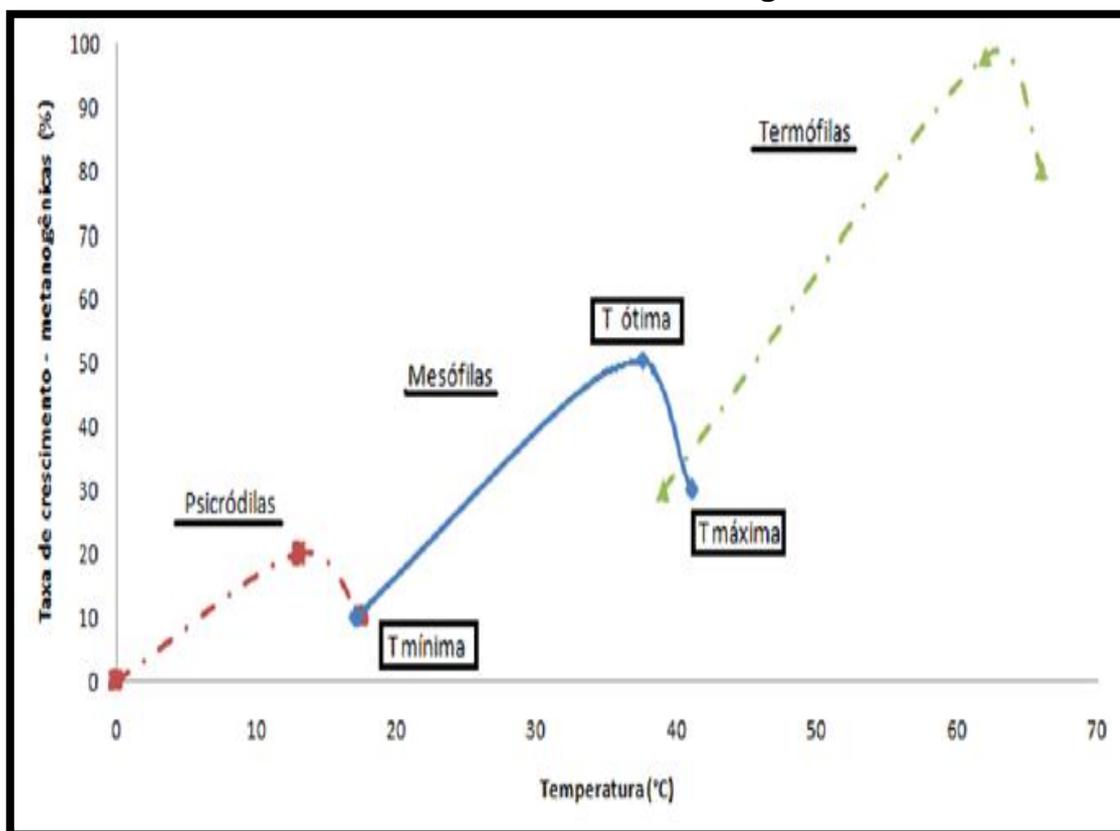
A termodinâmica das reações bioquímicas também é afetada fortemente pela temperatura, alterando as taxas das reações químicas enzimáticas e a própria difusão na massa de resíduos. Comumente observa-se crescimento das taxas de reações com o aumento de temperatura até atingirem um máximo, a partir do qual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

À medida que se aumenta a temperatura também se tem um incremento na produção de biogás (Figura 10). Em regiões com grande amplitude térmica a produção de biogás pode ser comprometida e a temperaturas de biomassa

muito baixa pode até mesmo cessar. Daí a importância de se estudar a pertinência do controle da temperatura da biomassa para garantir a uniformidade da geração de biogás (KUNS, 2009).

**Figura 10: Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de bactérias metanogênicas**



Fonte: Chernicharo (2007)

### 2.5.5 Teor de Umidade

A umidade exerce papel importante na metanogênese de aterros sanitários, pois além de suprir as necessidades dos microrganismos através da mobilização de nutrientes e substratos, possibilita o transporte de enzimas e microrganismos 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).

Segundo Lima (2004) o teor de umidade, que representa a quantidade de água contida na massa de lixo, é um dado importante para a escolha do sistema de tratamento e aquisição de equipamentos de coleta. Este teor

presente no lixo depende diretamente das condições meteorológicas e varia de um lugar para outro.

Os microrganismos dependem de um meio aquoso para se desenvolverem. De acordo com (PALMISANO e BARLAZ, 1996), a água dilui nutrientes requeridos pelos microrganismos, além de possibilitar sua rápida percolação/lixiviação no meio sólido. Esta também possibilita o transporte de enzimas e outros metabólitos importantes no processo de decomposição. Alguns autores sugerem que o teor de umidade e o teor de matéria orgânica constantes do lixo fornecem os pré-requisitos necessários à fase inicial do crescimento bacteriano.

A quantidade de água infiltrada pode prejudicar a degradação elevando o teor de umidade no interior da massa de lixo. A faixa ótima de umidade para a degradação biológica está entre 20-40%, sendo que valores fora desta faixa podem desestabilizar a célula de lixo (PALMISANO e BARLAZ, 1996). Alguns autores afirmam que o aumento do teor de umidade em uma massa de lixo contribui para um aumento da velocidade de degradação. Entretanto, aumentando a velocidade do fluxo de água sem variar o teor de umidade aumenta também a geração de metano.

#### **2.5.6 Sólidos Voláteis**

De acordo com (PALMISANO e BARLAZ, 1996), é através da determinação dos sólidos voláteis que se determina a porcentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existentes nos resíduos sólidos. 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 lixo depositada em aterro. 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 (PALMISANO e BARLAZ, 1996).

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 METODOLOGIA**

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

O projeto foi desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande, localizada na mesorregião Agreste do Estado da Paraíba, em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral, Campina Grande.

Essa pesquisa faz parte de um grande projeto intitulado de “Implantação de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Estudo para Estimar a Potencialidade de Geração de Biogás em Biorreatores para Escola de Ensino Médio Severino Cabral em Campina Grande-PB”, esse projeto é financiado pelo CNPq/Vale realizada pelo Grupo de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (GGA/UFCG) no qual uma equipe de professores, doutorandos, mestrandos, alunos de graduação, iniciação científica e voluntários participam. O projeto gera vários outros trabalhos ainda mais específicos

Todas as análises foram realizadas nos laboratórios de Geotecnia Ambiental e Saneamento no departamento de Engenharia Civil, os trabalhos foram desenvolvidos na UFCG, no que se refere à aquisição de dados como análises físico-químicas, microbiológicas e gases bem como a implantação dos biorreatores de bancada.

#### **3.2 Procedimento experimental**

O procedimento experimental que foi utilizado nesta pesquisa constituiu das etapas de construção dos biorreatores de bancada, instrumentação, testes e ajustes, composição volumétrica e gravimétrica dos resíduos, enchimentos, monitoramento e coleta de amostras de resíduos orgânicos e gases dos biorreatores e análise dos resultados.

A Figura 11 mostra as etapas do desenvolvimento da pesquisa, desde a construção dos biorreatores até a análise dos resultados obtidos.

**Figura 11: Etapas do desenvolvimento da pesquisa**

### 3.3 Construção e Instrumentação dos Biorreatores

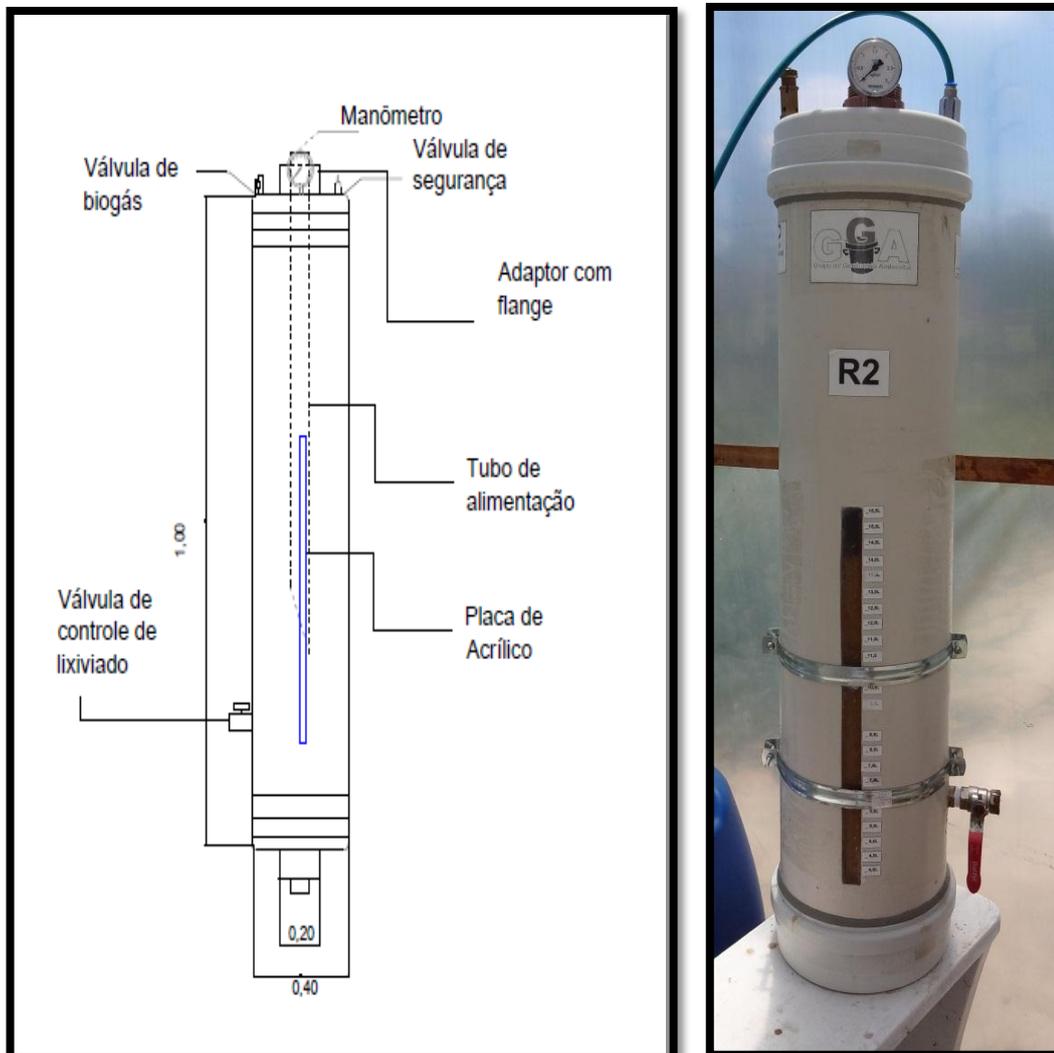
Foram confeccionados dois biorreatores de bancada com formato cilíndrico com seção transversal circular de tubos de PVC (Figura 12).

Os Biorreatores foram confeccionados com dimensões de 0,90m de altura e 0,2m de diâmetro interno, com um volume de 0,03m<sup>3</sup>. Esse formato em estrutura cilíndrica rígida com seção transversal circular facilita a distribuição dos resíduos no seu interior e as pressões laterais na parede interna dos biorreatores.

Para o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios o sistema foi isolado hermeticamente com o uso de dois *caps* nas extremidades superior e inferior dos biorreatores de bancada (Figura 12). No *cap* superior, foi introduzido um manômetro de 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>; uma válvula de segurança; uma válvula para saída do biogás, que foi utilizada durante as leituras das concentrações dos gases. E, para diminuir a entrada de ar durante a realimentação dos biorreatores, foi inserido um adaptador com flange, acoplada

a um tubo de 0,04m de diâmetro e altura 0,70m, por onde os resíduos sólidos orgânicos e o inóculo (esterco bovino) a 15% foram adicionados.

**Figura 12: Esquema geral dos biorreatores de bancada utilizados na pesquisa**



Na lateral de cada tubo foi inserida uma válvula de esfera para retirada das amostras, e na parte frontal de um dos reatores, colocou-se uma placa de acrílico transparente, para observar o nível do líquido presente nos biorreatores de bancada.

### 3.3.1 Materiais, equipamentos e utensílios

Os biorreatores foram construídos com os materiais apresentados no Quadro 4:

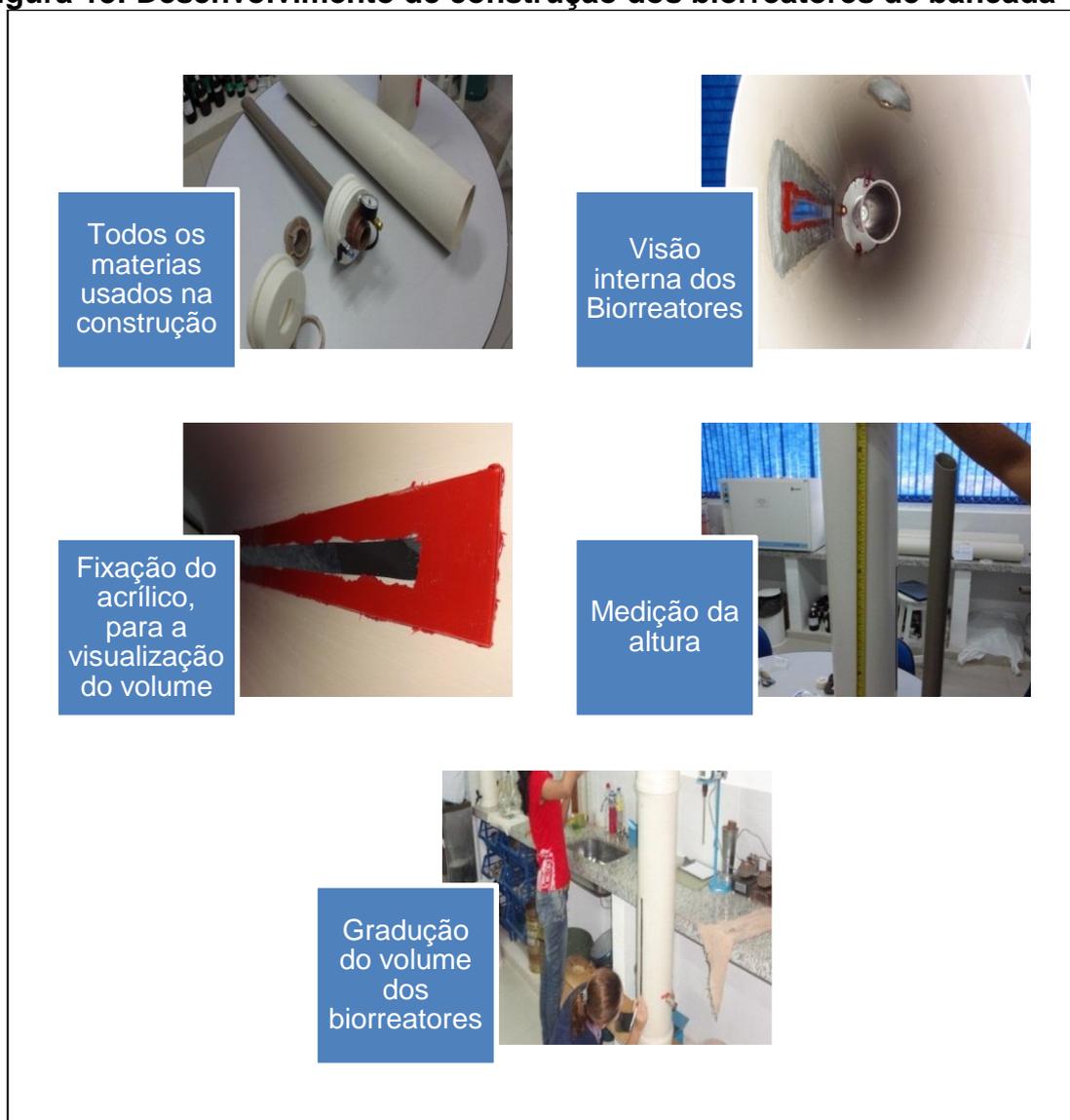
**Quadro 4: Principais materiais dos biorreatores e monitoramento de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos**

Material	Descrição	Função
<b>A</b> 	Tubo PVC de 0,200 m de diâmetro	Confinar os RSU para monitoramento.
<b>B</b> 	Tubo de PVC de 0,040m de diâmetro	Permitirá a adição de amostras e insumos, com menor entrada de oxigênio para o meio.
<b>C</b> 	Adaptador com flange para caixa água	Acoplado ao tubo de alimentação
<b>D</b> 	Plug PVC Roscável	Acoplado ao adaptador com flange para isolar do meio externo
<b>E</b> 	Válvula de Segurança	Aliviar a pressão nos tubos para evitar o rompimento.
<b>F</b> 	Manômetro	Utilizado para aferir a pressão em cada biorreator.
<b>G</b> 	Torneira F/F mini do tipo Válvulas Esfera (Tipo Italiana)	Torneira acoplado em cada biorreator para coleta do Biogás
<b>H</b> 	Válvula de Esfera	Utilizada para retirada das amostras de resíduos para análises

### 3.3.2 Construção dos biorreatores

A Figura 13 mostra em partes o desenvolvimento de construção dos biorreatores de bancada.

**Figura 13: Desenvolvimento de construção dos biorreatores de bancada**



### 3.4 Caracterização dos resíduos

Antes do enchimento dos biorreatores foi realizada a caracterização físico-química e microbiológica.

#### 3.4.1 Composição gravimétrica

A composição gravimétrica para este estudo foi baseada na metodologia de Lipor (2000) com adaptações de Leite (2008) e Pereira *et.al.* (2010). Para a

determinação da composição gravimétrica foram utilizados recipientes de aproximadamente 65 Litros e preenchidos com resíduos, previamente separados na triagem (Figura 14). Primeiramente, os resíduos sólidos urbanos (RSU) foram dispostos em uma lona plástica. Em seguida, realizou-se a triagem do material disposto na lona plástica. Estes materiais foram separados de acordo as seguintes categorias: papel, papelão, plástico, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários, matéria orgânica e outros. Posteriormente à triagem, o material já separado por categorias foi pesado em uma balança, para se determinar o percentual de cada componente presente nos resíduos através da determinação da massa destes em relação à massa total.

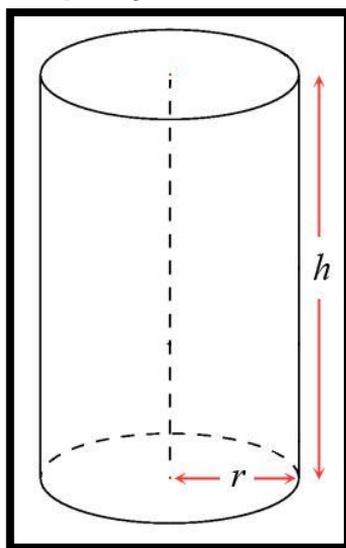
**Figura 14: Determinação da composição gravimétrica**



### 3.4.2 Composição volumétrica

A metodologia para a composição volumétrica dos resíduos sólidos foi baseada de acordo com Catapreta e Simões (2008). Esse procedimento foi realizado após a caracterização gravimétrica, no qual, depois da pesagem mediu-se o volume dos resíduos soltos e compactados que estavam dispostos no recipiente. Vale destacar que o recipiente utilizado para se determinar a gravimetria e a volumetria foi cilíndrico (Figura 15).

**Figura 15: Esquema do recipiente utilizado para a realização da composição volumétrica**



O volume dos recipientes foi obtido através das medidas do diâmetro e da altura (Equação 1), que foi obtida com o auxílio de uma trena métrica

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad Eq (1)$$

Onde:

- V: Volume dos resíduos soltos
- h: Altura do recipiente;
- r: Raio do recipiente.

Para se determinar o volume dos resíduos soltos, simplesmente mediu-se o volume destes após a determinação da gravimetria. Posteriormente, os resíduos foram compactados com um soquete manual confeccionado pelo GGA para se determinar a volumetria dos resíduos, agora, compactados. O soquete foi confeccionado em concreto no molde do recipiente plástico utilizado, possuindo uma área de aproximadamente 0,580m<sup>2</sup>, volume 0,0871m<sup>3</sup> e peso 50kg. A Figura 16 mostra a sequência da obtenção da composição e

volumétrica solta e volumétrica compactada dos resíduos provenientes da escola.

