

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

**Análise da produção do biogás proveniente da degradação de resíduos
sólidos urbanos (RSU) em função da sua granulometria em biorreatores
anaeróbios**

Ana Cristina de Oliveira Santos Pereira

**Itajubá-MG
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

Ana Cristina de Oliveira Santos Pereira

Análise da produção do biogás proveniente da degradação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em função da sua granulometria em biorreatores anaeróbios

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

**Itajubá-MG
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

Ana Cristina de Oliveira Santos Pereira

Análise da produção do biogás proveniente de degradação de resíduos sólidos urbanos (RSU) em função da sua granulometria em biorreatores anaeróbios

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19 de maio de 2017, conferindo ao autor o título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Orientador)

Prof^a. Dr^a. Regina Mambeli Barros

Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade

Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos

Prof^a. Dr^a. Kátia Sakihama Ventura

**Itajubá-MG
2017**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido avô José Mendes dos Santos, alguém que amo, pois o amor jamais acabará. A dor da saudade não vai passar, mas as lembranças dos momentos juntos permanecerão na minha mente e coração. Obrigada Vô Zezé por todos os ensinamentos, espero que esteja orgulhoso de onde estiver!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

À toda minha família, em especial aos meus pais Rogéria e José Adilson, Ana Carolina, Laís, Júnior, Maria Aparecida, Nilton, José Maurício e Karina, que sempre estiveram do meu lado.

Ao meu marido Carlos Roberto (Juninho) pelo amor, incentivo e paciência.

À família do meu marido, Terezinha, Ana Carolina e Carlos Roberto, pelo apoio incondicional.

À equipe da iX Estudos e Projetos por ter oferecido todo o suporte e conhecimento para a execução deste trabalho. Um obrigado mais que especial à Bárbara Karoline Flauzino e ao Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos, que me acolheram e proporcionaram todo conhecimento durante minha trajetória desde a graduação, nos estágios de férias, até no mestrado.

Ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, por ter me acolhido e orientado sempre com muito carinho e dedicação.

Agradeço também à minha querida Nossa Senhora de Aparecida e ao Santo Expedito por terem se tornado ponto de apoio nos dias mais difíceis.

À Endesa Geração Brasil, proponente do projeto de P&D do qual o meu trabalho fez parte, agradeço pela oportunidade.

Aos funcionários do campo experimental de Itanhandu -MG, em especial ao Seu Tião e filhos, os meus sinceros agradecimentos.

À CAPES, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

Aos meus queridos amigos, pelo incentivo e pelas palavras de otimismo.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A urbanização crescente traz um aumento considerável da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo necessária a criação de alternativas que minimizem os impactos do descarte desse material no ambiente. A disposição dos RSU em aterros sanitários representa uma das destinações ambientalmente adequadas no contexto brasileiro. Nestes locais a degradação dos resíduos ocorre por meio de um processo anaeróbio que origina uma mistura gasosa denominada biogás, o qual é composto, basicamente, por metano, dióxido de carbono e outros gases em menores concentrações. Estudos realizados em biorreatores têm por objetivo o conhecimento das condições de degradação da matéria orgânica e dos fatores que favorecem ou prejudicam este processo. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência da granulometria do RSU na produção e composição do biogás proveniente de três biorreatores anaeróbios com resíduos diferentes granulometrias (entre 4 e 8 mm) instalados no município de Itanhandu-MG. Para isso, foi realizado o monitoramento da quantidade e composição do biogás proveniente destes biorreatores. Além disso, realizou-se a caracterização físico-química do resíduo no início e fim do experimento. Os resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores eram detentores de grande carga orgânica e ao fim do experimento demonstraram que houve degradação do material depositado, entretanto com umidade final abaixo dos valores ideais. A massa total de biogás produzida pelo biorreator de menor granulometria (0,54 kg) foi superior à do biorreator controle (0,51 kg), que por sua vez, foi maior a do biorreator com maior granulometria (0,45 kg). De maneira geral, a redução da granulometria mostrou-se um parâmetro favorável, para as condições do estudo, tanto no aumento do percentual de metano como na quantidade de biogás produzida, que variou de 0,38 a 0,52 m³. Considerando o potencial de geração e o teor ideal de metano no biogás pregados na literatura, os biorreatores não atingiram os resultados esperados, possivelmente pela baixa umidade dos resíduos, evidenciando a importância deste parâmetro para a degradação anaeróbia dos resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Degradação Anaeróbia. Biorreator. Granulometria. Biogás.

ABSTRACT

The growing urbanization brings a considerable increase of municipal solid waste (MSW), requiring the creation of alternatives that minimize the impacts of the disposal of this material in the environment. The disposal of MSW in landfills represents one of the environmentally appropriate destinations in the Brazilian context. In these places the waste degradation occurs through an anaerobic process that results to a gas mixture called biogas, which is composed basically by methane, carbon dioxide and other gases in lower concentrations. Bioreactor studies to the knowledge of the conditions of degradation of organic matter and of the factors that promote or hinder this process. Given this, the objective of this work was to analyze the influence of the granulometry of the MSW in the production and composition of biogas from three anaerobic bioreactors with different granulometries waste (between 4 and 8 mm) installed in the municipality of Itanhandu-MG. The monitoring of the quantity and composition of biogas from these bioreactors was done. Physico-chemical characterization was made of the residue at the beginning and end of the experiment. Waste used in the bioreactors had of large organic load and the end of the experiment demonstrated that there has been degradation of the material deposited. Final humidity was under ideal values. The total mass of biogas produced by smaller bioreactor size (0.54 kg) was greater than that of the control bioreactor (0.51 kg), which in your time, was the largest of the bioreactor with highest particle size (0.45 kg). In General, the reduction in particle size proved to be a parameter, to the conditions of the study, both in increasing the percentage of methane as the amount of biogas produced, which ranged from 0.38 to 0.52 m³. Considering the potential of generation and ideal content of methane in the biogas nailed in the literature, not reached the expected results bioreactors, possibly by the low humidity of the waste, highlighting the importance of this parameter for the anaerobic degradation of waste.

KEY WORDS: Anaerobic Degradation. Bioreactor. Granulometry. Biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a sua periculosidade, conforme a série de normas ABNT 10.004 (2004).	17
Figura 3.2: Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado em São Paulo-SP.....	20
Figura 3.3: Exemplo ilustrativo de um aterro sanitário	21
Figura 3.4: Sistema de impermeabilização de base e laterais do aterro sanitário com geomembrana sintética	21
Figura 3.5: Exemplo ilustrativo de um sistema de drenagem de percolado do tipo espinha de peixe	22
Figura 3.6: Exemplo ilustrativo de um sistema de coleta de biogás do tipo vertical	23
Figura 3.7: Exemplo ilustrativo de aterro controlado.....	24
Figura 3.8: Exemplo ilustrativo de lixão	25
Figura 3.9: Destinação final dos RSU no Brasil, agrupado por região e por destino em 2014	26
Figura 3.10: Resumo esquemático das etapas do processo de digestão anaeróbia.....	31
Figura 3.11: Comparação da ação das bactérias em resíduos de tamanhos diferentes devido à superfície de contato	34
Figura 3.12: Modelo de degradação de resíduos e formação de gases proposto por Pohland e Harper (1985), que possui cinco fases distintas e sequenciais	37
Figura 3.13: Exemplo de biorreator operado em laboratório	40
Figura 4.1: Mapa com a localização do município de Itanhandu (a direita) e localização da UCR Itanhandu onde foi implantado o campo experimental	41
Figura 4.2: Biorreatores utilizados para o estudo da influência da granulometria na produção do biogás.....	42
Figura 4.3: Instalação do coletor de chorume.....	43
Figura 4.4: Camada de brita ao fundo do biorreator para drenagem do chorume	43
Figura 4.5: Instalação do dreno de biogás.	44
Figura 4.6: Picadeira.....	45
Figura 4.7: Adaptações realizadas na picadeira: acionamento do equipamento e mudança do local da saída dos resíduos picados	45
Figura 4.8: Pesagem dos resíduos picados e enchimento do biorreator.	46
Figura 4.9: Procedimentos finais do enchimento do biorreator.....	46
Figura 4.10: Amostragem dos resíduos, utilizados no enchimento dos biorreatores, para a análise dos parâmetros físico-químicos.....	47

Figura 4.11: Série de peneiras utilizadas para a determinação da granulometria do resíduo e pesagem do material retido em cada uma das peneiras.	48
Figura 4.12: Resultado do ensaio de granulometria para o resíduo de menor granulometria ..	49
Figura 4.13: Resultado do ensaio de granulometria para o resíduo de maior granulometria ...	49
Figura 4.14: Resultado do ensaio de granulometria para a mistura de resíduos	50
Figura 4.15: Analisador de gás GEM 5000 Landtec® e medição da composição de biogás no gasômetro	51
Figura 4.16: Gasômetros	51
Figura 5.1: Monitoramento do biogás no biorreator controle referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016.....	57
Figura 5.2: Monitoramento do biogás no biorreator com resíduo de menor granulometria referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016.....	58
Figura 5.3: Monitoramento do biogás no biorreator com resíduo de maior granulometria referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016.....	59
Figura 5.4: Monitoramento da massa de biogás produzida nos três biorreatores no período de 01/10/2015 a 30/09/2016.....	61
Figura 5.5: Monitoramento da massa de metano produzida nos três biorreatores no período de 01/10/2015 a 30/09/2016.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a sua origem (BRASIL, 2010)	18
Tabela 3.2: Prazos diferenciados para os municípios se adequarem à PNRS	24
Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para caracterização dos resíduos sólidos.....	26
Tabela 3.4: Composição gravimétrica dos RSU município de Itanhandu-MG.....	27
Tabela 3.5: Valores de referência de massa específica aparente dos resíduos	28
Tabela 3.6: Composição básica do biogás.....	35
Tabela 3.7: Duração de cada fase na decomposição dos resíduos.....	38
Tabela 4.1: Dados sobre o tamanho do resíduo, data e quantidade de dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.	42
Tabela 4.2: Dados sobre o tamanho do resíduo dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.	50
Tabela 5.1: Parâmetros físico-químicos dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.	53
Tabela 5.2: Relação DQO/DBO dos resíduos no início e fim do experimento.....	54
Tabela 5.3: Relação entre a massa de biogás produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator	62
Tabela 5.4: Relação entre a massa de metano produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Justificativas.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo Geral.....	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1. Resíduos Sólidos.....	16
3.2. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	19
3.3. Digestão Anaeróbia.....	29
3.4. Biogás	35
3.5. Biorreatores.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1. Área de Estudo.....	41
4.2. Biorreatores.....	42
4.3. Caracterização dos Resíduos	47
4.4. Monitoramento da Produção de Biogás.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Caracterização dos Resíduos	53
5.2. Monitoramento da Produção de Biogás.....	55
6. CONCLUSÕES.....	66

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização, atual e crescente, acarreta no aumento considerável da produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo necessária a criação de alternativas que minimizem os impactos do descarte desse material no ambiente. Segundo Silva (2012), a disposição em aterros sanitários é a destinação final ambientalmente adequada no contexto brasileiro. A degradação dos resíduos, nos aterros, ocorre por meio de um processo anaeróbio, ou seja, na ausência de oxigênio, e origina uma mistura gasosa denominada biogás (GÜLZOW, 2010). O biogás é composto, basicamente, por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases, tais como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis (TCHOBANOGLOUS, THEISEN e VIRGIL, 1993). Dependendo da eficiência do processo de decomposição, o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano.

O rápido crescimento, tanto populacional como industrial, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, requer uma intensificação na demanda energética e manejo adequado dos resíduos sólidos. Neste contexto, surge o interesse em pesquisas com ênfase na disposição adequada dos RSU e em tecnologias de aceleração de sua degradação com possível geração e utilização energética do biogás (DUARTE, 2014).

