



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
ENGENHARIA AMBIENTAL



FELIPE CALSAVARA MARTINES

**INFLUÊNCIA DA RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA BIODIGESTÃO  
ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E NA PRODUÇÃO  
DE BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA  
2015



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA  
FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
ENGENHARIA AMBIENTAL



FELIPE CALSAVARA MARTINES

## **INFLUÊNCIA DA RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica do Paraná, Câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. MSc. Bruno de Oliveira Freitas.

LONDRINA  
2015



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do**  
**Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Influência da taxa de recirculação de lixiviado na biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás

por

Felipe Calsavara Martines

Monografia apresentada no dia 25 de novembro de 2015 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Profa. Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira  
(UTFPR)

---

Prof. Msc. Bruno de Oliveira Freitas  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter permitido que eu tivesse essa oportunidade e conseguisse alcançar esse objetivo, por todas as vezes que pedi sua benção e iluminação e fui agraciado pelo Senhor. Sem as orações e a fé no Senhor não conseguiria ter chegado até onde cheguei.

Agradeço aos meus pais que não mediram esforços para que eu pudesse chegar até aqui e conseguir a minha formação. Obrigado por sempre me incentivarem a estar buscando mais conhecimentos e nunca desistir dos objetivos, me mostrando que é preciso ter persistência para realizar os sonhos. Obrigado por todo o amor, carinho e dedicação que sempre me deram, além de palavras de consolo e incentivos nos momentos difíceis. Nunca esquecerei de tudo o que fizeram e fazem por mim e serei eternamente grato a vocês. Amo muitos vocês.

Agradeço ao meu orientador Bruno de Oliveira Freitas, que com todo seu conhecimento e dedicação tornou possível a construção dos reatores utilizados no experimento. Obrigado professor por toda atenção que sempre demonstrou me ensinando como fazia todas as análises necessárias no monitoramento do experimento e sempre estar disposto a ajudar e tirar as dúvidas que surgiam pelo caminho. O senhor foi fundamental durante todo o período de realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que no decorrer do curso me passaram conhecimentos de grande importância para minha formação.

Agradeço a toda minha família pelo apoio e incentivo que sempre me deram nessa caminhada e sei que são pessoas que posso contar sempre que precisar.

Agradeço aos amigos de laboratório Rafael, Lívia e Renan pela ajuda que me deram quando precisei e por tornarem o ambiente mais descontraído e alegre.

## RESUMO

MARTINES, Felipe C. **Influência da recirculação de lixiviado na biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e na produção de biogás.** 2015. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2015.

O aumento na quantidade de resíduos gerados diariamente demonstra a necessidade de fazer o seu gerenciamento e disposição final adequada, afim de preservar o meio ambiente e a saúde da sociedade. Uma ótima alternativa para a disposição final dos resíduos é o aterro sanitário, que utiliza técnicas específicas de construção e operação. A recirculação do lixiviado é uma excelente técnica para aumentar a vida útil de um aterro, pois contribui para a aceleração da degradação anaeróbia dos resíduos, fato muito importante visto a dificuldade em encontrar uma área adequada para sua construção, além dos altos custos envolvidos. Esta técnica de operação também serve para tratar o lixiviado, sendo importante devido ao seu alto potencial poluidor. Este trabalho teve como objetivo dar continuidade ao experimento iniciado por Souza (2014) e analisar a influência de diferentes taxas de recirculação na degradação dos resíduos e produção de biogás, utilizando para isto reatores anaeróbios. Para montagem dos reatores foram utilizados recipientes de polietileno de alta densidade, com 48 cm de altura, 32 cm de diâmetro e volume aproximado de 30 litros, contendo sistema para simulação de chuva, coleta e recirculação de lixiviado e produção quantitativa de biogás. O preenchimento deles foi realizado com os resíduos já inicialmente degradados pelo experimento de Souza (2014). Os reatores foram operados com os seguintes tratamentos: reator 1 (R1) sem recirculação, reator (R2) com recirculação de 50% do lixiviado gerado e reator 3 (R3) com recirculação de 100% do lixiviado gerado. Foram realizados monitoramentos físico-químicos na massa de resíduos ao fim do experimento e no lixiviado ao decorrer de todo o experimento que teve duração de 189 dias, além do monitoramento da quantidade de produção do biogás. Os parâmetros analisados para a massa de resíduos foram: pH, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis, carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total, enquanto que para o lixiviado foram: pH, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis, demanda química de oxigênio (DQO), ácidos voláteis, alcalinidade e nitrogênio amoniacal. Os reatores operando com recirculação demonstraram uma maior degradação da massa de resíduos, fato este observado tanto pela análise visual quanto pelos resultados obtidos das análises físico-químicas. Ocorreu a melhora na qualidade do lixiviado de todos os reatores, mas o melhor desempenho foi apresentado no reator operando com 100% de recirculação, fato observado pelas maiores reduções dos parâmetros neste reator, além de ter apresentado uma maior produção de biogás. Com os resultados obtidos, conclui-se que a recirculação de lixiviado contribui para acelerar a degradação dos resíduos, tratar o lixiviado e aumentar a produção de biogás.

**Palavras chaves:** Recirculação do lixiviado. Simulação de aterro sanitário. Aceleração da degradação anaeróbia. Produção de biogás.

## ABSTRACT

MARTINES, Felipe C. **Influence of recirculation leachate on anaerobic digestion of municipal solid waste and production of biogas.** 2015. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2015.

The increase in the amount of waste generated daily demonstrates the need to make a properly management and final disposal in order to preserve the environment and the health of society. A great alternative to the final disposal of waste is the landfill, which uses specific techniques of construction and operation. This technique operation also serves to treat the leachate, which is important due to the high pollution potential. This study aimed to continue the experiment started by Souza (2014) and analyze the influence of different recirculation rates in the degradation of waste and produce biogas using anaerobic reactors for this. For the construction of the reactors used were high-density polyethylene containers, 48 cm high, 32 cm in diameter and approximate 30 liters of volume containing system for simulating rain, leachate collection and recirculating and quantitative production of biogas. Their filling was performed with the waste already degraded initially by experiment Souza (2014). The reactors were operated with the following treatments: reactor 1 (R1) without recirculation reactor (R2) with recirculating 50% of the leachate generated and third reactor (R3) with 100% recirculation of the leached generated. Chemical and physical monitoring was carried out in the mass of waste, leachate and amount of production of biogas until the end of the experiment, which has had the duration of 189 days. The parameters analyzed for the mass of waste were: pH, electrical conductivity, total volatile solids solids, total organic carbon (TOC) and total nitrogen, while for the leachate were: pH, electrical conductivity, total volatile solid, chemical oxygen demand (COD), volatile acids, alkalinity and ammonia nitrogen. The reactors that were operating with recirculation demonstrated increased degradation of the waste mass, a fact observed by both visual analysis and the results of physicochemical analysis. The improvement occurred in all reactors, but the best performance was presented by the reactor operating at 100% recirculation, a fact noted by the reductions of variables in this reactor, besides has presented a greater production of biogas. With the obtained results, it is concluded that the recirculation of leacheate contributed to accelerate the degradation of waste, to treat the leachate and to increase the production of biogas.

**Keywords:** Recirculation of leachate. Landfill simulation. Acceleration of anaerobic degradation. Production of biogas.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da caracterização e classificação de resíduos sólidos.....	17
Figura 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados no Brasil.....	20
Figura 3 – Fluxograma da hierarquização do gerenciamento dos resíduos sólidos.....	21
Figura 4 – Esquema de um aterro sanitário.....	24
Figura 5 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	25
Figura 6 - Reator montado para experimento.....	39
Figura 7 – (a) Vista da parte externa do sistema de introdução e distribuição de água e (b) Vista da parte interna do sistema.....	40
Figura 8 – Tela colocada na entrada interna da torneira.....	40
Figura 9 – Sistema de medição da quantidade de biogás gerado.....	41
Figura 10 – Reatores instalados na casa de vegetação da UTFPR.....	42
Figura 11 – Fluxograma de um ciclo de simulação de chuva e recirculação do lixiviado.....	44
Figura 12 – (a) Vista superior do reator 1, (b) Vista superior do reator 2 e (c) Vista superior do reator 3.....	49
Figura 13 – Resíduos do reator 1 após o término do experimento.....	50
Figura 14 – Resíduos do reator 2 após o término do experimento.....	51
Figura 15 – Resíduos do reator 3 após o término do experimento.....	52

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Produção de lixiviado nos reatores.....	55
Gráfico 2 – Volume acumulado da produção de lixiviado ao longo do experimento.....	56
Gráfico 3 - Valores de pH do lixiviado nos reatores.....	57
Gráfico 4 – Valores das concentrações de ácidos voláteis do lixiviado nos reatores....	59
Gráfico 5 – Valores da alcalinidade do lixiviado nos reatores.....	61
Gráfico 6 – Valores da condutividade elétrica do lixiviado nos reatores.....	62
Gráfico 7 – Valores de DQO do lixiviado nos reatores.....	64
Gráfico 8 – Valores de sólidos totais do lixiviado nos reatores.....	65
Gráfico 9 – Valores de sólidos voláteis do lixiviado nos reatores.....	66
Gráfico 10 – Concentrações de nitrogênio amoniacal do lixiviado nos reatores.....	67
Gráfico 11 – Produção de biogás para os reatores.....	68
Gráfico 12 – Produção acumulada de biogás para os reatores ao longo do experimento.....	70



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição gravimétrica dos resíduos coletados no Brasil em 2012.....	19
Tabela 2 – Quantidade de municípios por tipo de destinação adotada em cada região do Brasil.....	21
Tabela 3 – Constituintes típicos do biogás produzido em aterros sanitários.....	29
Tabela 4 – Comparação entre biogás e outros combustíveis.....	31
Tabela 5 – Parâmetros do lixiviado de diferentes aterros sanitários brasileiros.....	33
Tabela 6 – Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano padrão.....	45
Tabela 7 – Parâmetros monitorados na fração orgânica da massa de resíduos.....	46
Tabela 8 – Caracterização da fração orgânica inicial e final dos reatores.....	47
Tabela 9 – Parâmetros analisados no lixiviado e métodos utilizados.....	48
Tabela 10 – Caracterização da fração orgânica dos resíduos no início e no fim do experimento.....	53

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca <sup>2+</sup>	Íon Cálcio
Cd <sup>2+</sup>	Íon Cádmi
CEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl <sup>-</sup>	Íon Cloro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
Cr <sup>3+</sup>	Íon Cromo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Fe <sup>2+</sup>	Íon Ferro
HAc	Ácido Acético
HCO <sub>3</sub>	Íon Carbonato
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IAPAR	Instituto agrônômico do Paraná
K <sup>+</sup>	Íon Potássio
Mg <sup>2+</sup>	Íon Magnésio
Mn <sup>2+</sup>	Íon Manganês
Na <sup>+</sup>	Íon Sódio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Íon Amônia
Ni <sup>2+</sup>	Íon Níquel
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>3</sub>	Nitrato
Pb <sup>2+</sup>	Íon Chumbo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PU	Poliuretano
RSU	Resíduo Sólido Urbano

RSUp	Resíduo Sólido Urbano Padrão
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	Íon Sulfato
ST	Sólidos Totais
SUDHERSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
SV	Sólidos Voláteis
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Zn <sup>2+</sup>	Íon Zinco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
3.1 CONTEXTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....	16
3.2 ATERRO SANITÁRIO.....	22
3.2.1 Digestão Anaeróbia.....	24
3.2.2 Produção de biogás .....	27
3.2.3 Produção de lixiviado.....	31
3.2.4 Recirculação de lixiviado .....	34
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS. ....</b>	<b>38</b>
4.1 REATORES.....	38
4.2 PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS REATORES.....	42
4.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS UTILIZADOS.....	44
4.4 MONITORAMENTO DOS REATORES.....	46
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
5.1 ENCERRAMENTO DO EXPERIMENTO E ABERTURA DOS REATORES.....	49
5.2 ANÁLISE DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS.....	52
5.3 ANÁLISES DO LIXIVIADO.....	55
5.3.1 Volume do Lixiviado Produzido.....	55
5.3.2 pH.....	57
5.3.3 Ácidos Voláteis.....	59
5.3.4 Alcalinidade.....	60
5.3.5 Condutividade Elétrica.....	62
5.3.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO) .....	63
5.3.7 Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV) .....	65
5.3.8 Nitrogênio Amoniacal.....	66
5.4 PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	68

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento das populações e o desenvolvimento industrial, tecnológico e econômico está ocorrendo um conseqüente aumento de renda de parte da população, fazendo com que o consumo cresça e que conseqüentemente aumente cada vez mais a quantidade de resíduos sólidos que são gerados diariamente. Com este aumento da quantidade de resíduos, é necessário dar uma destinação adequada, evitando dessa maneira que venham a causar impactos negativos e significativos ao meio ambiente e problemas à saúde da população.

A coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos são alguns dos grandes problemas enfrentados pelos administradores públicos, visto que a geração de resíduos tende a aumentar cada vez mais. Isso pode ser verificado por meio dos dados da ABRELPE (2014), de que no Brasil entre 2013 e 2014 houve um aumento de 2,9% na geração de resíduos sólidos, um índice que é maior que a taxa de aumento da população, que foi de 0,9%. No Brasil, em 2014, 58,4% dos resíduos sólidos urbanos coletados tiveram destinação ou disposição final adequada, mas esse panorama ainda precisa melhorar, pois 41,6% dos resíduos coletados é depositado em lixões ou aterros controlados, que se diferenciam pouco dos lixões em termos de impactos negativos para o meio ambiente (ABRELPE, 2014).

De acordo com a Norma Brasileira NBR 8419/92, a disposição final de resíduos sólidos em aterro sanitário é uma técnica que utiliza critérios de engenharia com critérios de operação específicos para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, minimizando dessa maneira o impacto ao meio ambiente e os danos à saúde pública (ABNT, 1992).

O biogás que é produzido nos aterros sanitários pode ser definido como a mistura gasosa do metano, dióxido de carbono e outros gases em menores proporções, através do processo de degradação matéria orgânica pela ação de bactérias (CASSINI, 2003; MONTAGNA, 2013).

O lixiviado, é um líquido escuro, ácido e mal cheiroso que se acumula na parte inferior do aterro sendo resultante da mistura das águas pluviais infiltradas com o

chorume, gerado pela decomposição da matéria orgânica como um subproduto da atividade bacteriana (BIDONE e POVINELLI, 1999; SOUZA, 2014).

A recirculação do lixiviado é uma excelente alternativa para acelerar o processo de degradação dos resíduos sólidos confinados em aterros sanitários, fornecendo microrganismos, umidade e nutrientes necessários para uma rápida degradação (CINTRA, 2003).

Dessa maneira, este trabalho visa analisar a influência de diferentes condições de recirculação de lixiviado na digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos e na produção de biogás, por meio do monitoramento de digestores anaeróbios de resíduos sólidos urbanos sob simulação de chuva

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de diferentes porcentagens de recirculação de lixiviado na digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e na produção de biogás utilizando reatores anaeróbios como unidade de simulação de uma célula de aterro sanitário.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as características do lixiviado produzido no processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, sob condição de simulação de chuva a partir de dados históricos da região de Londrina.
- Verificar as características físico-químicas da fração orgânica da massa de resíduos sólidos ao término do experimento.
- Quantificar a produção do biogás.
- Analisar, comparativamente, a influência da recirculação de lixiviado, no processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CONTEXTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio NBR 10004 (2004a) define resíduos sólidos como:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola de serviços e de varrição. Fica incluída nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).

Monteiro et al. (2001) definem resíduos sólidos como todo material sólido ou semi-sólido indesejável que precisa ser descartado por ser considerado inútil ou não necessário por quem o gerou, em qualquer tipo de recipiente que seja utilizado para este ato. Os autores destacam o caráter do resíduo sólido possuir um valor relativo, pois um resíduo que não apresenta nenhum tipo de utilidade para quem o gerou, pode, para outro, ser utilizado como matéria prima para um novo produto ou processo. Portanto, é como se o resíduo sólido fosse assim conceituado somente quando ninguém mais reivindicasse sua utilização.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos potenciais riscos que suas características físicas, químicas e infectocontagiosas podem causar ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados corretamente. Ainda segundo a referida norma, os resíduos devem ser classificados envolvendo a identificação do processo ou atividade que lhe deu origem, suas características e constituintes, sendo necessário a comparação destes constituintes com resíduos e substâncias que contenham riscos à saúde e ao meio ambiente já conhecidos. Na Figura 1 verifica-se a caracterização e classificação dos resíduos sólidos.