**Figura 16: (A) Composição Volumétrica dos resíduos, (B) Compactação dos resíduos, (C) resíduos compactados e (D) medição da altura dos resíduos**



### 3.5 Trituração da matéria orgânica

Após o processo de caracterização dos RSU provenientes da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral, foi retirada uma amostra de

matéria orgânica, onde foi submetida às operações de trituração, diluição e caracterizações microbiológicas e físico-químicas. Para trituração dos resíduos, utilizou-se um triturador de resíduos orgânicos TR 200 (Figura 17B), o que proporcionou uma maior homogeneização da amostra de resíduos orgânicos. Vale salientar que a trituração promove uma redução do tamanho das partículas, tornando a matéria orgânica apropriada e mais homogênea para aceleração da digestão anaeróbia (Gunaseelan, 1997).

**Figura 17: (A) Resíduos orgânicos, (B) triturador de resíduos orgânicos TR 200, (C) trituração dos resíduos orgânicos, (D) aparência dos resíduos triturados**



### 3.6 Enchimentos dos Biorreatores de Bancada

Após o processo de trituração dos resíduos orgânicos, retirou-se uma amostra de 25 Kg desse material (Figura 18A), e adicionou-se 14L de água destilada, para estabelecer condições de umidade iniciais para cada biorreator. Em seguida, a amostra foi submetida à adição de 3,750Kg de esterco bovino (inóculo) (Figura 18B), o que corresponde a 15% da massa de resíduos, considerada ideal para o melhor desempenho de biorreatores (LOPES et al, 2003).

Deve-se salientar que esterco bovino é um inóculo em potencial já que os microrganismos metanogênicos representam cerca de 40% de sua microfauna (Pramod *et al*, 2011). Além disso, é um resíduo das indústrias de laticínios, que pode ser adquirido sem custo algum ou muito baixo. O esterco (Figura 18B) foi coletado no Distrito de Ribeira, Cabaceiras – PB, e armazenado em saco plástico em temperatura ambiente até a sua utilização como inóculo.

Os estercos foram coletados em dois momentos distintos. A primeira coleta, para primeira batelada foi realizada um dia anterior a caracterização e inoculação nos resíduos orgânicos. A segunda coleta foi realizada 15 dias antes do enchimento do biorreator 2.

Posteriormente, retirou-se 15L da mistura (matéria orgânica triturada + esterco + água) (Figura 18C) e procedeu-se o enchimento de cada biorreator com uma ajuda de um funil de plástico (Figura 18 D).

Destaca-se que imediatamente antes de se preencher os biorreatores com a mistura, efetuava-se a medição de pH.

Figura 18: (A) Amostra de matéria orgânica triturada, (B) esterco bovino (inóculo), (C) mistura dos resíduos (matéria orgânica + esterco + água) e (D) enchimento dos biorreatores



### 3.7 Construção da Estufa

Com o intuito de aumentar a temperatura interna dos biorreatores, construiu-se uma estufa de madeira revestida com filme plástico extra longa vida, 150 micras de espessura, contendo aditivos anti-UV (Figura 19).

Em dias de alta incidência, a estufa apresentava diferenças de até 15°C em relação à temperatura externa, o que promovia também um aumento na temperatura da mistura de resíduos contida dentro dos biorreatores, favorecendo o processo de degradação dos resíduos pelos microrganismos.

**Figura 19: Construção em sequencia da estufa para aumento da temperatura interna dos biorreatores**



A estufa não só promove o aumento de temperatura durante o dia, mas evita a perda rápida de calor durante a noite.

### **3.8 Monitoramento dos biorreatores**

Após o enchimento dos biorreatores de bancada com os resíduos orgânicos, iniciou-se a fase de monitoramento, onde se objetivou analisar a evolução temporal do processo de degradação destes resíduos e a concentração de gases. Estes dados foram obtidos através da instrumentação inserida nos biorreatores de bancada, que permitiu a coleta das amostras para

a determinação de parâmetros, físicos, físico-químicos, microbiológicos, toxicidade, e dos gases, com medições *in situ* e através de sacos coletores.

### 3.8.1 Coleta das amostras semi-sólidas

Para coletar amostras, inicialmente, era promovida uma agitação dos biorreatores de forma lenta para evitar a ruptura das células bacterianas e, também, obter uma mistura homogênea, em seguida abria-se a válvula de esfera na lateral dos biorreatores e, então, retirava-se uma amostra de aproximadamente 250mL (Figura 20). Estas amostras eram encaminhadas para o laboratório de Geotecnia Ambiental para realização das análises físicas, físico-químicas, microbiológicas e toxicidade.

A coleta de amostras de resíduos orgânicos era realizada quinzenalmente.

**Figura 20: Coleta das amostras**



### 3.8.2 Análises *in situ* e laboratoriais

Foram realizadas as seguintes análises:

- **Análises físicas:** teor de umidade.
- **Análises físico-químicas:** pH, sólidos voláteis, ácidos voláteis, alcalinidade, amônia.

- **Análises dos gases:** Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Oxigênio (O<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Monóxido de Carbono (CO) e Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S).

### 3.8.3 Parâmetros físicos

As análises físicas dos resíduos orgânicos objetivou auxiliar nos estudos sobre as interferências dos fatores ambientais e operacionais na produção de biogás no interior dos biorreatores de bancada. As metodologias utilizadas para determinação da caracterização física dos resíduos estão descritas no Quadro 5, referente à etapa de monitoramento. As análises foram realizadas *in situ* e no laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Campina Grande.

**Quadro 5: Parâmetros físicos avaliados nos biorreatores**

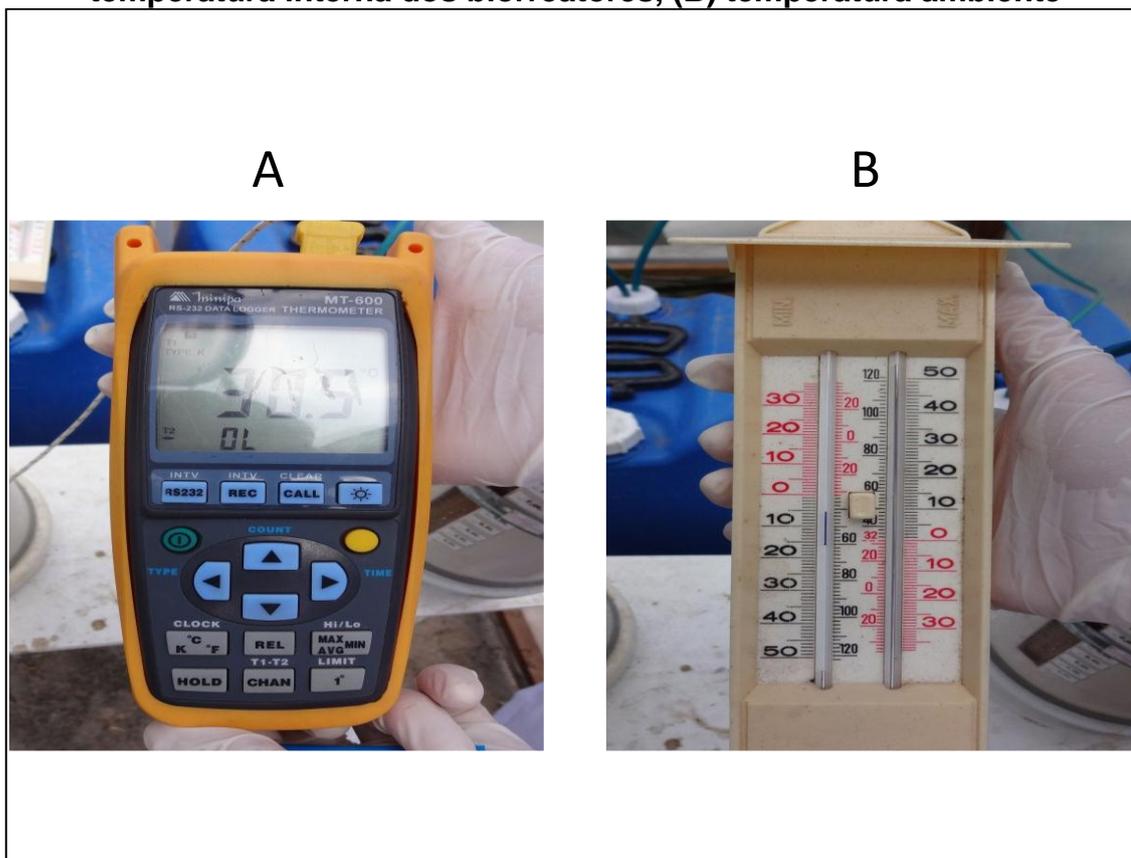
Parâmetros	Métodos
Teor de Umidade	NBR 6457 (ABNT, 1986a); Manassero <i>et al.</i> (1996)
Temperatura	Metodologia própria

#### 3.8.3.1 Temperatura

O monitoramento da temperatura no interior dos biorreatores foram realizados *in situ* com o auxílio de um termômetro conectado a 1 termopar instalado na parte inferior de cada biorreator.

Para medição foi utilizado um termômetro digital MT-600 com precisão de leitura de aproximadamente 0,1% e a ele foi conectado os termopares, que consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma uma corrente elétrica proporcional à temperatura. E para monitorar a temperatura ambiente, ou seja, a temperatura dentro da estufa, utilizou-se um termômetro de mercúrio - 016116. A Figura 21 mostra os termômetros utilizados nesta pesquisa.

**Figura 21: Termômetros utilizados na medição das temperaturas: (A) temperatura interna dos biorreatores, (B) temperatura ambiente**



### 3.8.3.2 Teor de umidade

O monitoramento do teor de umidade nos resíduos orgânicos foi realizado conforme metodologia de Manassero *et al.* (1996), pelo método da base úmida. Para isso, 10g da amostra dos resíduos orgânicos foram pesadas, em balança digital (Figura 22), e encaminhadas para secagem em estufa a 60°C por um período de 24 horas.

Após esse período foi feita a pesagem do material seco e então determinada a umidade da amostra de resíduos. Assim, o teor de umidade foi expresso pela quantidade de água perdida durante o processo de secagem. Os cálculos para determinação do teor de umidade foram expressos pela Equação 2.

$$T = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{Eq (2)}$$

Onde:

- T: Teor de Umidade (%);
- Pi: peso inicial (g);
- Pf: peso final (g).

**Figura 22: Amostras para determinação do teor de umidade**



### 3.8.4 Parâmetros físico-químicos

As análises físico-químicas indicam a evolução do processo degradativo da massa de resíduos e conseqüentemente a concentração de biogás no interior dos biorreatores de bancada. Para as análises laboratoriais dos resíduos orgânicos, durante a fase de execução foram realizadas adaptações nas metodologias utilizadas em outras áreas do conhecimento. Os parâmetros abordados neste trabalho estão apresentados no Quadro 6 e suas

metodologias estão detalhadas a seguir. Todas estas análises foram realizadas no laboratório Geotecnia. As análises físico-químicas foram realizadas antes do preenchimento dos biorreatores de bancada e durante o processo de biodegradação dos resíduos orgânicos.

**Quadro 6: Parâmetros físico – químicos avaliados nos biorreatores**

Parâmetros	Métodos
pH, Alcalinidade Total, Cloretos, Ácidos Voláteis	Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 1998) Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias (Silva & Oliveira, 2001).
Sólidos Voláteis	Who (1979)

#### 3.8.4.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um parâmetro que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio. A determinação do pH foi realizada com a utilização de um potenciômetro e eletrodos (Figura 23). O princípio da medição eletrométrica do pH foi 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 (APHA, 2005).

Para realização do ensaio adicionou-se em um béquer 25 ml da amostra de resíduos sólidos contida nos biorreatores, agitando-a levemente com o auxílio de um agitador magnético. Em seguida introduziu-se o eletrodo nessa amostra e, quando estabelecido o equilíbrio, fez-se a leitura do pH.

**Figura 23: Determinação do pH**

#### 3.8.4.2 Alcalinidade total

A alcalinidade total foi determinada segundo a metodologia do Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 2005). Anotado o valor do pH foi adicionado à amostra de resíduos orgânicos, ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de normalidade 0,1N (diluição de 2,8ml de ácido sulfídrico para 1l de água destilada) sob discreta agitação até atingir  $\text{pH} = 4,0$ , depois de estabilizado anotou-se o volume de ácido gasto na titulação. A Equação 3 foi utilizada para o cálculo da alcalinidade total.

$$AT = \frac{(N \times V_{\text{ácido}} \times 50000)}{VA} \quad \text{Eq (3)}$$

Onde:

- AT: alcalinidade total (mgCaCO<sub>3</sub>/l);
- V<sub>ácido</sub>: volume de ácido sulfídrico gasto na titulação (ml);
- VA: volume da amostra (ml);
- N: normalidade do titulante.

### 3.8.4.3 Ácidos voláteis

Os ácidos voláteis foram determinados utilizando-se a metodologia do Standard Methods (APHA, 2005), na qual se calibrou o pH da amostra de resíduos orgânicos para 3,0 e em levadas à fervura até reduzir o seu volume à metade (Figura 24). 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).

$$AV = \frac{N \times VT}{VA} \times 60000 \quad \text{Eq (4)}$$

Onde:

- AV = ácidos voláteis (mgHAC/L);
- VT = volume de NaOH gasto na titulação (mL);
- VA = volume da amostra (mL);
- N =normalidade do NaOH (N).

**Figura 24: Amostras da determinação de ácidos voláteis**



#### **3.8.4.4 Sólidos Voláteis**

O teor de matéria orgânica é dado pela percentagem de massa perdida durante a calcinação em relação a massa total original.

Uma quantidade representativa de resíduos orgânicos foi pesada em uma balança digital, em capsulas de porcelana, e em seguida levadas a estufa a uma temperatura de 65°C por 24 horas. Após este tempo, as amostras de resíduos foram calcinadas, ou seja, foram acondicionadas na mufla até atingir gradativamente 550 °C por no mínimo duas horas, em seguida as amostras foram resfriadas em um dessecador, logo após a este resfriamento estas cápsulas foram pesadas em balança analítica e por diferença do peso foi determinado o teor de sólidos voláteis das amostras de resíduos conforme a Equação (5).

$$\% \mathbf{SV} = \frac{\mathbf{Pi-Pf}}{\mathbf{Pi}} \times \mathbf{100} \quad \text{Eq (5)}$$

Em que:

- SV= Sólidos Voláteis (%);
- Pi = peso inicial (g);
- Pf = peso final (g).

#### 3.8.4.5 Nitrogênio Amoniacal

Adicionou-se 50 ml da amostra de resíduos orgânicos diluído em um tubo de digestão juntamente com 3 ml da solução tampão de borato e 3 gotas da solução de NaOH 6 N. A concentração da amônia foi recolhida em um erlenmeyer contendo uma solução de ácido bórico (coloração roxa), à medida que a amostra era destilada, a coloração mudava de roxa para verde. Coletou-se então aproximadamente 40 ml do destilado e titulou-se com ácido sulfúrico 0,02N (a solução na titulação voltou para a cor roxa), e com o volume gasto pode-se a partir da Equação 6 calcular o nitrogênio amoniacal do resíduo.

$$\mathbf{NH3} = \frac{(\mathbf{VL} \times \mathbf{N} \times \mathbf{14000})}{\mathbf{VA}} \quad \text{Eq (6)}$$

Em que:

- VL= volume gasto na titulação com o ácido sulfúrico (ml);
- N= normalidade do titulante;
- VA= volume da amostra (50 ml).

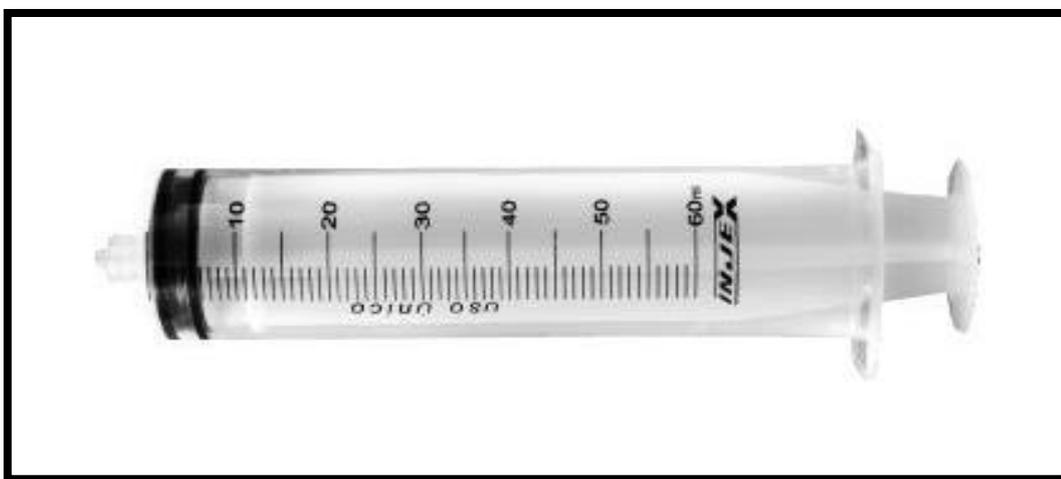
#### 3.8.5 Monitoramento de análise de gases

O monitoramento das concentrações dos gases nos biorreatores de bancada foi realizado através de análises em laboratório e *in situ* através do equipamento DragerX-am 7000 e seu volume através de um aparato de mangueiras e bombonas plásticas.

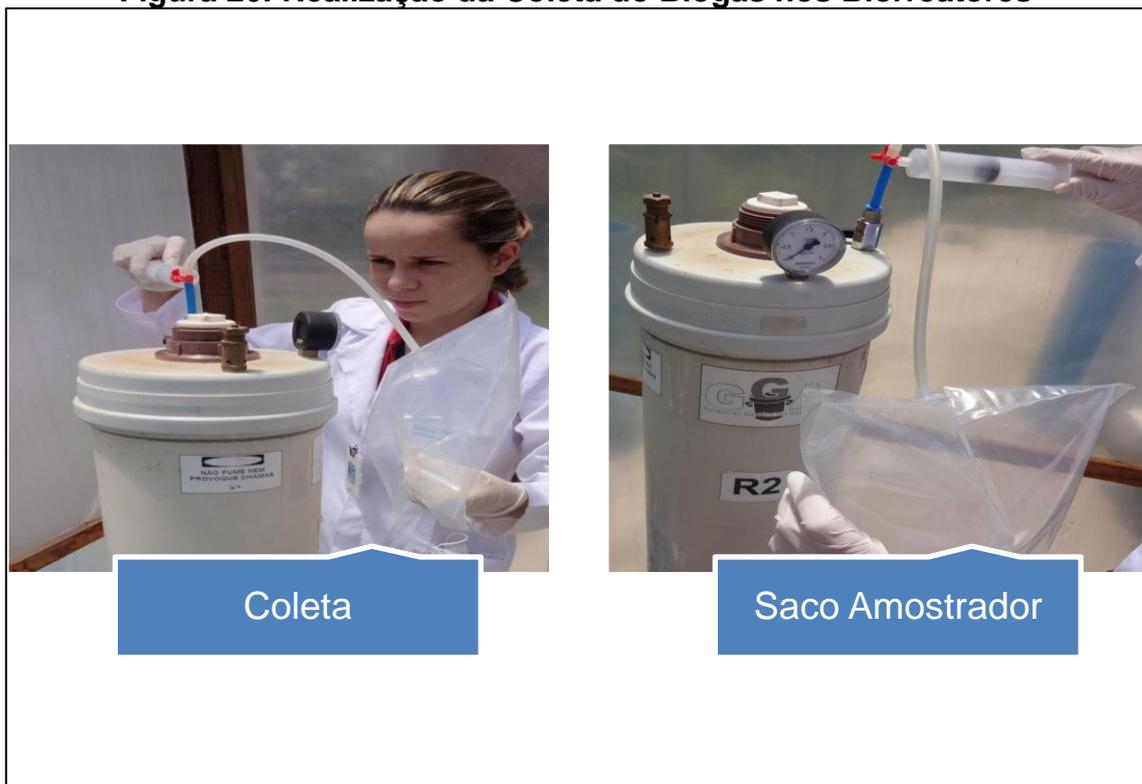
### 3.8.5.1 Monitoramento das concentrações de gases pelo Drager

Inicialmente, a coleta do Biogás era realizada utilizando os seguintes equipamentos: uma válvula de três saídas, uma seringa plástica de 75mm, e um saco amostrador acoplado a outra válvula de três saídas. Do biorreator de bancada projeta-se uma mangueira rígida no qual é coletado o biogás gerado. Uma seringa (Figura 25) é conectada ao saco amostrador através de uma válvula de três saídas (Figura 26), que também é conectada a mangueira rígida do biorreator de bancada.