De acordo com Costa (2006), atualmente o biogás não é mais considerado apenas como um subproduto obtido a partir da decomposição anaeróbia, mas sim, como alvo de fortes pesquisas. Tais pesquisas são impulsionadas pela elevação acentuada no preço dos combustíveis fósseis, pela possibilidade de redução do uso dos recursos naturais não renováveis e, principalmente ao incentivo da destinação final ambientalmente adequada, representada, no contexto brasileiro, pelos aterros sanitários.

Pesquisas envolvendo aterros sanitários em escala real apresentam custo elevado, grande número de variáveis envolvidas no processo, além da dinâmica de operação do aterro, dificultando a obtenção de dados sob condições controladas (SOUSA et al., 2012). Nesse contexto, a utilização de biorreatores é uma das soluções para os estudos que envolvem a análise da produção de biogás, uma vez que esses dispositivos permitem a compreensão do processo de decomposição anaeróbia, pois propiciam condições ideais para o desenvolvimento dos micro-organismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica e produção de biogás.

Estudos desenvolvidos em biorreatores têm por finalidade o conhecimento das condições de degradação da matéria orgânica, possibilitando a verificação e alteração das condições

ambientais e operacionais que favorecem o processo de decomposição anaeróbia, possibilitando a proposição de soluções para a melhoria na eficiência da produção de biogás. Para Barros (2013), os parâmetros passíveis de intervenção no processo de digestão anaeróbia de RSU são pH, presença de inóculo, fração orgânica dos resíduos, proporção entre a concentração de carbono e nitrogênio (relação C:N), temperatura, tamanho da partícula (granulometria) e grau de compactação do RSU.

A composição dos RSU é extremamente heterogênea, podendo variar muito em tamanhos de partículas (LIMA, 2004). Nesse sentido, a redução do tamanho das partículas por trituração em veículos de coleta ou em estações de transferência aumenta significativamente a reatividade do processo, devido ao aumento da área superficial de contato do substrato disponível ao ataque enzimático dos micro-organismos (JOHN, 2004).

O conhecimento sobre o efeito da granulometria dos resíduos sobre a degradação anaeróbia possibilita o delineamento dos mecanismos de remoção de matéria orgânica sendo fundamental para o aperfeiçoamento das alternativas tecnológicas de tratamento do RSU. Este trabalho buscou analisar a influência da granulometria do RSU na produção e composição do biogás proveniente de três biorreatores anaeróbios com resíduos diferentes granulometrias (entre 4 e 8 mm) instalados no município de Itanhandu-MG. Esse estudo foi resultado dos experimentos realizados no âmbito do P&D 2934-0012/2012, selecionado pela ANELL por meio da Chamada estratégica nº 014/2012.

1.1. Justificativas

Segundo o último Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos da Secretaria Nacional de Saneamento ambiental (SNSA, 2016), a população brasileira gerou em 2014, aproximadamente, 64 milhões de toneladas de RSU, dos quais 52,4% foram dispostos em aterros sanitários. Este tipo de destinação ambientalmente adequada certamente aumentará, visto que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu o fechamento dos lixões, inicialmente para 2014 e, posteriormente, até 2021, de acordo com a população do seu município (BRASIL, 2010).

Assim como a implantação de aterros sanitários, nos últimos anos houve, também, o aumento do aproveitamento energético do biogás. De acordo com o Banco de Informações para Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016), em 2016, a matriz energética brasileira conta com 15 usinas termelétricas com queima de biogás oriundo de RSU, gerando cerca de 65 MW. Oito dessas usinas entraram em operação nos últimos anos.

Dessa forma, considerando o cenário determinado pela PNRS, a tendência é que o interesse pelo aproveitamento energético do biogás cresça ainda mais.

Por se tratar de uma fonte de energia renovável ainda incipiente no Brasil, os modelos de projeção de geração adotados, assim como as tecnologias utilizadas para aproveitamento energético de biogás, tais como os sistemas de purificação e os motores, são, em sua grande maioria, desenvolvidos em outros países, especialmente, os europeus. Portanto, muitas dessas tecnologias foram projetadas com base na composição do biogás cujas características físico-químicas e gravimétricas, diferem da realidade brasileira. A adoção de tecnologias importadas tem causado alguns problemas para centrais no país, como por exemplo, menor tempo de funcionamento dos motores entre as manutenções, rápida saturação do carvão ativado, devido à presença de siloxanos, entre outros.

Nesse sentido é de grande importância que sejam desenvolvidos no Brasil estudos que envolvam a análise da produção e composição do biogás, proveniente da degradação anaeróbia do RSU, pois além de criar material científico para o país, irá auxiliar no desenvolvimento/adequação de tecnologias compatíveis com a realidade brasileira. Além disso, o estudo da influência da redução da granulometria, tema deste trabalho, pode ser aplicado à realidade dos aterros sanitários, por meio da utilização equipamentos trituradores anteriormente a disposição dos RSU.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a influência da granulometria do resíduo sólido urbano na produção e composição do biogás proveniente da degradação anaeróbia em biorreatores.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os resíduos utilizados no enchimento de três biorreatores, no início e fim do experimento por meio da análise dos parâmetros físico-químicos.
- Monitorar e determinar a produção de biogás proveniente de três biorreatores com resíduos de granulometrias diferentes, determinando, para cada biorreator a massa total de biogás produzida e a sua composição em relação às frações de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S.
- Analisar, para as condições do estudo, se a granulometria foi um fator que favoreceu ou prejudicou a produção de biogás.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos são, de acordo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), os resíduos em estado sólido e semissólido, oriundos de atividades de procedência doméstica, industrial, de serviços, de varrição, comercial, agrícola e hospitalar. Estão incluídos, ainda, os lodos originários de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, assim como determinados líquidos, cujas características tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para tanto, soluções econômica e tecnicamente inexecutáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), por sua vez, considera resíduo sólido como qualquer material, substância, objeto ou bem descartado oriundo de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido. Inclui-se também nessa definição, os gases contidos em recipientes, além dos supracitados líquidos com as dadas particularidades constantes na norma NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos podem ser classificados segundo determinadas características ou propriedades identificadas. Segundo Barros (2013), os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à periculosidade e à origem. A periculosidade é a característica apresentada pelo resíduo em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que podem representar potencial de risco à saúde pública e ao meio ambiente. De acordo com sua periculosidade os resíduos sólidos podem ser enquadrados, segundo a norma NBR 10004/2004 da ABNT, como Classe I (resíduos perigosos), Classe II (resíduos não perigosos), a qual se subdivide em Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes).

Para a classificação do resíduo quanto à periculosidade (Figura 3.1), uma amostra deve ser coletada respeitando a norma ABNT NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004). Caso essa amostra possua uma das cinco características de periculosidade, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, ela é classificada como Classe I (resíduos perigosos). Se não se souber de alguma característica de periculosidade, ela não deve ser diretamente considerada não perigosa (Classe II). Neste caso, deve ser realizado o ensaio de lixiviação de acordo com a norma ABNT NBR 10.005/2004 (ABNT, 2004). Caso a amostra

submetida ao ensaio apresente valores dos parâmetros analisados superiores ao limite proposto pela norma ABNT NBR 10.004/2004, ela é considerada Classe I. Caso contrário ela pertence à Classe II (não perigosos) e deve ser subclassificada em Classe II A (não inertes) ou Classe II B (inertes). Para isso, a amostra deve ser submetida ao ensaio de solubilização e caso haja constituintes solubilizados em concentrações superiores aos limites de potabilidade da água, a amostra será considerada pertencente à Classe II A. Se a concentração dos constituintes solubilizados for inferior aos limites de potabilidade da água, a amostra será considerada pertencente à Classe II B.

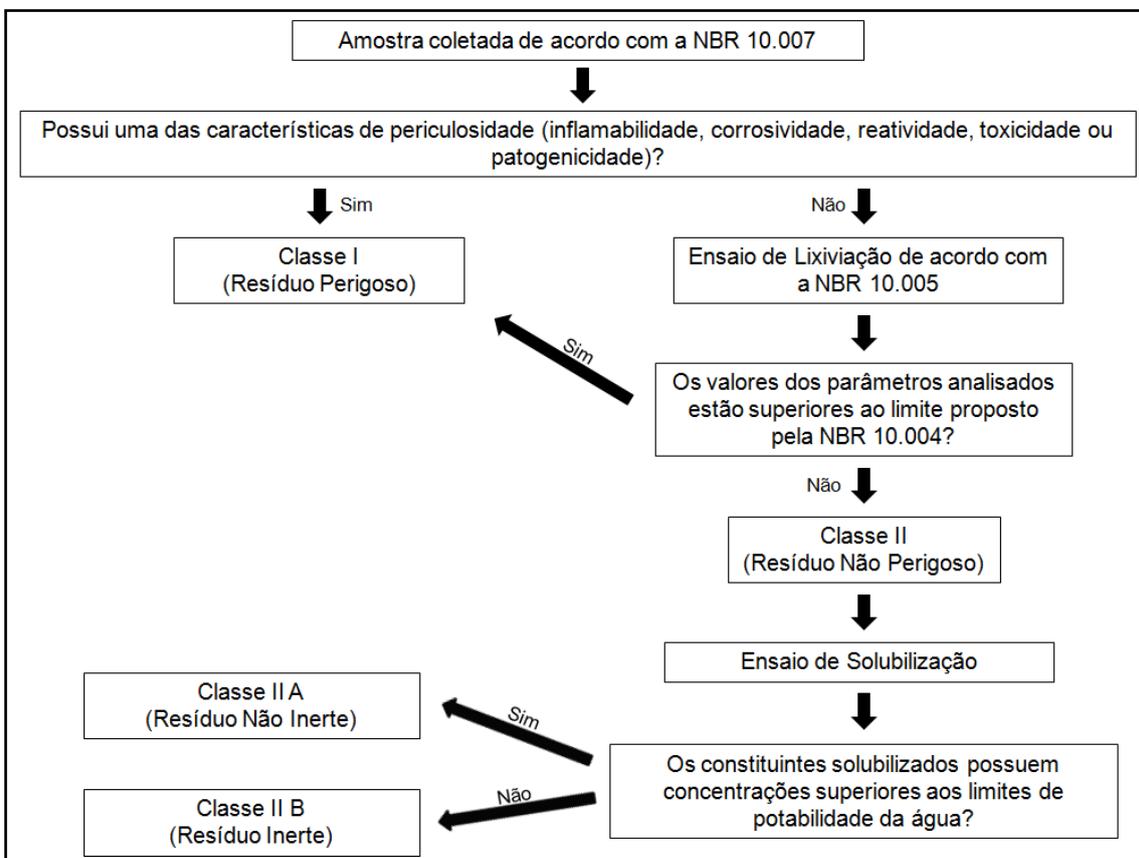


Figura 3.1: Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a sua periculosidade, conforme a série de normas ABNT 10.004 (2004).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), por sua vez, propõe onze categorias para os resíduos sólidos. Nesta classificação o critério utilizado é a origem do resíduo sólido (BRASIL, 2010). Na Tabela 3.1 estão as categorias, origem e exemplos de cada tipo de resíduo proposto por esta lei.