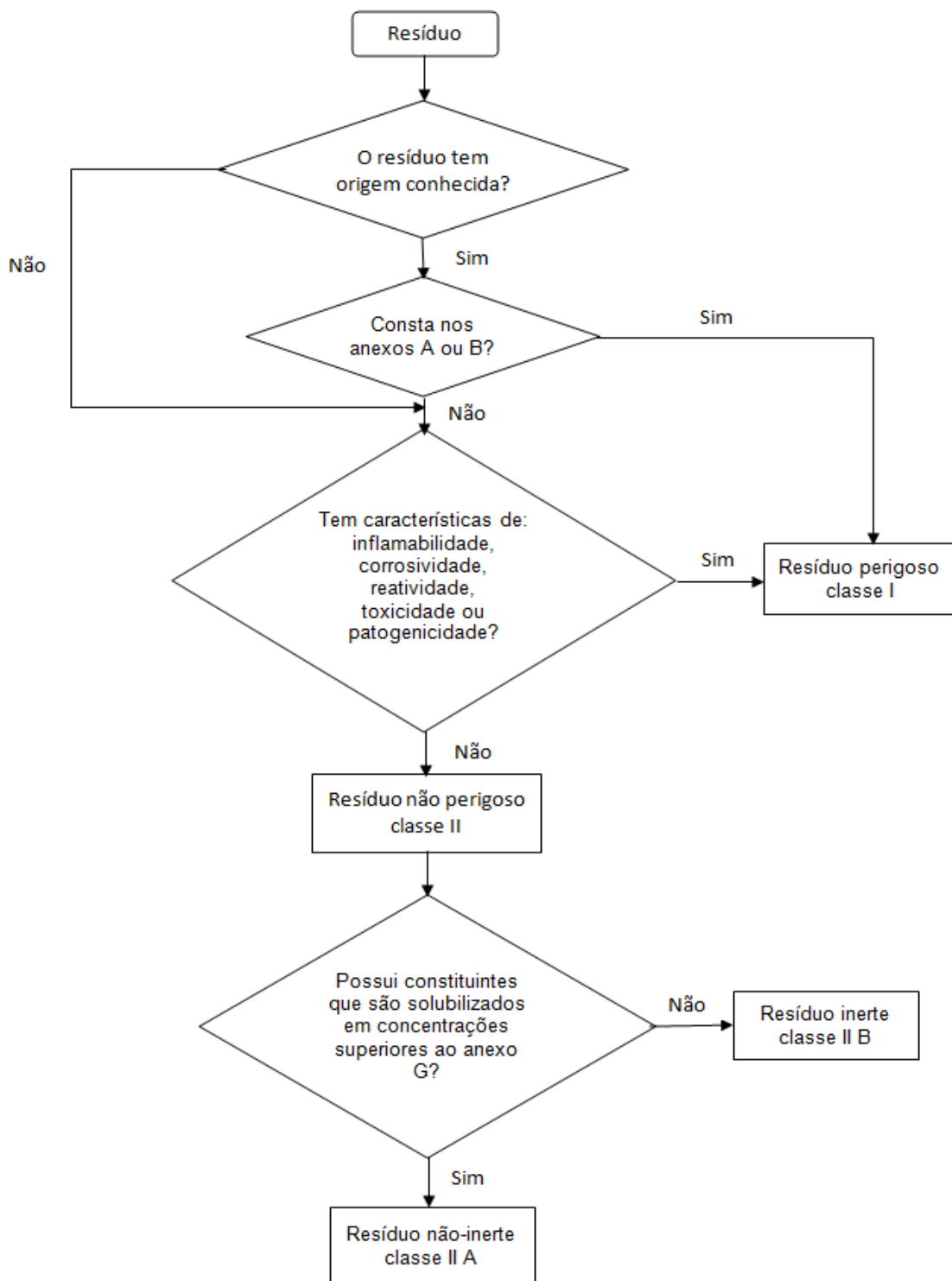


Figura 1 – Fluxograma da caracterização e classificação de resíduos sólidos.

Fonte: ABNT (2004).

Conforme estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal 12305 que foi instituída no Brasil, em 2010, a classificação se dá segundo a origem do resíduo e pode ser verificada no Quadro 1 (BRASIL, 2010).

<b>Origem dos Resíduos</b>	<b>Descrição</b>
Domiciliares	Originários de atividades domésticas em residências urbanas
Limpeza urbana	Originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana
Sólidos urbanos	Engloba os resíduos domiciliares e resíduos de limpeza urbana, como varrição das ruas, capinação e poda
Estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	São os resíduos gerados nessas atividades
Serviços públicos de saneamento básico	Os gerados nessas atividades, exceto os de limpeza urbana
Industriais	Os gerados nos processos produtivos e instalações industriais. De acordo com BIDONE e POVINELLI (1999), inclui uma grande quantidade de lodos decorrentes do tratamento de efluentes líquidos industriais, que muitas vezes são tóxicos e perigosos
Serviços de saúde	Os 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), englobando resíduos sólidos de hospitais, de clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultório odontológicos e de farmácias (BIDONE e POVINELLI, 1999)
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
Agrossilvopastoris	Os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades
Serviços de Transporte	Os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira
Mineração	Os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios

**Quadro 1 – Classificação dos resíduos sólidos segundo sua origem.**

Fonte: BRASIL (2010).

Segundo BIDONE e POVINELLI (1999); MONTEIRO et al. (2001), a geração de resíduos varia de acordo com diversos fatores, como por exemplo: a) socioeconômicos: nível cultural e educacional, poder aquisitivo, desenvolvimento tecnológico; b) demográficos: quanto maior a população maior a geração per capita; c) datas e épocas especiais: natal, ano novo, páscoa, férias escolares; d) climáticos: chuvas, outono, verão, primavera e inverno.

BIDONE e POVINELLI (1999) definem a composição gravimétrica como a porcentagem, geralmente em peso, das diferentes frações dos materiais constituintes dos resíduos, dividindo-se geralmente em matéria orgânica, papel, papelão, plástico, trapos, couro, metais, vidro, borracha, madeira e outros. A composição gravimétrica dos resíduos coletados no Brasil em 2012, está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Composição gravimétrica dos resíduos coletados no Brasil em 2012.**

<b>Material</b>	<b>Participação (%)</b>
<b>Metais</b>	2,9
<b>Papel, papelão e TetraPak</b>	13,1
<b>Plástico</b>	13,5
<b>Vidro</b>	2,4
<b>Matéria Orgânica</b>	51,4
<b>Outros<sup>1</sup></b>	16,7
<b>Total</b>	100

Fonte: ABRELPE (2012).

**Notas:**

<sup>1</sup> A categoria outros se refere aos outros materiais não enquadrados nas outras categorias como trapos, couro, borracha madeira e outros (BIDONE e POVINELLI, 1999).

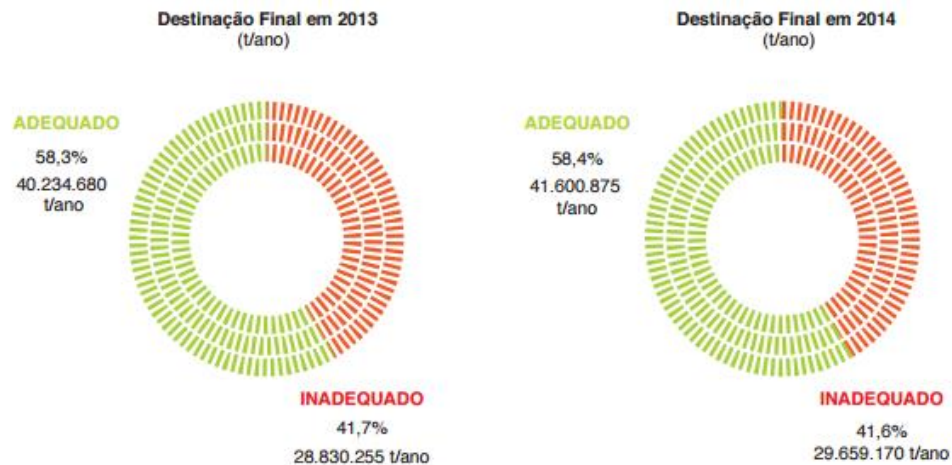
A composição gravimétrica também indica as melhores alternativas tecnológicas de acondicionamento, transporte, tratamento e disposição final adequada dos resíduos gerados (BIDONE; POVINELLI, 1999).

Ainda sobre a importância de se realizar a análise de composição gravimétrica dos resíduos sólidos, ela permite analisar a geração e origem desses resíduos, obtendo-se os subsídios necessários para avaliar se o sistema de gerenciamento dos resíduos está sendo eficiente. A caracterização dos resíduos também traz benefícios para planejar as atividades empregadas na limpeza pública e avaliar o potencial de reutilização, reciclagem e recuperação dos resíduos gerados (MOURA, LIMA e ARCHANJO, 2012).

Segundo o *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014*, relatório anual da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

(ABRELPE, 2014), entre 2013 e 2014 houve um aumento de 2,9 % na geração de resíduos sólidos, um índice que é maior que a taxa de aumento da população, que foi de 0,9%, totalizando mais de 78 milhões de toneladas, sendo um índice bastante superior ao encontrado nos anos passados. Ainda segundo este Panorama, apenas 58,4% dos resíduos urbanos coletados têm destinação final adequada, a outra parcela de 41,6% dos resíduos coletados é depositada em lixões ou aterros controlados, que se diferenciam pouco dos lixões em termos de impactos para o meio ambiente. Verifica-se na Figura 2 a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil nos anos de 2013 e 2014.

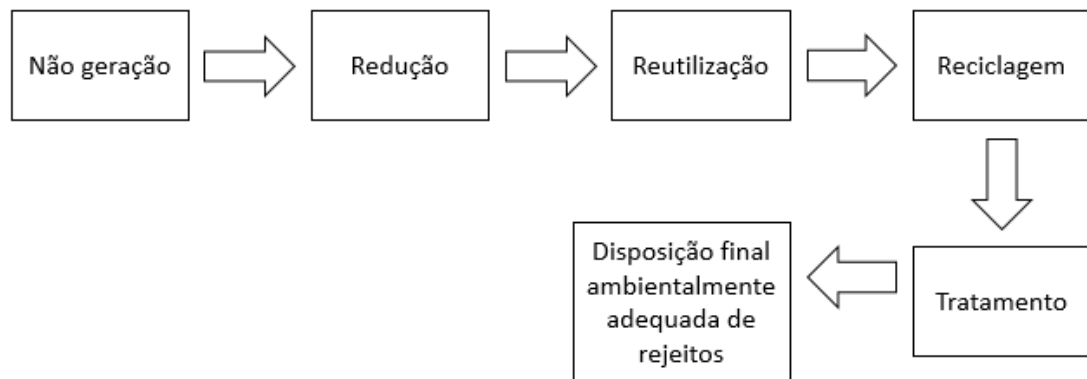
No Brasil a quantidade per capita de resíduos gerados variou entre 0,772 kg/dia e 1,205 kg/dia, tendo como média 0,963 kg/dia (ABRELPE, 2014). Estes valores variam de acordo com a região do Brasil, segundo o porte do município e a cobrança ou não pela de taxa de limpeza urbana e pública (CAMPOS, 2012).



**Figura 2 – Destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados no Brasil.**

Fonte: ABRELPE (2014).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305/2010 – (BRASIL, 2010), estabelece uma hierarquização com as prioridades a serem seguidas na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, conforme pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3 – Fluxograma da hierarquização do gerenciamento dos resíduos sólidos**  
 Fonte: BRASIL (2010).

Apesar de aproximadamente 58,4%, que representa a maior parte, dos resíduos gerados no Brasil serem destinados de forma ambientalmente adequada, tem 3334 municípios que ainda fazem uso de locais inadequados para a destinação dos resíduos gerados, sendo que 1559 municípios fazem uso de lixões, que é a pior forma de destinação dos resíduos, onde deposita-os diretamente sobre o solo sem nenhum tipo de cuidado e nem tratamento para não causar impactos ao meio ambiente (ABRELPE, 2014). Na Tabela 2 mostra-se a quantidade de municípios por tipo de destinação adotada em cada região do Brasil.

**Tabela 2 – Quantidade de municípios por tipo de destinação adotada em cada região do Brasil.**

<b>Destinação Final</b>	<b>Norte</b>	<b>Nordeste</b>	<b>Centro-Oeste</b>	<b>Suldeste</b>	<b>Sul</b>	<b>Brasil</b>
<b>Aterro Sanitário</b>	93	455	164	820	704	2236
<b>Aterro Controlado</b>	112	505	147	644	367	1775
<b>Lixão</b>	245	834	156	204	120	1559
<b>Total</b>	<b>450</b>	<b>1794</b>	<b>467</b>	<b>1668</b>	<b>1191</b>	<b>5570</b>

Fonte: ABRELPE (2014).

### 3.2 ATERRO SANITÁRIO

Antonio (2012) relata que a falta de tratamento e/ou a disposição final incorreta dos resíduos podem gerar impactos ambientais, sanitários e sociais, como exemplo: a transmissão de doenças, contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, a poluição atmosférica pela emissão de gases e a presença de catadores nesse ambiente. Sendo assim, a maneira mais adequada de dar uma disposição final adequada aos resíduos sólidos é utilizando-se de aterros sanitários.

Segundo Borges e Guedes (2008), no mundo inteiro, excetuando-se poucos casos, os aterros sanitários são responsáveis pela principal forma de disposição final dos resíduos sólidos gerados, mesmo com o empenho em reduzir, reciclar e reutilizar tais resíduos. Ainda segundo as autoras, no Brasil, a quantidade de aterros encontra-se em um número significativo, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, sendo que as principais dificuldades de lugares com poucas ou nenhuma unidade, são os custos que ainda são altos para a operação de um aterro sanitário.

De acordo a Norma Brasileira NBR 8419 (ABNT, 1992), que dispõem sobre apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, os aterros sanitários podem ser definidos como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os 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 (ABNT, 1992).

Os critérios de engenharia mencionados consistem no projeto do sistema de drenagem periférica e superficial das águas das chuvas, drenagem do fundo da célula para drenagem e transporte do lixiviado gerado, sistema de tratamento do lixiviado coletado e drenagem e queima do biogás gerado na decomposição da matéria orgânica, sendo estes aspectos construtivos a serem seguidos. Já os aspectos operacionais são: recobrimento diário ou em períodos menores, caso necessário, com argila após a compactação dos resíduos, o selamento e impermeabilização das células

após o alcance da vida útil do aterro e a urbanização final do local (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Cintra (2003) explica que atualmente os aterros sanitários além de serem utilizados como método de disposição final, também são vistos como maneira de tratar os resíduos. Segundo a autora, os aterros sanitários são como reatores que promovem a redução da carga orgânica e converte a massa de resíduos, transformando-os em materiais ou substâncias mais estáveis para a ação dos decompositores, ou seja, nos aterros ocorrem processos que causam a bioestabilização da matéria orgânica.

Os aterros sanitários são passíveis de receberem resíduos biodegradáveis, resíduos inertes e alguns resíduos especiais, que não apresentem toxicidade. Entre os resíduos que não são considerados passíveis de serem dispostos em aterros estão: líquidos voláteis ou solventes, resíduos que contaminariam o lixiviado de maneira a impedir o seu tratamento e resíduos que interferem na atividade dos microrganismos do aterro (MACHADO, 2009).

O local escolhido para implantação de um aterro sanitário deve apresentar características que permitam controlar o risco de contaminação de água, solo e ar, possuir uma localização não muito próxima de zonas urbanas mas que permitam uma maior racionalização do transporte dos resíduos coletados na cidade e deve ser um terreno com amplitude e topografia que permitam por um período longo a sua utilização, a fim de amenizar os altos investimentos que são necessários para a implantação de um aterro sanitário (BORGES e GUEDES, 2008).

Antes de projetar um aterro sanitário e escolher a área que será utilizada é necessário estudos geológicos e topográficos e verificação do tipo de solo. É necessário fazer a impermeabilização do solo, utilizar drenos horizontais para captar os líquidos percolados para tratamento utilizar, drenos verticais para captar os gases gerados pela decomposição dos resíduos. Diariamente é feita a compactação e cobertura da massa de resíduos com uma camada de solo de 20 a 40 cm (MACHADO, 2009). Na Figura 4 representa-se o esquema de construção e operação de um aterro sanitário.



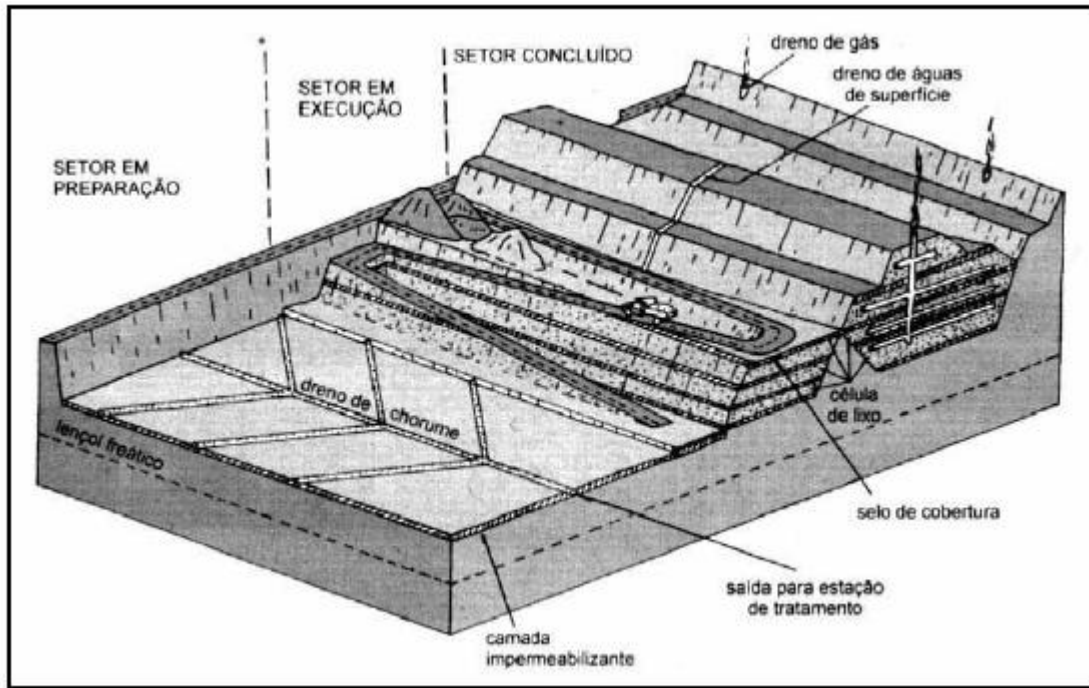


Figura 4 – Esquema de um aterro sanitário.