**Figura 25: Esquema de uma seringa**



A válvula de três saídas permite a coleta do gás para a seringa e depois da seringa para o saco amostrador. Com a válvula na posição aberta juntamente com a seringa, fazia-se movimentos de sucção do biogás para dentro da seringa, mudava-se a posição da válvula aberta da seringa para o saco amostrador e pressionava-se o êmbolo da seringa, empurrando o biogás para o saco amostrador. Depois de o saco amostrador estar preenchido de biogás a válvula de três saídas era travada para evitar a fuga do gás. Esse processo era repetido diversas vezes até que a quantidade de biogás no interior do saco amostrador fosse o suficiente para as análises laboratoriais (Figura 26).

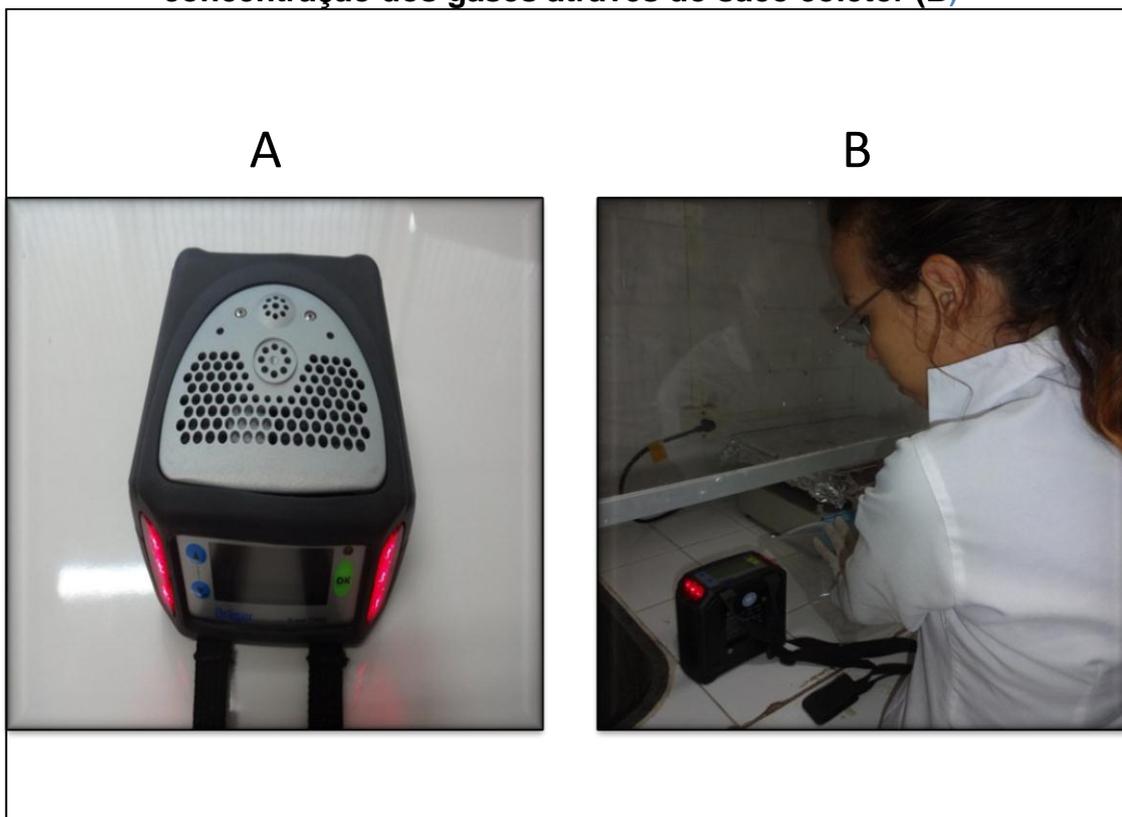
**Figura 26: Realização da Coleta do Biogás nos Biorreatores**

Uma vez que o biogás era succionado e armazenado no saco amostrador, este era transportado até o local de análise. Vale salientar que nos meses iniciais de coleta as leituras das concentrações de biogás eram realizadas na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no Laboratório de Geotecnia Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil.

As leituras da concentração dos gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}$ ) foram realizadas pelo detector portátil e automático de gases com infravermelho Drager modelo X-am 7000 (Figura 27).

O equipamento (Drager) é dotado de uma pequena bomba que faz a sucção do gás do saco amostrador e direciona o fluxo para os sensores de leitura. O procedimento de leitura da concentração consiste em: ligar o aparelho e verificar a calibração.

**Figura 27: Detector portátil de gases DragerX-am 7000 (A), leituras da concentração dos gases através do saco coletor (B)**



Após a aquisição do detector de gases através do Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, as leituras da concentração dos gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}$ ) no interior dos biorreatores de bancada foram realizadas *in situ* (Figura 28), acoplando-se diretamente o aparelho ao biorreator, interligado pelo detector automático de gases com infravermelho do Drager. Portanto, as leituras dos gases foram realizadas através de dois métodos distintos, no que se refere a coleta; um método com o aparato de seringa, válvula de três saídas e saco amostrador para posterior leitura no drager e outro apenas com drager ligado a mangueira rígida do biorreator de bancada.

**Figura 28: Leitura das concentrações dos gases através do equipamento Drager**



O resultado das concentrações obtido pelo método do drager é em torno de 5 minutos, ou até a estabilização das leituras, com as faixas de medição de acordo com o Quadro 7, para esse tipo de equipamento, o que torna as análises viáveis pela praticidade, rapidez e pela margem de erro que é de apenas 5%, além de possibilitar medições *in situ*. É considerado na leitura das concentrações para os gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e CO o maior percentual acusado no equipamento.

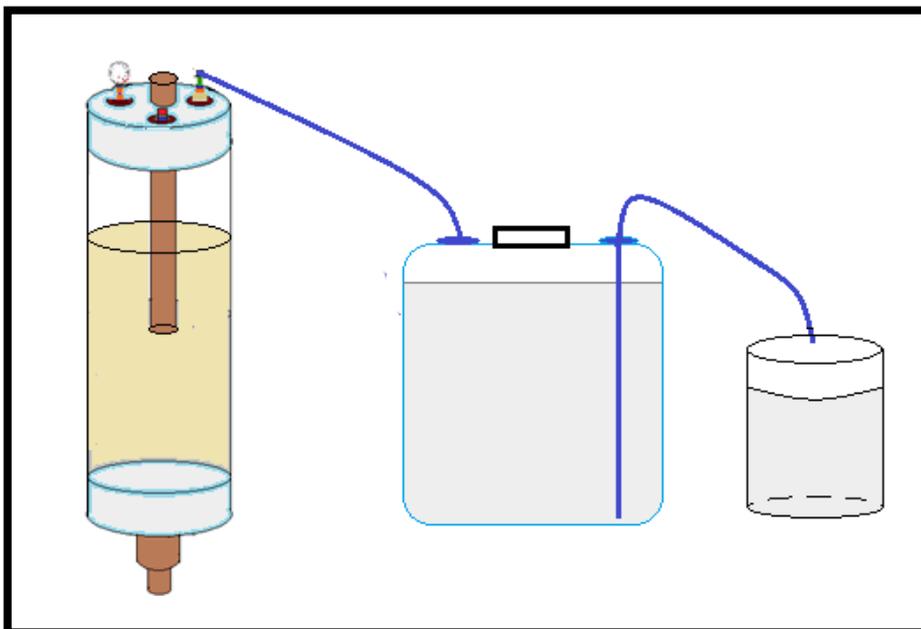
**Quadro 7: Características do equipamento de medição das concentrações dos gases**

Equipamento	Gases	Parâmetro	Faixa de medição
DragerX-am 7000	CO <sub>2</sub>	Concentração	0 – 100%
	CH <sub>4</sub>		0 – 100%
	O <sub>2</sub>		0 – 25%
	CO		0 – 500 ppm
	H <sub>2</sub> S		0 – 500ppm

### 3.8.5.2 Monitoramento do volume do Biogás

O volume de biogás, inicialmente, foi medido através de um aparato de reservatórios (50L) e tubulações (mangueiras de plásticos-tipos) interligado aos biorreatores. O gás produzido no biorreator era encaminhado através das mangueiras para uma bombona (Figura 29) que por sua vez expulsava a água contida neste para um segundo recipiente. Água expulsa era medida em proveta graduada (1000mL) e expressava de forma indireta o volume de biogás produzido nos biorreatores.

**Figura 29: Esquema geral do aparato para medição do volume de biogás**



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

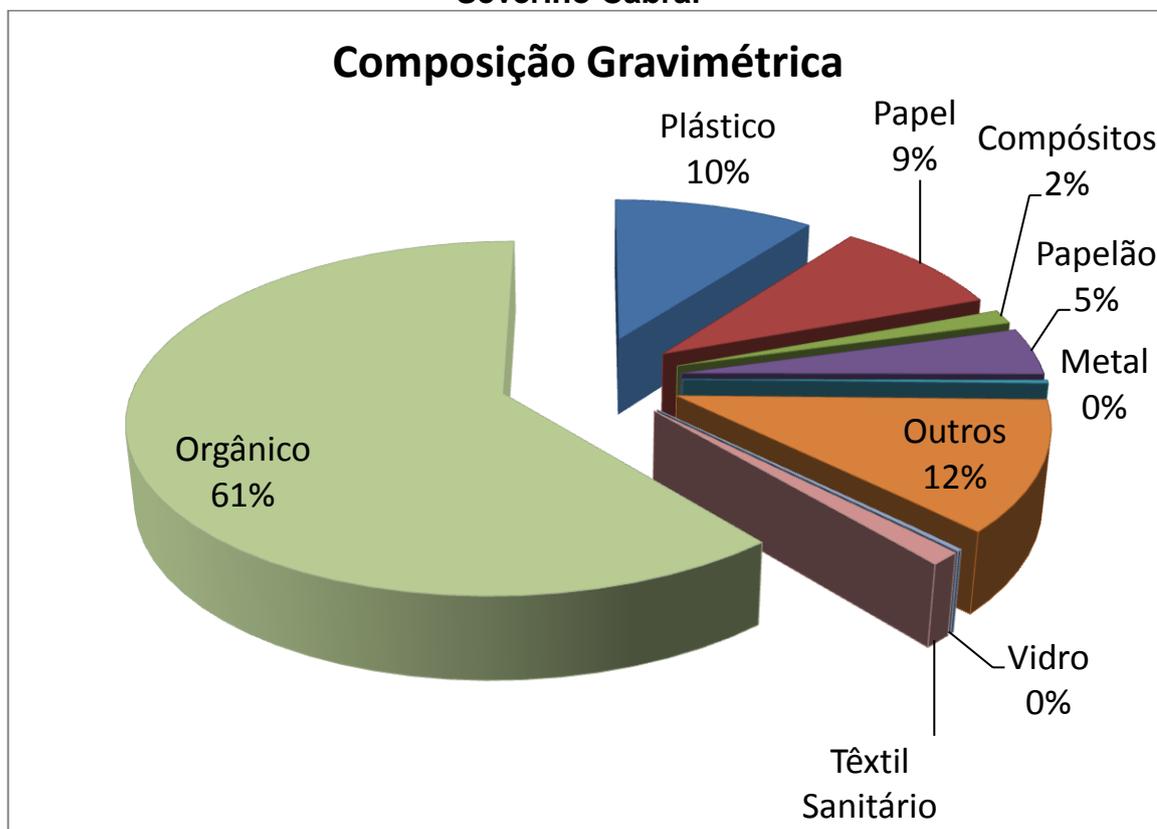
### 4.1 Caracterização e composição dos resíduos sólidos da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral

#### 4.1.1 Composição Gravimétrica

Na composição gravimétrica foi analisado o peso de cada tipo de material em relação ao peso total dos resíduos encontrado na escola durante um período de armazenamento de uma semana em que ela esteve em pleno funcionamento.

A Figura 30 mostra os resultados obtidos em termos de porcentagem e o Quadro 8 nos apresenta o peso de cada material visto na análise. Esse tipo de estudo é bastante interessante e importante na caracterização dos resíduos, com ele é possível verificar quais os tipos de material estão presentes nos RSU e, assim, gerenciar, caso queira, uma destinação mais adequada desses materiais e o quanto eles podem, ainda, serem rentáveis até mesmo a própria escola.

**Figura 30: Composição Gravimétrica da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral**



O Quadro 8 nos mostra que foi armazenado um total de 129,275 Kg de resíduos em apenas uma semana útil, do qual a escola esteve em funcionamento.

**Quadro 8: Resíduo Total e o peso de cada material encontrado na escola**

Tipo	Peso (Kg)
Plástico	13,260
Papel	11,760
Compósitos	1,715
Papelão	5,680
Metal	0,365
Outros	15,615
Vidro	0,235
Têxtil Sanitário	1,565
Orgânico	79,080
Total	129,275

Os estudos da caracterização gravimétrica mostram que há uma grande quantidade de material orgânico presente na análise, sendo responsável por 61% (79,08 Kg) do peso total. Isso se deve basicamente ao funcionamento da escola ser de ensino inovador, no qual os alunos passam a manhã e a tarde na instituição de ensino, inclusive, alimentando-se na própria instituição de ensino. Neste estabelecimento é fornecido almoço e lanche à tarde a todos os alunos, funcionários e professores. Assim, este resultado já era o esperado.

Se for comparado com os resíduos gerados por uma cidade, a quantidade de matéria orgânica é bastante próxima ao encontrado nos aterros, cuja média é de 60%. Segundo Pereira (2010) quanto maior a quantidade de matéria orgânica encontrada, menor o desenvolvimento econômico. Regiões com um poder aquisitivo maiores, tem em seus resíduos uma presença maior de plásticos e papeis. Vale destacar que a quantidade de matéria orgânica encontrada em aterros, sobretudo no Brasil, vem diminuindo. Alguns pesquisadores encontraram valores, para este item, menores que 50%.

A quantidade de matéria orgânica encontrada na escola estudada pode ser aproveitada para fins energéticos que podem ser aproveitados na próprio estabelecimento de ensino.

Iwasaki (2009) diz que para cada quilo de resíduo biodegradável processado pode-se gerar  $0,059\text{m}^3$  de biogás, uma mistura de metano e gás carbônico. Então, pode-se dizer, que apenas a matéria orgânica encontrada na escola pode ter uma produção de aproximadamente  $4,7\text{m}^3$  de biogás a cada semana. Este pesquisador, ainda, relata que para cada  $\text{m}^3$  de biogás formado  $0,55\text{m}^3$  é de metano, portanto a quantidade gerada de metano pela a escola a cada semana é próximo de  $2,7\text{m}^3$ .

Segundo Lindemeyer (2008),  $1\text{m}^3$  de biogás equivale ao uso de  $1,5\text{m}^3$  de gás natural. Assim, ter-se-á uma produção equivalente a  $7,05\text{m}^3$  de gás natural por semana nos biorreatores estudados.

No que se refere a papel a sua composição gravimétrica foi de 9% (11,760 Kg) e de papelão 5% (5,68Kg), perfazendo um total de 14%. Estes resultados foram ligeiramente maiores do que os encontrados nos resíduos sólidos urbanos de Campina Grande-PB (Pereira e Melo, 2010). A Gestão dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande/PB e seus reflexos socioeconômicos, que obtiveram um total de 11,3%.

Os resultados encontrado na Escola estudada para papel e papelão eram já esperado, pois sendo um estabelecimento de ensino, usa-se muito destes materiais. Entretanto, estes percentuais não é ainda mais significativos devido a uma parceria da escola com a companhia de energia elétrica da região (Energisa) onde parte do material reciclável da instituição é repassado para a companhia, que em troca permite um abatimento na conta de energia elétrica.

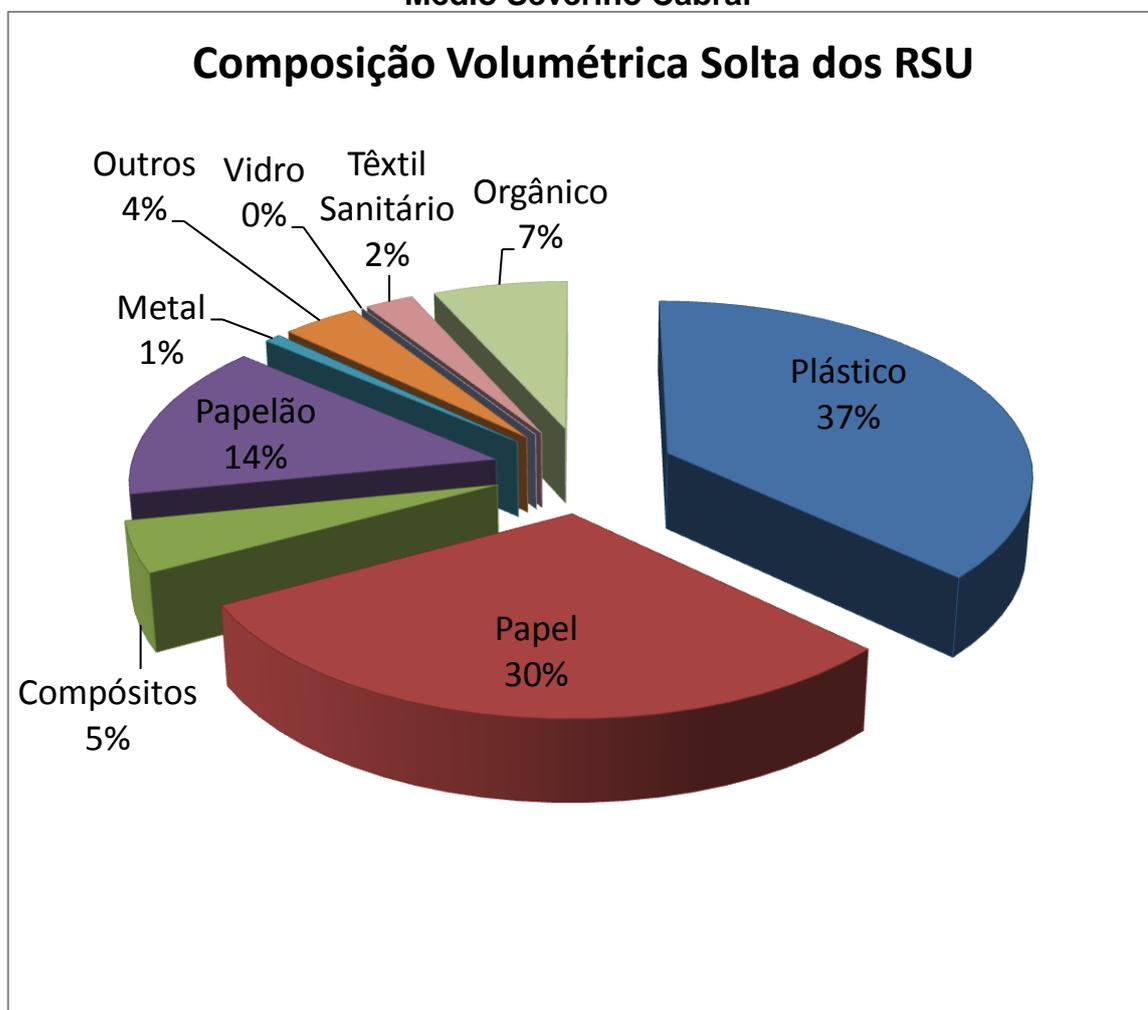
Algo que foi observado também, é a quase total ausência de vidros e metais (Quadro 8). Este tipo de material não é usado com frequência na escola, portanto, os valores encontrados são perfeitamente aceitáveis. Este valores para têxteis sanitários ficou próximo aos trabalhos de Leite (2008) estudando os resíduos da cidade de Campina Grande-PB, contudo, Araújo (2011) já encontrou valores de têxteis sanitários em torno de 4% nos resíduos desta mesma cidade.

#### 4.1.2 Composição Volumétrica

A composição volumétrica dos resíduos foi realizada em duas etapas. A primeira parte para se determinar a volumetria do resíduo solto e a segunda para resíduo compactado. Assim como a composição gravimétrica a volumétrica é importante para se avaliar a gestão e gerenciamento dos resíduos.

A Figura 31 mostra a composição volumétrica solta, em termos percentuais, e o Quadro 9, com seus respectivos valores de cada material e a quantidade de espaço ocupado na unidades de litros (L) e (m<sup>3</sup>) encontrado na pesquisa.

**Figura 31: Composição Volumétrica solta da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral**



**Quadro 9: Espaço total e ocupado de cada material solto encontrado no resíduo da escola**

Tipo	Volume Solto (L)	Volume Solto (m <sup>3</sup> )
Plásticos	485,18	0,485
Papel	393,80	0,393
Compósitos	61,48	0,061
Papelão	189,42	0,189
Metal	10,80	0,010
Outros	49,85	0,049
Vidro	0,00	0,000
Têxtil Sanitário	31,57	0,031
Orgânico	88,06	0,088
Total	1310,16	1,310

O Quadro 9 mostra um volume total de 1310,16L (1,31m<sup>3</sup>) armazenados em uma semana de funcionamento do estabelecimento de ensino.