Tabela 3.1: Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a sua origem (BRASIL, 2010)

Classificação	Origem	Exemplo
Resíduo Domiciliar	Originados da vida diária nas residências	Restos de comida, cascas de alimentos, jornais, revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico
Resíduo de Limpeza Urbana	Aqueles originados nos diversos serviços de limpeza pública urbana	Resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de praias, limpeza de galerias, de córregos e de terrenos, restos de podas de árvores, corpos de animais, etc
Resíduo Sólido Urbano	É o somatório dos resíduos domiciliares com o de limpeza urbana	-
Resíduo de estabelecimento comercial e/ou prestador de serviço	Originados nos diversos estabelecimentos comerciais	Papel, plásticos, embalagens diversas, papéis-toalha, papel higiênico, etc.
Resíduo do serviço público de saneamento básico	Resíduos de Estação de Tratamento de Esgoto, de Estação de Tratamento de Água	Principalmente lodo resultante do tratamento de esgoto e da água
Resíduo Industrial	Originados nas atividades dos diversos ramos da indústria, nessa categoria incluem-se grande maioria dos resíduos considerados tóxicos	Cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas, etc
Resíduo de Serviço de Saúde	Resíduos produzidos em serviços de saúde, tais como hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, etc	Constituídos de seringas, gases, órgãos removidos, meios de culturas e cobaias, remédios com validade vencida, filmes fotográficos de raio X
Resíduo de Construção Civil	São os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições	Constituem-se de demolições e restos de obras, solos de escavações diversas, etc. Trata-se, geralmente, de materiais inertes, passíveis de reaproveitamento
Resíduos Agrossilvopastoril	Resíduos sólidos das atividades agrícolas e da silvicultura	Embalagens de defensivos agrícolas, restos de criatórios intensivos (produtos veterinários, restos de processamento, estrume, etc.), bagaço de cana, laranja, etc
Resíduo do serviço de transporte	Proveniente de atividades de transporte, como portos, aeroportos e terminais rodoviários.	Constituem-se de materiais de higiene e asseio pessoal, que podem veicular doenças provenientes de outros países.
Resíduo de Mineração	Resíduos resultantes dos processos de mineração em geral	São constituídos pelos resíduos gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Além do critério de periculosidade e origem, os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à sua composição química. Esta classificação representa uma das formas mais simples de classificação, que compreende resíduos orgânicos e inorgânicos. Os resíduos orgânicos são oriundos dos seres vivos, animais e vegetais e neles podem-se incluir restos de alimentos, folhas, sementes, restos de carne e ossos, papéis, madeiras. Já os inorgânicos são os materiais que não possuem origem biológica, ou que foi produzida através de meios humanos, como plásticos, metais e ligas (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2001).

3.2. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Conforme definição dada pela PNRS (BRASIL, 2010), os resíduos sólidos urbanos englobam os resíduos domiciliares, que são aqueles originados a partir de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, que por sua vez representam aqueles originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

Os RSU podem ter várias destinações, e isso depende muito da sua tipologia e origem. Há materiais, que mesmo após o seu descarte ainda podem ser reutilizados e, nesse caso, são captados em processos de pré-tratamentos, como a reciclagem e a logística reversa. Caso o material descartado não seja passível de reaproveitamento, ele pode ser encaminhado a tratamentos que minimizam os impactos de seu descarte inadequado no meio ambiente e ainda podem gerar benefícios, como a compostagem, a incineração, pirólise e co-processamento. Se nenhum processo anterior pode ser aplicado, então se tem os rejeitos, que, segundo a PNRS, são os resíduos que, posteriormente ao esgotamento de todas as possibilidades de tratamento e recuperação por meio de processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não ofereçam outra possibilidade, a não ser a disposição final ambientalmente adequada. No Brasil, os rejeitos podem ser encaminhados, principalmente, para aterros sanitários, aterros controlados ou lixões. Vale salientar que os lixões são proibidos pela PNRS (BRASIL, 2010) e os aterros sanitários são considerados a disposição final ambientalmente adequada, de acordo com esta lei.

Segundo a norma ABNT NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992), aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo que minimiza os danos à

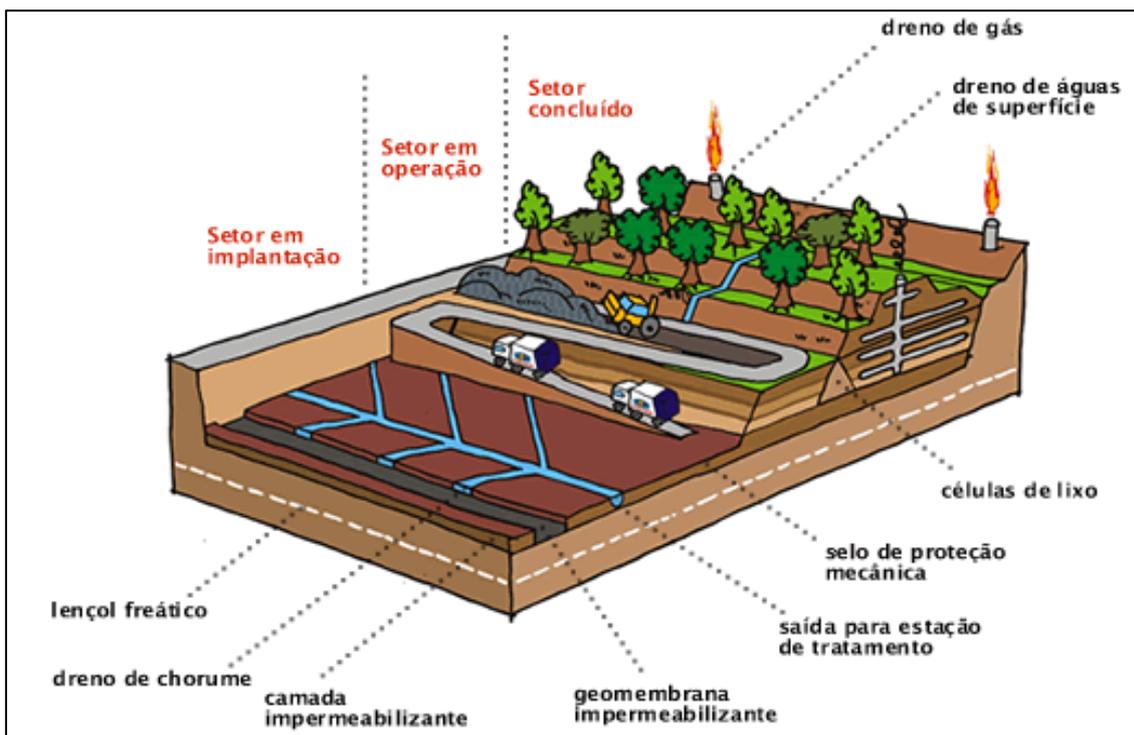
saúde pública e à sua segurança, e conseqüentemente os impactos ambientais. O aterro sanitário (Figura 3.2) é a forma de dispor o RSU sobre o solo, compactando-o com trator, reduzindo-o ao menor volume permissível e recobrimdo-o com camada de terra compactada, na frequência necessária de forma que ocupe a menor área possível. Nos aterros sanitários devem ser depositados somente os rejeitos dos resíduos sólidos, sendo respeitada a ordem prioritária de gestão, a qual engloba a não geração, redução, reutilização, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE e CONSELHO INTERNACIONAL PARA INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS, 2012).



Fonte: Ambiental (2012)

Figura 3.2: Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado em São Paulo-SP

Os aterros sanitários representam locais de destinação final de RSU ambientalmente adequados pelo fato de possuírem, em sua estrutura, sistemas de proteção ambiental, como o de impermeabilização de base e laterais, de coleta e drenagem de líquidos percolados e de coleta e tratamentos dos gases.



Fonte: Ambiental (2012)

Figura 3.3: Exemplo ilustrativo de um aterro sanitário

A camada de impermeabilização da base e das laterais (Figura 3.4) tem o objetivo de garantir a separação entre a disposição de resíduos e o subsolo de forma segura. Ela impede a contaminação do lençol freático e do meio natural através de infiltrações de percolados e/ou substâncias tóxicas. Para desempenhar essa função de maneira eficiente, a camada de impermeabilização de materiais deve compor-se de solo argiloso de baixa permeabilidade ou geomembrana sintética com espessuras adequadas (LANZA e CARVALHO, 2006).



Fonte: Tecnoplás (2015)

Figura 3.4: Sistema de impermeabilização de base e laterais do aterro sanitário com geomembrana sintética

O principal efluente líquido de aterros sanitários é o chorume, que, ao atingir as águas subterrâneas, polui o recurso natural, devido à sua elevada carga orgânica. Nos aterros sanitários, o chorume é gerado pelo processo de degradação do resíduo sólido urbano e pela passagem de águas de chuva pelo interior dos mesmos. A poluição das águas pelo chorume pode provocar endemias ou intoxicações, se houver a presença de organismos patogênicos e substâncias tóxicas em níveis acima do permissível (SISINNO e OLIVEIRA, 2000).

Os sistemas de drenagem dos efluentes líquidos (Figura 3.5) são instalados na fundação dos aterros, juntamente com a execução da camada de impermeabilização. Eles se constituem por linhas principais de drenagem com tubos perfurados envoltos em material granular subjacentes a camadas de areia e ou brita/cascalho, associados a drenos secundários, configurando sistemas tipo espinha de peixe. Os tubos podem ser de concreto ou de polietileno de alta densidade (PEAD) (COMPANHIA DO DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA, 2014).



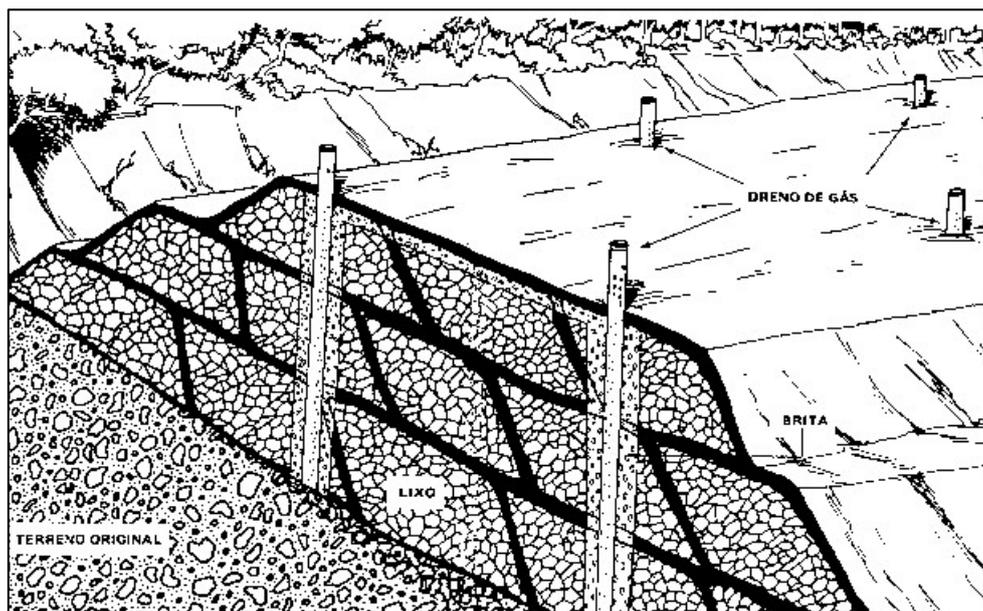
Fonte: Fonseca (2012)

Figura 3.5: Exemplo ilustrativo de um sistema de drenagem de percolado do tipo espinha de peixe

O sistema de drenagem de efluentes líquidos é um item obrigatório nos aterros sanitários, segundo as normas ABNT, e tem a função de drenar o chorume produzido e levar materiais em suspensão e dissolvidos com alto potencial de contaminação. O chorume coletado por esse sistema deve ser tratado em estações próprias para essa

finalidade. Em certos casos o chorume por ser reintroduzido na massa de RSU do aterro sanitário, fato que acelera a sua decomposição.

O sistema de coleta dos gases tem por objetivo drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, evitando migração através dos meios porosos que constituem o subsolo. Em relação aos efluentes gasosos produzidos em um aterro sanitário, aquele que merece destaque é o biogás, que é composto principalmente por metano e dióxido de carbono. Como os dois gases contribuem para o agravamento do efeito estufa, eles precisam ser drenados e tratados adequadamente. A coleta de biogás do aterro é realizada através de tubos verticais perfurados (Figura 3.6) ou de tubos de sucção horizontais. A coleta do biogás é importante, pois permite a minimização de possíveis impactos ambientais, controla a migração do biogás, controla odores e cumpre com proposto na ABNT NBR 13.896/1997 (ABNT, 1997), que define os critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos (MAZO-NIX, 2013).