Fonte: IPT/CEMPRE (2000) *apud* MACHADO (2009).

### 3.2.1 Digestão anaeróbia

Libânio (2002) explica a diferença da digestão aeróbia e da digestão anaeróbia: enquanto na digestão aeróbia, ocorre a oxidação dos compostos orgânicos, que são convertidos em água, gás carbônico e sais minerais, na digestão anaeróbia são obtidos subprodutos orgânicos, como o metano, álcoois, sulfetos e amônia, que podem ser oxidados posteriormente. Outra diferença que o autor ressalta é que na digestão anaeróbia, de maneira diferente da aeróbia, são utilizados como aceptor de elétrons compostos como nitratos, sulfatos e dióxidos de carbono e não o oxigênio.

A digestão anaeróbia envolve processos metabólicos complexos que ocorrem em etapas sequenciais e que são dependentes de no mínimo três grupos de microrganismos: bactérias fermentativas (acidogênicas), bactérias acetogênicas e microrganismos metanogênicos, sendo que cada grupo possui suas funções específicas (CHERNICHARO, 1997).

Apesar do processo de digestão anaeróbia ser de maneira simplificada considerado como duas fases, acidogênica e metanogênica, ele consiste em várias rotas metabólicas, com participação de vários grupos microbianos, cada um com um comportamento fisiológico diferente (CHERNICHARO, 1997). Verifica-se na Figura 5 o fluxograma do processo de digestão anaeróbia que será descrito nos parágrafos a seguir.

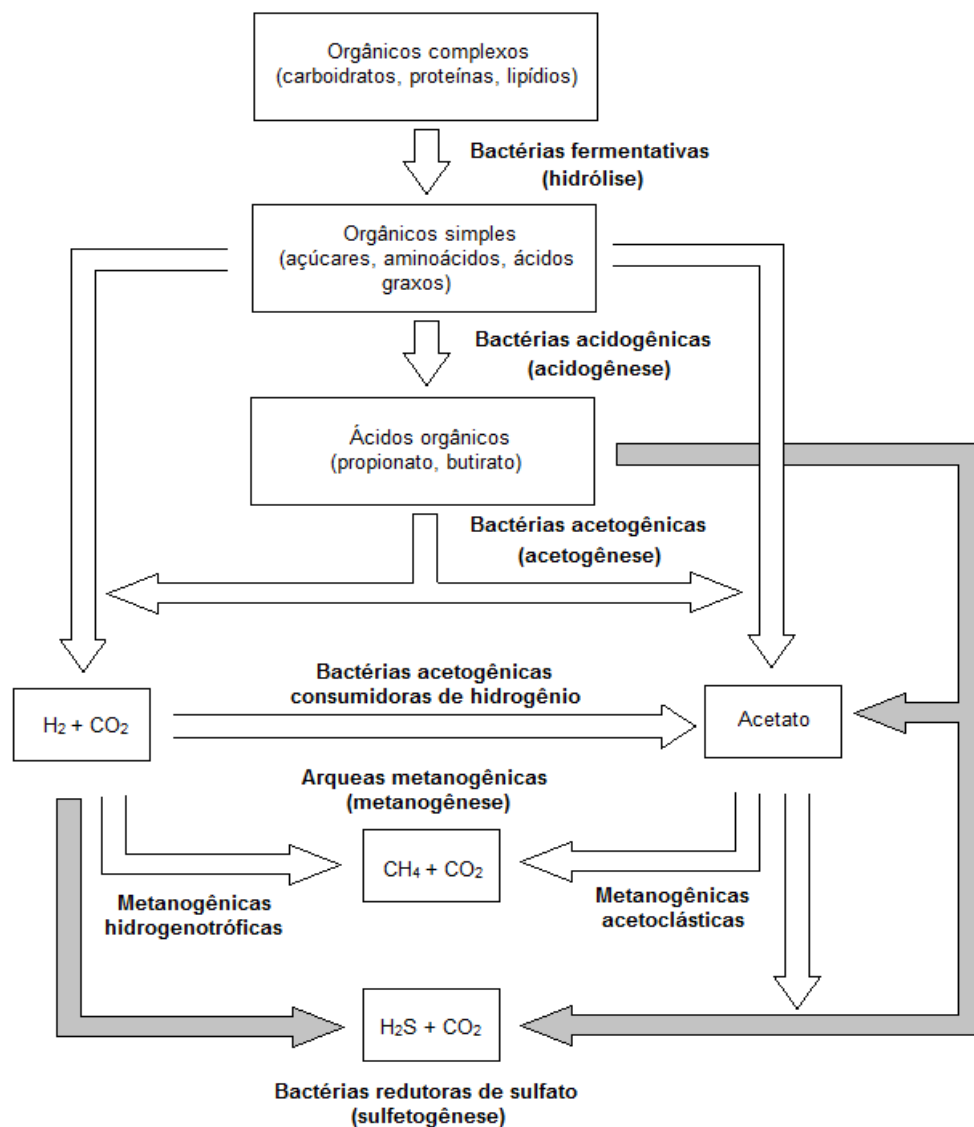


Figura 5 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.

Fonte: CHERNICHARO (1997).

A primeira fase no processo de digestão anaeróbia é a hidrólise de materiais complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples, como os açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, que são resultantes da hidrólise da matéria orgânica complexa. Esses materiais mais simples apresentam moléculas menores de forma que podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas, sendo que a conversão desses materiais é obtida pela ação das exoenzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias acidogênicas, por meio de seu metabolismo fermentativo, assimilam o material hidrolisado, transformando-os em compostos ainda mais simples, como ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois, cetona, dióxido de carbono e hidrogênio, que serão utilizados nos processos subsequentes da digestão anaeróbia. Os organismos fermentativos são usualmente chamados de bactérias fermentativas acidogênicas por possuírem como principal produto os ácidos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

A responsabilidade pela oxidação de compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em substratos adequados para microrganismos metanogênicos (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono) é das bactérias acetogênicas. São assim definidas pelo fato de que sua existência depende da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio (CHERNICHARO, 1997).

Durante a fase da acetogênese a produção de acetato a partir do propionato e butirato é inibida termodinamicamente devido às baixas concentrações de hidrogênio dissolvido e de acetato. Assim, as reações realizadas pelas bactérias acetogênicas só ocorrerão perante a manutenção em baixas concentrações de produtos (hidrogênio e acetato), sendo que isso é possível pela ação de microrganismos consumidores desses produtos (CHERNICHARO, 1997).

Os microrganismos metanogênicos realizam a etapa final da conversão anaeróbia dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, sendo que esses microrganismos são classificados dentro do domínio *Archae*. As arqueas metanogênicas, desempenham um papel ecológico vital em ambientes anaeróbios, pois são responsáveis pela remoção do hidrogênio e produtos da fermentação, gerados nas fases anteriores. Assim, as reações realizadas pelas bactérias acetogênicas tornam-se

possíveis devido à redução da pressão parcial de hidrogênio no meio (CHERNICHARO, 1997).

As arqueas metanogênicas devido a sua fisiologia são divididas em dois grupos, metanogênicas acetotlásticas e metanogênicas hidrogenotróficas. As metanogênicas acetotlásticas utilizam o acetato como fonte de carbono e energia para produzir o gás carbônico e o metano, sendo que elas são responsáveis pela produção de cerca de 60 a 70% do metano, a partir do grupo metil do ácido acético. Já as metanogênicas hidrogenotróficas utilizam o gás carbônico como fonte de carbono e o hidrogênio como fonte de energia, sendo que parte do gás carbônico reage com o hidrogênio para produzir o metano (CHERNICHARO, 1997).

Além das rotas metabólicas e dos microrganismos atuantes já descritos anteriormente, o processo da digestão anaeróbia pode incluir a sulfetogênese, que consiste em redução de sulfatos e formação de sulfetos. A produção de sulfetos é realizada por um conjunto de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias sulforedutoras, que utilizam sulfato e outros compostos a base de enxofre como aceptores de elétrons, para realizar a oxidação de compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias sulforedutoras possuem um metabolismo de fundamental importância para a realização da digestão anaeróbia, devido ao seu produto final, o sulfeto de hidrogênio (CHERNICHARO, 1997).

A redução de sulfatos em reatores anaeróbios é um processo considerado indesejado visto que a produção de sulfeto de hidrogênio causa uma série de problemas como toxicidade, odor, aumento da DQO do efluente líquido e redução na qualidade e quantidade do biogás (SUBTIL, 2007).

### 3.2.2 Produção de biogás

O biogás pode ser definido como a mistura gasosa do metano, dióxido de carbono e outros gases em menores proporções, gerados pelo processo fermentativo

da matéria orgânica, pela ação de bactérias (CASSINI, 2003; MONTAGNA, 2013). A produção de gás em um aterro sanitário é afetada por diversos fatores, tais como: composição dos resíduos, teor de umidade, temperatura, pH, nutrientes, tamanho das partículas dos resíduos e taxa de oxigenação (BORGES e GUEDES, 2008).

A temperatura ideal para ocorrer a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas, sendo que tipicamente, a própria decomposição fornece calor para que ocorra a metanogênese. Temperaturas abaixo de 10° C causa uma redução brusca na produção de metano. Geralmente as maiores taxas de geração de biogás ocorrem por ação das bactérias metanogênicas termofílicas, no entanto, a maioria dos aterros sanitários encontram-se na fase mesofílica (ANTONIO, 2012).

Antonio (2012) explica que quanto maior a porcentagem de resíduos orgânicos maior será o potencial de geração do metano. Ainda segundo o autor, se no aterro sanitário forem mantidas condições de anaerobiose, pH entre 6,8 e 7,2 e uma umidade de aproximadamente 60%, maior será a geração do biogás.

A água é fundamental no processo químico de fermentação anaeróbia e produção de biogás e serve de meio de transporte para os produtos gerados no interior do aterro, além de contribuir para a mistura de alguns componentes solúveis e contribuir para a participação do metano e dióxido de carbono, componentes do biogás, durante a fase anaeróbia (BRAZ, 2001).

A temperatura e a umidade ambiente são dois fatores ambientais de grande importância, pois determinam a velocidade da reação de degradação dos resíduos, sendo que a produção de metano reduz com a diminuição da umidade e temperatura (LEITE, MAHLER e BRITO FILHO, 2005).

O biogás é um gás incolor, insolúvel, leve, de baixa densidade e que geralmente não apresenta odor (se não contiver gases odoríferos em concentrações perceptíveis), constituído principalmente de metano, dióxido de carbono e outros gases em menores concentrações. A digestão anaeróbia converte os compostos orgânicos em diversos subprodutos, que juntos, geram o biogás (CASSINI, 2003). Pode-se verificar na Tabela 3 duas composições típicas do biogás produzido em aterros sanitários.

**Tabela 3 - Constituintes típicos do biogás produzido em aterros sanitários**

Componente	Percentual	Percentual
	Tchobanoglous (2002)	CASSINI (2003)
<b>Metano</b>	45-60	50-75
<b>Dióxido de Carbono</b>	40-60	25-40
<b>Nitrogênio</b>	2-5	0,5-2,5
<b>Oxigênio</b>	0,1-1	0,1-1
<b>Amônia</b>	0,1-1	0,1-0,5
<b>Enxofre e mercaptanas</b>	0-0,1	-
<b>Hidrogênio</b>	0-0,2	1-3
<b>Monóxido de Carbono</b>	0-0,2	0-0,1
<b>Componentes traços</b>	0,01-0,6	-
<b>Sulfeto de Hidrogênio</b>	-	0,1-0,5
<b>Água</b>	-	Variável

Fonte: Adaptado de Cassini (2003); Tchobanoglous (2002).

O metano é o gás combustível do biogás, sendo que ele será mais puro quanto maior for sua concentração, estando o seu poder calorífico diretamente relacionado com a sua quantidade na mistura. Este gás combustível apresenta origens antropogênicas e naturais (CASSINI, 2003). A concentração de metano na atmosfera aumentou 151% desde 1750, sendo mais de 50% das emissões de ações antropogênicas e cerca de 3 a 4% das emissões decorrentes de aterros sanitários (IPCC, 2006).

Devido ao biogás ser um gás combustível, ele precisa ser drenado constantemente dos aterros sanitários para evitar que ocorram explosões. Os sistemas de captação de gases do aterro possuem uma eficiência de cerca de 40 a 60%, permitindo que uma considerável parte dos gases produzidos escape para a atmosfera através da camada de solo que cobre os resíduos (SILVA, FREITAS e CANDIANI, 2013).

No Brasil é utilizado um sistema de drenos abertos com um queimador mantido constantemente aceso na saída do biogás para a sua queima imediata, mas esse sistema possui uma baixa eficiência. Estima-se que cerca de 20% do biogás drenado

seja destruído. O restante é lançado na atmosfera, contendo parcelas significativas de metano que são liberadas para o meio ambiente (ICLEI, 2009).

A taxa de geração e formação do biogás é variável durante um período de tempo, sendo que atinge seu pico durante seus dois primeiros anos, diminuindo constantemente com o passar dos anos, mas podendo prolongar-se durante um período de 25 anos ou mais. A queima do biogás gerado auxilia na redução dos gases do efeito estufa, sendo que a queima do gás metano transforma-o em gás carbônico, e isto, é muito benéfico pelo fato do metano possuir um potencial de aquecimento global cerca de 21 vezes maior que o dióxido de carbono (MONTAGNA, 2013; LEITE, MAHLER e BRITO FILHO, 2005).

Para Antônio (2012) o estudo do biogás gerado durante a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos em aterros sanitários contribui para a compreensão das relações existente entre a produção de biogás e outros parâmetros, como o tempo de disposição de resíduos, por exemplo, dando subsídios para serem realizados estudos sobre a viabilidade do aproveitamento energético do biogás.

O poder calorífico do biogás varia conforme a quantidade de metano presente na mistura, sendo que para uma concentração de cerca de 60% de metano, o poder calorífico do biogás é de  $5500 \text{ kcal.m}^{-3}$ . O biogás produzido nos aterros pode ser reaproveitado de duas maneiras, através da queima direta (aquecedores, fogões e caldeiras) ou por meio de sua conversão em eletricidade, significando que o biogás permite a produção de energia elétrica e térmica (CASSINI, 2003).

A emissão do biogás para atmosfera, além de causar danos ao meio ambiente é também um desperdício de uma fonte de energia renovável. O metano possui um elevado potencial energético, sendo possível produzir 4700 kWh de energia elétrica e 5400 kWh de energia térmica por tonelada queimada de metano (MANETTI, RACO e LIPPO, 2013). Por meio da Tabela 4 pode-se comparar o volume de  $1 \text{ m}^3$  de biogás com algumas fontes de energia para demonstrar o seu potencial energético.

**Tabela 4 – Comparação entre biogás e outros combustíveis**

<b>Combustíveis</b>	<b>Equivalência à 1 m<sup>3</sup> de biogás</b>
<b>Gasolina</b>	0,613 litros
<b>Querosene</b>	0,579 litros
<b>Óleo diesel</b>	0,553 litros
<b>Gás de cozinha (GLP)</b>	0,454 kg
<b>Lenha</b>	1,536 kg
<b>Álcool hidratado</b>	0,790 litros
<b>Eletricidade</b>	1,428 kWh

Fonte: Zilotti (2003).

### 3.2.3 Produção de lixiviado

O lixiviado é um líquido que se acumula na parte inferior do aterro sendo resultante da mistura das águas pluviais infiltradas com o chorume, que é um líquido escuro, ácido e mal cheiroso, gerado pela decomposição da matéria orgânica como um subproduto da atividade bacteriana (BIDONE e POVINELLI, 1999; SOUZA, 2014).

A vazão do lixiviado produzido em um aterro sanitário é decorrente do volume de águas pluviais infiltradas, enquanto que suas características físicas, químicas e microbiológicas são decorrentes das características dos resíduos enterrados. Alguns dos problemas para o tratamento desse efluente são a variável composição de resíduos de acordo com o aterro e a variação da vazão ao longo do ano devido às mudanças no regime de chuvas (GOMES, 2009).