Segundo a Figura 31, resíduo orgânico ocupa um volume solto de 7%, enquanto na composição gravimétrica a sua massa ocupa um percentual de 61%. Isto é perfeitamente possível, já que os resíduos orgânicos tem uma alta massa específica se comparado ao volume desse material. Contudo, no que se refere aos estudos realizados por Araújo (2011) a volumetria dos resíduos soltos de Campina Grande-PB foi de 38%. Esta discrepância se refere ao fato de os resíduos encontrados na escola serem muito particularizados, ou seja, mais pastosos se comparados aos resíduos de uma forma geral, portanto o seu volume será menor e sua massa maior em termos percentuais.

Papel e papelão quanto a sua composição volumétrica solta nos resíduos da escola estudada foram de 30% e 14% respectivamente. Aires (2013) obteve valores para estes dois itens juntos em torno de 14% para a volumetria solta, valores semelhante foram observados por Melo (2011) e Monteiro (2003) para as cidades de Campina Grande-PB e Recife-PE.

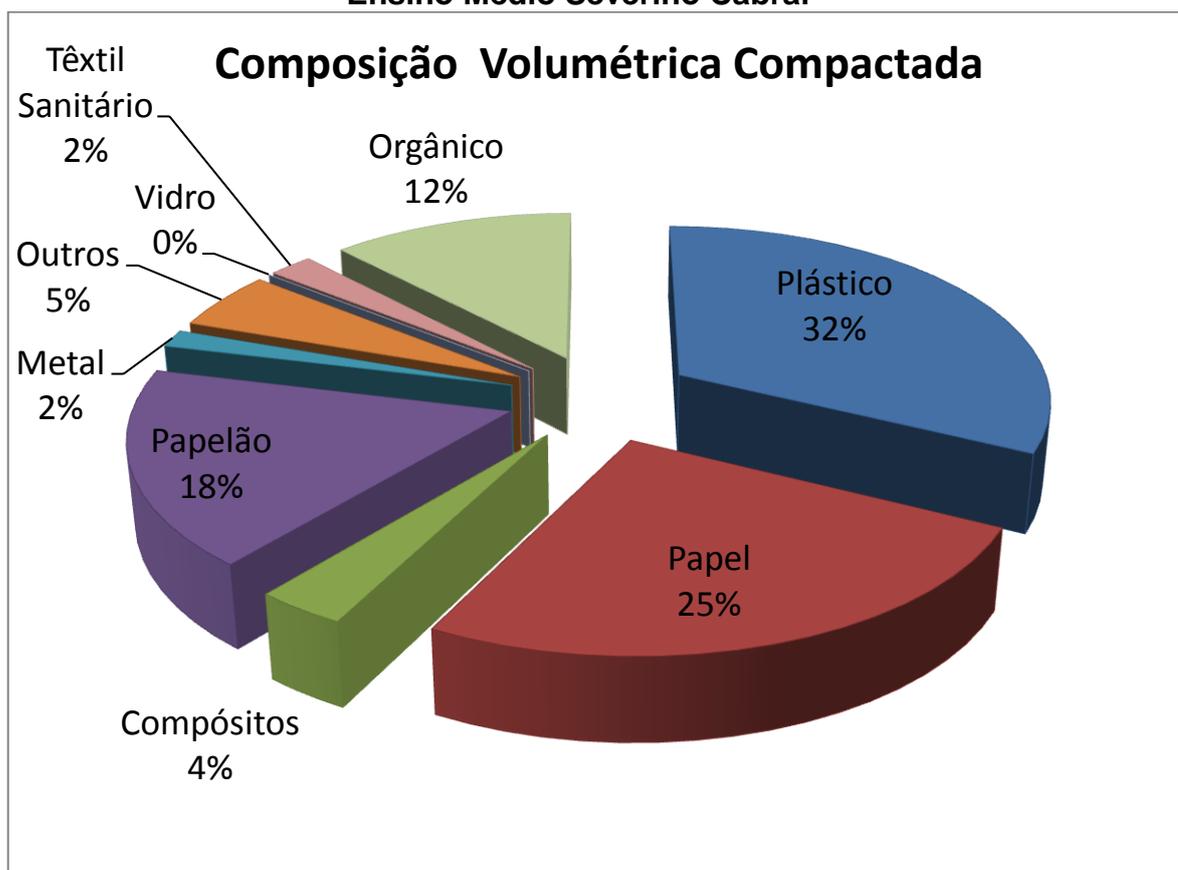
No que se refere ao plástico, este ocupa 37% da volumetria solta. Se for comparado a volumetria dos plásticos da escola com a sua composição gravimétrica, Figura 31, este possui uma massa de apenas 10% (13,260 Kg), porém ocupa 38% do volume total dos resíduos dispostos no estabelecimento de ensino. Estudos realizados por Fucale (2007) o plástico pode funcionar como uma matriz de reforço no interior da massa de resíduos, o que permite uma maior estabilidade de aterros. Contudo, a biodegradação de resíduos pode ser prejudicada, uma vez que a grande quantidade de plástico podem isolar a matéria orgânica a ser degradada em bolsões. Além do mais segundo Melo (2011), os plásticos possuem metais em sua composição, que podem ser difundidos para o interior da massa de resíduos devido ao gradiente de concentrações, temperatura e até fatores como pH e umidade. Portanto, políticas públicas para evitá-los no interior da massa de resíduos devem ser tomadas e, também, incentivar o uso de sacolas biodegradáveis poderia minimizar o impacto ambiental causado por esse resíduo. Ainda, segundo Pereira et al, (2010), o plástico em grandes quantidades nos aterros indicam a mal gestão e gerenciamento dos resíduos pelos órgãos gestores.

Esse tipo de material se não for bem gerenciado pode causar vários tipos de impacto ambiental, além da degradação ser bem lenta e levar vários anos pra ser totalmente absorvido pelo ambiente.

Quanto ao volume dos resíduos compactados, nota-se que estes possuem valores muito semelhantes aos soltos no que se referem aos vidros, metais, compósitos e matéria orgânica (Figura 32 e Quadro 10). Isto já se esperava, pois estes materiais sofrem pouca deformação quando compactados.

Vale destacar que a porcentagem do volume compactado da matéria orgânica em relação ao seu volume solto pouco variou (volumetria solta:  $0,088\text{m}^3$ ; volumetria compactada:  $0,083\text{ m}^3$ ). Mas este resíduo quando compactado ocupou um volume de 12%, portanto, em termos percentuais um ganho de volume em comparação com a volumetria total. Mas isto é possível, pois os outros resíduos diminuíram drasticamente o seu volume quando compactados. Por exemplo, o plástico diminui o seu volume quando compactado pela metade (volumetria solta  $0,485\text{m}^3$  para  $0,221\text{m}^3$ ).

**Figura 32: Composição Volumétrica compactada da Escola Estadual de Ensino Médio Severino Cabral**



**Quadro 10: Espaço total e ocupado de cada material compactado encontrado no resíduo da escola**

Tipo	Volume Compactado (L)	Volume compactado (m <sup>3</sup> )
Plásticos	221,49	0,221
Papel	173,64	0,173
Compostos	23,26	0,023
Papelão	122,13	0,122
Metal	10,80	0,010
Outros	36,55	0,036
Vidro	0,00	0,000
Têxtil Sanitário	14,95	0,014
Orgânico	83,08	0,083
Total	685,90	0,685

Outro material que ganha destaque pelo mesmo motivo que a matéria orgânica é o papelão. Este material diminui de  $0,190\text{m}^3$  para  $0,122\text{m}^3$  quando compactado. Porém, este material teve um ganho percentual de volume ocupado quando comparado com o volume total dos materiais compactados.

O papel, teve um comportamento contrário, pois o seu volume diminui em termos percentuais e absoluto (Figura 31 e Quadro 9). A comparação entre a composição volumétrica solta e compactada mostra (Quadro 9 e Quadro 10) realmente, que houve uma queda de volume total após a compactação dos resíduos de  $1,3\text{m}^3$  para  $0,68\text{m}^3$ , portanto houve um ganho percentual de aproximadamente 48% em volume. Isto é muito importante, pois se houver uma compactação ideal dos resíduos haverá ganho em volume e até mesmo em velocidade de decomposição da matéria orgânica, pois as partículas dos materiais dispostos em aterros ficam mais próximas uma das outras e, portanto, melhor será a sua disponibilidade para os microrganismos (MELO, 2011).

Portanto, a composição volumétrica e gravimétrica dos resíduos deve ser analisada em termos econômicos, sociais e biodegradativos.

## **4.2 Parâmetros físico-químicos**

### **4.2.1 Parâmetros físicos**

#### **4.2.1.1 Temperatura**

A temperatura é um parâmetro físico importante a ser observado na digestão anaeróbia, uma vez que esta pode alterar a atividade metabólica dos microrganismos, influenciar nas taxas das reações enzimáticas e desnaturar enzimas e proteínas em geral (MENEZES, 2012) e, por conseguinte alterar as concentrações de biogás presentes no interior da massa de resíduos. Segundo Melo (2003), as temperaturas no interior da massa de resíduos influenciam na atividade microbiológica em RSU em uma Célula de Aterros na Região Metropolitana de Recife, ocorrendo faixas ótimas de degradação para cada grupo de microrganismo. Vale salientar que a temperatura pode também influenciar na difusão dos gases no interior da massa de resíduos. Temperaturas altas aumentam a velocidade de dissipação dos gases, o

contrário ocorre devido a temperaturas mais baixas. A Figura 33 e Figura 34 mostram que as temperaturas externas aos biorreatores e a temperatura interna sofreram grandes variações, e muitas vezes não apresentaram semelhanças. Essas diferenças são justificadas, pois as leituras ocorriam no período da tarde, geralmente por volta das 13 horas, horário em que a temperatura da estufa estava mais elevada, chegando a atingir 50°C, que era a temperatura máxima que o termômetro poderia registrar. Outro horário de monitoramento, era em torno das 17 horas, horário em que a estufa (local de acondicionamento dos biorreatores) registrava temperaturas amenas, aproximadamente 26°C, e os resíduos orgânicos possuíam temperaturas mais elevadas, pois havia absorvido calor durante todo período do dia. A noite ocorria o inverso, tendo em vista que os biorreatores foram confeccionados em PVC, material não isolante térmico, o que permitia a troca de calor com o meio externo. Vale salientar que Campina Grande está incluído na área geográfica de abrangência do semiárido brasileiro, definida pelo Ministério da Integração Nacional (2005) e possui um clima com temperaturas moderadas, considerado tropical com estação seca, com chuvas durante o outono e o inverno de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. Entretanto, as variações diárias da temperatura chegam a ser de 17°C e isso pode influenciar a biota microbiana.

Na estação seca, as temperaturas ficam altas, com máximas entre 28°C e 35°C, com mínimas agradáveis, entre 18°C e 22°C. Já no inverno, o tempo não chega a esquentar, com máximas entre 22°C e 27°C, e com mínimas entre 15°C e 20°C. Mesmo assim, as condições climáticas de Campina Grande, com algumas adaptações operacionais, podem favorecer a produção de biogás, pois a velocidade de decomposição dos resíduos pelos microrganismos é maior que nos países de clima temperado. Mas algo que não pode deixar de ser considerado é que uma elevada amplitude térmica, resultante das diferenças de temperaturas diurnas e noturnas, pode ser um fator negativo as bactérias metanogênicas. Conforme Deubleinet *et al.*, (2008) e Neves (2010), as bactérias metanogênicas são organismos extremamente sensíveis às variações bruscas de temperatura, uma queda de temperatura no biorreator, pode causar uma redução progressiva na produção de biogás, até a estagnação total do processo.

Figura 33: Temperatura do Biorreator 1 em relação ao tempo

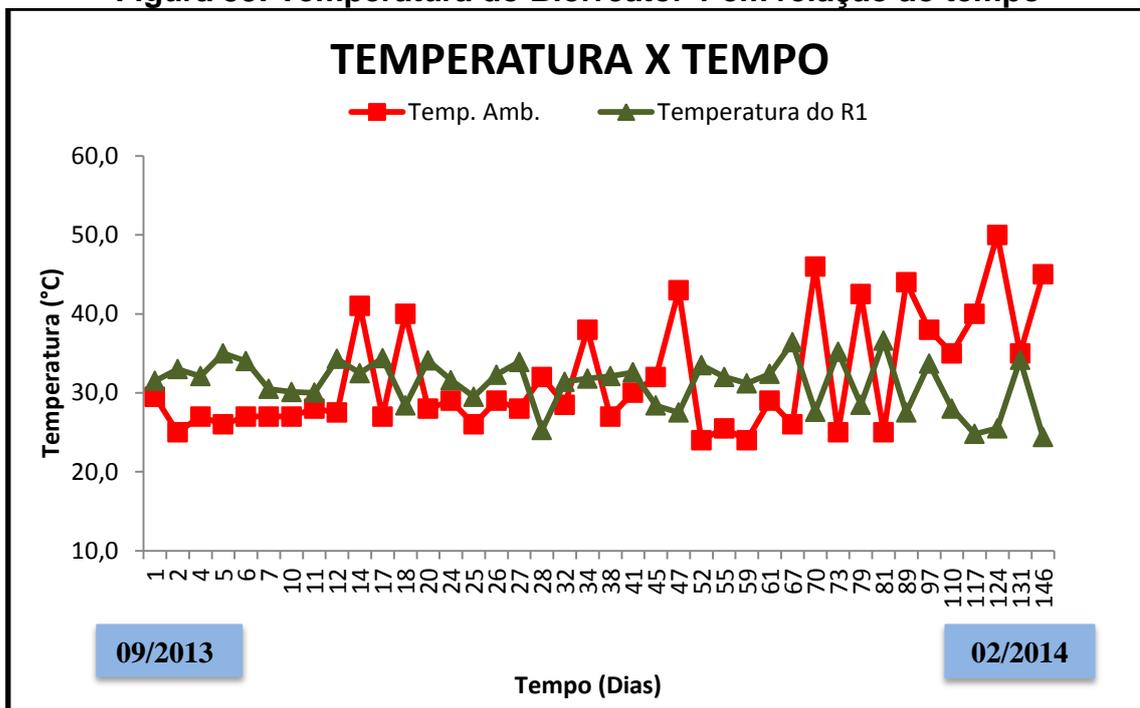
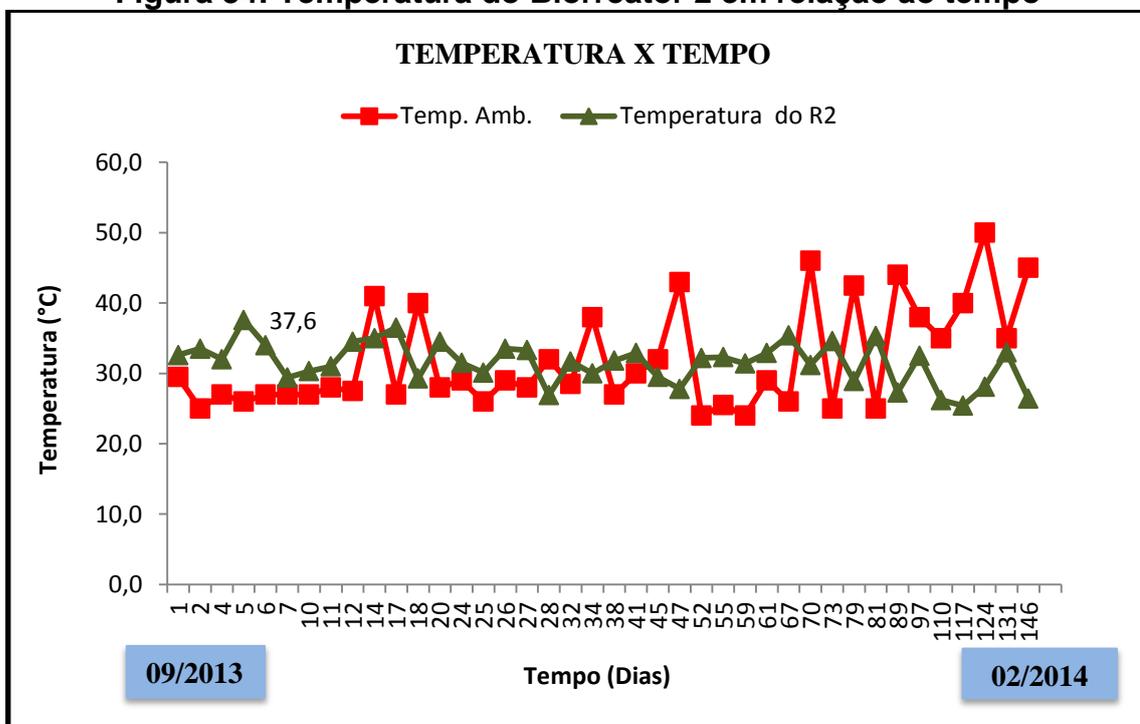


Figura 34: Temperatura do Biorreator 2 em relação ao tempo



Ainda verificando a Figura 33 e Figura 34, observa-se que as temperaturas internas dos dois biorreatores, embora tenham apresentado várias oscilações durante todo período de monitoramento, grande parte dos valores encontravam-se dentro da faixa de temperatura considerada ideal para o desenvolvimento dos microrganismos, pois conforme Guedes (2007) os microrganismos aumentam o rendimento quando a temperatura está entre 35 e 45°C e, que temperaturas fora desta faixa podem inibir esses organismos. Vale salientar que Menezes (2012), observou em seus estudos que a temperatura em torno de 21° favoreceu o processo de digestão anaeróbia em reatores com resíduos sólidos orgânicos.

Conforme, ainda, na Figura 33 e Figura 34, nos primeiros 12 dias de monitoramento, praticamente as temperaturas permaneceram constantes, situando-se na faixa de 27°C, essas baixas temperaturas foram ocasionadas devido à estação do ano, já que se encontrava em meados de setembro, mês que registra temperaturas ainda baixas se comparados ao verão nos trópicos e em altas altitudes, caso da cidade de Campina Grande. Já a partir do 70° dia, são observadas temperaturas mais elevadas, acima dos 46°C, fato que é justificado, pois é o período em que ocorrem altas temperaturas da estação seca.

Durante o monitoramento dos biorreatores de bancada, notou-se que a estufa apenas aumentou a amplitude térmica nos biorreatores, mas não favoreceu no aumento da concentração do gás metano. Esta influencia nas temperaturas está ligada diretamente ao potencial degradativo das bactérias metanogênicas, e aliados a temperatura, o pH é outro fator preponderante a degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, na produção de biogás. As bactéria metanogênicas trabalham de forma ótima em meios com pH em torno de 7, e temperaturas de 37°C para as metanogênicas mesofílicas e até 60° para as termofílicas. Durante o processo foram observadas temperaturas ideais para as bactérias metanogênicas, principalmente, as mesofílicas, porém estás temperaturas oscilavam e este grupo de bactérias é sensível as variações de temperaturas (SAWAZAKI, 1985). Aliados a temperatura, o pH verificado foi muito baixo durante todo o processo (Figura 39 39 e Figura 40), o que também influenciou na concentração dos gases produzidos nos biorreatores. Assim, provavelmente as temperaturas observadas nos

biorreatores de bancada estudados influenciaram negativamente na concentração de biogás e o pH também foi um fator preponderante nesta condição, principalmente, na baixa concentração do gás metano. Assim esse fator físico é essencial para aumentar a concentração de metano e também na produção deste gás em escala comercial.