Fonte: HF Construtécnica (2004)

Figura 3.6: Exemplo ilustrativo de um sistema de coleta de biogás do tipo vertical

A adoção da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 2010 (BRASIL, 2010), estabeleceu uma meta ambiciosa e desafiadora em seu Artigo 54, o qual deu o prazo de quatro anos para que os municípios fizessem a disposição final ambientalmente adequada dos seus rejeitos, ou seja, propôs o fim dos lixões para o ano de 2014. Porém, muitos municípios não se adequaram a nova proposta e, em julho de 2015, foi aprovado Projeto de Lei 425/2014 (BRASIL 2014) que confere prazos diferenciados para a

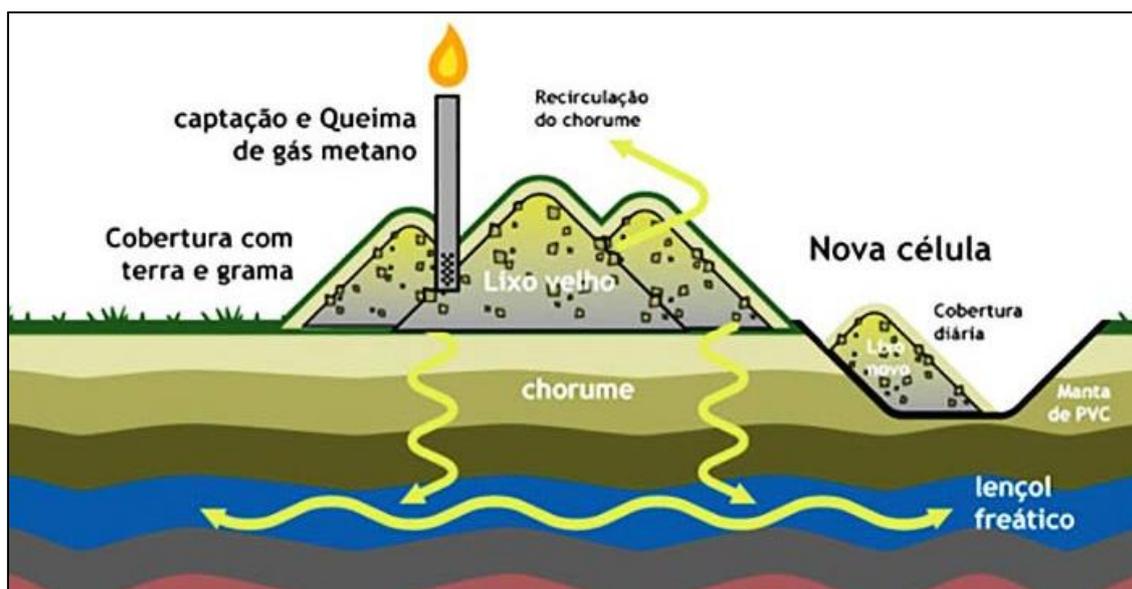
adequação à nova lei (Tabela 3.2). Os prazos mais longos foram concedidos para municípios com população inferior a 50 mil habitantes e mais curtos para as capitais de Estados e Municípios integrantes de região metropolitana ou de região integrada de desenvolvimento.

Tabela 3.2: Prazos diferenciados para os municípios se adequarem à PNRS

Municípios	Prazo
Capitais e municípios de região metropolitana	Até 31 de julho de 2018
Municípios de fronteira e com mais de 100 mil habitantes*, com base no Censo de 2010	Até 31 de julho de 2019
Municípios com população entre 50 e 100 mil habitantes*	Até 31 de julho de 2020.
Municípios com menos de 50 mil habitantes*	até 31 de julho de 2021

* com base no censo de 2010

Outra forma de disposição final de rejeitos, ainda utilizada no Brasil é o aterro controlado, exemplificado na Figura 3.7. Este tipo de disposição produz poluição localizada e normalmente não possui impermeabilização de base, o que acaba por comprometer a qualidade das águas subterrâneas. Além disso, não emprega processos de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados. De maneira geral, esse método é preferível ao lixão, entretanto é inferior ao aterro sanitário devido aos problemas ambientais que causa e aos seus custos de operação (LANZA e CARVALHO, 2006). Contudo, é uma técnica não permitida pela PNRS (BRASIL, 2010), que determina a disposição ambientalmente adequada.



Fonte: Gonçalves (2015)

Figura 3.7: Exemplo ilustrativo de aterro controlado

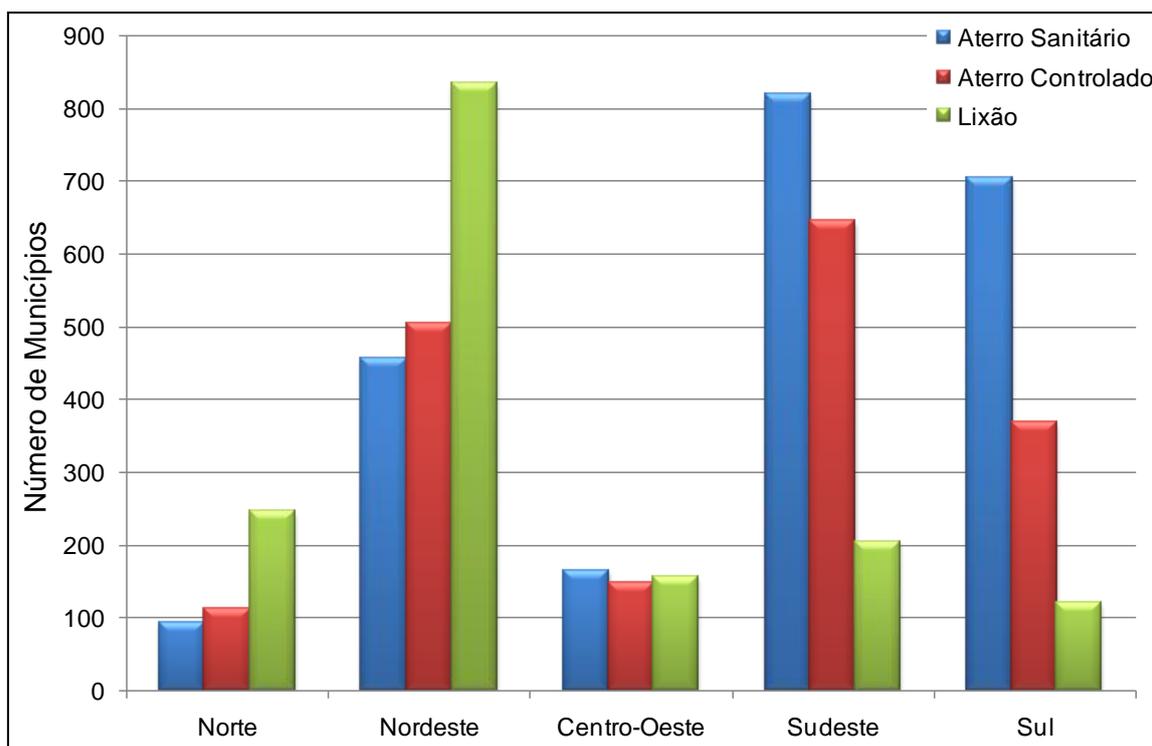
O lixão, por sua vez, é a forma incorreta de disposição final de rejeitos ainda utilizada no Brasil, sendo proibido pela PNRS. Ele se caracteriza pela descarga direta do rejeito sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (Figura 3.8). Esse tipo de destinação está associado à proliferação de vetores de doenças, como moscas, mosquitos, baratas e ratos, geração de maus odores, poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através do chorume, comprometendo os recursos hídricos. Acrescenta-se a esta situação o total descontrole quanto aos tipos de resíduos recebidos nestes locais, verificando-se até mesmo a disposição de dejetos originados dos serviços de saúde e das indústrias (BRITO FILHO, 2005).



Fonte: Cintra (2011)

Figura 3.8: Exemplo ilustrativo de lixão

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2015), em 2014, 40% dos municípios brasileiros destinaram seus RSU para aterros sanitários, 32% para aterros controlados e 28% para lixões. A análise por regiões brasileiras (Figura 3.9) demonstra que a região Sudeste conta com o maior número de aterros sanitários em contrapartida com a região Nordeste que possui a maior parte dos lixões.



Fonte: ABRELPE (2015)

Figura 3.9: Destinação final dos RSU no Brasil, agrupado por região e por destino em 2014

A caracterização dos RSU gerados no município é fundamental para qualquer definição posterior de gerenciamento, pois permite identificar a quantidade e qualidade dos resíduos gerados, assim como as tendências futuras, auxiliando no cálculo da capacidade e tipo de equipamento de coleta, tratamento e destinação final (LIMA, 2004). Os resíduos sólidos urbanos apresentam grande diversidade e complexidade e as suas características variam de acordo com a sua fonte geradora. Os resíduos sólidos podem ser caracterizados de acordo com as propriedades físicas, químicas e biológicas, conforme mostrado na Tabela 3.3 (BARROS, 2013; INSTITUTO PARA A DEMOCRATIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO BÁSICO E MEIO AMBIENTE, 2012; CASTILHOS JÚNIOR, 2006; MONTEIRO et al., 2001; BIDONE e POVINELLI, 1999).

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados para caracterização dos resíduos sólidos

Características	Descrição
Características físicas	Geração <i>per capita</i> , composição gravimétrica, peso específico aparente, teor de umidade e compressividade
Características químicas	Poder calorífico, potencial hidrogeniônico (pH), composição química, relação carbono/nitrogênio, sólidos totais fixos e voláteis
Características biológicas	Aspectos microbiológicos.

3.2.1. Características Físicas

O conhecimento das características físicas está associado ao dimensionamento e escolha das unidades de tratamento e disposição final, de uma forma sanitária economicamente viável (BIDONE e POVINELLI, 1999). As características físicas mais importantes dos RSU são geração *per capita*, composição gravimétrica, peso específico aparente, teor de umidade e compressibilidade.

A geração *per capita* relaciona a quantidade diária de RSU gerada com o número de habitantes de determinado local e pode ser determinada pelo quociente entre a massa total de todos os resíduos produzidos no intervalo de um dia e o número total de habitantes do município, tendo como base os dados de população, sendo expressa em $\text{kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Este parâmetro é importante, pois funciona como orientação para o planejamento de instalações e equipamentos que farão parte componente do serviço de coleta e transporte de resíduos (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A composição gravimétrica identifica o percentual de cada componente de RSU em relação ao peso total da amostra analisada e permite identificar a quantidade e a qualidade dos resíduos gerados pelos municípios. A determinação da composição gravimétrica representa a etapa inicial de qualquer definição posterior de gerenciamento. Os componentes dos RSU estão, geralmente, distribuídos em matéria orgânica, papel, papelão, trapos, plástico, metais, vidro, borracha, madeira e outros. Este tipo de caracterização é importante, pois pode ser um indicativo para o aproveitamento das frações recicláveis para comercialização e da matéria orgânica para a produção de composto orgânico. (BIDONE e POVINELLI, 1999). A Tabela 3.4 traz a composição gravimétrica do município de Itanhandu-MG.

Tabela 3.4: Composição gravimétrica dos RSU município de Itanhandu-MG.

Material	Porcentagem (%)
Matéria orgânica	64,3 %
Plástico mole	10,7 %
Papel e papelão	8,0 %
Plástico duro	6,7 %
Trapos	5,0 %
Vidro	2,4 %
Metais ferrosos	1,1 %
Metais não ferrosos	0,7 %
Outros materiais (madeira, couro e borracha)	1,1 %

Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

De acordo com Monteiro et al. (2001), a massa específica aparente do resíduo sólido urbano representa o peso do resíduo solto em função do volume ocupado sem compactação. Sua determinação é fundamental para o dimensionamento de equipamentos e instalações. Os valores de referência para diferentes tipos de resíduos sólidos estão na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores de referência de massa específica aparente dos resíduos

Tipo	Massa Específica
Resíduo sólido domiciliar	230 kg/m ³
Resíduo sólido de serviços de saúde	280 kg/m ³
Resíduo sólido de construção civil	1.300 kg/m ³

A umidade, ou teor de água, representa a quantidade de água presente no RSU, a qual é medida em percentual do seu peso. Este parâmetro sofre alterações em função das estações do ano e também da incidência de chuvas, além disso, tem papel fundamental na velocidade de degradação dos resíduos em um aterro sanitário, pois é essencial para efetivação das reações microbiológicas (BARROS, 2013). Este parâmetro influencia diretamente o poder calorífico e o peso específico aparente do RSU, entretanto concorre de forma indireta para o dimensionamento de incineradores e usinas de compostagem. Além disso, a umidade está diretamente associada ao cálculo da produção de chorume e ao correto dimensionamento do sistema de coleta de percolados. Para os RSU, a umidade pode variar em torno de 40 a 60% (MONTEIRO et al., 2001).