A geração de lixiviado em um aterro pode ser influenciada por fatores climáticos (precipitação, evapotranspiração e temperatura), hidrogeológicos (infiltração, escoamento superficial, geologia, topografia e recirculação do lixiviado), pelas características do material de cobertura (umidade, declividade e vegetação), características dos resíduos (composição gravimétrica, compactação, granulometria e peso específico) e pelo método de impermeabilização do local (GOMES, 2009).

O tempo de aterramento dos resíduos pode influenciar na qualidade do lixiviado e acredita-se que seu potencial poluidor seja inversamente proporcional ao tempo de



aterramento dos resíduos, ou seja, possui um potencial poluidor alto nos primeiros anos e vai diminuindo com o decorrer do tempo (GOMES, 2009).

Os lixiviados podem ser caracterizados como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes: material orgânico dissolvido (ácidos graxos voláteis e compostos orgânicos mais estáveis como ácidos húmicos e fúlvicos), macro componentes inorgânicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), metais pesados ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) e compostos orgânicos xenobióticos originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações (hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros) (GOMES, 2009).

A vazão e as características do lixiviado estão relacionadas entre si e dependem de alguns fatores como: das condições climatológicas e hidrogeológicas existentes na região do aterro (precipitação pluviométrica e contribuições pelo escoamento superficial e subterrâneo), das características dos resíduos aterrados (umidade e composição química de seus constituintes) e da infraestrutura disponível e condições de operação do aterro (existência de drenos para captação das águas superficiais, tipo de material utilizado na cobertura das células de aterramento, pré-tratamento dos resíduos sólidos e recirculação ou não de lixiviados) (CASSINI, 2003).

A composição química do lixiviado também varia em decorrência da idade do aterro e da fase do processo de decomposição em que se encontram os resíduos. No início do processo, fases acidogênica e acetogênica, o lixiviado apresenta valores bem ácidos de pH e alta concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Química de Oxigênio (DQO), nutrientes e metais pesados. Na fase metanogênica, o pH aumenta próximo à neutralidade e as concentrações de DBO, COT, DQO e nutrientes diminuem consideravelmente, reduzindo, dessa maneira, a solubilidade de metais pesados e sua concentração no lixiviado (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

Pode ser verificado na Tabela 5 alguns parâmetros do lixiviado de aterros sanitários brasileiros situados em diferentes localidades, climas e idades (período de operação).

Tabela 5 - Parâmetros do lixiviado de diferentes aterros sanitários brasileiros

Parâmetros	Londrina (PR)	João Pessoa (PB)	Belo Horizonte (MG)	Jardim Gramacho (RJ)	São Leopoldo (RS)	Muribeca (PE)
<b>Clima</b>	Mesotérmico	Mediterrâneo	Tropical de altitude	Tropical	Subtropical	Tropical
<b>Idade (anos)</b>	33	6	21	30	-	23
<b>Vazão (m<sup>3</sup>dia<sup>-1</sup>)</b>	11-518	100	300-450	1300	11	86,4-864
<b>Alcalinidade (mg L<sup>-1</sup>)</b>	4.227	10.770	6.115	8.607	5.129	7.443
<b>pH</b>	-	8,3	8,2	8,4	7,8	8,2
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.152	12.924	2.739	2.767	5.141	4.750
<b>Nitrogênio Amoniacal (mg L<sup>-1</sup>)</b>	713	2.004	1.175	1.547	826	1.492
<b>ST (mg L<sup>-1</sup>)</b>	7.669	16.331	-	11.878	-	10396
<b>SV (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.643	7.634	-	2.118	-	2.940
<b>Cloreto (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	2.314	3.822	-	469

Fonte: GOMES (2009); SOUZA (2014).

Para realizar o dimensionamento dos sistemas de drenagem, armazenamento e tratamento dos efluentes de um aterro sanitário é necessário a estimativa da quantidade de lixiviado que será gerado (GOMES, 2009). Mas a variabilidade das suas características tem se mostrado como um desafio para o tratamento adequado desse efluente, bem como a imprevisibilidade das vazões aplicadas e à elevada carga de poluentes, e por isso, a geração de líquidos lixiviados em aterros sanitários constitui-se na principal preocupação quanto à degradação ambiental de áreas localizadas próximas aos locais de disposição final de resíduos sólidos (CASSINI, 2003).

### 3.2.4 Recirculação de Lixiviado

Segundo Libânio (2002) a busca pela melhoria dos procedimentos operacionais em aterros sanitários é devido à necessidade de se estender ao máximo a vida útil do mesmo, através da aceleração do processo de estabilização do material orgânico dos resíduos, e pela maior exigência no cumprimento à legislação ambiental com parâmetros de controle mais rigorosos e restritivos.

A recirculação do lixiviado é uma excelente técnica para acelerar o processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos em aterros, reduzindo desta maneira, o tempo de bioestabilização da matéria orgânica. Este método de gerenciamento de lixiviado, é constituído por uma estratégia de fornecer microrganismos e nutrientes, necessários para uma rápida degradação de resíduos sólidos e remoção de elementos inibidores, durante a fase inicial do processo (CINTRA, 2003).

Além de acelerar o processo de estabilização dos resíduos aterrados, a recirculação do lixiviado gera aumento na produção do biogás e melhora a qualidade do lixiviado. Quando esta técnica é empregada o aterro passa de um local de disposição de resíduos para um biorreator de tratamento de resíduos, sendo biodegradada toda a matéria orgânica (ANTONIO, 2012).

No Paraná é determinado que seja feita a recirculação de 100% do lixiviado gerado, independente do sistema de tratamento adotado, sendo mantido um sistema de tratamento fechado, de acordo com a resolução conjunta nº. 01/2006 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA, Instituto Ambiental do Paraná – IAP e Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA (PARANÁ, 2006). A recirculação de lixiviado como técnica de tratamento também é citada pela resolução nº 86/2013 do Conselho Estadual do Meio Ambiente – CEMA, técnica esta que pode ser aplicada isoladamente ou associada com outros métodos de tratamento do lixiviado (PARANÁ, 2013).

A inoculação na digestão anaeróbia dos resíduos sólidos aterrados visa uma aceleração da degradação dos resíduos para que ela seja realizada em um menor tempo, proporcionando um aumento na vida útil do aterro e conseqüentemente o seu

tempo de operação. A recirculação é baseada na inoculação da biomassa endógena, que pode ser feita pela simples recirculação do lixiviado, pelo retorno do lodo produzido no tratamento do lixiviado, ou por combinação de ambos (CASSINI, 2003).

A inoculação endógena apresenta muitas vantagens pelo fato da biomassa estar aclimatada ao substrato e aos fatores de inibição, sendo esta técnica uma das formas mais conhecidas e utilizadas para a promoção de digestão acelerada dos resíduos sólidos confinados em aterros sanitários (LIBÂNIO, 2002; CASSINI, 2003).

Cintra (2003) relata que na década de 80 a técnica de recirculação do lixiviado passou a ser vista como um método que interfere na cinética das reações no processo de decomposição e diz que o lixiviado, assim como o lodo de esgoto, é um produto com potencialidades biológicas e bioquímicas. Porém, a autora relata que as taxas de recirculação do lixiviado devem ser controladas com cuidado, pois em caso de excesso, podem ocorrer problemas estruturais e de estabilidade dos taludes. Outro fator a ser levado em consideração ao estabelecer a taxa de recirculação de lixiviado é que o excesso de lixiviado recirculado pode infiltrar e contaminar o solo e as águas subterrâneas, se houver algum problema na impermeabilização do solo; além da possibilidade de ocorrer arraste de substâncias gerando um aumento nas concentrações de sais e metais pesados do lixiviado (BOCCHIGLIERI, 2010).

Contrariando a informação de Cintra (2003) quanto aos problemas relacionados à recirculação do lixiviado, para LIBÂNIO (2002) e CASSINI (2003) a recirculação do lixiviado gerado nos aterros sanitários com ou sem tratamento traz benefícios para a digestão anaeróbia dos resíduos, sendo que contribui para a disponibilidade de nutrientes, substâncias e meio essencial para diversas reações bioquímicas, correção de pH e teor de água. Esta técnica também possui a vantagem de atenuar a carga de poluentes do lixiviado. Em aterros localizados em regiões com baixos índices pluviométricos, a recirculação do lixiviado é uma opção muito interessante para manter a umidade ótima no interior do aterro (CINTRA, 2003; CASSINI, 2003).

O aumento do teor de umidade torna o meio mais adequado ao desenvolvimento dos microrganismos, intensifica as atividades microbiológicas e facilita o transporte de nutrientes (ANTONIO, 2012).

O lixiviado produzido pelo processo de bioestabilização dos resíduos possui elevado potencial metanogênico, podendo este líquido ser usado como inóculo devido ao fato de acelerar as atividades dos organismos metanogênicos e ajuda a manter a umidade do substrato (CINTRA, 2003).

A técnica de recircular o lixiviado proporciona a atenuação dos constituintes derivados da atividade biológica e das reações físico-químicas, como por exemplo a conversão de ácidos orgânicos presentes no lixiviado em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , além de reduzir a carga de poluentes, aumentar a mineralização dos resíduos e manter a umidade no interior do aterro numa faixa entre 50 e 70%, considerada ótima para atividade biológica (BARALDI, 2003).

Segundo Matos (2008), após ser empregada a técnica de recirculação de lixiviado a qualidade do lixiviado produzido melhora no que diz respeito a alguns parâmetros como DBO, DQO e Carbono Orgânico Total (COT). A autora explica que isso ocorre porque quando o aterro atinge a estabilização, ele já foi submetido a várias recirculações e uma grande parte da matéria biodegradável já foi degradada.

A recirculação direta do lixiviado produzido sem tratamento é uma alternativa interessante durante o início da operação de um aterro ou quando existem condições climatológicas (baixa pluviometria e/ou elevada evapotranspiração) e geotécnicas (predominância de zonas não-saturadas) favoráveis, que permitam a recirculação de todo volume drenado. Esta técnica também possibilita a inoculação para viabilizar a digestão anaeróbia em aterros, pois promove o retorno de microrganismos decompositores em suspensão no lixiviado e sua manutenção junto aos resíduos (CASSINI, 2003).

Souza (2014) utilizou três reatores anaeróbios preenchidos com resíduos sólidos urbanos, sendo estes submetidos a diferentes condições operacionais de recirculação do lixiviado e constatou, ao fim do experimento, que o reator em que era recirculado 100% do lixiviado gerado não apresentou produção de biogás. A autora relatou que a recirculação dessa taxa de lixiviado pode ter influenciado negativamente as atividades dos microrganismos envolvidos na produção do biogás. Nos outros dois reatores, onde era realizada a recirculação de 50% do lixiviado produzido em um dos reatores e no outro que era operado sem recirculação, obteve a produção de biogás, sendo esta

produção maior durante quase todo o experimento no reator em que era recirculado 50% do lixiviado produzido.

Os resultados obtidos no experimento de Souza (2014) também demonstraram um aumento no pH e da concentração de ácidos voláteis mais evidente nos reatores em que foi realizada a recirculação de lixiviado. Os valores das concentrações de nitrogênio amoniacal aumentaram no início do experimento e depois foram se estabilizando. Os sólidos totais e os sólidos voláteis apresentaram redução em suas concentrações, demonstrando a degradação da matéria orgânica presente nos resíduos.

Cintra (2003), realizou um experimento onde foram preenchidos reatores com resíduos sólidos e foram submetidos a três condições de operação, sendo estas condições: aterramento convencional dos resíduos, sem recirculação de lixiviado; aterramento dos resíduos, com recirculação do lixiviado bruto ou *in natura* e aterramento dos resíduos, com recirculação do lixiviado pré tratado anaerobiamente. Os resultados encontrados nesse experimento mostraram uma degradação dos resíduos maiores nos reatores operados com recirculação do lixiviado cru ou tratado do que nos reatores onde não era realizada a recirculação do lixiviado. Houve decaimento nas concentrações médias de DBO e DQO nos reatores em que era realizada a recirculação do lixiviado bruto ou tratado enquanto nos reatores sem recirculação essas concentrações mantiveram-se praticamente constantes.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, de caráter experimental, visou dar continuidade ao experimento iniciado no segundo semestre de 2014 pela aluna Jéssica Lara Nunes de Souza a fim de realizar o seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). O trabalho consistiu na construção e operação de reatores anaeróbios sob diferentes condições, além de realizar o monitoramento das características físico-químicas do lixiviado produzido e da massa resíduos, juntamente com a medição do biogás produzido. A importância em dar continuidade a este trabalho, caracterizando o lixiviado e o biogás, é pelo fato de que os resíduos sólidos em aterros demoram muito tempo para serem degradados completamente e que durante muitos anos a massa de resíduos aterrada continua gerando lixiviado e produzindo o biogás.

### 4.1 REATORES

Na construção dos reatores foram utilizadas as mesmas peças móveis que foram utilizadas no experimento realizado por Souza (2014), sendo adaptado para outro recipiente a fim de garantir que os reatores tivessem condições totalmente anaeróbias, permanecessem fechados e facilitassem a abertura dos reatores caso houvesse a necessidade.

Para montagem dos reatores foram utilizados recipientes de polietileno de alta densidade, com 48 cm de altura, 32 cm de diâmetro e volume aproximado de 30 litros, contendo como tampa uma placa de PVC fixada por parafusos a uma flange na borda do reator. O reator foi vedado colocando-se uma borracha entre a tampa e a flange, sendo utilizado oito parafusos por reator. Na Figura 6 observa-se o reator montado.



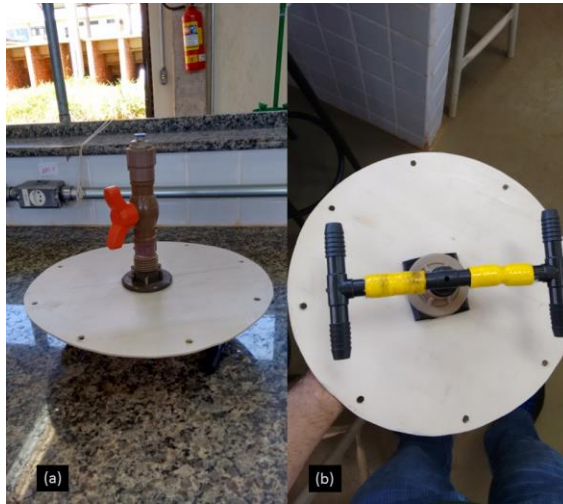
**Figura 6 - Reator montado para o experimento.**

**Fonte: Autoria própria.**

Sobre a tampa, foi instalado um sistema que permitiu a recirculação do lixiviado, a simulação de chuva e a condução do gás ao gasômetro. Este sistema é composto por um registro hidráulico, peça de engate rápido com entrada para mangueira de 6 mm de diâmetro em poliuretano (PU). A peça de engate rápido era utilizada para acoplar a seringa para introduzir o lixiviado (recirculação) e a água para simulação da chuva, assim como conduzir o gás pela mangueira ali inserida até o gasômetro (Figura 7a). O sistema também possuía um distribuidor de líquidos, para que tanto o lixiviado quanto a água cheguem assim de maneira homogênea à superfície dos resíduos dentro do reator (Figura 7b).

No fundo do reator foi instalada uma torneira para permitir o esgotamento do lixiviado gerado. Além disso, no fundo do reator foi colocada uma tela para impedir o entupimento da torneira pela brita ou resíduos (Figura 8).





**Figura 7 – (a) Vista da parte externa do sistema de introdução e distribuição de água e (b) Vista da parte interna do sistema.**

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 8 – Tela colocada na entrada do coletor de lixiviado.**

**Fonte: Autoria própria.**

A quantificação do biogás gerado foi feita por meio da metodologia de deslocamento de volume, onde o biogás gerado nos reatores era conduzido por meio de uma mangueira até um galão de 5 litros cheio de água (gasômetro). O biogás ao entrar no gasômetro, desloca um volume igual de água para outro recipiente, permitindo a leitura do biogás gerado por meio da medição do volume de água. Pode-se verificar na Figura 9 o sistema de medição de gás.



**Figura 9 – Sistema de medição da quantidade de biogás gerado.**

**Fonte: Autoria própria.**

## 4.2 PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS REATORES

O experimento foi realizado utilizando-se três reatores, cada um sendo operado sob condições diferentes:

- No Reator 1 (R1), sem recirculação do lixiviado, serviu como reator controle.
- No Reator 2 (R2), com recirculação de lixiviado a uma porcentagem fixa de 50% do volume total de lixiviado gerado.
- No Reator 3 (R3), com recirculação de lixiviado a uma porcentagem fixa de 100% do volume total de lixiviado gerado.

As taxas de recirculação são as mesmas utilizadas por Souza (2014), por se tratar de uma continuação do seu trabalho como já citado anteriormente. Os reatores foram instalados na casa de vegetação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Londrina), como demonstrado na Figura 10.