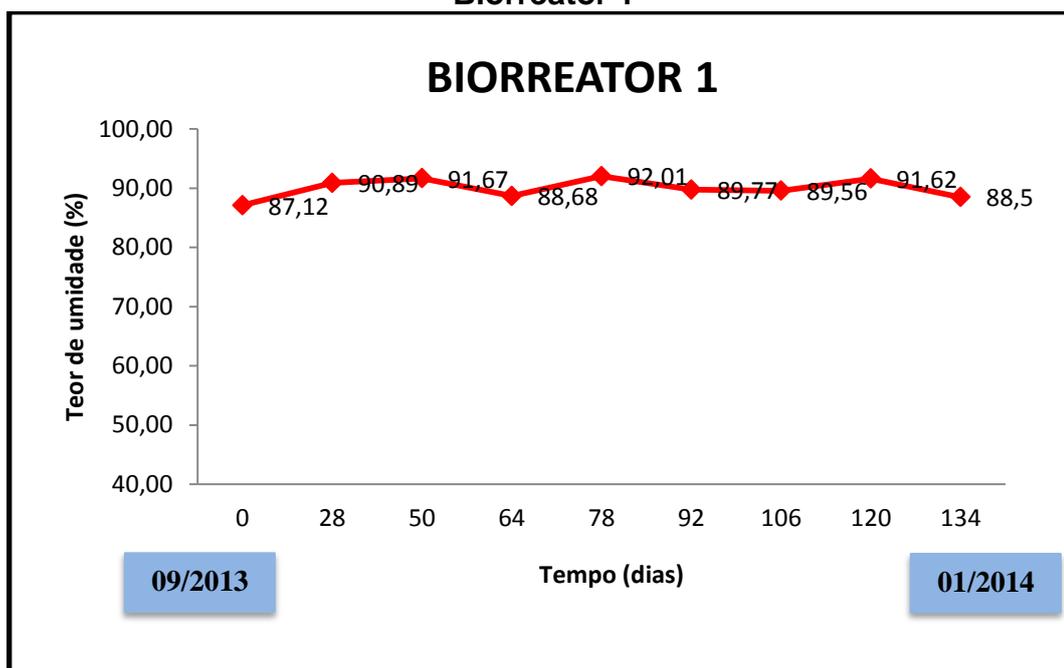
#### **4.2.1.2 Teor de Umidade**

O teor de umidade é um fator físico importante que contribui para o metabolismo dos microrganismos, pois favorece a assimilação de substrato e nutrientes necessários, comportando-se como agente condutor de enzimas e outros metabólitos microbianos importantes no processo de decomposição anaeróbia (LOPES et al. 2003).

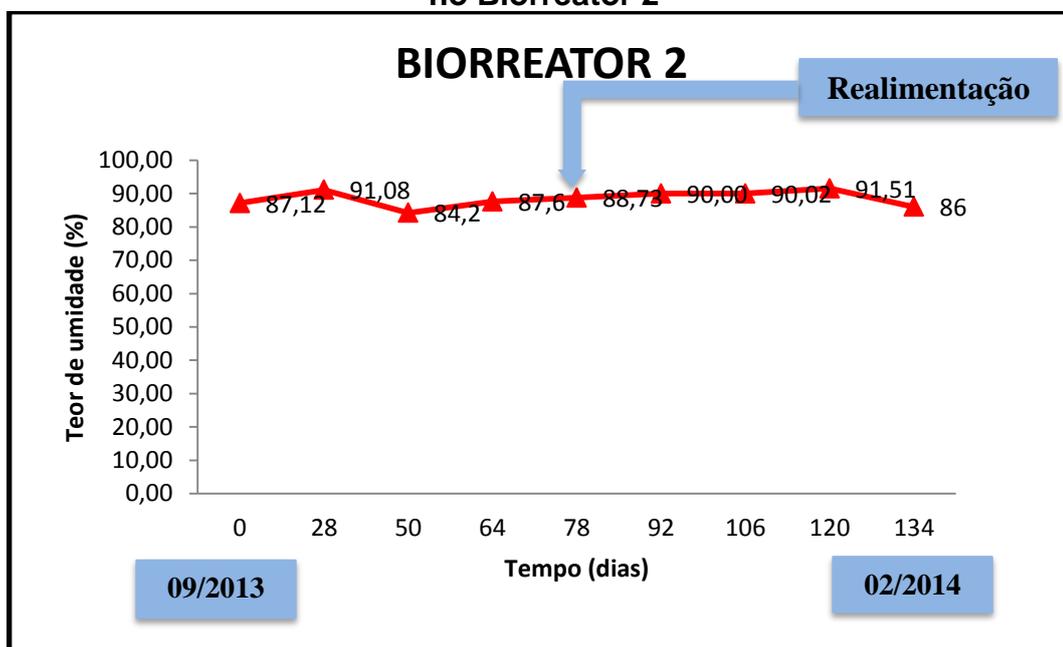
A umidade pode, ainda, ser um fator chave para a difusão de substância devido ao gradiente de concentração e potencial eletroquímico de compostos no interior da massa de resíduos. Portanto, a umidade pode determinar o fluxo de nutrientes, metabólicos e compostos tóxicos inerentes à biodegradação. Observando a Figura 35 e Figura 36, notou-se que praticamente não houve variações dos teores de umidade durante a fase de monitoramento nos biorreatores de bancada. Porém, verificou-se um elevando teor de umidade nos resíduos orgânicos, em média 89%, o que pode ter influenciado de forma negativa a geração e produção de biogás, o que vai ao encontro de Palmisano e Barlas (1996).

No que se refere às concentrações de biogás, estas estiveram bem abaixo do esperado para o gás metano (em torno de 0,5%) e bem acima para o CO<sub>2</sub> (média de 50%). Vale salientar que o gás metano deveria estar em condições normais de operação, em torno de 65% e o CO<sub>2</sub> por volta de 30% após dois meses de operação, o que nunca ocorreu nos dois reatores de bancada estudados.

**Figura 35: Teor de umidade ao longo do tempo dos resíduos orgânicos no Biorreator 1**



**Figura 36: Teor de umidade ao tempo do tempo dos resíduos orgânicos no Biorreator 2**



A elevada umidade nos biorreatores estudados, possivelmente, interferiu na presença de microrganismos como os de fungos, organismos necessários a primeira fase de decomposição hidrolítica da matéria orgânica. Estes organismos tornam compostos mais complexos como, por exemplo, a celulose

em compostos mais simples e, portanto, assimiláveis para os grupos microbianos. Entretanto, a faixa ótima de umidade para os fungos encontra-se em torno de 40%. Em estudos paralelos que vem sendo desenvolvidos pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA/UFCG) observou-se que os fungos tiveram valores bem abaixo do esperado. Araújo (2011) ao estudar fungos em RSU da Cidade de Campina Grande-PB com teor de umidade em torno de 50% em um lisímetro de 9m<sup>3</sup> encontrou fungos em até 3 ordem de grandezas superior. Portanto, a umidade pode realmente ter interferido nas fases subsequentes de decomposição da matéria orgânica, já que estes organismos oferecem um ataque inicial aos resíduos, deixando compostos menos complexos para os grupos subsequentes. Entretanto, destaca-se que a pouca concentração de gases no interior dos biorreatores, também pode ter sido baixo pela pequena presença de bactéria metanogênicas, embora, estes microrganismos não tenham sido mensurados neste estudo. Em estudos desenvolvidos por Alves (2008), sobre o potencial de geração de biogás com resíduos sólidos orgânicos e adição de lodo anaeróbio, a maior produção e concentração de biogás foi obtida pelo reator com 80% de umidade, e a menor, pelo reator com 20%, demonstrando assim, que o teor de água está intimamente relacionado à produção e geração de biogás. Se por um lado a umidade elevada pode diminuir um ataque fúngico, principalmente, na fase inicial de biodegradação dos resíduos, por outro pode favorecer as bactérias metanogênicas. Assim fica claro que a umidade deve ser monitorada em todo o período de biodegradação dos resíduos.

Conforme Palmisano e Barlaz (1996), a adição de umidade em excesso estimula a atividade hidrolítica pelo acúmulo de ácidos carboxílicos que acidificam o meio. Isso pode ter ocorrido nesse estudo, já que inicialmente não houve um controle do pH, e a quantidade de água adicionada foi elevada, e considerando que os resíduos orgânicos possuem em sua constituição química um conteúdo de água em torno de 50%, a depender de cada tipo de material, isso aumenta ainda mais a umidade presente na mistura de resíduos. Entretanto, conforme já comentado, isto pode inibir os grupos fungicos. Estudos mais detalhados devem ser feitos a fim de se determinar como este parâmetro físico (umidade) de fato interfere no processo.

## 4.2.2 Parâmetros físico-químicos

### 4.2.2.1 Alcalinidade

Na Figura 37 e Figura 38, verifica-se que os biorreatores 1 e 2 não apresentaram alcalinidade total até os 14<sup>o</sup> e 28<sup>o</sup> dias de monitoramento, haja vista, os valores de pH terem se sido sempre menores que 4,0. A partir do 28<sup>o</sup> dia de operação até o 106<sup>o</sup> dia, o biorreator 1 apresentou oscilações elevadas nos valores de alcalinidade. Em seguida ocorreu um aumento abrupto na concentração de alcalinidade no 120<sup>o</sup> dia, alcançando o patamar de 750mgCaCO<sub>3</sub>/L. No 134<sup>o</sup> dia de monitoramento não mais observou alcalinidade total, ocasionado pelo pH do meio ter sido inferior a 4, não permitindo assim a leitura da alcalinidade.

Conforme a Figura 39, observa-se que a alcalinidade no biorreator 2, também ficou abaixo do esperado até o 64<sup>o</sup> dia. Após 64<sup>o</sup> dia, o biorreator 2 foi realimentado, pois ocorreu um problema operacional e, então se decidiu por este procedimento. Assim, após a realimentação do biorreator 2, os valores de alcalinidade ficaram entre 1800mgCaCO<sub>3</sub>/L a 4080 mgCaCO<sub>3</sub>/L. Destaca-se, ainda, que esses elevados valores foram alcançados através da adição de bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) na mistura de resíduos orgânicos afim de elevar o pH do meio ou restringir suas variações bruscas. Conforme Felizola (2006) e Reis (2012), os altos valores de alcalinidade podem estar associados à alta concentração de nitrogênio apresentada no resíduo orgânico. E isto foi comprovado nos estudos realizados no biorreator 2, no qual após a realimentação os teores de Nitrogênio foram maiores (1300mg/L), valor esse que é considerado por alguns autores, tóxicos para alguns tipos de microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Se por um lado a concentração de nitrogênio e alcalinidade elevadas favorecem a estabilização de pH, por outro lado o elevado teor de nitrogênio poderá ser tóxico, principalmente para às bactéria metanogênicas, o que pode ter explicado a baixa concentração de metano no biorreator 2.

Figura 37: Evolução da alcalinidade total no biorreator 1

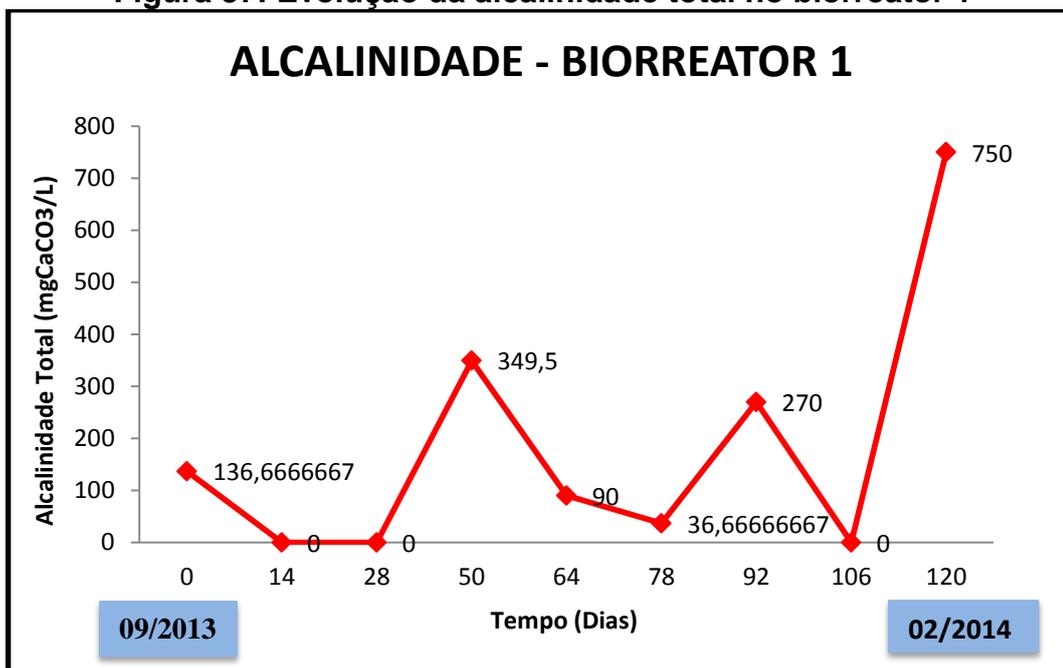
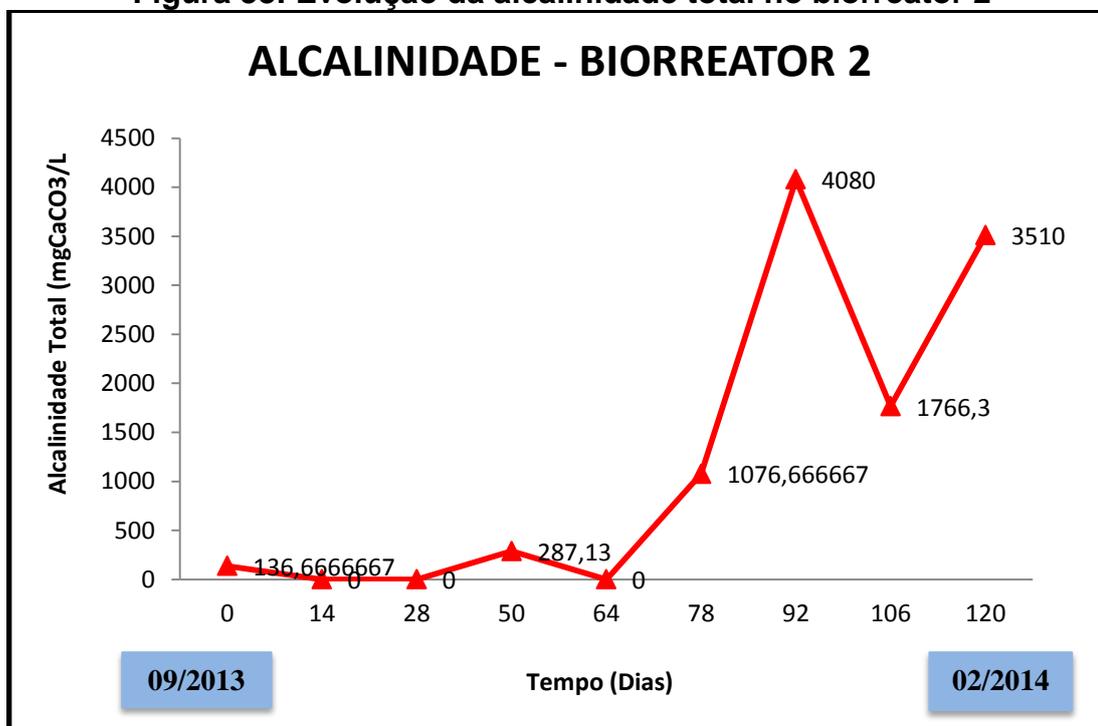


Figura 38: Evolução da alcalinidade total no biorreator 2



De acordo com Metcalf e Eddy (1991), a faixa de alcalinidade para o processo funcionar bem deve estar entre 1000 e 5000 mg/L. Como pode ser

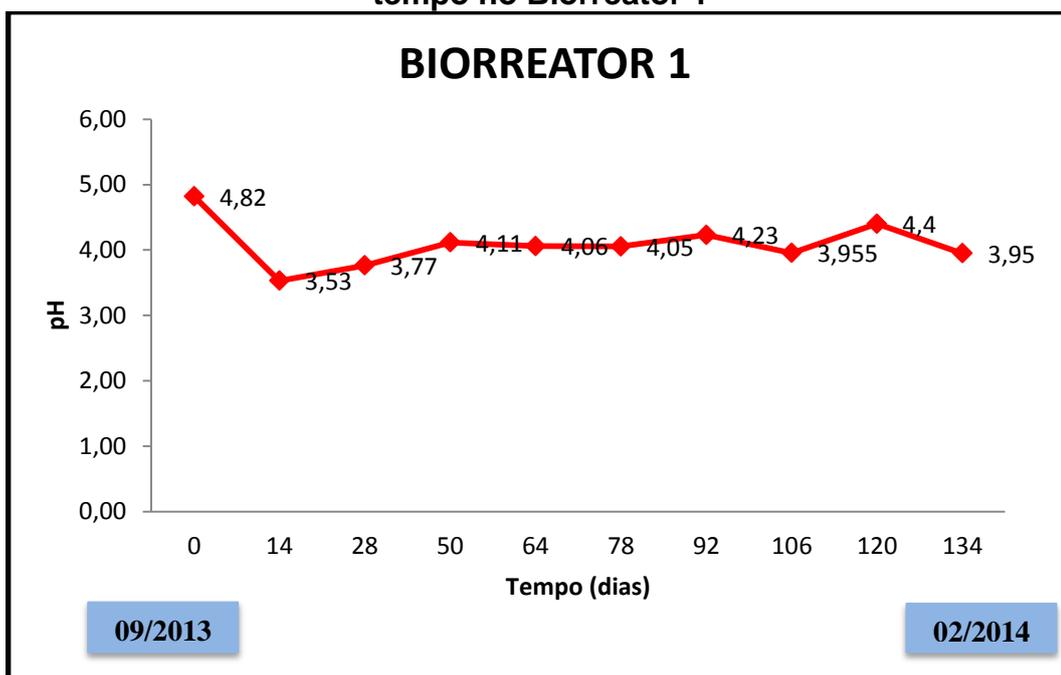
observado na Figura 38 e Figura 39, todos os valores de alcalinidade total dos resíduos orgânicos mensurados no biorreator estudado ficou fora do intervalo proposto no biorreator 1, indicando que o processo não ocorreu de forma satisfatória, o que não favoreceu a concentração desejável de biogás, que é em torno de 65% de CH<sub>4</sub> e 35% CO<sub>2</sub> (TEIXEIRA, 2003). De acordo com Gerardi (2003), quando é verificado decaimento da concentração de alcalinidade para abaixo do nível operacional normal, indica falha durante a digestão, resultando em rápida mudança no pH. O autor ainda mencionou que tal redução pode ser causada pelo acúmulo de ácidos orgânicos, ocasionado em virtudes dos microrganismos metanogênicos não converterem os ácidos orgânicos a CH<sub>4</sub>, ou devido à presença de resíduos que inibam a atividade dos microrganismos formadores de CH<sub>4</sub> (MENEZES, 2012).

O que deve ficar claro é que as concentrações dos gases nos biorreatores são afetadas pela alcalinidade, pois está passa a influenciar o pH e, portanto, na biota microbiana que é a responsável direta pela produção de metano.

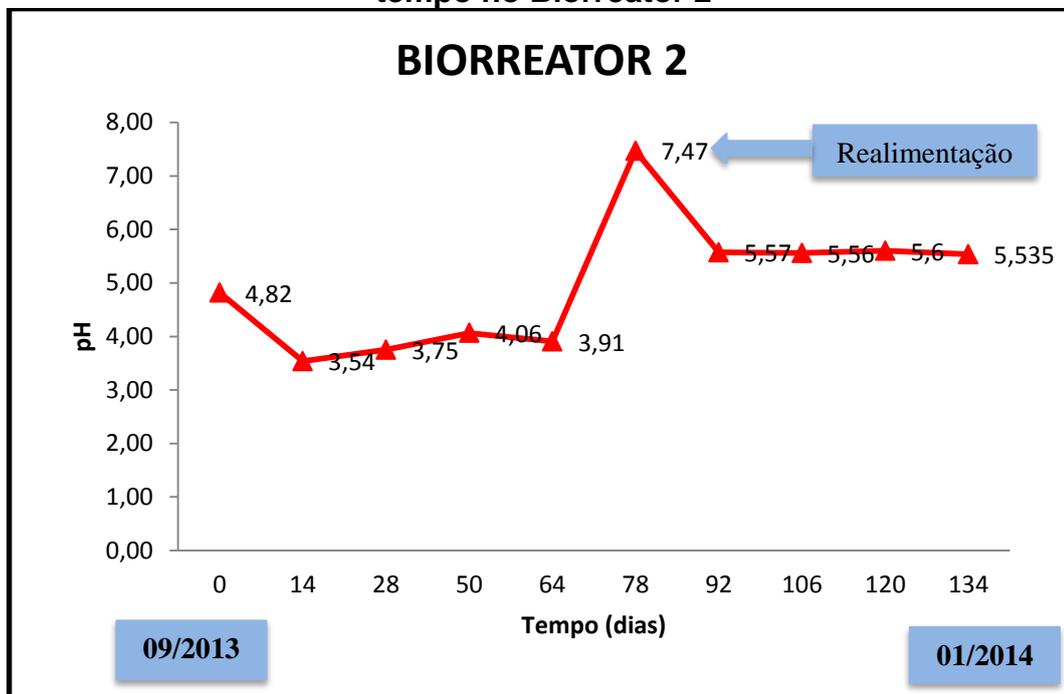
#### **4.2.2.2 Potencial Hidrogeniônico – pH**

O pH é um importante fator no controle do processo anaeróbio, pois influencia a atividade enzimática, uma vez que cada enzima é ativa somente num pH específico e limitado (LAY et al., 1997). O crescimento ótimo dos microrganismos metanogênicos ocorre em uma faixa relativamente estreita, em torno de 6,5 a 7,5, já as bactérias hidrolíticas e fermentativas como a acidogênicas e acetogênicas, o pH ideal está entre 4,5 a 6,3. Embora os microrganismos não foram mensurados neste estudo, vale salientar que o pH ótimo para cada organismo não necessariamente àquele no qual será produzido biogás e, ainda, que o pH em uma determinada faixa e por um tempo prolongado pode ocasionar limitações nas fases subsequentes, e portanto, nas concentrações dos gases gerados em um reator anaeróbio.