Segundo Barros (2013), a compressividade representa o grau de compactação ou a redução do volume que uma massa de RSU pode receber. A compressividade é muito importante para o dimensionamento de veículos coletores, estações de transferência com compactação e caçambas compactadoras estacionárias.

3.2.2. Características Químicas

Poder calorífico, potencial hidrogeniônico (pH), composição química, relação C:N e sólidos totais, fixos e voláteis representam os principais parâmetros para a caracterização química do RSU. O poder calorífico é uma característica química que indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima. O poder calorífico médio do RSU situa na faixa de 5.000 kcal/kg (20,9 MJ/kg) e esse parâmetro importante para o dimensionamento das

instalações de todos os processos de tratamento térmico de RSU, como incineração, pirólise e outros (MONTEIRO et al, 2001).

O pH indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos e as reações microbiológicas de degradação dependem de um pH ideal, que em geral, situa-se na faixa de 5 a 7. Na degradação anaeróbia dos RSU, o pH está associado à capacidade tampão do meio, a qual é o potencial de manter os valores de pH do meio, mesmo estando sujeito a variações (BARROS, 2013).

Conforme Monteiro et al. (2001), a composição química consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras. É de fundamental importância para os processos biológicos, pois compreende as análises de macro e micro nutrientes, que são fundamentais para o metabolismo dos micro-organismos durante a degradação da matéria orgânica (BARROS, 2013).

O carbono e o nitrogênio presentes nos resíduos são metabolizados em frações diferentes e a relação entre eles (relação C:N) indica o grau de decomposição da matéria orgânica nos processos de tratamento ou disposição final. Os RSU apresentam a relação C:N em torno de 50:1, entretanto, no aproveitamento energético dos resíduos, existem proporções ótimas, as quais devem estar na ordem de 20:1 a 35:1. Nesse sentido alguns autores propõem a suplementação de nitrogênio, a fim de corrigir a relação e, com isso, acelerar a reação de decomposição (BARROS, 2013; MONTEIRO et al. 2001; BIDONE e POVINELLI, 1999).

3.2.3. Características Biológicas

As características biológicas dos resíduos são representadas pelas populações microbianas e pelos agentes patogênicos presentes no RSU. O conhecimento das características biológicas dos resíduos tem sido muito utilizado no desenvolvimento de inibidores de cheiro e de retardadores ou aceleradores da decomposição da matéria orgânica (BARROS, 2013).

3.3. Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que ocorre na ausência do oxigênio e envolve diversos tipos de micro-organismos, com cada grupo realizando uma etapa

específica, na transformação de compostos orgânicos complexos em produtos simples, como o metano e gás carbônico (FERNANDES, 2009).

De acordo com Chernicaro (1997), a digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de micro-organismos trabalham em uma simbiose na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. Ela representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, envolvendo processos metabólicos complexos, que ocorrem em etapas sequenciais e que dependem da atividade de vários grupos de micro-organismos. O processo de digestão anaeróbia engloba quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 3.10 traz um resumo das etapas do processo de digestão anaeróbia, considerando os produtos formados e os principais grupos microbianos envolvidos.

De acordo com a Figura 3.10, a hidrólise representa a etapa inicial do processo de digestão anaeróbia e consiste na conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos, ou seja, a matéria orgânica complexa é transformada em compostos mais simples (matéria orgânica solúvel) como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares, principalmente pela ação das bactérias hidrolíticas. Alguns fatores podem influenciar nesta etapa, como, por exemplo, temperatura, composição do material, tamanho das partículas, pH do meio, concentração de NH_4 , dentre outros (CHERNICARO, 1997).

A segunda etapa da digestão anaeróbia é denominada acidogênese, que pode ser rápida e levar a acidificação do meio. Nessa fase os produtos gerados na fase anterior, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, são absorvidos pelas bactérias fermentativas (acidogênicas) e, posteriormente, excretados como substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos voláteis, ácido acético, H_2 e CO_2 (CHERNICARO, 1997).

A próxima etapa é a acetogênese, que ocorre pela ação de um grupo específico de bactérias anaeróbias estritas, denominadas genericamente de acetogênicas. Devido à ação dessas bactérias, na acetogênese ocorre a conversão dos ácidos graxos voláteis, gerados na acidogênese, em compostos que formam os substratos para a produção de metano (ácido acético, H_2 e CO_2). As bactérias acetogênicas desempenham um importante papel entre a acidogênese e a metanogênese, pois não havendo essa conversão, tampouco haverá metanogênese, ocorrendo o acúmulo dos produtos da hidrólise e da fermentação ácida.

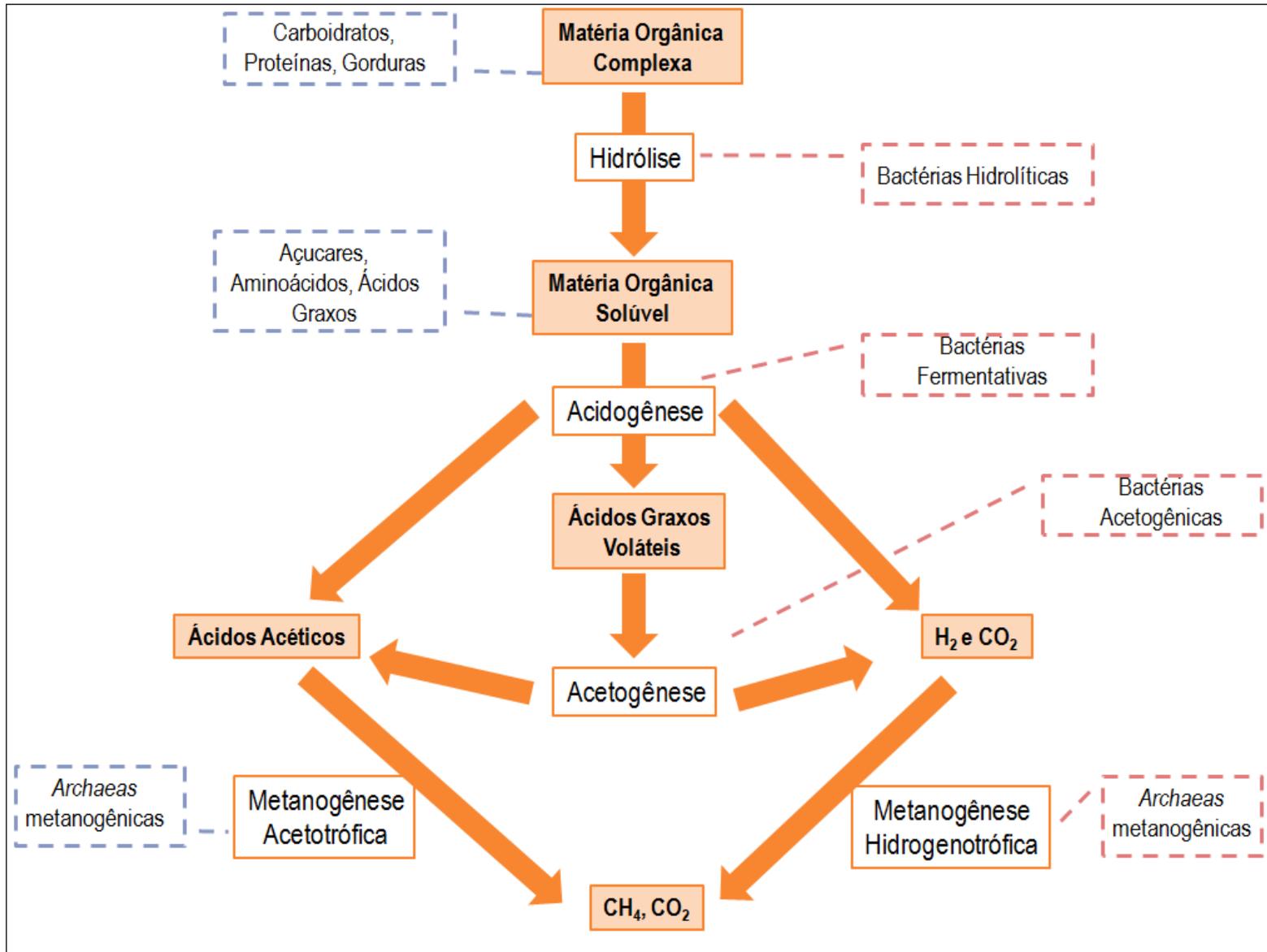


Figura 3.10: Resumo esquemático das etapas do processo de digestão anaeróbia

A metanogênese, por sua vez, é a etapa final do processo de conversão anaeróbia dos compostos orgânicos e seus produtos são metano e dióxido de carbono. Esta fase é efetuada por micro-organismos metanogênicos, os quais são anaeróbios estritos. As arqueas metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas acetogênicas, que são dependentes das acidogênicas e estas das hidrolíticas, estabelecendo-se um mecanismo de interações entre diversificados grupos de bactérias (CHERNICARO, 1997).

O metano pode ser produzido pelas arqueas metanogênicas acetotróficas a partir da fermentação do ácido acético e pelas arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, com o dióxido de carbono como acceptor de elétrons. Cerca de 70% do metano produzido é proveniente da fermentação do ácido acético, enquanto que aproximadamente 30% provêm da oxidação de CO₂ com H₂ (CHERNICARO, 1997).

3.3.1. Fatores que interferem na digestão anaeróbia

Alguns fatores interferem na digestão anaeróbia e conseqüentemente influenciam na degradação dos resíduos sólidos. O desempenho da microbiota responsável pela degradação dos resíduos é afetado de modo adverso quando as condições de pH, temperatura, umidade, alcalinidade e acidez não são adequadas. A otimização destes fatores são fundamentais para a obtenção de bons resultados na degradação de resíduos, e conseqüentemente na produção de biogás (DUARTE, 2014).

Alguns parâmetros são passíveis de afetarem o processo de digestão anaeróbia, tanto de forma positiva quanto de forma negativa. Presença de inóculo, pH, composição do resíduo, relação C:N, temperatura, presença de oxigênio, teor de umidade e tamanho da partícula do resíduo são os principais parâmetros capazes de intervir no processo de digestão anaeróbia do RSU. O seu monitoramento é importante quando se deseja aproveitar o biogás resultante da digestão anaeróbia, pois podem proporcionar melhoria da qualidade e da quantidade de biogás produzido (DUARTE, 2014; BARROS, 2013; CASTILHOS JÚNIOR, 2006; REICHERT, 2005; SILVA, 2005; CINTRA, 2003).

O pH representa um dos mais importantes fatores que influenciam nas velocidades das reações de degradação, pois cada micro-organismo tem uma faixa ideal de pH, em que seu crescimento é possível e nela existe um valor ótimo, bem definido, onde a taxa de crescimento é máxima (CINTRA, 2003). Segundo Chernicaro (1997), com relação aos processos de digestão anaeróbia, o pH ideal situa-se na faixa de 6,6 a 7,4, embora a formação de metano possa ser estável com pH entre 6,0 e 8,0. Valores abaixo e acima

dessa faixa devem ser evitados, uma vez que estes podem inibir por completo os micro-organismos formadores de metano. De acordo com Cintra (2003), valores baixos de pH podem significar uma concentração alta de ácidos graxos voláteis e, portanto, uma inibição de metanogênese. Valores acima de 8,0 podem favorecer a formação de amônia, que pode ser tóxica aos microrganismos, em níveis elevados.

O início da digestão anaeróbia constitui um aspecto crucial na determinação do sucesso no tratamento de resíduos. O ponto chave na partida do processo está relacionado com a existência de uma população microbiana adaptada ao resíduo em questão, que pode ser suprida por micro-organismos presentes no próprio resíduo, ou pode ser introduzida por meio da utilização de inóculos de outras fontes, como fezes de animais e lodo de estação de tratamento de esgoto. Uma avaliação do inóculo a ser utilizado, é importante no sentido de reduzir ao mínimo o período de adaptação e acelerar o processo de digestão anaeróbia (STEIL, 2001).