**Figura 10 – Reatores instalados na casa de vegetação da UTFPR.**

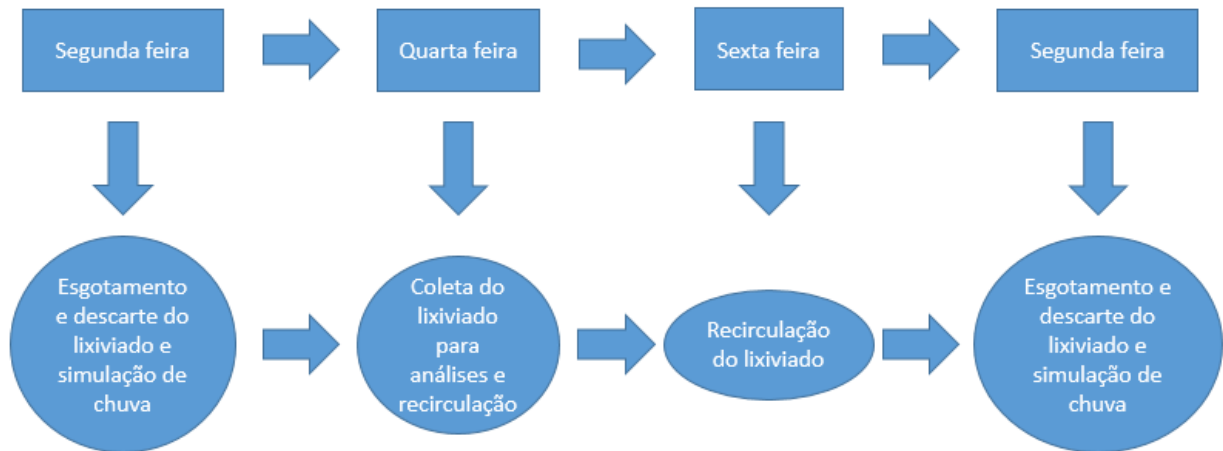
**Fonte: Autoria própria.**

A recirculação do lixiviado e a simulação de chuva foram feitas com uma seringa de 60 mL, com o bico adaptado para evitar o vazamento de gás e manter o sistema vedado à entrada de ar na hora de injetar ambos os líquidos.

A quantidade de água utilizada para realizar a simulação da chuva foi estipulada a partir de valores de dados históricos para a cidade de Londrina, obtidos junto ao Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR (2015). Para realizar o cálculo levou-se em consideração o valor de precipitação anual, 1608 mm, e de evaporação anual, 1425 mm, medida pelo evaporímetro de piche e corrigida através da multiplicação pelo fator 0,7. Com esses valores obtidos foi encontrado uma precipitação anual de 610.5 mm, que divididos entre os doze meses do ano, resultou em uma precipitação mensal de 50,88 mm.

O valor da precipitação mensal multiplicado pela área superficial do reator resultou no volume de 4,09 L de água por mês para simulação da chuva. Esse valor dividido por uma aplicação semanal, resultou em 1,020 L por aplicação. Por ser um volume de água considerável a ser injetado por aplicação, era realizada a injeção da metade do volume de água no período da manhã e metade no período da tarde do mesmo dia. A água injetada no reator era adicionada de uma solução desclorificante (Labcon Anticlor) que retira o cloro da água para impedir que ocorra a inibição do crescimento da comunidade microbiana. A água utilizada para simulação de chuva era preparada adicionando-se uma gota da substância desclorificante por litro de água, sendo preparado 3,5 litros por aplicação e realizada no próprio dia da simulação de chuva, esperando 5 minutos para a substância reagir com o cloro presente na água.

No dia de realizar a simulação de chuva o lixiviado era esgotado previamente. Dois dias após ter sido feita a simulação de chuva o lixiviado resultante era coletado e este era utilizado para a recirculação e análises laboratoriais, tendo seu volume medido e armazenado em garrafas pets sob refrigeração até ser recirculado. A recirculação era feita de acordo com o tratamento de cada reator, sendo no R1 não havia recirculação, no R2 metade do volume de lixiviado produzido era recirculado e no R3 todo o volume de lixiviado produzido era recirculado. Verifica-se na Figura 11 o fluxograma de um ciclo de simulação de chuva, coleta e recirculação do lixiviado.



**Figura 11 – Fluxograma de um ciclo de simulação de chuva e recirculação do lixiviado.**

**Fonte: Autoria própria.**

Pelo fato do lixiviado possuir valores de pH muito ácidos, quando necessário o pH foi corrigido para valores entre 7 e 8 antes da recirculação. A correção era feita adicionando-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 3M, que era adicionado aos poucos até o pH estar na faixa de 7 a 8, sendo que para isto era utilizado um medidor de pH que permitiu a leitura conforme adicionava-se o NaOH. A partir do momento que o lixiviado passou a apresentar pH maior que 7 para o reator 3 não houve mais a necessidade de correção antes da recirculação, porém este procedimento foi feito até o fim do experimento para o reator 2.

#### 4.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS UTILIZADOS

Sendo este trabalho uma continuação do experimento iniciado Souza (2014), os resíduos utilizados para o preenchimento dos reatores já estavam em processo de decomposição e só foram transferidos para os novos reatores. Para o preenchimento do reator foi colocado no fundo uma camada de brita número zero (0) para drenar o lixiviado produzido, em seguida foi colocado os resíduos sólidos que já estavam sendo decompostos nos reatores utilizados por Souza (2014).

No momento da montagem conforme o resíduo foi sendo colocado no reator também foi sendo efetuada a compactação com um bloco de madeira maciça para o mesmo grau de compactação de 493,12 Kg/m<sup>3</sup>, presente no experimento de Souza (2014). Não foi possível cobrir a massa de resíduos com uma camada de brita pelo fato do novo reator utilizado possuir dimensões menores e já estar quase totalmente preenchido.

Souza (2014), trabalhou com resíduos sólidos urbanos padrão (RSUp) para a obtenção da amostra inicial dos resíduos. A composição gravimétrica foi baseada em valores da literatura. Na Tabela 6 encontra-se a composição gravimétrica dos resíduos do experimento.

**Tabela 6 - Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano padrão**

<b>Material</b>	<b>% em peso da categoria</b>	<b>Peso da categoria por reator</b>	<b>Peso total da categoria</b>
<b>Papel/papelão</b>	10,54	1,50	4,50
<b>Vidro</b>	4,57	0,65	1,95
<b>Metal</b>	1,15	0,48	0,16
<b>Plástico</b>	5,23	0,74	2,22
<b>Isopor</b>	0,47	0,07	0,21
<b>Orgânico</b>	74,14	10,54	31,62
<b>Outros<sup>1</sup></b>	3,90	0,55	1,65

**Fonte: Souza (2014).**

**Notas:**

<sup>1</sup> A categoria outros foi composta por maravalha e tecido, nas porcentagens de 75% e 25%, respectivamente.

Segundo Souza (2014), a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos foi obtida no restaurante universitário da UTFPR Câmpus Londrina e foi coletada durante três dias para garantir uma heterogeneidade dos resíduos orgânicos, sendo estes resíduos compostos por sobras de alimentos utilizados no preparo das refeições (cascas de legumes, talos de verduras, cascas de ovos e carne crua) e sobra de alimentos após o

preparo (arroz, feijão, carne cozida, legumes, verduras e cascas de frutas), além de borra de café e guardanapos de papel. Ainda segundo a autora, após os resíduos terem sido coletados, tanto os resíduos orgânicos quanto os resíduos recicláveis foram cortados em pedaços menores e misturados.

#### 4.4 MONITORAMENTO DOS REATORES

Foram monitorados no decorrer do experimento o volume e as características físico-químicas do lixiviado e a produção de biogás. E ao fim do experimento foi analisada as características da massa de resíduos.

As características da massa de resíduos foram analisadas somente no final do experimento por não ser possível abrir o reator durante o seu funcionamento visando manter a condição anaeróbia e por já conhecer as suas características iniciais devido ao fato de ser um resíduo que estava sendo utilizado em outro experimento, as características iniciais da massa de resíduos do trabalho atual são as características finais encontradas por Souza (2014) em seu TCC. Os parâmetros que foram monitorados na fração orgânica da massa de resíduos, bem como os métodos que foram utilizados para obtê-los são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 - Parâmetros monitorados na fração orgânica da massa de resíduos**

<b>Parâmetros</b>	<b>Método</b>	<b>Referência</b>
<b>Sólidos totais (ST) e Sólidos voláteis (SV)</b>	2540 G – Sólidos totais, fixos e voláteis em amostras sólidas e semissólidas.	APHA; AWWA e WEF (2012).
<b>Carbono total</b>	Utilizou-se fator de conversão	Carmo e Silva (2012)
<b>pH</b>	Método potenciométrico	Tedesco et al. (1995)
<b>Condutividade Elétrica</b>	Método condutimétrico	Tedesco et al. (1995)
<b>Nitrogênio Total</b>		Malavolta; Vitti; Oliveira (1997)

Fonte: A autoria própria.

A fração orgânica de resíduos foi analisada separadamente da fração reciclável no início do experimento de Souza (2014) por ser somente os resíduos orgânicos a parte facilmente reativa dos resíduos sólidos urbanos contidas no reator e ao final do experimento foi feita a separação manual da fração orgânica, excetuando-se papel/papelão devido à impossibilidade pelo estado avançado de degradação, e posteriormente foi feita as análises do resíduo final (SOUZA, 2014). Pode-se verificar na Tabela 8 a caracterização da fração orgânica inicial e final dos resíduos do experimento de Souza (2014).

**Tabela 8 - Caracterização da fração orgânica inicial e final dos reatores**

<b>Amostra</b>	<b>pH</b>	<b>Condutividade elétrica (<math>\mu\text{S cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Sólidos Totais (%)</b>	<b>Sólidos Voláteis (%)</b>	<b>Carbono Orgânico Total' (%)</b>	<b>Nitrogênio Total (%)</b>
<b>Fração orgânica inicial</b>	4,29	2187,33	24,25	94,20	43,06	5,35
<b>R1</b>	4,61	19,09	31,44	93,18	42,29	3,89
<b>R2</b>	5,44	16,19	32,50	93,87	42,91	3,35
<b>R3</b>	5,10	18,70	27,00	92,42	42,24	4,73

**Fonte: Souza (2014).**

**Notas:**

(1) O carbono orgânico total foi determinado segundo metodologia de Carmo e Silva (2012) mediante utilização da equação:  $\text{COT} = 0,462 \text{ SV} - 0,550$ . Onde COT é o carbono orgânico total e SV são os sólidos voláteis.

O monitoramento da produção do biogás foi realizado conforme era visto a necessidade de realizar sua medição, pois este parâmetro alternou em semanas mais produtivas com semanas menos produtivas e não apresentou uma constância que permitisse uma leitura frequente.

O volume de lixiviado produzido foi monitorado semanalmente, sendo guardado sob refrigeração até o dia da recirculação. Antes de ocorrer a recirculação o lixiviado



tinha seu pH medido, a fim de verificar a necessidade de realizar sua correção para valores entre 7 e 8.

As amostras analisadas de lixiviado para obter suas características físico-químicas foram obtidas no momento em que era feito a coleta do lixiviado para a recirculação e foram guardadas em recipiente plástico sob refrigeração. Os parâmetros analisados assim como os métodos utilizados para obtê-los, estão demonstrados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Parâmetros analisados no lixiviado e métodos utilizados**

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Referência</b>
<b>Sólidos Totais</b>	2540 B - Sólidos totais secos a 103-105°C	
<b>Sólidos Voláteis</b>	2540 E – Sólidos fixos e voláteis inflamados a 550°C	
<b>DQO</b>	5220 D – Método colorimétrico, refluxo fechado	APHA; AWWA e WEF (2012)
<b>Acidez Volátil</b>	2320 A – Método de titulação	
<b>Alcalinidade</b>	Método potenciométrico	
<b>Nitrogênio Amoniacal</b>	4500-NH3 B – Etapa da destilação preliminar	
<b>pH</b>	Método potenciométrico	Tedesco et al. (1995)
<b>Condutividade Elétrica</b>	Método condutimétrico	Tedesco et al. (1995)

Fonte: Autoria própria.

Para os parâmetros sólidos totais, sólidos voláteis e DQO as análises foram realizadas em duplicata, para o pH e condutividade elétrica era esperado o equipamento estabilizar-se para anotar os resultados e os demais parâmetros foram analisados pela realização de análises únicas.

Para a interpretação dos dados foram gerados gráficos dos resultados obtidos e os dados foram analisados numericamente, observando quais reatores obtiveram melhor desempenho nos parâmetros analisados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ENCERRAMENTO DO EXPERIMENTO E ABERTURA DOS REATORES

O experimento teve início dia 23 de março de 2015, quando os reatores foram fechados e teve fim dia 28 de setembro de 2015, data em que ocorreu a abertura dos reatores, tendo este experimento uma duração total de 189 dias. Após a retirada da tampa, foi possível fazer uma inspeção visual, como pode ser observado na Figura 12. Sendo, respectivamente, reator 1 (Figura 12 a), reator 2 (Figura 12 b) e reator 3 (Figura 12 c).

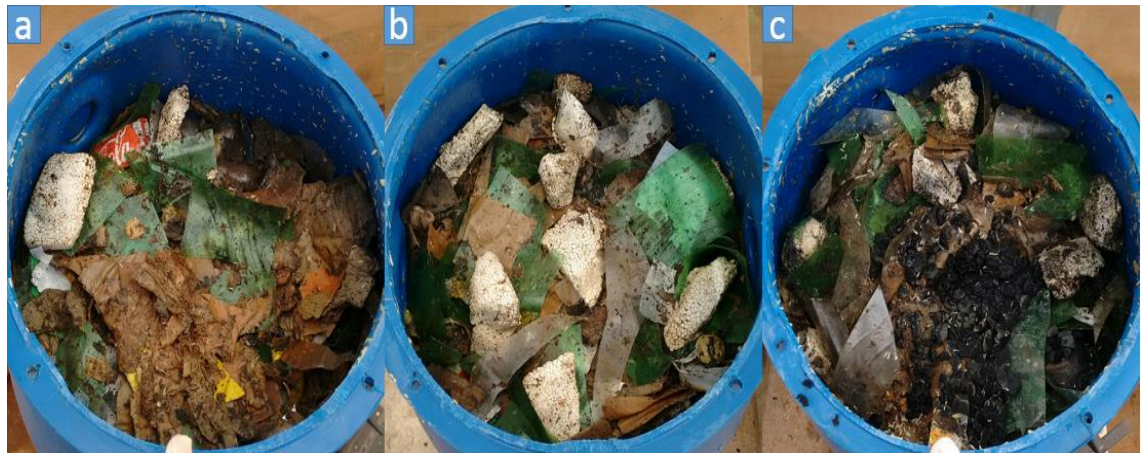


Figura 12 – (a) Vista superior do reator 1, (b) Vista superior do reator 2 e (c) Vista superior do reator 3.

Fonte: Autoria própria.

Por meio da análise visual não foi possível identificar uma grande diferença entre os tratamentos, por conterem superficialmente muitos resíduos não orgânicos, e conseqüentemente possuem degradação mais lenta que os resíduos orgânicos.

Após essa análise visual da superfície, foi retirada uma amostra de resíduo de cada reator para observar como estava as condições de degradação no meio da massa de resíduos sólidos, podendo-se observar uma maior degradação da matéria orgânica nos reatores em que o lixiviado era recirculado.

No Reator 1 (Figura 13) onde não era realizada a recirculação do lixiviado foi possível distinguir parte da matéria orgânica, como: grãos de feijão, pedaços de folhagens e de legumes. Já nos Reatores 2 e 3 (Figuras 14 e 15, respectivamente), nos quais efetuava-se a recirculação do lixiviado, apresentava sua matéria orgânica num estágio maior de degradação e praticamente inseparável de alguns materiais, como papelão e trapos.



**Figura 13 – Resíduos do reator 1 após o término do experimento.**

**Fonte: Autoria própria.**

Um importante aspecto foi observado no reator 3 onde era recirculado 100% do lixiviado. Este reator apresentava retenção de líquido devido ao grande volume de lixiviado que era inserido no reator, provocando a saturação da massa de resíduos,

impedindo que todo o líquido infiltrasse chegando até o sistema de drenagem de lixiviado.

Já nos reatores 1 e 2 apesar de serem tratamentos diferentes, visualmente não foi observado diferença na umidade dos resíduos bem como não apresentava retenção de líquidos em nenhum dos dois reatores.



**Figura 14 – Resíduos do reator 2 após o término do experimento**

**Fonte: Autoria própria.**

Cintra (2003) utilizou reatores anaeróbios para simular a degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários. O experimento consistiu na utilização de nove reatores distribuídos em três linhas, sendo essas linhas operadas com diferentes tratamentos: linha 1 operada com tratamento convencional sem recirculação, linha 2 operada com recirculação de lixiviado bruto e linha 3 com a recirculação de lixiviado pré-tratado. Os resultados obtidos foram semelhantes, apresentando uma maior degradação e descaracterização dos resíduos orgânicos nos reatores em que era recirculado lixiviado bruto ou pré-tratado, indicando que a prática de recirculação do lixiviado contribui para a degradação dos resíduos.



**Figura 15 – Resíduos do reator 3 após o término do experimento**

**Fonte: Autoria própria.**

Baraldi (2003) realizou um experimento e analisou a influência da recirculação do lixiviado para a biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, produção de biogás e na qualidade do lixiviado produzido em uma célula experimental do aterro sanitário de Muribeca/PE. Através dos parâmetros analisados observou-se uma aceleração na biodegradação dos resíduos e da fração orgânica, aumento na produção de metano devido a aceleração da fase metanogênica e uma melhora na qualidade do lixiviado, fatos esses que foram relacionados com a recirculação do lixiviado.