**Figura 39: Evolução do pH dos resíduos orgânicos durante o intervalo de tempo no Biorreator 1**



**Figura 40: Evolução do pH dos resíduos orgânicos durante o intervalo de tempo no Biorreator 2**



Segundo Pohland e Harper (1985) e Catapreta (2008) o pH pode variar com o tempo de degradação dos resíduos. Na fase inicial do processo de

degradação, o pH é normalmente mais baixo devido à produção de ácidos pelas bactérias hidrolíticas e fermentativas acidogênica e acetogênicas, mas com o avanço do processo de degradação biológica da matéria orgânica, os valores de pH se elevam em função do consumo dos ácidos pelas bactérias metanogênicas e pela maior produção de gases (MEIRA, 2009). Porém, conforme observado nas Figuras 39 e Figura 40 observa-se uma leve queda no pH logo nos primeiros dias de monitoramento nos dois biorreatores, fato que é justificado devido à degradação acontecer de forma rápida, produzindo ácidos orgânicos quase que imediatamente ao início do processo, indicando a baixa capacidade de tamponamento dos materiais. Entretanto, o pH nos dois biorreatores analisados esteve baixo durante todo o processo fermentativo, indicando uma baixa eficiência na produção de metano. No biorreator 2, optou-se por adicionar  $\text{NaHCO}_3$  no 72º dia de monitoramento, pois a concentração do gás metano no interior dos biorreatores eram baixas e, assim, verificar se havia um modo de se elevar a produção deste gás. Mas mesmo adicionando-se  $\text{NaHCO}_3$  na concentração de 30g/L de resíduo orgânico, não se observou aumento na concentração de biogás e, ainda, o pH em poucos dias retornou a valores baixo (5,5), embora mais altos que no biorreator 1. Vale salientar que as altas concentrações de  $\text{CO}_2$  podem ter sido elevadas devido, principalmente, pelo fato de o pH baixo favorecer as bactérias acidogênicas e acetogênicas, produtoras de  $\text{CO}_2$  e também de  $\text{H}_2$ , o que abaixa mais ainda o pH, entretanto não as metanogênicas que produzem o  $\text{CH}_4$ .

As metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol, e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Portanto, as elevadas concentrações de  $\text{CO}_2$  podem favorecer a sua redução posterior para a produção de metano, mas isto não foi observado nos biorreatores estudados, pois a produção de metano sempre foi baixa. Assim fica claro, que o pH é um parâmetro físico-químico que está intimamente associado a concentração dos gases formadores do biogás. Se o objetivo é produzir o metano em grande escala, o pH associado a outros fatores como temperatura e umidade podem estar associados a ionização das enzimas e, portanto, na atividade metabólica e por isso o monitoramento destes parâmetros físico-químicos é indispensável para o bom funcionamento de reatores biológicos anaeróbicos.

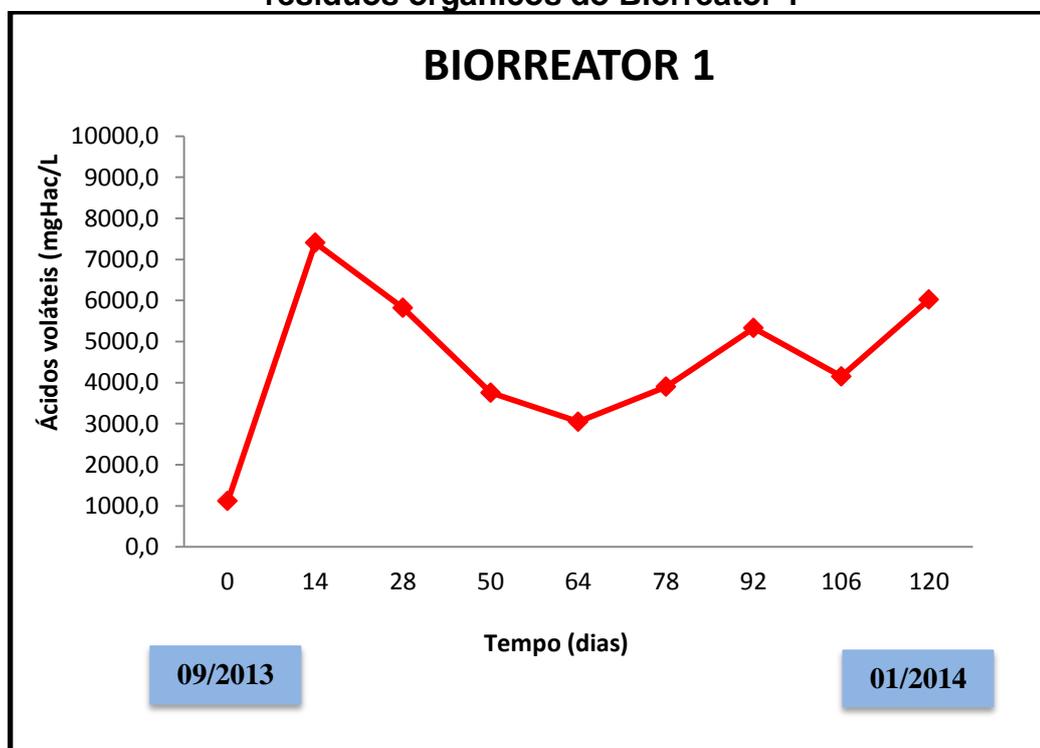
#### 4.2.2.3 Ácidos voláteis

Como mostram a Figura 41 e Figura 42, verifica-se um acúmulo de ácidos voláteis nos dois biorreatores, indicando que a taxa de remoção destes ácidos através da metanogênese não acompanhou a taxa de sua produção, o que ocasionou uma situação de instabilidade e resultou na diminuição dos valores do pH.

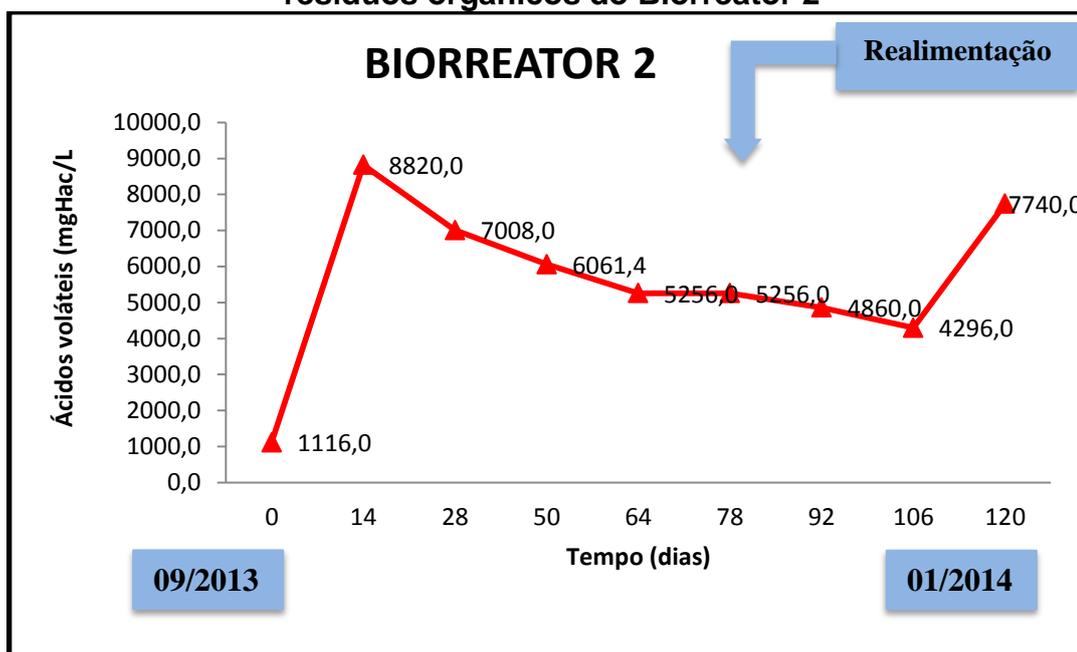
Conforme Leite (2008), os ácidos voláteis advêm da solubilização do material particulado e passam a ser substratos ou material tóxico para algumas espécies bacterianas responsáveis pela bioestabilização da matéria orgânica.

Kjeldsen e Christensen (1990), observaram o efeito inibitório à atividade bacteriana causado pelas concentrações de ácido acético, propiônico e butírico em concentrações acima de 6000 mg/L, porém Leite, et.al., (2008) encontraram em seus estudos com biorreatores contendo resíduos sólidos vegetais e lodo de esgoto valores  $1920\text{mgHac}^{-1}$  a  $10.350\text{mgHac}^{-1}$  e obtiveram excelentes resultados na bioestabilização deste material.

**Figura 41: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo nos resíduos orgânicos do Biorreator 1**



**Figura 42: Concentrações de ácidos voláteis ao longo do tempo nos resíduos orgânicos do Biorreator 2**



Segundo Stafford *et al.*, (1980), McCarty e Pittmann(2001), valores nas faixas entre 2000 a 4000 mgHAC/L são considerados ideais para o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos. E conforme observa-se na Figura 41 e Figura 42, os resultados para os ácidos voláteis variaram de 1000 mgHAC/L a aproximadamente 8000 mgHAC/L para o biorreator 1, e 1000 a 9000mgHAC/L para o biorreator 2, valores bem acima da faixa de concentração considerada ideal.

Os estudos realizados nos dois biorreatores de bancada sugerem que provavelmente os altos valores de ácidos voláteis são produtos das bactérias hidrolíticas, acidogênicas e acetogênicas. No caso de ambos os reatores, em estudo paralelos desenvolvidos pelo GGA/UFCG verificou-se a presença de bactérias aeróbias, produtoras de CO<sub>2</sub> e ácidos, o que justifica os baixos valores de pH. Além do mais, estas bactérias aeróbias podem ser facultativas e, portanto, produzirem ácidos através da acidogênese e acetogênese. Frísa-se ainda, que a hidrólise é um fator limitante para a conversão de matéria orgânica em metano. Os produtos das reações hidrolíticas são fermentados e depois transformados em metanos (VAN HANDELL, 1994). Assim, se a fase hidrolítica for muito longa ou muito curta a metanogênese será influenciada. No caso dos biorreatores estudados, o pH sugere que a metanogênese, ainda, não

está ocorrendo e, portanto, talvez um dos motivos para a não produção de metano em concentrações ideais.

Outro fator que pode ter influenciado as altas concentrações de ácidos, como já citado anteriormente, foi à adição excessiva de água no substrato, pois de acordo com McDonald *et al.* (1991), teores elevados de umidade favorecem o desenvolvimento de bactérias do gênero *Clostridium*, produtoras de ácido butírico. Deve-se destacar que os ácidos voláteis é um parâmetro físico-químico de suma importância, mas analisá-lo de forma isolada é bastante inadequado para se prever o comportamento de processos fermentativos. Assim, pH, temperatura, umidade, ácidos voláteis e sólidos voláteis são fundamentais para se analisar de uma forma mais geral o comportamento de biorreatores. Estes parâmetros influenciam na concentração de biogás, sobretudo o metano, produto das bactérias metanogênicas que são extremamente sensíveis a mudanças ambientais e físico-químicas.

#### **4.2.2.4 Sólidos Voláteis**

Os sólidos voláteis são os responsáveis diretos pela produção de biogás e indicam se está ocorrendo a biodegradação dos compostos de forma adequada. No caso dos dois biorreatores estudados, a concentração de sólidos voláteis caiu com o tempo (Figura 43 e Figura 44), indicando que os microrganismos estão atuando, embora, estudos paralelos realizados pelo GGA/UFCG mostram que as bactérias metanogênicas, responsável pela produção de metano estão sendo influenciados negativamente pelas condições físico-químicas do meio interno. Portanto, estes sólidos voláteis estão realmente diminuindo, mas provavelmente pelo metabolismo das bactérias aeróbia totais e facultativas.

No biorreator 1, praticamente não houve redução no teor de sólidos voláteis até o 106º dia de monitoramento, permanecendo praticamente constante, somente a partir do 120º dia é que verifica-se um decréscimo acentuado, no qual o percentual chegou a diminuir aproximadamente 50% da fração inicial, indicando uma degradação mais acelerada nesse período. Para o biorreator 2, até o 78º dia, o decréscimo dos sólidos voláteis foi menor que 9%, a maior redução ocorreu após a realimentação do biorreator, entre os dias 92 e 134 dias, que foi em torno de 21%.

Figura 43: Teor de sólidos voláteis do biorreator 1

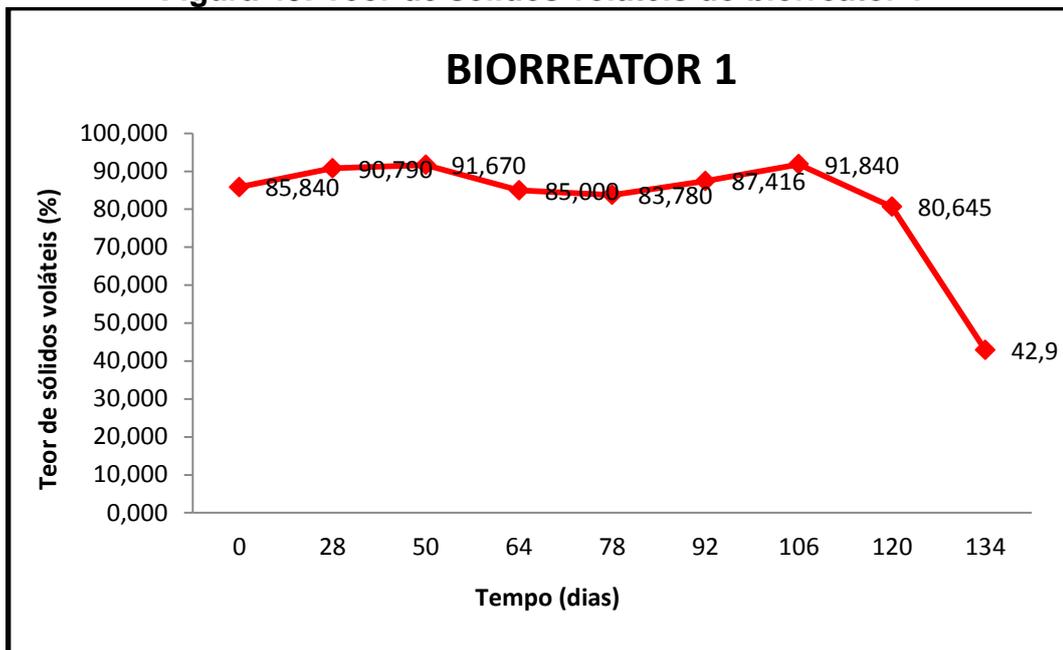
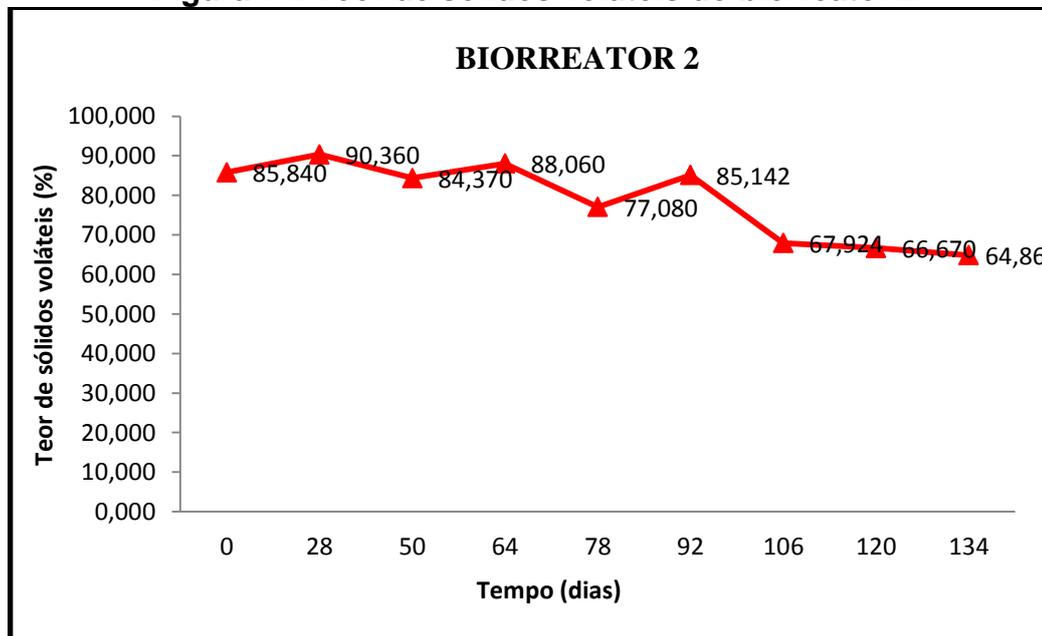


Figura 44: Teor de sólidos voláteis do biorreator 2



Apesar dos sólidos voláteis terem sofrido um decréscimo ao longo do tempo, isto não foi traduzido em altas concentrações de metano, mas sim em  $\text{CO}_2$ . Este fato é possível devido à presença de microrganismos aeróbios que são os responsáveis pela produção de dióxido de carbono através da

degradação da matéria orgânica, conforme estudos realizados pelo GGA/UFMG em mesmo período de tempo. Provavelmente organismos encontrados nos biorreatores são facultativos, pois foram também observados baixos teores de oxigênio, sobretudo para o biorreator 2. Vale destacar que as contrações de sólidos voláteis caíram de 85% a 65% em 134 dias de monitoramento no biorreator 2.

A diminuição dos sólidos voláteis provavelmente aumentou a concentração de CO<sub>2</sub> devido processos degradativos através de bactérias fermentativas acidogênicas e acetogênicas, mas não a de metano, que permaneceu muito baixo, justamente por esta fase ser característica de produção de ácidos e o que, também, influenciou nos valores de pH baixos observados nos biorreatores estudados.

A atividade metabólica fermentativa provenientes das bactérias hidrolíticas, acidogênicas e acetogênicas, assim, diminui a atividade metanogênica, pelo que se refere ao aumento de ácidos. Acrescenta-se a isso a toxicidade gerada pelo nitrogênio amoniacal que foi elevada, porém devido a valores baixos de pH esta toxidez, provavelmente foi menor. Assim é muito adequado o monitoramento desse parâmetro físico-químico, pois as concentrações de biogás, sobretudo o metano, podem ser afetados direta e indiretamente pela presença de sólidos voláteis.

#### **4.2.2.5 Nitrogênio Amoniacal**

Tanto a Figura 45 quanto a Figura 46 apresentam a evolução temporal do nitrogênio amoniacal nos biorreatores. Observa-se que no biorreator de bancada 1, na fase inicial, a concentração de nitrogênio amoniacal foi bastante baixa, ocorrendo um aumento a partir de 28º dia de monitoramento (450mg/l). No 92º o valor alcançado foi de aproximadamente 640mg/l neste biorreator. No biorreator 2, o teor de nitrogênio amoniacal apresentou valores que variaram de 479mg/l a 684mg/l na primeira alimentação. Logo após a realimentação, esse biorreator apresentou valores com alta magnitude de nitrogênio amoniacal, aproximadamente, 1270 mg/l, o que pode ser um fator limitante quando se objetiva tratar biologicamente os resíduos orgânicos.

Ambos os reatores apresentaram valores de nitrogênio amoniacal bastante elevado na parte final do monitoramento, o que indica toxicidade pela

presença deste composto. Estes íons são formas de nitrogênio amoniacal e de acordo com Metcalf e Eddy (1991), os altos teores de nitrogênio amoniacal são indicativos de que ainda há bastante matéria orgânica a ser decomposta.