A composição dos RSU, em especial os domésticos ou domiciliares, é extremamente diversificada e heterogênea e pode variar em função de fatores como nível socioeconômico da população, época do ano e tipo de coleta existente (REICHERT, 2005). Conforme Barros (2013), a composição dos resíduos afeta quantitativamente e qualitativamente a produção dos gases. A disponibilidade de frações orgânicas, que representam as porções mais facilmente degradáveis, está associada à maior quantidade de substrato para a atuação de microrganismos, com isso, os resíduos com grande presença de matéria orgânica devem apresentar maior potencial de produção de gases.

Um indicativo para mensurar a fração de matéria orgânica do resíduo é a concentração de sólidos voláteis, pois quanto maior a sua concentração, maior também deverá ser a taxa de conversão biológica do resíduo.

A temperatura também representa um fator de influência nos processos biológicos, pois afeta a taxa das reações enzimáticas, desnaturação das enzimas e proteínas, em geral, ou destruição dos processos metabólicos dos microrganismos para a produção dessas enzimas, logo este parâmetro tem importância significativa no processo de conversão de resíduos, pois tem a ver com a produção de gás e com a eficiência da atividade microbiana (SILVA, 2012; CINTRA, 2003). Os micro-organismos que atuam na degradação anaeróbia dependem de uma faixa de temperatura ótima de crescimento.

Os principais nutrientes utilizados pelos micro-organismos na degradação anaeróbia são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. A relação C:N representa a relação entre as quantidades de carbono e de nitrogênio presentes no resíduo. O valor ideal para essa

relação está entre 20 e 30. Quando essa relação é alta significa que provavelmente haverá rápido consumo de nitrogênio pelas arqueas metanogênicas, fato que resulta em baixa produção de biogás (REICHERT, 2005; ALVES, 2008).

Pelo fato da digestão anaeróbia ocorrer na ausência de oxigênio, os micro-organismos metanogênicos são anaeróbios estritos, ou seja, são particularmente sensíveis à presença de oxigênio (CASTILHOS JÚNIOR, 2006). Sendo assim, para manter um sistema de tratamento anaeróbio que estabilize um resíduo orgânico eficientemente não deve ser observado oxigênio dissolvido no conteúdo do material (CAMPELLO, 2009).

A água é importante para a digestão anaeróbia, pois possibilita o transporte de enzimas e outros produtos microbianos. O teor de água nos resíduos sólidos depende diretamente das condições climáticas, variando sensivelmente de um lugar para outro. A faixa ótima de umidade para a degradação biológica está compreendida entre 40 e 60% (CINTRA, 2003).

O tamanho da partícula do resíduo é um parâmetro importante na digestão anaeróbia, uma vez que a redução do tamanho das partículas por trituração aumenta significativamente a reatividade do processo, devido ao aumento da área superficial de contato do substrato disponível ao ataque enzimático dos microrganismos (VIRIATO, 2013; ALCÂNTARA, 2007; JOHN, 2004; KIM et al., 2000; SOUZA, 1984).

Resíduos de menores tamanhos tendem a decompor mais rapidamente do que resíduos de maiores dimensões devido à superfície de contato, pois uma partícula menor de resíduo possui maior superfície de contato quando comparada a uma partícula maior (Figura 3.11).

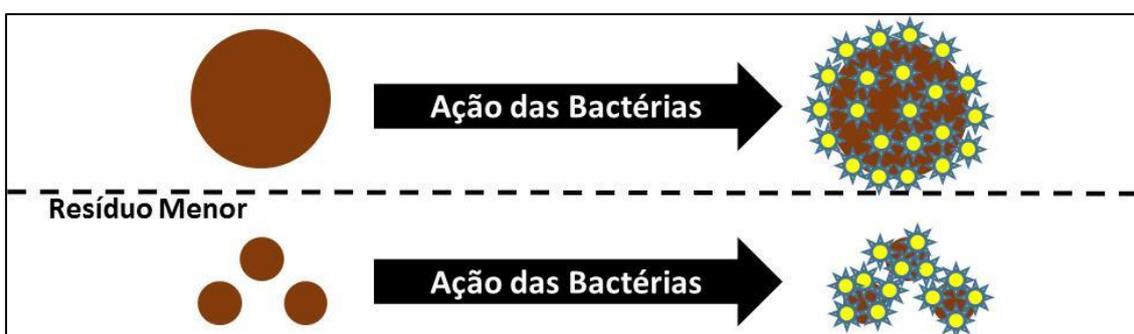


Figura 3.11: Comparação da ação das bactérias em resíduos de tamanhos diferentes devido à superfície de contato

3.4. Biogás

A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbico, ou seja, na ausência de oxigênio, origina uma mistura gasosa chamada de biogás. De maneira geral, o biogás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, e pode conter, ainda, pequenas quantidades de hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, amônia e outros gases traço (GÜLZOW, 2010).

O biogás tem sua origem na decomposição anaeróbia da matéria orgânica e sua produção existe desde os primórdios devido à quebra da matéria orgânica em meios ausentes de oxigênio. Esse processo é muito comum na natureza, que pode ocorrer em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais (KARLSSON et al, 2014; GÜLZOW, 2010). Basicamente, a composição do biogás é semelhante ao disposto na Tabela 3.6 e pode variar dependendo do material degradado e da fase de degradação.

Tabela 3.6: Composição básica do biogás

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

Fonte: Tchobanoglous, Theisen e Virgil (1993)

O metano é o principal constituinte do biogás, e este será mais puro quanto maior for o teor de metano produzido, estando seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade desse gás existente na mistura gasosa. Em relação ao potencial de aquecimento global, o metano possui valores superiores quando comparado ao dióxido de carbono, que podem ser entre 21 a 27 vezes maior (FERNANDES, 2009).

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água, por exemplo, prejudicam o seu processo de queima, tornando-o menos eficiente e, portanto, seu poder calorífico diminui à medida que se eleva a concentração de impurezas em sua composição. Um biogás constituído de cerca de 60% de metano possui um poder calorífico de 5.500 kcal/m³ (PECORA et al., 2008).

Segundo Castilhos Júnior (2006), existem diversos modelos que descrevem e simulam a decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos em aterros sanitários. Esses modelos não se diferenciam conceitualmente e sim nos níveis de detalhamento de cada etapa. O modelo mais conhecido é o proposto por Pohland e Harper (1985), que possui cinco fases distintas e sequenciais, as quais estão descritas abaixo (FERNANDES, 2009; BRITO FILHO, 2005; TCHOBANOGLOUS et al. 1993; BIDONE, 1999).

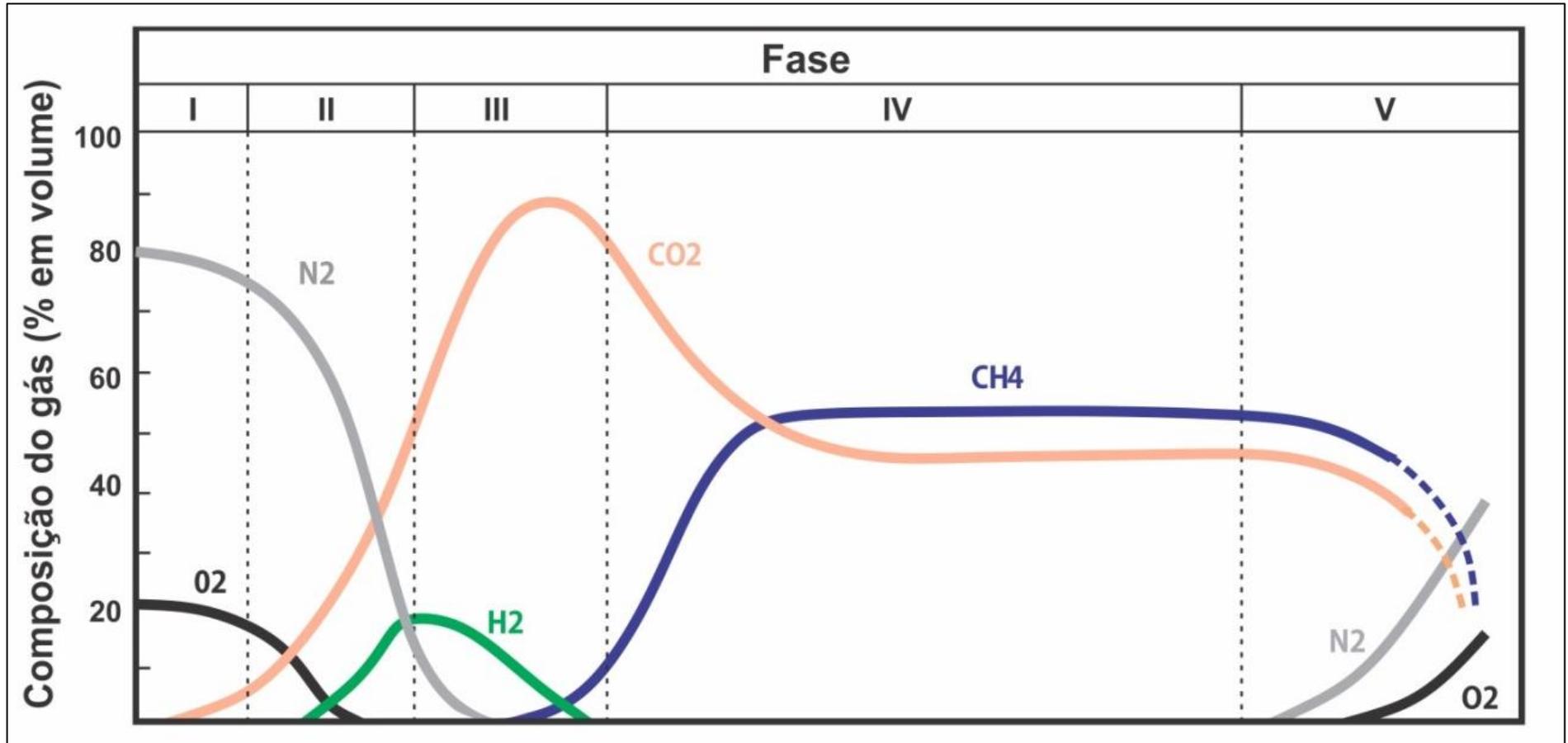
A primeira fase refere-se ao ajuste inicial e possui curta duração. Após o aterramento e compactação dos resíduos, são detectadas as primeiras mudanças dos diferentes parâmetros de degradação, como o acúmulo de umidade. A biodegradação do resíduo, nessa fase, é aeróbia devido à quantidade de ar que é enterrado juntamente com o resíduo.

A fase II é identificada como fase de transição e nela ocorre a passagem das condições aeróbias para anaeróbias, após o ajuste inicial. Observa-se, então, a conversão de matéria orgânica solúvel em ácidos graxos voláteis e a formação de CO_2 e H_2 . Além disso, a capacidade de retenção em água dos resíduos é ultrapassada e inicia-se a formação dos lixiviados.

Na Fase III acontece o aumento de ácidos graxos voláteis no lixiviado e consequente diminuição do pH do meio. As reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante esta fase.

A metanogênese é finalmente observada na Fase IV, onde os produtos intermediários que apareceram anteriormente são transformados em metano e dióxido de carbono. Nesta fase, predominam micro-organismos estritamente anaeróbios, as arqueas metanogênicas, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CO_2 e CH_4 em uma proporção de 35-50% e de 45-60%, respectivamente.