## 5.2 ANÁLISES DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS

Após a abertura dos reatores foi recolhida uma amostra de resíduos de cada reator para análises laboratoriais. Antes de serem feitas as análises físico-químicas da massa de resíduos, foi feita a separação manual dos resíduos não orgânicos, e que

conseqüentemente, possuem difícil degradação, deixando na amostra que foi analisada apenas os resíduos orgânicos ainda identificáveis e papel/papelão, devido a estes estarem bem agregados a matéria orgânica e ser difícil realizar sua separação. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros de caracterização da fração orgânica dos resíduos que foram analisados após o fim do experimento e os valores que os resíduos apresentavam para os mesmos parâmetros no início do experimento, segundo Souza (2014)

**Tabela 10 - Caracterização da fração orgânica dos resíduos no início e no fim do experimento**

Parâmetro	Reator 1		Reator 2		Reator 3	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
pH	4,61	5,27	5,44	5,77	5,10	8,76
Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	19,09	303	16,19	1242	18,70	551
Sólidos Totais (%)	31,44	19,89	32,50	19,20	27,00	17,62
Sólidos Voláteis (%)	93,18	95,27	93,87	93,32	92,42	91,14
Carbono Orgânico Total <sup>1</sup> (%)	42,29	43,46	42,91	42,52	42,24	41,56
Nitrogênio Total (%)	3,89	3,91	3,35	5,95	4,73	4,05

Fonte: Autoria própria.

**Notas:**

(1) O carbono orgânico total foi determinado segundo metodologia de Carmo e Silva (2012) mediante utilização da equação:  $\text{COT} = 0,462 \text{ SV} - 0,550$ . Onde COT é o carbono orgânico total e SV são os sólidos voláteis.

Os valores de pH não tiveram diferenças muito elevadas na massa de resíduos nos tratamentos 1 e 2 e encontravam-se com valores que indicam um ambiente ácido, sendo que o reator 2 encontrava-se com pH um pouco superior ao reator 1, podendo este fato ter ocorrido pelos resíduos presentes no reator 2 estarem em um estado mais avançado de decomposição, devido a este operar com recirculação de 50% de seu lixiviado produzido. Já o reator 3, apresentou um pH alcalino, demonstrando a eficiência da recirculação do lixiviado na aceleração da degradação dos resíduos. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Baraldi (2003), onde os resíduos da célula operando com recirculação se encontravam com valores mais alcalinos, com pH entre 7,5 a 9.

A condutividade elétrica foi maior nos reatores onde era operado com recirculação do lixiviado, o que pode ser resultado da reintrodução do lixiviado com sais nele presente, e que conseqüentemente, aumentava a quantidade de sais presentes na massa de resíduos. Já no reator 1, em que era inserido somente água, acredita-se que a baixa condutividade elétrica pode ter ocorrido devido a rápida passagem da água através dos resíduos.

Ainda com relação à condutividade elétrica, é importante ressaltar que no reator 2 apesar de ser recirculada uma taxa menor que no reator 3, a massa de resíduos apresentou uma condutividade elétrica maior, indicando que a mineralização dos seus compostos orgânicos foi menor e que ainda há mais sais solubilizados em sua massa de resíduos do que no reator 3, demonstrando que a recirculação auxilia na mineralização dos resíduos (BARALDI, 2003).

Os valores de sólidos totais (ST) da massa de resíduos apresentaram uma pequena diferença entre os tratamentos, mas foi diminuindo à medida que era inserido mais líquido nos reatores devido ao fato de que nos reatores onde era recirculado parte ou a totalidade do lixiviado produzido aumentava a saturação dos resíduos, e conseqüentemente, sua umidade.

Os resultados para sólidos voláteis (SV) e carbono orgânico total (COT) indicaram maior degradação nos resíduos dos reatores que eram operados com recirculação, pois apresentaram valores menores. Os altos valores apresentados devem-se ao fato que não foi possível separar adequadamente o papel/papelão da amostra, materiais ricos em carbono. Matos (2008) realizou um levantamento bibliográfico, onde analisou a influência da recirculação do lixiviado. O autor encontrou resultados semelhantes, que apesar de observar uma pequena diferença indicam a contribuição deste modo de operação.

A análise de nitrogênio total nos reatores que recebiam recirculação de lixiviado resultou em concentrações maiores de nitrogênio, fato que pode ter ocorrido pela inserção de líquido contendo este nutriente. A menor concentração no reator 1 pode estar associada à lavagem dos resíduos pela inserção de água.

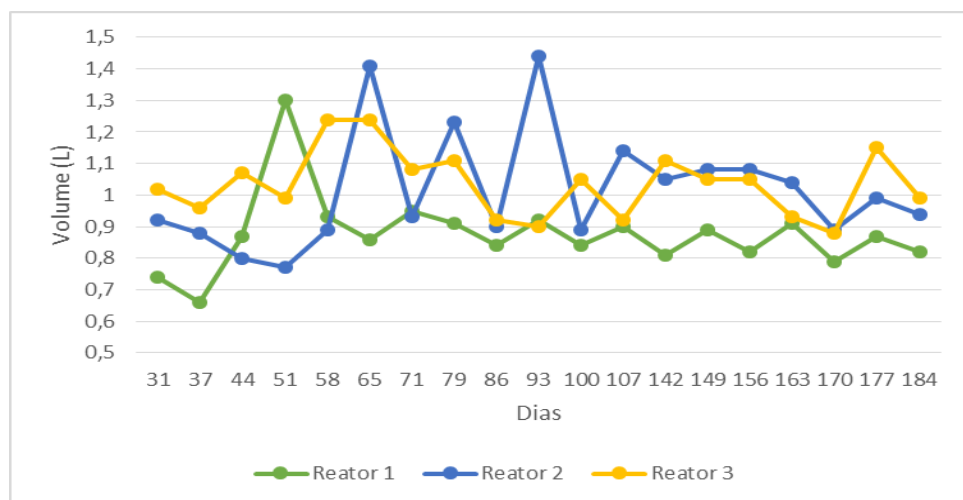
Comparando com os valores de nitrogênio da massa dos resíduos dos reatores no início do experimento que era de 3,89% para o reator 1, 3,35% para o reator 2 e

4,73% para o reator 3 observa-se que as concentrações de nitrogênio apresentaram pouca variação para os reatores 1 e 2, contrariando a tendência que com a degradação da matéria orgânica, essas concentrações tendem a diminuir (CINTRA, 2003).

### 5.3 ANÁLISES DO LIXIVIADO

#### 5.3.1 Volume de Lixiviado Produzido

A produção de lixiviado foi maior em quase todo o experimento nos reatores com recirculação do lixiviado devido ao maior volume de líquidos inseridos nos sistemas, sendo que a simulação de chuva inseria a mesma quantidade de água em todos os reatores só diferenciando a quantidade de lixiviado recirculado. O reator 2 apesar de ser operado com uma recirculação de lixiviado menor que no reator 3, em alguns dias apresentou uma produção de lixiviado maior. A produção de lixiviado em cada reator pode ser observada no Gráfico 1.



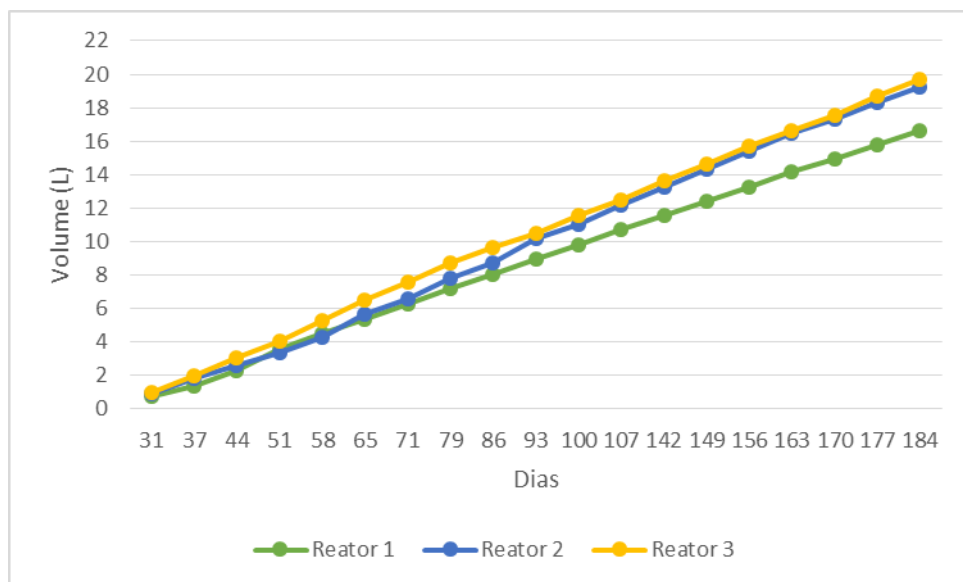
**Gráfico 1 – Produção de lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**



Analisando a produção acumulada de lixiviado, observada no Gráfico 2, nota-se que a quantidade de lixiviado recirculado ou a não recirculação refletiram no tratamento ao que o reator era submetido, sendo a produção maior no reator 3 e a produção menor no reator 1. Nota-se que houve pouca diferença na produção do reator 2 e do reator 3, apesar de um deles receber a maior quantidade de líquidos, acredita-se que foi devido a saturação da massa de resíduos do reator 3, como já citada anteriormente, impedindo que todo o líquido percolasse para o fundo do reator.

Souza (2014) encontrou resultados semelhantes em seu experimento, onde a produção total de lixiviado foi maior no reator em que era recirculado 100% do lixiviado e menor onde não havia recirculação, tendo que em seus resultados, a produção total de lixiviado se diferenciou mais entre os dois reatores que operavam com duas diferentes taxas de recirculação.

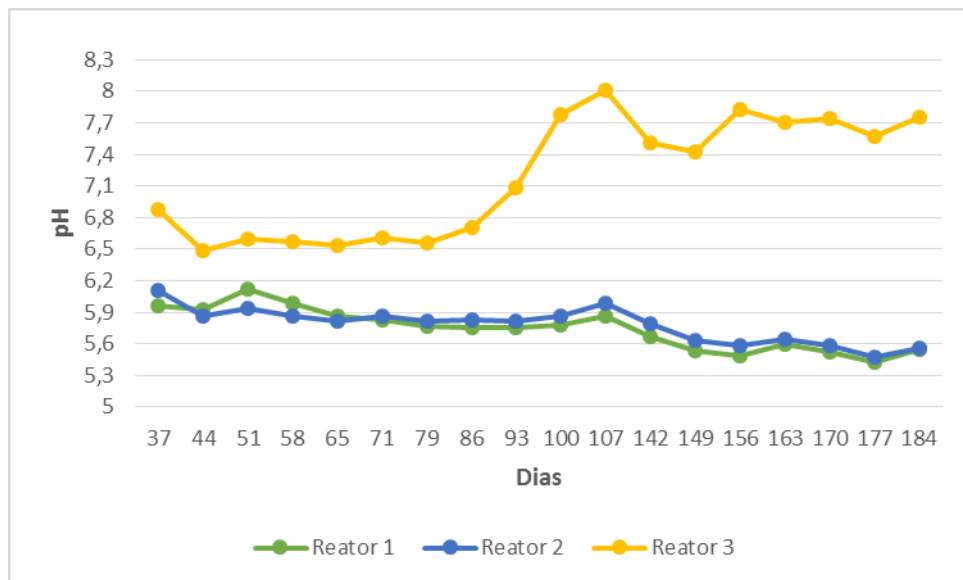


**Gráfico 2 – Volume acumulado da produção de lixiviado ao longo do experimento.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 5.3.2 pH

O pH ao longo de todo o experimento permaneceu ácido e praticamente igual para os reatores 1 e 2. Já o reator 3 apresentou sempre valores próximos ou acima da neutralidade, tendo atingido seu valor máximo de 8,01 no 107º dia do experimento. Pode ser verificado no Gráfico 3 o comportamento do pH do lixiviado de cada reator.



**Gráfico 3 – Valores de pH do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

Os valores mais baixos de pH para os reatores 1 e 2 indicam a ocorrência da fase ácida do processo de digestão anaeróbia, que é típica em aterros jovens (THOBANOGLIOUS, 2002). Já o reator 3, demonstra que a recirculação promoveu um estímulo da metanogênese e uma redução no tempo necessário para a formação do metano, onde ocorre um aumento nos valores de pH (BARALDI, 2003).

Os valores ácidos que ocorrem no início da digestão anaeróbia são devidos à produção de ácidos orgânicos, hidrogênio (H<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Após a digestão anaeróbia entrar na fase metanogênica e começar a ocorrer a produção e

metano, os ácidos orgânicos,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  são convertidos em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , ocasionando aumento nos valores de pH para valores entre 6,2 e 7,9 (CINTRA, 2003).

Segundo Chernicharo (1997) os microrganismos formadores de metano possuem um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora se possa conseguir estabilidade na produção de metano, em uma faixa maior entre 6,0 e 8,0. Ainda segundo o autor, valores de pH acima de 8,3 e abaixo de 6,0 devem ser evitados, sendo que estes valores podem inibir completamente as atividades dos microrganismos formadores de metano.

As bactérias produtoras de ácidos, por serem muito menos sensíveis ao pH que as arqueas metanogênicas, é especialmente importante, pois as bactérias acidogênicas podem continuar bem ativas mesmos com valores de pH baixos como 4,5. Devido a isso, a produção de ácidos pode continuar em um reator, mesmo com a produção do metano ter sido cessada pelos baixos valores de pH, causando azedamento do conteúdo do reator (CHERNICHARO, 1997).

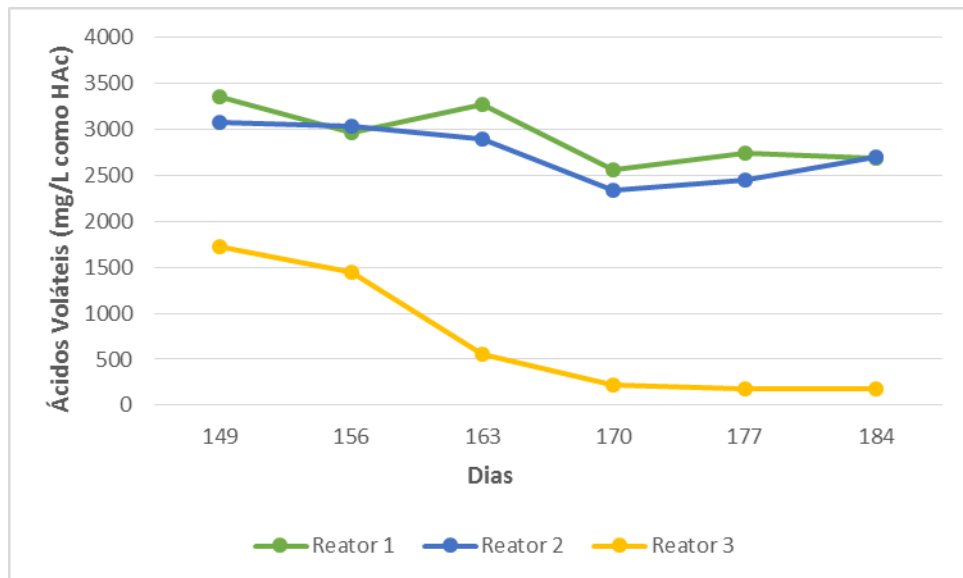
Matos (2008) em seu levantamento bibliográfico onde estudou a influência da recirculação de lixiviado, explica que a queda inicial do pH que normalmente é observada no início da operação com recirculação indica que esta não foi suficiente para a remoção dos ácidos produzidos na fase acidogênica, e que posteriormente a esta fase, deve ocorrer degradação dos produtos fermentados que influencia no aumento do pH. A autora concluiu, que este é um indicativo do aumento da biodegradação com a utilização da recirculação, visto que valores mais altos de pH só são atingidos na fase metanogênica.

Cintra (2003), em seu experimento que teve duração de aproximadamente 600 dias, encontrou resultados onde comprovou o aumento do pH nas duas linhas onde o lixiviado bruto ou tratado eram recirculados, comparado à linha onde operava sem recirculação. Com relação aos dois conjuntos de reatores que realizavam a recirculação, a linha que operava com a recirculação de lixiviado pré-tratado obteve o melhor desempenho em relação a que recirculava lixiviado bruto, por ter o seu pH corrigido antes de ser inserido novamente dentro do reator.

### 5.3.3 Ácidos Voláteis

A partir dos valores de ácidos voláteis encontrados verificou-se que o reator onde foi recirculado 100% do lixiviado apresentou concentração de ácidos voláteis abaixo dos demais reatores e que os outros dois reatores apesar de receberem tratamentos diferentes apresentaram concentrações bem semelhantes de ácidos voláteis. Ao longo de todo o experimento ocorreu a redução da acidez do lixiviado em todos os reatores, mas essa redução foi mais acentuada no reator 3, indicando uma aceleração da decomposição dos resíduos desse reator. No Gráfico 4 verifica-se a concentração de ácidos voláteis do lixiviado presente em cada reator.