Destaca-se, ainda, que nitrogênio amoniacal em altas concentrações pode ocasionar vários problemas, como inibir o desenvolvimento metabólico de diversos grupos de bactérias que atuam nos processos de degradação, porém a sua toxicidade depende tanto da concentração do nitrogênio amoniacal quanto do pH, como já mencionado.

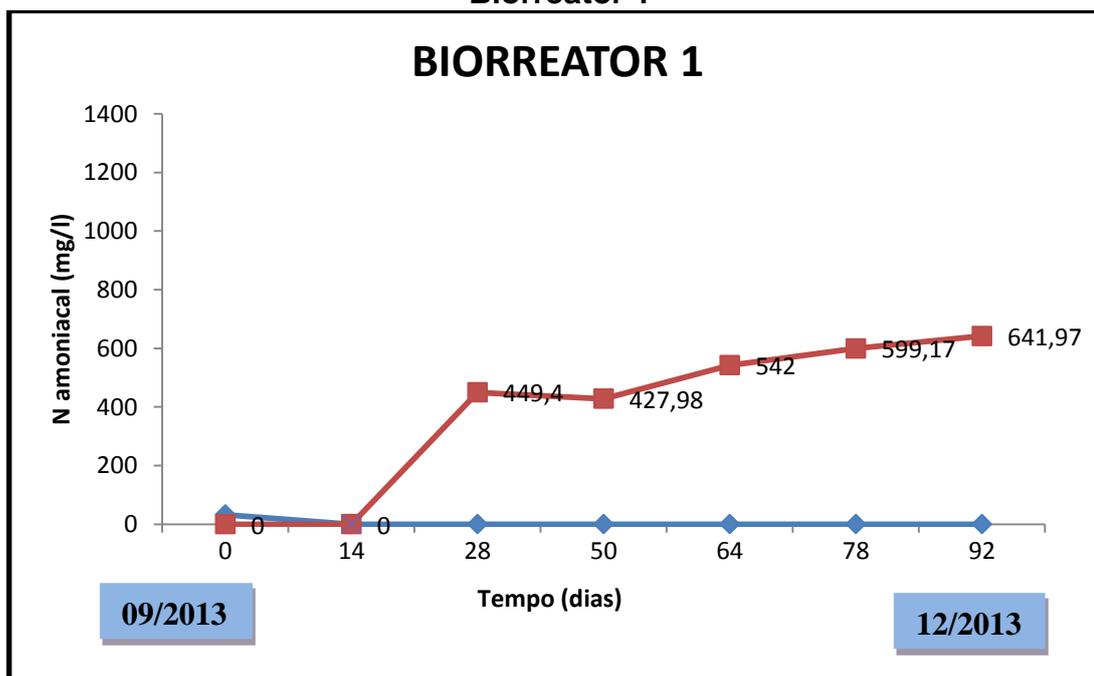
A toxicidade da amônia pode ter influenciado o desenvolvimento dos microrganismos presentes na massa de resíduos dos biorreatores, pois segundo Calliet *et al.* (2005) e Castilhos Jr. *et al.* (2006) 600mg/l de amônia inibi a flora bacteriana. Entretanto, conforme Abreu (1994), a concentração de amônia ionizada de 10 a 150 mg L<sup>-1</sup> é inibitória para as Nitrosomonas sp. já as Nitrobacter sp. sofrem inibição por amônia em valores de 0,1 a 1,0 mg L<sup>-1</sup>.

Embora, os reatores só começaram a apresentar teores tóxicos de nitrogênio amoniacal no final do monitoramento, sobretudo no biorreator 2 (Figura 45 e Figura 46), estes foram amenizados pelo pH apresentado em ambos reatores, principalmente no reator 1. O reator 2 após ser realimentado apresentou valores que variaram de 230 a 1270mg/l. Esta alta concentração de nitrogênio amoniacal no final do monitoramento já seria altamente tóxica, mas, provavelmente, foi agravada pelos altos valores de pH se comparada ao reator 1. No reator 2, o pH, após o monitoramento, foi estabilizado 7,4 na realimentação e voltou a cair para 5,6.

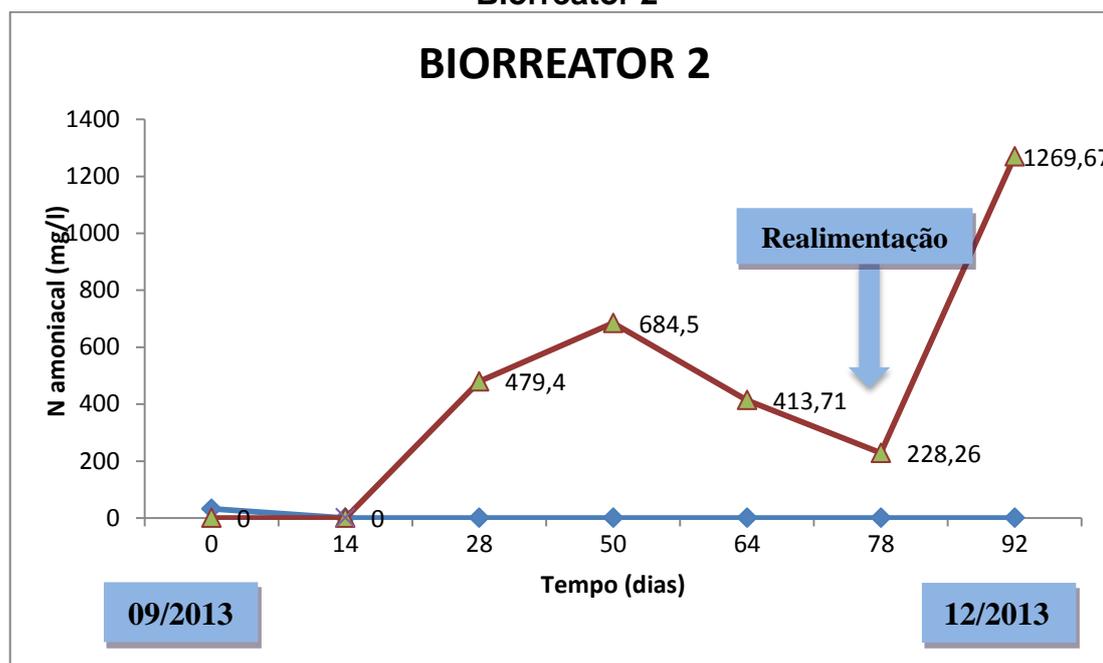
De acordo com Tchobanoglous *et al.* (1994) é na fase inicial quando se inicia o processo de decomposição dos resíduos que se tem a maior quantidade de Nitrogênio (N) no meio, porém observou-se que nos dois biorreatores estudados as concentrações de nitrogênio foram baixas (0 a 10 mg/l nos biorreatores de bancada estudados, isso não ocorreu e, pode ser justificado, pelo fato que no início do experimento as concentrações de oxigênio eram bastante baixas, mostrando-se um ambiente anaeróbio, desfavorecendo a formação de nitrogênio amoniacal, já que o processo de nitrificação intermediado por microrganismos acontece em condições aeróbias (Figura 45 e Figura 46). Destaca-se que a concentração elevada de nitrogênio amoniacal pode ocorrer devido ao desequilíbrio na relação carbono/nitrogênio (C/N).

Neste trabalho infelizmente, as relações de C/N são desconhecidas, entretanto pelo tipo de resíduos acondicionado nos reatores a concentração de nitrogênio, provavelmente foram maiores. Os resíduos orgânicos da escola são compostos por restos alimentares adicionados de esterco bovinos, ambos ricos em nitrogênio e pobres em carbono, conforme Guedes (2007). Desta forma fica evidente que o acompanhamento do nitrogênio amoniacal é um fator chave para o desenvolvimento adequado de condições ambientais de reatores de bancada. A análise estrutural do substrato também deve ser encarada de forma bastante séria, uma vez que, pode direcionar o processo fermentativo. Assim, um composto com maior quantidade de proteínas possibilitará maiores formações de compostos nitrogenados no metabolismo, o que pode originar ambientes tóxicos que, ainda, podem ser agravados pelo pH do meio

**Figura 45: Concentração de Nitrogênio amoniacal ao longo do tempo no Biorreator 1**



**Figura 46: Concentração de Nitrogênio amoniacal ao longo do tempo no Biorreator 2**



As análises mostraram que o reator 2 teve maiores concentrações de metano após a realimentação, quando foi adicionado alcalinizante. Mas isto só foi evidente na primeira semana, posteriormente a concentração deste gás caiu a valores muito baixos e o CO<sub>2</sub> aumentou a sua concentração (Figura 48). Talvez o pH tenha agido favoravelmente a produção de gás metano, embora a concentração de nitrogênio amoniacal tenha sido alta. Pode ser que ainda as bactérias metanogênicas tenham sido favorecidas pelo pH inicial elevado, após a realimentação, e por consequência aumentado a concentração de metano, mas logo após o ambiente ficou novamente tóxico; pH caiu e altas concentrações de nitrogênio amoniacal foram observadas, e, talvez por isso, a concentração de metano diminuído. Assim, possivelmente isso demonstra que pH mais altos e condições ambientais e operacionais adequadas permitem maiores produções de metano em relação aos outros gases gerados

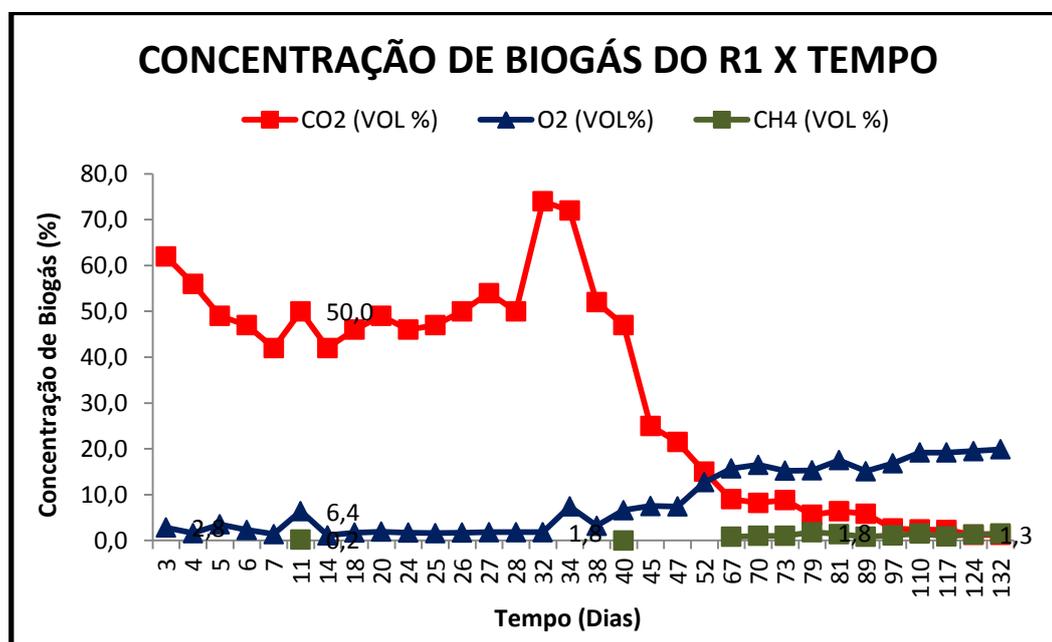
### 4.3 Monitoramento dos Gases

O monitoramento do biogás gerado no interior dos biorreatores de bancada, ocorreu através de medições *in loco*, utilizando a válvula de coleta, interligada a uma mangueira, com auxílio de um detector portátil de gases, e também através de sacos amostradores de biogás, onde foram obtidos valores da concentração de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), monóxido de carbono (CO),

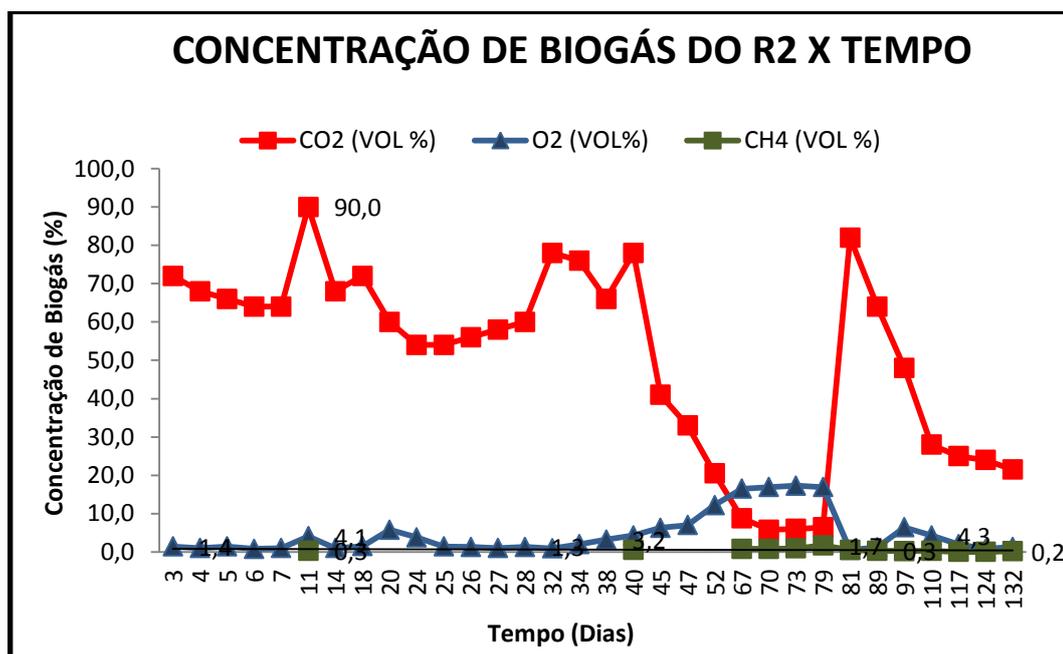
dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ). A partir do monitoramento dos gases, pode-se avaliar o processo de degradação dos compostos orgânicos em paralelo com os demais parâmetros monitorados e relacionar as interferências de fatores ambientais e operacionais na produção de biogás. Os dados apresentados na Figura 47 e 48 são referentes aos valores das concentrações de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  durante o tempo de monitoramento para os biorreatores.

Conforme a Figura 47 e Figura 48, as medições do  $\text{CH}_4$  só começaram a ser realizadas a partir do 11º dia de monitoramento. O comportamento do metano e do dióxido de carbono foram bem distintos ao longo do tempo. Para o metano as concentrações variaram de 0,2 a 2% para ambos biorreatores, bem abaixo do esperado. Para o  $\text{CO}_2$  as concentrações variaram de 6% a 82%. As maiores concentrações de  $\text{CO}_2$  foram encontradas no biorreator 2. Já para o metano, as maiores concentrações foram no biorreator 1.

**Figura 47: Concentração volumétrica (%) de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  ao longo tempo do Biorreator 1**



**Figura 48: Concentração volumétrica (%) de O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> ao longo do tempo do Biorreator 2**



Os altos valores para o CO<sub>2</sub> ao longo do tempo de monitoramento nos dois biorreatores de bancada, provavelmente, evidenciam que as bactérias que estão presentes no seu interior são em sua maioria fermentativas (Lettinga, 1996), uma vez que são responsáveis por liberarem este gás. Vale destacar que foram encontrados fungos e bactérias aeróbias no interior dos biorreatores estudados, em pesquisa paralela realizada pelo GGA/UFMG, que contribuem para a geração de CO<sub>2</sub> e, por consequência, diminuem o pH e, assim, podem ter prejudicados o desenvolvimento de bactérias metanogênicas.

Outro fator importante no que se refere à produção de biogás é que apesar de haver elevados teores de matéria orgânica e microrganismos estes podem inibir a produção de biogás pela excreta de metabólitos intermediários. Conforme Poulsen (2003), a produção de biogás e sua composição estão intimamente ligados aos níveis da carga orgânica. Geralmente, quando o reator é sobrecarregado, este irá responder com um aumento imediato na produção de biogás, mas logo em seguida, poderá ocorrer uma diminuição repentina, pois os níveis de produtos inibidores (ácidos) são demasiado elevados e o pH tende a diminuir. Fato este que foi evidenciado na realimentação do biorreator 2 (Figura 48). Estes fortes desequilíbrios podem causar variações na

composição do biogás, como mudança para níveis mais elevados de dióxido de carbono e hidrogênio, uma vez que não são consumidos rapidamente pela metanogênese. Como já comentado, especificamente no biorreator 2, onde observa-se através da Figura 48, após sua realimentação, no 78° dia, verificou-se a maior concentração de CH<sub>4</sub> registrada, de aproximadamente 2% e 6% de CO<sub>2</sub>. Logo em seguida, no 81° dia, ocorreu um aumento abrupto na concentração de CO<sub>2</sub>, atingindo 82%, e uma redução na concentração de CH<sub>4</sub>, chegando a valores de 0,3%. Vale salientar que nesta realimentação o pH foi ajustado para 7,4, o que favorece a produção de biogás pela estabilização do sistema.

No que se refere ao gás oxigênio a Figura 47 mostra que a concentração de O<sub>2</sub> presente no biorreator 1, no 4° dia de monitoramento foi equivalente a 2,8%, sofrendo um decréscimo ao longo do tempo, chegando a valores a de 1,8% no 32° dia e, após este período para valores próximos a 20%. Já para o biorreator 2, as concentrações de O<sub>2</sub>, foram ainda menores, 1,4% para 4° dia de monitoramento e 1,3% no 32° dia, a partir daí, houve um acréscimo em sua concentração, chegando atingir valores em torno de 17%. Estes elevados valores de O<sub>2</sub> nos períodos finais de monitoramento podem evidenciar uma falha na estrutura dos biorreatores. Inclusive, no biorreator 2 foi encontrado um vazamento no 64° dia, indicando a entrada de gás oxigênio. A presença de O<sub>2</sub> nos biorreatores pode ter influenciado nos valores de microrganismos aeróbios e facultativos. Ainda, a presença de O<sub>2</sub> conforme Melo (2011) desestabiliza o meio interno de reatores, provocando atividades metabólicas exergônicas. Segundo este pesquisador até mesmo o pH é influenciado pelo gás oxigênio, neste caso, diminuindo-o. Estes fatores influenciam negativamente as bactérias metanogênicas, produtoras de metano. Alcantara (2007), relata que o monitoramento das concentrações de O<sub>2</sub> é útil para avaliar as condições de anaerobiose do meio. A entrada de elevadas concentrações de oxigênio no sistema anaeróbio representa danos significativos no processo, enquanto que pequenas concentrações atuam na otimização da taxa de hidrólise da celulose criando microambientes aeróbios (ALCÂNTARA, 2007).

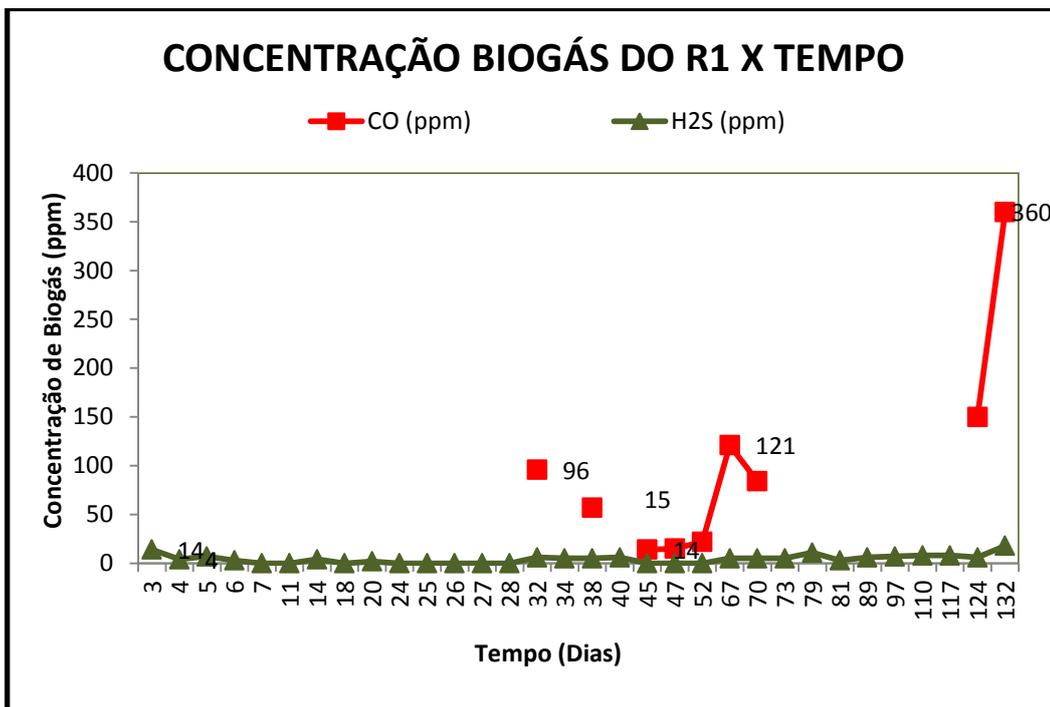
Okamoto *et al.* (2000), estudando a degradação anaeróbia individual de sete componentes da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU),

verificaram que a maior parte do biogás produzido na degradação de proteínas era constituída por CO<sub>2</sub>, e conforme observou-se nas Figura 47 e Figura 48, os valores de CO<sub>2</sub> presentes nos biorreatores preenchidos com resíduos orgânicos foram bastante elevados, atingindo valores de até 90%, no 11º dia de monitoramento para o biorreator 2. Como já comentado isto pode ser aceitável para os reatores estudados, pois ambos foram preenchidos com restos alimentares adicionados de esterco bovinos, o que conforme cita Guedes (2005), são ricos em nitrogênio (proteínas) e, portanto, podem gerar elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>.