A Fase V, por sua vez, é a fase de maturação final onde há estabilização dos componentes orgânicos disponíveis, queda na produção de gases, retorno gradual das condições aeróbias e ocorrência de pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio, dependendo da suscetibilidade do aterro às condições atmosféricas. Na Figura 3.12 é apresentado o comportamento dos principais componentes ao longo das cinco fases de degradação anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: Pohland e Harper (1985) apud Fernandes (2009)

Figura 3.12: Modelo de degradação de resíduos e formação de gases proposto por Pohland e Harper (1985), que possui cinco fases distintas e sequenciais

A duração de cada etapa de degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários (Tabela 3.7) pode variar dependendo da quantidade de nutrientes, da quantidade de água presente na massa de resíduos e principalmente da compactação dada à camada de resíduos.

Tabela 3.7: Duração de cada fase na decomposição dos resíduos.

Fase	Intervalo de Duração
Fase I	Algumas horas a 1 semana
Fase II	1 mês a 6 meses
Fase III	3 meses a 3 anos
Fase IV	8 anos a 40 anos
Fase V	1 ano a 40 anos (ou mais)

Fonte: Pohland e Harper (1985) apud Fernandes (2009)

O biogás proveniente de aterros sanitários era visto apenas como um subproduto da degradação anaeróbia. Atualmente, passou a ganhar destaque em decorrência da destinação dos resíduos em aterros sanitários, elevada produção de resíduos e dos altos preços dos combustíveis fósseis, além do inevitável esgotamento nas reservas destes combustíveis no futuro. A crescente procura por combustíveis alternativos e ambientalmente sustentáveis vêm conduzindo ao desenvolvimento das tecnologias de aproveitamento energético dos biogás (FERREIRA, 2015).

A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (PECORA et al., 2008).

O aproveitamento energético do biogás se configura numa forma de reduzir as emissões para a atmosfera de gás metano, um dos mais importantes gases que colaboram com o efeito estufa. O biogás é considerado uma fonte de energia renovável e, portanto, sua recuperação e seu uso energético apresentam vantagens ambientais, sociais, estratégicas e tecnológicas significativas. Neste contexto, a PNRS (BRASIL, 2010) também prevê a criação de sistemas de incentivos para o aproveitamento energético do biogás.

3.5. Biorreatores

O estudo acerca de aparatos experimentais que estimulam aterros sanitários em escala real apresenta complexidade no que se refere à elevada variedade de parâmetros e suas interligações, tornando difícil o seu monitoramento. Portanto, os estudos que utilizam

biorreatores são de fundamental importância, possibilitando o controle e monitoramento do processo de forma mais objetiva e prática (SILVA et al., 2015).

Os biorreatores são sistemas fechados onde ocorre a degradação da matéria orgânica pela digestão anaeróbia, principalmente por bactérias. Um ambiente empobrecido de oxigênio representa o cenário ideal para a sobrevivência das mais diversas bactérias. Entretanto, há limites e faixas toleráveis de temperatura, pH, relação C:N e umidade para a boa degradação da matéria orgânica e a consequente geração de biogás (DUARTE, 2014).

Para Alcântara (2007), os biorreatores, também chamados de lisímetros, representam células de aterro em pequenas dimensões e referem-se a uma técnica bastante interessante que pode ser empregada para estudar o comportamento dos resíduos quanto aos aspectos físicos, químicos, microbiológicos, além de contribuir para uma melhor compreensão de rotas metabólicas da degradação de resíduos.

Os biorreatores são importantes, pois eles podem simular situações particulares para análise de causa e efeito, o que seria inviável em escala real, como, por exemplo, estudar o comportamento de resíduos com composições específicas, a simulação de condições ambientais que podem envolver precipitação, umidade e temperatura específicos, dentre outros aspectos. Os parâmetros que podem ser analisados nos lisímetros são temperatura, umidade, sólidos voláteis, aspectos microbiológicos, influência da água na degradação dos RSU, influência da recirculação do lixiviado e produção de biogás, dentre outros (ARAÚJO et al., 2010).

Dentre os principais tipos de biorreatores aplicados ao tratamento de RSU destacam-se os sistemas contínuos e em batelada. Nos sistemas contínuos, as matérias-primas usadas são líquidas ou semi-líquidas, onde são colocadas e retiradas periodicamente, e a produção de gás e de resíduos é contínua.

Já os sistemas em batelada são sistemas simples, usados principalmente para investigações em laboratório. Os biorreatores são totalmente preenchidos com a matéria-prima a ser fermentada de forma a favorecer a digestão anaeróbia; sendo que o gás produzido é armazenado no próprio recipiente ou em um gasômetro acoplado a este. Ao término, os resíduos, já estabilizados, são removidos e inicia-se um novo ciclo, com a introdução de nova batelada de resíduos (CASSINI, VOZOLLER e PINTO, 2003). O sistema em batelada é indicado para pequenas produções de biogás, pois é abastecida uma única vez, fermentando por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente (DEGANUTTI et al., 2002).

Os biorreatores podem ser operados em condições de campo e em laboratório. O uso de biorreatores em condições de campo representa uma técnica bastante interessante, pois permite, com custos relativamente baixos, a manipulação e o controle de variáveis, além de uma melhor compreensão do comportamento global de um aterro. Já os lisímetros operados em laboratório (Figura 3.13) são mantidos sob condições artificiais e eles geralmente são constituídos de pequenos reatores construídos em plástico, acrílico, vidro ou metal e têm sido utilizados para simular o comportamento da degradação de resíduos em aterros (ALCÂNTARA, 2007).



Fonte: iX Estudos e Projetos (2016)

Figura 3.13: Exemplo de biorreator operado em laboratório

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O trabalho foi realizado no Campo Experimental instalado, em parceria com a Prefeitura Municipal de Itanhandu, na Unidade de Compostagem e Reciclagem (UCR) (Figura 4.1). A UCR é utilizada pelo serviço de limpeza pública municipal para a segregação de recicláveis e disposição final dos rejeitos.

Os biorreatores foram implantados no município de Itanhandu (22° 17' 12" S e 44° 56' 71" O), que está localizado na região Sul do Estado de Minas Gerais, possui população estimada de 15.200 habitantes em 2016 para uma área territorial de 143,363 km², resultando numa densidade demográfica de 106,02 hab/km². Possui clima quente e temperado; no qual o verão tem maior pluviosidade que o inverno. A classificação do clima é Cwa de acordo com a Köppen e Geiger, com temperatura média anual de 19.0°C e pluviosidade média anual de 1490 mm. A economia do município é baseada, sobretudo, no setor de comércio e serviços (52%), seguido pelas atividades industriais (30,2%) e extração vegetal/pesca (17,8%) (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

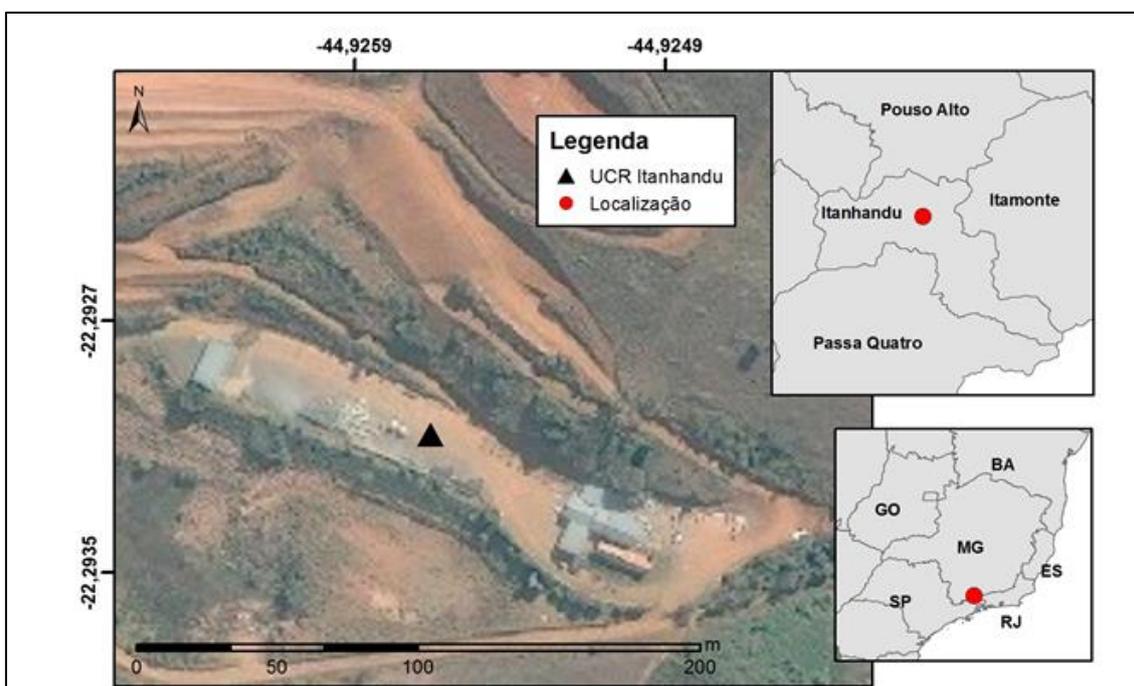


Figura 4.1: Mapa com a localização do município de Itanhandu (a direita) e localização da UCR Itanhandu onde foi implantado o campo experimental

4.2. Biorreatores

No experimento foram utilizados três biorreatores, os quais foram planejados com base em estudos preliminares de Moura (2014), Abe (2011), Brito (2011) e Pieroni (2010). Nos biorreatores foi estudada a interferência da granulometria do resíduo sobre a produção do biogás proveniente da degradação anaeróbia dos resíduos neles dispostos (Figura 4.2).



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.2: Biorreatores utilizados para o estudo da influência da granulometria na produção do biogás

Um dos biorreatores foi preenchido apenas com resíduo de menor granulometria (4 mm), outro com resíduo de maior granulometria (8 mm), e o terceiro foi preenchido com uma mistura na proporção de 1:1 de resíduos de maior e menor granulometrias, utilizado como controle. O biorreator controle tem a função de servir de parâmetro para os demais biorreatores do estudos. Na Tabela 4.1 é possível verificar os dados sobre o tamanho do resíduo, data e quantidade de resíduos utilizados no enchimento de cada um dos biorreatores.

Tabela 4.1: Dados sobre o tamanho do resíduo, data e quantidade de dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.

Biorreator	Tamanho Médio do Resíduo	Data de Enchimento	Quantidade de Resíduo
Biorreator com resíduo de maior granulometria	8 mm	29/05/15	490,0 kg
Biorreator com resíduo de menor granulometria	4 mm	29/05/15	498,6 kg
Biorreator Controle	$\geq 4 \text{ mm e } \leq 8 \text{ mm}$	28/04/15	491,4 kg

Para um biorreator tornar-se funcional, ou seja, adequado às funções requeridas, foi necessária uma adequação prévia, que envolveu a instalação de coletor de chorume e

dreno de biogás, além da disposição de uma camada de brita para a drenagem do chorume. Para o estudo os biorreatores foram confeccionados com caixas d'água de polietileno com capacidade para 1.000 litros, e receberam a preparação abaixo descrita. Inicialmente foi instalado o coletor de chorume na parte inferior do biorreator (Figura 4.3), cuja função foi receber o chorume resultante da degradação dos resíduos contidos no biorreator e encaminhá-lo para um reservatório, no qual aguarda coleta e posterior análise dos parâmetros físico-químicos.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.3: Instalação do coletor de chorume.

Em seguida, uma camada de brita nº 0 foi colocada no fundo do biorreator até atingir a altura de aproximadamente cinco centímetros (Figura 4.4), cujo objetivo foi realizar a drenagem do chorume produzido, a fim de encaminhá-lo para o coletor previamente instalado.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.4: Camada de brita ao fundo do biorreator para drenagem do chorume.

Na sequência foi instalado um dreno de biogás ao centro do biorreator. Foi disposta uma camada de brita nº 1 ao redor do dreno e ambos foram sustentados por uma tela plástica do tipo galinheiro (Figura 4.5). Ao fim desse procedimento, o biorreator estava pronto para receber os resíduos.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.5: Instalação do dreno de biogás.

No município de Itanhandu não há, até agora, uma política municipal de coleta seletiva, dessa forma, os resíduos que chegam à UCR contém materiais recicláveis misturados aos orgânicos. O resíduo de interesse para o enchimento dos biorreatores foi o orgânico, composto, principalmente, por restos de alimentos. Dessa forma, paralelamente a preparação do biorreator, foi realizada a triagem e separação do material orgânico, o qual, após a seleção, foram acondicionados em *bags* para serem picados.