Os ácidos voláteis estão intrinsicamente relacionados com o pH, e a menor concentração de ácidos voláteis no reator 3, pode ser explicada pelo aumento do pH, que ocorre como resultado das baixas concentrações de ácidos voláteis disponíveis (LIBÂNIO, 2002).



**Gráfico 4 - Valores das concentrações de ácidos voláteis dos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

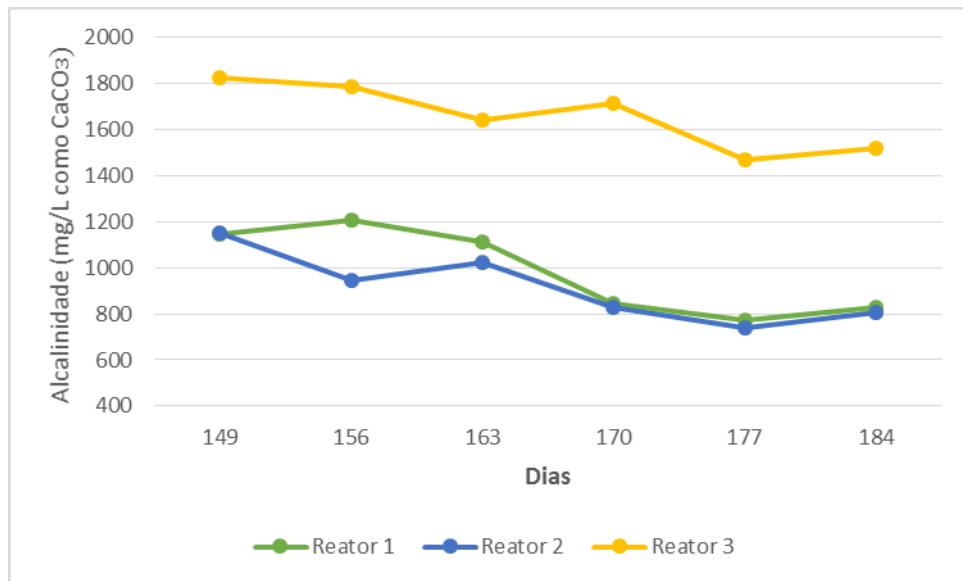
A pouca diferenciação nas concentrações de ácidos voláteis dos reatores 1 e 2 acredita-se que tenha ocorrido pelo fato do reator 2, mesmo operando com recirculação e correção do pH não acarretou no seu aumento, ficando com valores abaixo de 6, fora dos valores considerados ótimos de pH para atividade de microrganismos metanogênicos, entre 6,5 e 7,5 (LIBÂNIO, 2002).

Libânio (2002) realizou um experimento de digestão anaeróbia de resíduos em reatores operando em duas linhas de tratamentos, com e sem recirculação do lixiviado, e observou que as concentrações de ácidos voláteis diminuíram com o aumento do pH. Este fato foi associado à recirculação do lixiviado.

#### 5.3.4 Alcalinidade

A alcalinidade total do lixiviado dos reatores (Gráfico 5), encontrou-se com uma concentração maior no reator 3 comparado aos outros dois reatores, conferindo um valor mais alcalino para este reator, e isto pode ser explicado pelo fato de ocorrer incremento e carreamento de íons que conferem alcalinidade ao lixiviado recirculado (BARALDI, 2003).

O sistema ácido/base de um processo de digestão anaeróbia é formado pelo pH, alcalinidade e ácidos voláteis, estando estes parâmetros relacionados entre si e, portanto, é necessária uma compreensão conjunta dos mesmos para a interpretação dos dados obtidos com o monitoramento. A alcalinidade possui um papel fundamental para a manutenção do pH, evitando variações bruscas que podem afetar de maneira significativa a atividade microbiana (LIBÂNIO, 2002).



**Gráfico 5 - Valores da alcalinidade do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

Segundo Chernicharo (1997) na fase inicial da digestão anaeróbia de resíduos sólidos, quando se encontra com valores mais baixos de pH, faixa de 3,75 a 5,75, a capacidade de tamponamento deve-se basicamente à alcalinidade de ácidos voláteis, fato este que foi observado nos reatores 1 e 2.

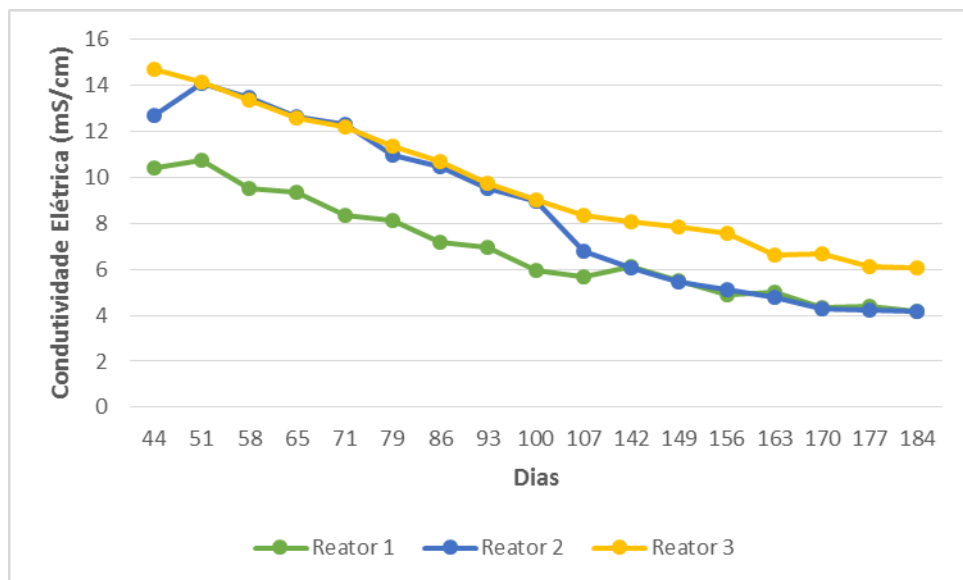
No reator 3 onde ocorreu a correção e aumento no valor do pH, houve redução na alcalinidade de ácidos voláteis e um aumento da alcalinidade bicarbonato, sendo que a alcalinidade bicarbonato representa a principal forma de tamponamento de processo anaeróbio em pH neutro, podendo ser fornecida pela degradação de materiais orgânicos nitrogenados, ácidos orgânicos e a redução de sulfitos e sulfatos (CHERNICHARO, 1997; LIBANIO, 2002).

Baraldi (2003) fez uma comparação da composição físico-química do lixiviado de três células do aterro sanitário de Muribeca-PE com aproximadamente a mesma idade de aterramento dos resíduos, sendo que uma operava com recirculação de lixiviado e as outras duas sem recirculação. O autor também verificou que a alcalinidade total era maior quando operada com recirculação.

### 5.3.5 Condutividade Elétrica

O comportamento da condutividade elétrica está apresentado no Gráfico 6. Os valores apresentaram redução desse parâmetro para o lixiviado dos três reatores, podendo isso ser explicado pela lixiviação de íons de metais e sulfatos, consumo de ácidos e conversão de sulfatos que acarretam em um aumento do pH (FERREIRA, 2013).

Inicialmente os dois reatores que operavam com recirculação apresentavam valores de condutividade elétrica maior do que o reator que operava sem recirculação, podendo ser explicado pelo fato do lixiviado com sais dissolvidos ser reintroduzido nos reatores, ocasionando o aumento da concentração de sais. Posteriormente, a condutividade elétrica do lixiviado do reator 2 apresentou uma queda mais acentuada em relação ao reator 3, passando a valores muito próximos da condutividade elétrica do lixiviado do reator 1.



**Gráfico 6 - Valores da condutividade elétrica do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

Segundo Ferreira (2013) a condutividade elétrica característica de lixiviado de aterros operando com recirculação é superior aos valores encontrados para aterros convencionais, os quais variam no decorrer do tempo de 2,5 a 35 mS/cm, devido a maior concentração de íons nos mesmos.

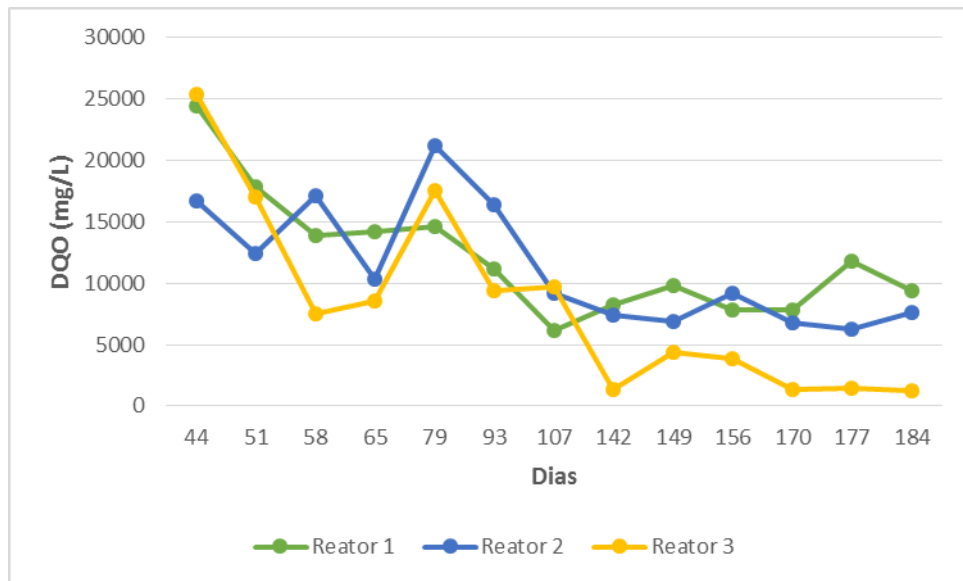
Matos (2008) concluiu em seus estudos que a recirculação de lixiviado causa um aumento na condutividade elétrica do lixiviado de aterros que utilizam esse procedimento em sua operação. No entanto, concentrações muito elevadas de sais no lixiviado devem ser evitadas, pois podem atrapalhar os processos biológicos envolvendo os microrganismos responsáveis pela degradação dos resíduos (SANTOS, 2010).

#### 5.3.6 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Os valores encontrados para a Demanda Química de Oxigênio (DQO) demonstram uma redução nos valores dos três reatores, tendo a maior redução ocorrida no reator operando com recirculação de 100% de seu lixiviado, tendo reduzido de 25375 mg/L no 44º dia para 1208 mg/L no 184º dia do experimento, representando uma redução total de aproximadamente 95,24%. As reduções desse parâmetro nos reatores 1 e 2 foram respectivamente 61,54% e 54,64%. No Gráfico 7, apresenta-se os valores de DQO para o lixiviado dos três reatores.

A grande redução deste parâmetro no reator 3 demonstra que o mesmo teve o seu processo de degradação acelerado e contém um menor teor de compostos orgânicos para ser degradados ao fim do experimento, com o mesmo tempo de duração nos três reatores. Já com relação aos reatores 1 e 2, acredita-se que o reator 2, obteve uma porcentagem menor de redução do que o reator 1, por este já estar inicialmente mais degradado, tendo em vista que a concentração final deste reator foi de 7604 mg/L enquanto no reator 1 foi de 9412 mg/L, demonstrando que mesmo tendo apresentado uma porcentagem menor de redução, apresenta uma quantidade menor de compostos orgânicos a serem degradados.





**Gráfico 7 - Valores de DQO do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

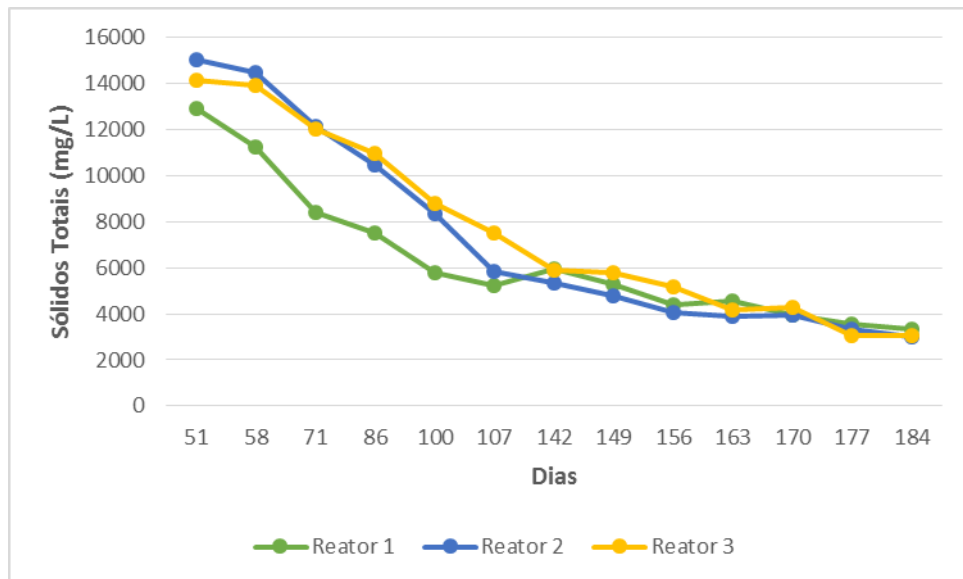
De acordo com Matos (2008), é comum os valores de DQO aumentarem no início da operação com recirculação devido ao acúmulo de ácidos orgânicos. Este crescimento ocorre no início da degradação devido à intensa atividade biológica, sendo caracterizada pelo decréscimo dos compostos orgânicos na fase sólida e em seguida no lixiviado.

Baraldi (2003) encontrou na comparação entre três células do aterro com aproximadamente a mesma idade de aterramento dos resíduos, onde uma operava com recirculação do lixiviado e as outras duas com operação convencional, que a DQO do lixiviado em células operando com recirculação é menor do que nas outras de operação convencional, demonstrando que existia uma menor quantidade de matéria orgânica a ser degradada devido à aceleração da degradação dos resíduos pela recirculação do lixiviado.

Resultados semelhantes foram encontrados por Cintra (2003), que analisando a digestão anaeróbia de resíduos em reatores, obteve uma maior redução de DQO para os que operavam com recirculação de lixiviado bruto ou pré-tratado em relação aos que operavam sem recirculação.

### 5.3.7 Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV)

Nos parâmetros sólidos totais e sólidos voláteis (Gráficos 8 e 9, respectivamente), observa-se uma redução no valor de ambos os parâmetros para os três reatores, demonstrando a redução da quantidade de sólidos e de matéria orgânica nos resíduos ali presentes. Apesar dos valores de sólidos terem apresentado resultados finais semelhantes nos três reatores, a sua redução foi mais acentuada nos reatores que operavam com recirculação, pois os mesmos possuíam valores iniciais maiores provavelmente devido a reintrodução de sólidos pela recirculação de lixiviado. Dessa maneira, demonstra maior degradação dos resíduos presentes nos reatores operados com recirculação.

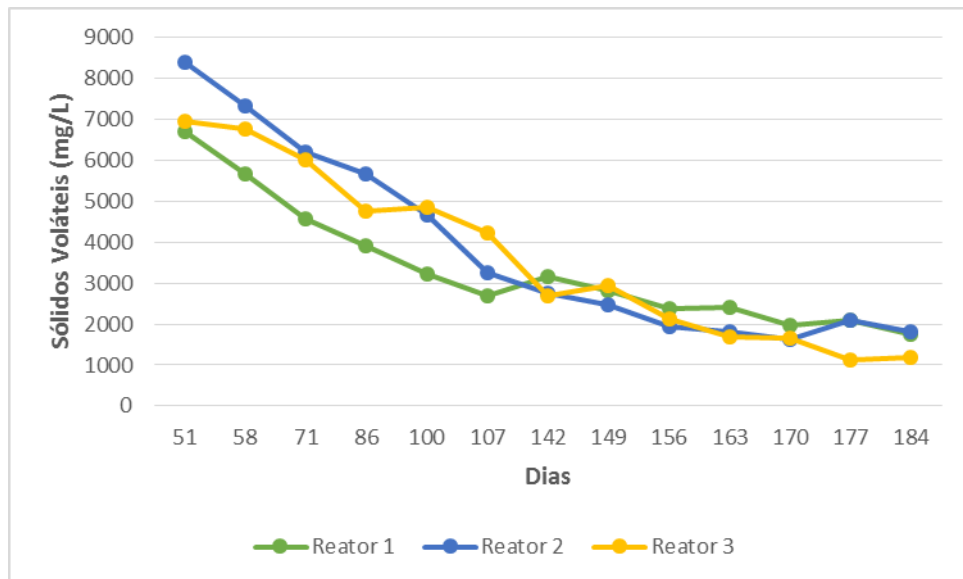


**Gráfico 8 - Valores de sólidos totais do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

De acordo com Cintra (2003) os sólidos totais referem-se a todos os resíduos presentes no substrato, podendo ser origem orgânica ou inorgânica, indicando o total da massa a ser tratada. A conversão dos resíduos só age no material que é

biodegradável. Quanto menor for a concentração de sólidos voláteis, menor é a fração de compostos orgânicos a serem degradados. Sendo assim, a autora indica que os sólidos, principalmente os voláteis, são significativos indicadores da degradação dos resíduos sólidos.