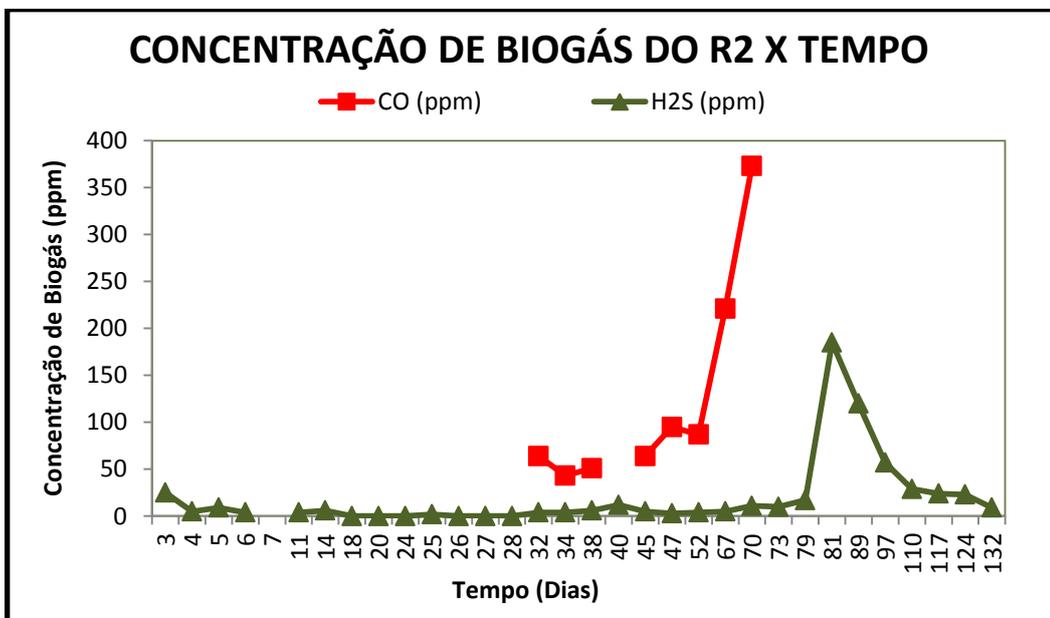
Ainda, segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), nem todo o material orgânico é convertido a CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, existindo uma certa parcela não biodegradável, dependente do conteúdo de lignina. Conforme os estudos realizados nos dois biorreatores pelo GGA/UFCEG em pesquisas paralelas, os grupos fungicos tiveram valores abaixo do esperado, e, portanto, a lignina e celulose, material do seu metabolismo foram degradados, talvez, em quantidades abaixo do esperado, o que também pode ter afetado na geração de metano, pois bactérias metanogênicas são incapazes de metaboliza-los.

A Figura 49 e Figura 50, mostram as concentrações volumétricas (ppm) de CO e H<sub>2</sub>S em função do tempo de enchimento dos biorreatores. As concentrações observadas no período do monitoramento com Drager para o biorreator 1 variaram entre 15 ppm e 300 ppm para CO, e 0 ppm a 18 ppm para H<sub>2</sub>S. Já para o biorreator 2, o CO variou de 43 ppm a 373, e para H<sub>2</sub>S, essa variação foi 0 a 185 ppm. De acordo com os valores apresentados, observa-se grandes variações, chegando a valores elevados, ultrapassando os valores recomendados, pois 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, e concentrações acima de 400 ppm seriam potencialmente mortais (AIRES, 2013).

**Figura 49: Concentração volumétrica (%) de CO, H<sub>2</sub>S e em função do tempo de enchimento do Biorreator 1**



**Figura 50: Concentração volumétrica (%) de CO e H<sub>2</sub>S e em função do tempo de enchimento do Biorreator 2**



Conforme a Figura 49, observa-se que as maiores concentrações de CO presentes no biorreator 1, foi entre o 47º dia ao 70º dia de monitoramento,

período em que as concentrações de  $O_2$  foram mais elevadas, devido a um problema operacional na estrutura do biorreator que ocasionou um vazamento, e conseqüentemente possibilitou a entrada do ar atmosférico para o interior do biorreator.

$H_2S$  é um gás incolor de odor forte, tóxico, mais denso que o ar e tem como principal fonte a decomposição anaeróbia dos excrementos. Pode causar sérios danos à saúde humana e dos animais, estando relacionado à redução de desenvolvimento dos animais. Seu odor característico já é detectado a partir 0,01 ppm (VERSTEGEN et al., 1994). O gás sulfídrico só é formado na ausência de oxigênio, e pode ser encontrada em rios poluídos, estação de tratamento de esgoto sendo resultante de processos de biodegradação. Este gás provoca a corrosão e conseqüentes prejuízos à conservação das instalações. Muito se investe atualmente em termos de pesquisa visando o controle do  $H_2S$ , mas é difícil ainda hoje a garantia de odor zero o tempo todo na área em torno da ETE (PIVELI, 2006).

Segundo Campos et al (1999) quanto mais elevado for o pH (acima de 7) menor será a existência do  $H_2S$  na forma de gás. Reduzindo a exalação de odores. De acordo com Chernicharo (2007) grandes quantidades de  $H_2S$  são devidas a baixos pHs, elevadas concentrações de ácidos voláteis entre outros fatores. Isto vai ao encontro do que foi observado nos biorreatores analisados.

A presença de sulfato em água residuária provoca uma alteração das rotas metabólicas no digestor anaeróbio, em virtude de uma competição por substrato, que estabelece entre as bactérias sulforedutoras e os microrganismos fermentativos, acetogênicos e metanogênicos. Dessa forma, dois produtos finais passam a ser formados: (através da metanogênese) e sulfeto (através da redução de sulfato). A magnitude dessa competição está relacionada a uma série de aspectos, particularmente o pH e a relação  $DQO/SO_4^{2-}$  na água residuária. Contudo, destaca-se que não foram realizadas análises de DQO neste estudo, portanto, ocorreu interrupção deste dado quanto a geração de informação. A produção de sulfetos pode provocar sérios problemas durante o tratamento desses despejos (Lettinga, 1995 e Visser, 1995). A redução  $SO_4^{2-}$  resulta na formação de  $H_2S$ , um composto inibidor para as arqueas metanogênicas, podendo reduzir sua atividade e a capacidade do reator anaeróbio. Deve-se destacar que a presença de sulfetos causa uma elevada

demanda de oxigênio no efluente e também problemas de mau cheiro. Uma etapa de pós-tratamento para remoção de sulfetos pode ser necessária. Assim, para uma mesma quantidade de material orgânico presente no despejo, a redução de sulfato diminui a quantidade de metano produzido. A redução de 1,5g de  $\text{SO}_4^{2-}$  é equivalente a utilização de 1,0g de DQO, o que significa uma menor disponibilidade para conversão em  $\text{CH}_4$ .

Estudos realizados no Instituto de Tecnologia Química e Biológica da Universidade Nova de Lisboa (2007), mostraram pela primeira vez que o monóxido de carbono tem a capacidade de neutralizar as bactérias. Este efeito foi demonstrado para várias bactérias, em particular no bem conhecido patogênico *Estafilococos*. Este achado pode, inclusive, direcionar o metabolismo interno nos biorreatores para que ocorram menores concentrações desse gás.

Desta forma, tanto o  $\text{CO}$  como o  $\text{H}_2\text{S}$  devem ser monitorados para melhorar a eficiência de biorreatores.

Os estudos em ambos os reatores mostraram que os parâmetros físico-químicos devem ser analisados de forma conjunta, pois eles estão relacionados ao bom funcionamento de reatores biológicos. Assim, a concentração de biogás gerada nos reatores estudados foi afetada pelos parâmetros pesquisados e melhorias devem ser propostas para uma efetiva melhora no sistema.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

- A composição gravimétrica mostrou elevada quantidade em massa de resíduos orgânicos que podem ser aproveitadas para a produção de biogás, especialmente, o metano;
- Foi encontrado grandes quantidades plástico, papel e papelão o que demonstra falhas na gestão e gerenciamento dos resíduos gerados na escola;
- Na composição volumétrica, verificou-se uma redução de volume ao se compactar os resíduos em quase a metade quando comparado a volumetria dos resíduos soltos;
- Foram verificadas grandes variações nas temperaturas o que provavelmente desestabilizou o meio interno nos biorreatores de bancada estudados, principalmente, para as bactérias anaeróbias metanogênicas que são sensíveis até as pequenas variações deste parâmetro físico;
- A elevada umidade nos biorreatores estudados, possivelmente, interferiu na presença de microrganismos como os de fungos, organismos necessários à primeira fase de decomposição hidrolítica da matéria orgânica e, conseqüentemente, afetando nas concentrações de metano no interior dos biorreatores estudados; pois às fases posteriores não teriam um substrato e condições; como pH e ácidos voláteis favoráveis;
- A alcalinidade em ambos biorreatores, de uma forma geral, ficou abaixo do esperado e, portanto, influenciou nos valores de pH e, por consequência, na biota microbiana que é a responsável direta pela produção de metano;
- Ácidos voláteis se mantiveram muito altos durante todo o processo fermentativo em ambos os reatores e, isso, provavelmente influenciou na alcalinidade;

- A alcalinidade, pH e ácidos voláteis provavelmente foram os parâmetros físico-químicos responsáveis pelas pequenas concentrações de metano no meio interno, e até, possivelmente no aumento da toxicidade interna nos biorreatores estudados;
- Sólidos voláteis caíram no tempo em ambos os reatores, possivelmente pelo metabolismo através das bactérias fermentativas (hidrolíticas, acidogênicas e acetogênicas);
- No que se refere a concentração dos gases, o CO<sub>2</sub> teve valores elevados e o metano valores muito baixos se comparado com a literatura e isso se deve as condições físico-químicas verificadas em ambos os reatores;
- O ácido sulfídrico teve em alguns momentos concentrações elevadas devido aos parâmetros físico químicos como pH muito baixo, ácidos voláteis em grande quantidade;
- Possivelmente o Monóxido de Carbono foi tóxico às bactérias metanogênicas;
- Os parâmetros físico químicos influenciaram negativamente na concentração de biogás, mas forneceram um direcionamento no que se refere o seu monitoramento e, como, eles podem ser avaliados para que o processo seja otimizado.

## **5.2 Sugestões para futuras pesquisas**

- Estudar as relações carbono/nitrogênio durante todo o monitoramento dos biorreatores;
- Verificar com mais ênfase os microrganismos presentes nos biorreatores e como estes são afetados pelas condições físico-químicas e a própria concentração de gases;
- Fazer estudos sobre a toxicidade do meio interno nos biorreatores;

- Verificar às relações entre as trocas de calor com o meio ambiente externo aos biorreatores;
- Analisar as dimensões dos biorreatores, a relação área/volume e de fato comprovar como estes fatores estão relacionados com o comportamento dos biorreatores como um todo: condições físico-químicas e microbiológicas;
- Modificar a proporção de esterco, testando outros percentuais ou até mesmo outro tipo de inóculo.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. NBR 13.896: **Aterros de Resíduos não Perigosos – Critérios de Projeto, Implantação e Operação** - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

ABREU, L.M. **Aspectos microbiológicos de los procesos de nitrificación-desnitrificación**. In: TALLER Y SEMINARIO LATINO AMERICANO TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, 3., 1994, Montevideo. Anais Montevideo: Universidad de la Republica, 1994. p. 55-63

AIRES, K. O. **Monitoramento das Concentrações de Gases em uma Célula Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Campina Grande** – PB. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

AGROENERGIA DA BIOMASSA RESIDUAL, Revista. **Perspectivas Energéticas, Ambientais e Socioeconômicas**. 2<sup>a</sup> ed. Itaipu Binacional, Organização Nações Unidas para Alimentação e Agricultura / FAO TechnoPolitik Editora, 2009.

ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife. 2007.

ALVES, I. R. F., **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ANASTÁCIO, M. C. F. **Produção de Energia na Forma de Biogás a Partir de Resíduos Animais para o Desenvolvimento Rural**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade do Porto. Porto, 2010.

APHA – **American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th. Washington: Public Health Association, 2005.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 77p.

BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos orgânicos**. Dissertação de Mestrado do Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. 2009. 90p.

BLEY JR, C., LIBANIO, J.C., GALINKIN, M., OLIVEIRA, M.M., **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas Energéticas, Ambientais e socioeconômicas**. 2<sup>a</sup> ed. Itaipu Binacional, Organização Nações Unidas para Alimentação e Agricultura / FAO TechnoPolitik Editora, 2009. 140.

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.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J. G. L., BARROS, M. T. L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N., EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002. v. 1, 305 p.

CATAPRETA, C. A. A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação**. 2008. 337 p. Tese 113 (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**. XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.

CHERNICHARO, C. A. L.; **Reatores Anaeróbios**. 2<sup>o</sup> ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. f75. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Paraná, 2006.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 03 de 28/06/90, estabelece os padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos, 1990.

EIGENHEER, E. M. **A História do Lixo, A Limpeza Urbana Através dos Tempos**. Porto Alegre, RS Pallotti, 2009.

FELIZOLA, C. de S. **Estudo cinético do tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. 2006. 89p.

FONSECA, E. **Iniciação ao estudo dos resíduos sólidos e da limpeza urbana**. 2. ed., João Pessoa-PB, 2001.

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. **Manual de Saneamento**. 3ª ed. Brasília, DF, 2007.

GERARDI, M. H.; **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. ed. John Wiley & Sons Inc, New Jersey, Canadá, 175p, 2003.

GUEDES, V. P. **Estudos do fluxo de gases através do solo de cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos**. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

GUNASEELAN V., **Anaerobic digestion of Biomass for methane production: a Review, Biomass and Bioenergy**, 1997.

Kunz, A. **Suinocultura Brasileira e o cenário de créditos de carbono Pós Cop-15. Suinocultura Industrial**, n 3, 2010.

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

IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. 26 de Abril de 2012. [http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=13932](http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=13932) (acesso em 05 de Janeiro de 2014).

IWASAKI, L. F. L; ANDRADE, J. C; PONTES, B.P; DOMINQUINI, R.B. **APROVEITAMENTO DO METANO DO LIXO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E COTA DE CARBONO**. Revista Ciências do Ambiente On-Line Volume 5, Número 2, Dezembro, 2009

KJELDSSEN, P.; Christensen, T.H. (1990) **Leaching tests to evaluate pollution potential of combustion residues from an iron recycling industry**. *Waste Management & Research*, 8, 277-292. (Also printed in Sardinia 89. 2nd International Landfill Symposium, Proceedings, 1: LXVII-1/18).

LAY, J. J. et al. **Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste**. *JapanElsevierScience*.V. 36, nº 6 – 7, p. 493 – 500. 1997.

LEI 12.305/2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos- PNRS**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. 2010.

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.

LEITTINGA, G. Introduction. In: **International course on anaerobic treatment. Wageningen Agricultural University / IHE Delft.** 1995.

LEITTINGA, G.; HULSHOF POL, L. W. & ZEEMAN, G.; **Biological Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic Wastewater Treatment.** Lecture Notes. Wageningen Agricultural University. ed. January 1996.

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

LIMA, L. M. Q. **Tratamento e Biorremediação.** 3 ed. São Paulo: Hemus Livraria, 265p. 2004.

LINDEMEYER, R. M. **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DO USO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA: 2008. 105 p. (ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DO USO DO BIOGÁS COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Ciências da Administração, Florianópolis, SC. 2008. NOVAES, W., RIBAS, O. e NOVAES, P. D. C. Agenda 21 Brasileira - Bases para discussão. Brasília: MMA/PNUD, 2000. 196p.

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

LOPES, W.S; LEITE, V.D.; SOUZA, J.T.; PRASAD, S.; ATHAYDE JUNIOR, G.B. (2003). **Fatores intervenientes no processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos.** In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Joinville, SC

MAGALHÃES, A. M; MAGALHÃES, A. B. S; MATOS, A. T. **Levantamento e Diagnóstico das Condições Sócio-Econômicas e Culturais dos Catadores de Lixo e do Mercado de Recicláveis no Município de Viçosa-Mg.** II Congresso de Educação Ambiental, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

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.

MCCARTY, P.L., Pittmann, B.E. **Environmental Biotechnology: Principles and Applications.** McGraw-Hill – New York, 754 p. 2001

MCDONALD, P.J.; HENDERSON, A.R.; HERON, S.J.E. **The biochemistry of silage.** 2ª Ed. MallowChalcombe Publications, 1991. 340 p.

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.

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

MEIRA, R. C. **Influência de fungos e bactérias aeróbias totais na biodegradação de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB em escala experimental.** Engenharia Ambiental. Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n.3, p. 333-349, 2009.

MENEZES, J. M. C. **Influência da concentração de sólidos totais e temperatura na bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.** 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental). Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 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.

OKUMU, J; NYENJE, R. **Municipal solid waste management under decentralisation in Uganda.** Habitat International, 2000.

OLIVEIRA, S. A. **Limpeza Urbana: Aspectos Sociais, Econômicos e Ambientais.** 123p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Federal da Paraíba/Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2004.

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.

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

PECORA, V. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto Residencial da USP- Estudo de Caso.** Dissertação (Mestrado)- Programa Inter unidades de Pós-graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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.

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

POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills.** Tech Project n. E20 G01. 1985

POULSEN, T. G. **Anaerobic digestion.** In **Solid Waste Management.** Aalborg University, Denmark. 2003.

PRAMOD K. PANDEY, et al. **Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and unstirred conditions.** **Biomass and Bioenergy.** V.35, p. 2705-2720, 2011.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbico.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Núcleo de Tecnologia. Recife, 2012.

ROUQUAYROL, M. Z; ALMEIDA FILHO, N. **Epidemiologia e Saúde Pública.** 5 ed. Rio de Janeiro: Medsi, 1999, 500p.

SAWAZAKI, HaikoEnok; TEIXEIRA, João Paulo Feijão; MORAES, Roberto Machado de. **O pH e a temperatura na produção de biogás a partir de casca de arroz.** In: *Bragantia.* Campinas: v. 44, n. 2, p. 715-721, 1985.

SILVA, A. S. **Influência do ph na fitotoxicidade dos resíduos sólidos urbanos presentes em uma célula experimental.** In: II Simpósio Sobre Resíduos Sólidos –USP - II SIRS, São Paulo, SP -2011.

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

STAFFORD, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R. **Methane Production From Waste Organic Matter.** CRC Press, Inc. 285p.1980.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VINIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues.** New York: Irwin MacGraw-Hill, 1993. 978p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THESEN, H.; VIGIL, S. A. **Composicion y Características, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedero.** **Gestion Integral de Resíduos Sólidos,** v. 1, Mc Graw Hill., 1994.

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

VAN HAANDEL, A. C., Lettinger, G. (1994). **Tratamento Anaeróbio de Esgoto: Um Manual para Regiões de Clima Quente**, Epgraf, Campinas Grande, 240p.

VEJA, Revista Veja – **Edição Especial – Como o lixo vira Riqueza**, São Paulo – SP: Editora Abril, ano 44/nº52 – Semanal, Veja 2249; 83p. ISSN 0100 – 7122; dez, 2011.

VERSTEGEN, M. W. A.; TAMMINGA, S. GREERS, R. **The effect of gaseous pollutants on animals**. In: DEWI, I.A. et al. (eds.). Pollution in Livestock Production Systems. Wallingford: CAB International, 1994. p.71-79.

VISSER, A. Anaerobic treatment of **sulfate containing waste water**. In: **International course on anaerobic treatment**. Wageningen Agricultural University / IHE Delft. Wageningen, 1995.

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