**Gráfico 9 - Valores de sólidos voláteis do lixiviado nos reatores.**

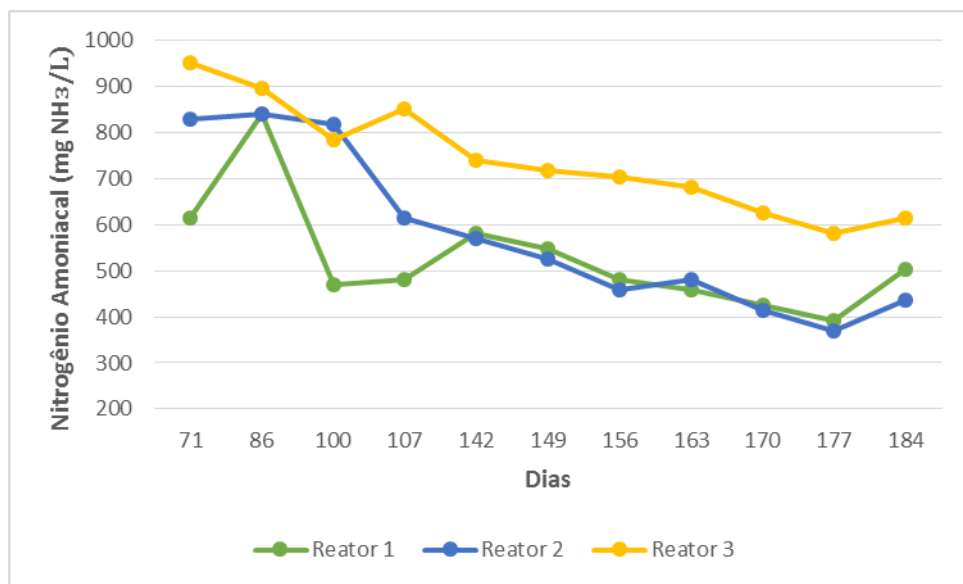
**Fonte: Autoria própria.**

Cintra (2003) encontrou valores de sólidos voláteis finais parecidos para as três linhas de operação, mas observou que o melhor desempenho ocorreu nos reatores onde operavam com recirculação do lixiviado bruto ou pré-tratado em relação aos que operavam sem recirculação.

### 5.3.8 Nitrogênio Amoniacal

O nitrogênio amoniacal é considerado como um parâmetro muito significativo no lixiviado, pois quando presente em altas concentrações pode complicar os processos

de tratamento do lixiviado devido à sua alta solubilidade, que dificulta sua remoção em um único processo de tratamento (SANTOS 2010; FERREIRA, 2013). No Gráfico 10 apresenta-se as concentrações de nitrogênio amoniacal para o lixiviado produzido pelos reatores e pode-se observar que este parâmetro obteve redução em todos os reatores, sendo um resultado muito importante para o tratamento do lixiviado, visto que pode vir a contaminar o solo e os corpos hídricos por possuir grande solubilidade.



**Gráfico 10 – Concentrações de nitrogênio amoniacal do lixiviado nos reatores.**

**Fonte: Autoria própria.**

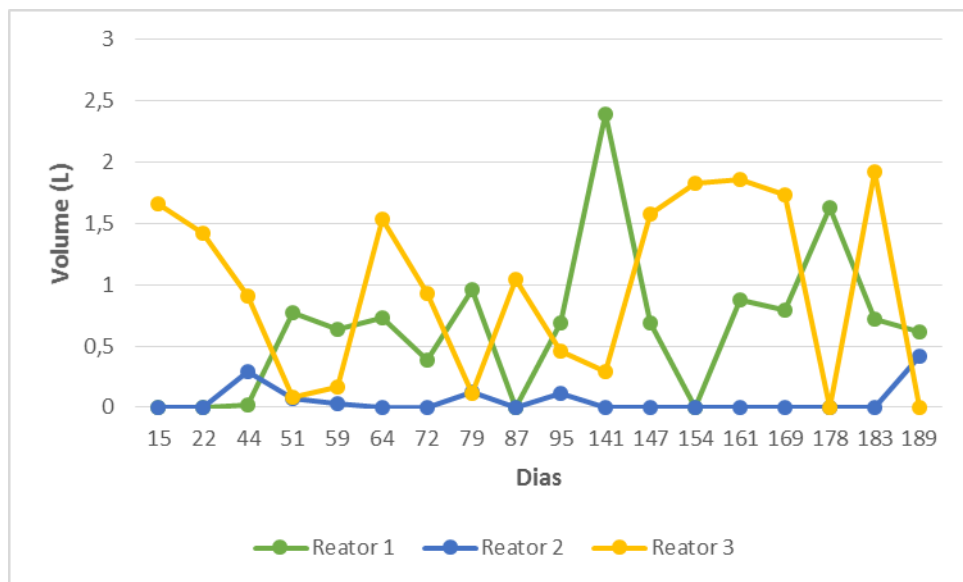
Os reatores operando com recirculação apresentavam no início das análises concentrações mais elevadas de nitrogênio amoniacal, sendo que ao final do experimento o reator operando com 50% de recirculação apresentava uma concentração menor que o reator 1, mas o reator 3 apresentou sempre concentrações superiores aos demais reatores. Esse fato provavelmente ocorreu pela reintrodução da amônia presente no lixiviado recirculado e as menores concentrações no reator 1 pela lavagem dos resíduos pela água inserida na simulação de chuva.

De acordo com Santos (2010), as altas concentrações de nitrogênio amoniacal no lixiviado podem ser decorrentes da degradação biológica de aminoácidos e

compostos orgânicos nitrogenados, podendo resultar em altas concentrações de amônia.

#### 5.4 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Nos reatores 1 e 3 onde a produção do biogás foi bem superior em relação ao reator 2, ela teve início no 44º dia para no reator 1 e 15º dia no reator 3, tendo sido superior neste último em quase todo o período do experimento. O volume de biogás produzido para o reator 1 no 44º dia foi de 0,02 L, sendo que a partir das próximas medições passou a apresentar volumes mais significativos de produção, alternando entre períodos de maior e menor produção. O reator 3 apresentou grande produção de biogás nos primeiros dias do monitoramento, porém a produção também variou como no reator 1. A produção de biogás nos reatores ao longo do experimento está apresentada no Gráfico 11.



**Gráfico 11 – Produção de biogás para os reatores.**

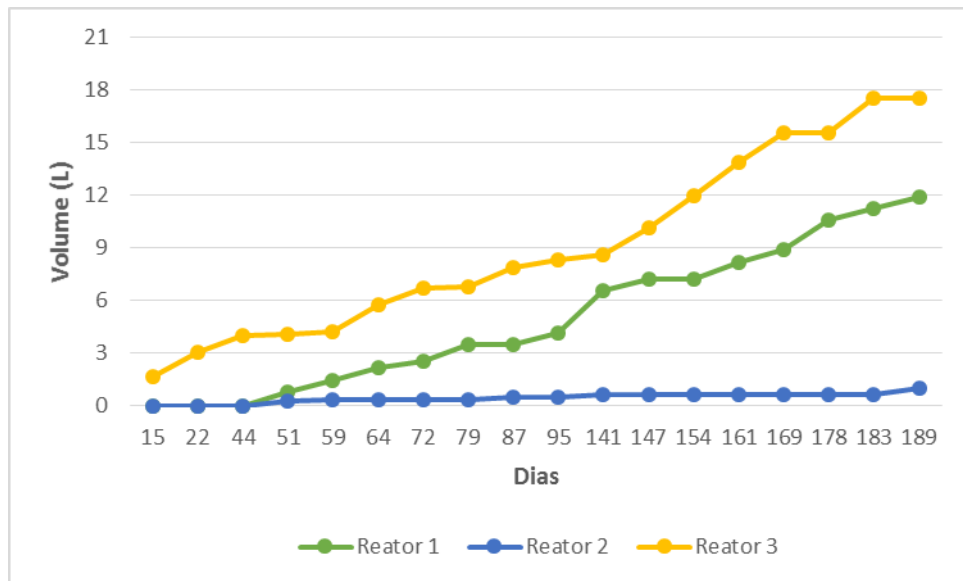
Fonte: Autoria própria.

O reator 2 ao longo de todo experimento produziu uma quantidade muito pequena de biogás, 1,04 L distribuídos em todo o período experimental. Uma hipótese para essa baixa produção é que, mesmo com os testes que não identificaram nenhum vazamento, pode ter ocorrido o vazamento do biogás por algum ponto não identificado do reator.

Outra hipótese para a baixa produção de gás no reator 2 foi associado à inibição, apesar do parâmetros analisados no lixiviado do reator 2 serem bem parecidos com os parâmetros do reator 1, essa inibição pode ter ocorrido por alguma condição físico-química dentro do reator, por exemplo, a condutividade elétrica no início estava elevada e isso pode ter interferido negativamente, pois altos valores de condutividade produzem um efeito osmótico que prejudica as atividades dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica (SANTOS, 2010). No final do experimento o valor da condutividade encontrada para a massa de resíduos foi maior no reator 2 com relação aos resíduos do reator 1, e demonstra que apesar do valor da condutividade elétrica do lixiviado de ambos os reatores tenha sido semelhante, na massa de resíduos sólidos ela pode ter se mantido maior no reator 2 durante todo o experimento, causando inibição na atividade dos microrganismos.

De acordo com Chernicharo (1997), valores baixos de pH devem ser evitados na digestão anaeróbia pois podem inibir a atividade dos microrganismos formadores de metano. Valores encontrados tanto para o lixiviado quanto para a massa de resíduos do reator 2 indicam que isto pode ter afetado a produção de biogás.

Na produção acumulada de biogás ao longo do experimento (Gráfico 12), observa-se que no reator 3 o volume de biogás produzido foi superior à produção do reator 1, e que a produção dos reatores 1 e 3 foram superiores ao reator 2, tendo as possíveis causas dessa baixa produção já explicadas anteriormente. A produção do biogás indica a decomposição dos compostos orgânicos em meio anaeróbio, demonstrando com a produção no reator 3 que ocorreu a aceleração da degradação dos resíduos desse reator (BARALDI, 2003).



**Gráfico 12 – Produção acumulada de biogás para os reatores ao longo do experimento.**

**Fonte: Autoria própria.**

Souza (2014) em seu trabalho encontrou resultados parecidos, onde um dos reatores operando com recirculação apresentou inibição de sua produção de biogás durante todo o experimento. Com relação aos outros dois reatores, ficou bem evidenciada a influência que a recirculação de lixiviado exerce para aumentar a produção de biogás, visto que a produção do reator com recirculação foi consideravelmente maior que o reator operando sem recirculação.

## 6. CONCLUSÕES

- As análises do lixiviado indicaram redução dos parâmetros e melhoria na qualidade do lixiviado de todos os reatores, sendo essa melhoria mais evidente no reator 3, que operava com 100% de recirculação, demonstrando que essa técnica além de contribuir para acelerar a degradação dos resíduos, é também uma maneira de tratar o lixiviado.
- Através dos resultados encontrados para as análises físico-químicas da massa de resíduos ao fim do experimento, conclui-se que ocorreu a degradação dos compostos orgânicos em todos os reatores. A degradação foi mais intensa na massa de resíduos presente nos reatores operando com recirculação, sendo que os menores valores de sólidos totais, sólidos voláteis e Carbono Orgânico Total (COT) e pH alcalino no reator 3, demonstraram que este acelerou a degradação quando comparado ao demais reatores.
- A produção acumulada de biogás foi maior no reator 3, totalizando a produção de 17,5 litros ao longo do experimento, que juntamente com as características físico-químicas do lixiviado demonstram que esse reator alcançou a fase metanogênica, estando em condições mais favoráveis para os microrganismos produtores de metano. Já o reator 1 produziu 11,9 litros de biogás e o reator 2 apenas 1,0 litro.
- Com os resultados obtidos é possível concluir que a recirculação a taxa de 100% do lixiviado produzido contribui para acelerar a degradação anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, melhorar a qualidade do lixiviado e aumentar a produção de biogás.



## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros para realizar a vedação do reator, utilizar uma borracha contínua para revestir toda a flange do reator. Para unir a tampa com a borda do reator por intermédio da borracha, utilizar um número maior de parafusos em intervalos de espaços menores, garantindo assim uma melhor vedação para manter condições anaeróbias e evitar vazamentos.

Montar um sistema que seja possível fazer as análises quantitativa e também análise qualitativa da produção do biogás para mensurar a produção de metano e dióxido de carbono, visto que a quantidade produzida de metano indica as condições em que está a digestão anaeróbia dos resíduos.

Adaptar uma abertura na lateral do reator para possibilitar a retirada de amostras da massa de sólidos para análise juntamente com o lixiviado no decorrer do experimento, permitindo uma melhor compreensão sobre o que ocorre durante a degradação anaeróbia dos resíduos.

Medir a temperatura do lixiviado quando o mesmo é esgotado e inserir no reator um termômetro para monitorar a temperatura dentro do reator, visto que a mesma possui papel fundamental na digestão anaeróbia.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2012.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2014.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

ANTONIO, Sarita M. **Análise da variação da vazão e da concentração do metano presentes nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro – SP**. 2012. 61 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2012.

BARALDI, Rosângela de C. O. **Efeitos da recirculação de lixiviado na biodegradação de resíduos sólidos em uma célula do aterro da Muribeca/PE**. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

BIDONE, Francisco. R. A; POVINELLI, Jurandy. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120p.

BOCCHIGLIERI, Miriam M. **O lixiviado dos aterros sanitários em estações de tratamento dos sistemas públicos de esgotos**. 2010. 257f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BORGES, Maeli E.; GUEDES, Rosa M. **Aterro Sanitário – Planejamento e Operação**. Viçosa, CPT, 2008. 274p. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 3 ago. 2010.

BRAZ, J. A. **Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa/PB. João Pessoa: ABES, 2001.

CAMPOS, Heliana K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 171-180, abr/jun 2012. -

CARMO, D.L. do; SILVA, C.A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v.36, n.4, p. 1211-1220, 2012.

CASSINI, Sérgio T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CHERNICHARO, Carlos A. L. **Reatores anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

CINTRA, Ilka S. **Estudo da influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado na aceleração do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos**. 2003. 352 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

FERREIRA, Bruna S. T. **Avaliação de desempenho de um sistema de gestão de resíduos – caso de estudo do Aterro Sanitário de Bigorne**. 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Escola Superior de Tecnologia de Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu. Portugal, 2013.

GOMES, Luciana P. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). Rio de Janeiro: ABES, 2009.

IAPAR. **Médias históricas em estações do IAPAR – Londrina**. Disponível em <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Londrina.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm)> Acesso em: 11 de maio de 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste**. v. 5. Hayama: IGES, 2006.

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

LIBÂNIO, Paulo A. C. **Avaliação da eficiência e aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume**. 2002. 156 f. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MACHADO, Rafaela dos S. **Avaliação da influência do tratamento biológico de lixiviado de aterro sanitário com recirculação do efluente por lagoas de estabilização**. 2009. 73 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: Potafos, 1997.319p.

MANETI, Piero; RACO, Brunella; LIPPO, Giovanni. Efeitos ambientais e econômicos positivos associados ao monitoramento do chorume e das emissões de biogás em aterros. **Conexão Academia**. Vol. 2, n. 3, p. 09-15, 2012.

MATOS, Ana Rita V. de. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos.** 2008. 131 f. Dissertação (Mestre em Engenharia do Ambiente). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 2008.

MONTAGNA, Tainara B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma revisão bibliográfica.** 2013. 53f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). União de Ensino do sudoeste do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

MONTEIRO, José H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

MOURA, A.A.; LIMA, W.S.; ARCHANJO, C.R. **Análise da composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso - Município de Itaúna- MG.** Revista Digital FAPAM, Pará de Minas, n.3, 4 - 16, abr. 2012

PARANÁ. Resolução conjunta SEMA/IAP/SUDERHSA nº 01 de 26 de agosto de 2006. Estabelece requisitos, critérios técnicos e procedimentos para a impermeabilização de áreas destinadas a implantação de Aterros Sanitários, visando à proteção e a conservação do solo e das águas subterrâneas. **Diário Oficial.** Curitiba, PR, 26 ago. 2006.

PARANÁ. Resolução CEMA nº 86 de 2 de abril de 2013. Estabelece diretrizes e critérios orientadores para o licenciamento e outorga, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários, visando o controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e dá outras providências. **Diário Oficial.** Curitiba, PR, 19 dez. 2013.

SANTOS, Valter C. dos. **Projeto, construção e instrumentação de um lisímetro em escala de laboratório para estudos em resíduos sólidos.** 2010. 105 f. Monografia (Graduado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010

SOUZA, J. L. N. de. **Influência da taxa de recirculação de lixiviado na degradação de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás.** 2014. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2014.

SUBTIL, Eduardo L. **Avaliação da redução de sulfato e produção de sulfeto dissolvido em reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgoto sanitário em escala real.** 2007. 100f. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** 2 Ed. Porto Alegre: Departamento de solos UFRGS. 1995, 175p.

TCHOBANOGLIOUS, George; KREITH, Frank. **Handbook of solid waste management.** 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.