Os resíduos utilizados para o enchimento dos biorreatores foram picados, no dia anterior ao enchimento, em uma picadeira do tipo ensiladeira (Figura 4.6). Ensiladeiras são equipamentos indispensáveis para o trato diário do rebanho ou pequenas silagens, que cortam sem desfibrar todos os tipos de forragens como cana de açúcar, capins, milho, sorgo e outros. Para obter a granulometria desejada, o procedimento adotado foi o de associação de polias grandes e pequenas no equipamento, o qual proporciona aberturas de diferentes tamanhos no momento do corte do resíduo.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.6: Picadeira

Para a realização do procedimento de corte dos resíduos, o equipamento passou por uma adaptação. Em condições normais, os resíduos picados saem pela parte superior do equipamento. Para a trituração dos resíduos do experimento, o material picado saiu pela parte inferior, sendo encaminhado diretamente para o *bag* de armazenamento. Outra adaptação foi a realizada no método de acionamento da picadeira. Usualmente, este tipo de equipamento é acoplado a motores a diesel ou elétricos. Neste caso, a picadeira foi acionada por motor de trator.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.7: Adaptações realizadas na picadeira: acionamento do equipamento e mudança do local da saída dos resíduos picados .

Para a obtenção da massa do material picado foi utilizada uma balança eletrônica de bancada com capacidade de 60 kg (Figura 4.8). Os resíduos orgânicos picados foram dispostos em um tambor plástico, encaminhados para a pesagem e em seguida colocados no biorreator.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.8: Pesagem dos resíduos picados e enchimento do biorreator.

Quando atingida a quantidade de resíduos pré-determinada, foi disposta massa de terra para cobrir e selar os resíduos, além disso, a tampa do biorreator foi lacrada com cola de silicone, aplicada em toda a extensão da rosca da tampa. (Figura 4.9). Assim, quando a tampa é rosqueada e a cola seca, é formada uma borracha de silicone que prende as partes e calafeta os espaços entre a tampa e caixa d'água, evitando vazamentos de biogás e entrada de ar no sistema.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.9: Procedimentos finais do enchimento do biorreator

4.3. Caracterização dos Resíduos

4.3.1. Parâmetros Físico-químicos

Para a caracterização dos resíduos, foram coletadas amostras de aproximadamente 2 kg (Figura 4.10) antes do enchimento dos biorreatores e após a abertura dos mesmos ao fim do experimento, para a análise de 10 parâmetros físico-químicos (pH, sólidos totais, sólidos totais fixos e voláteis, demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total, umidade, material seco e carbono orgânico total) de acordo com as metodologias preconizadas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998).



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.10: Amostragem dos resíduos, utilizados no enchimento dos biorreatores, para a análise dos parâmetros físico-químicos.

4.3.2. Caracterização Granulométrica

A granulometria tem por objetivo fornecer a determinação das dimensões de partículas sólidas, ou seja, descrever o tamanho das partículas desses compostos. Sua determinação é realizada a partir da quantificação de matéria que consegue ultrapassar as aberturas de malhas de peneiras. O tamanho da partícula é definido através de peneiras com diâmetros diferenciados e, que são padronizadas internacionalmente (CAPUTO, 1995). Para constatar a diferença de tamanho entre os resíduos, foi feita a determinação da composição granulométrica por meio de procedimentos da análise

granulométrica baseados em uma adaptação da determinação de agregados do solo (EMPRAPA, 1997).

Em laboratório foi realizado inicialmente a secagem e pesagem das amostras de resíduo. Para a secagem, as amostras foram dispostas na estufa Olidef CZ[®] a 100 °C, permanecendo por um período de 24 horas. A pesagem foi realizada na balança Gehaka BK 2000[®], com capacidade máxima de 2.100 gramas. Posteriormente a secagem e pesagem, o material foi passado, separadamente, por uma série de cinco peneiras, com aberturas de 30, 10, 8, 4 e 2 mm, respectivamente (Figura 4.11).



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.11: Série de peneiras utilizadas para a determinação da granulometria do resíduo e pesagem do material retido em cada uma das peneiras.

Observou-se no procedimento de determinação da granulometria, que as peneiras de 30 mm e 10 mm retiveram apenas materiais não orgânicos, os quais foram descartados. De acordo com resultado do ensaio de granulometria (Figura 4.12), cerca de 15% do resíduo de menor granulometria ficou retido na peneira de 2 mm, cerca de 60% na peneira de 4 mm e aproximadamente 20% na peneira de 8 mm.

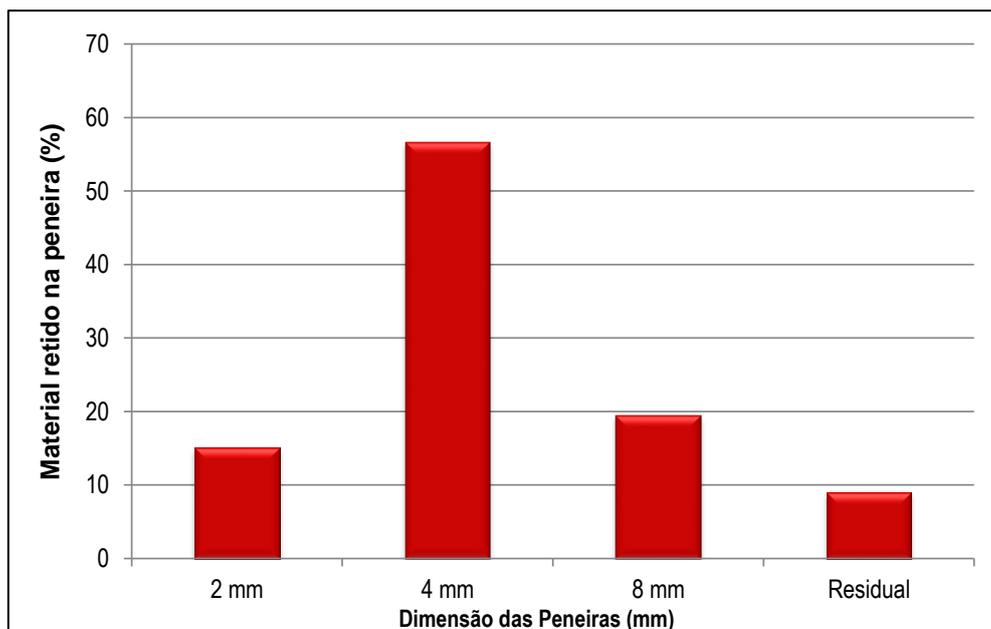


Figura 4.12: Resultado do ensaio de granulometria para o resíduo de menor granulometria

Para o resíduo de maior granulometria (Figura 4.13), em torno de 40% do material foi retido na peneira de 8 mm, 30% na peneira de 4 mm e 15% na peneira de 2 mm.

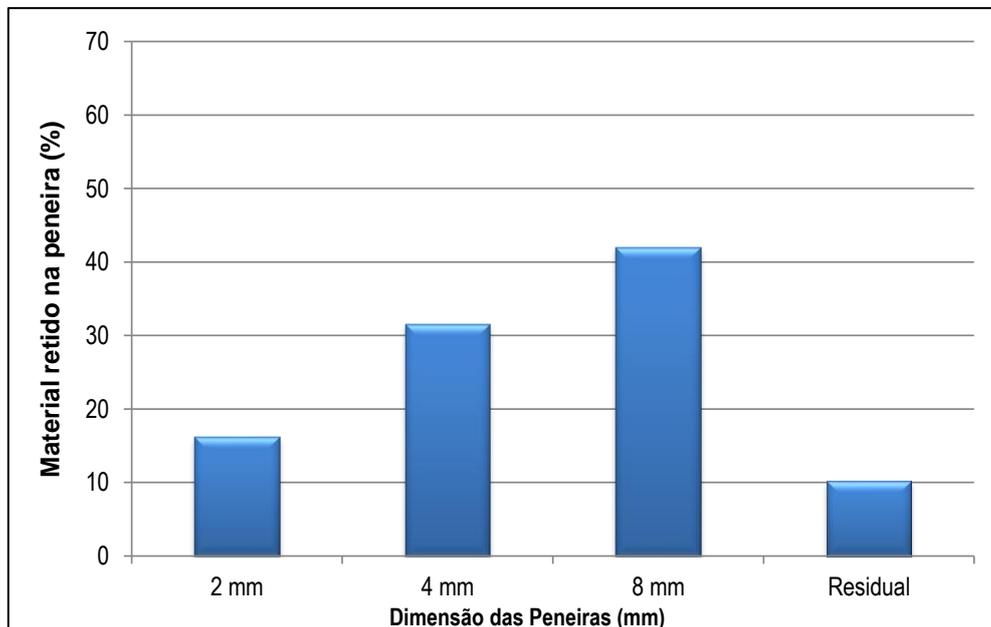


Figura 4.13: Resultado do ensaio de granulometria para o resíduo de maior granulometria

Já para o biorreator controle, cuja composição foi a mistura de resíduos, aproximadamente 40% ficaram retidos na peneira de 8 mm, 37% na de 4 mm e 16% na peneira de 2 mm.

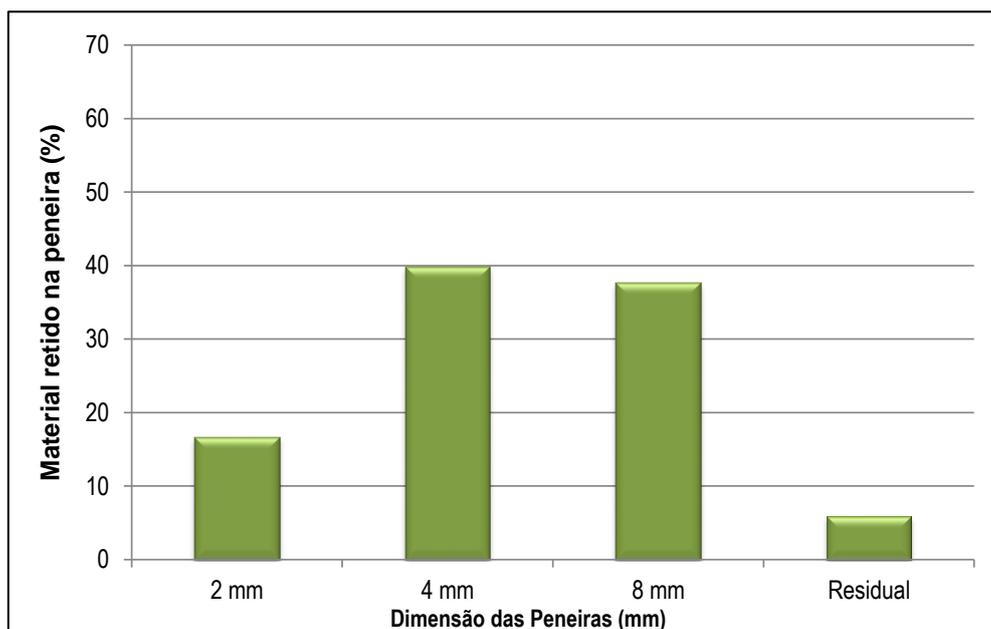


Figura 4.14: Resultado do ensaio de granulometria para a mistura de resíduos

Diante disso, a determinação da granulometria indicou a existência de diferença entre as dimensões dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores. Definiu-se, então, que resíduos de maior granulometria seriam aqueles com tamanho médio de 8 mm. Os resíduos de menor granulometria, por sua vez, possuem tamanho médio de 4 mm e os resíduos contidos no biorreator controle detém tamanho médio entre 8 e 4 mm, conforme observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados sobre o tamanho do resíduo dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.

Resíduo	Tamanho Médio do Resíduo
Resíduo de maior granulometria	8 mm
Resíduo de menor granulometria	4 mm
Resíduo do biorreator controle (mistura)	$\geq 4 \text{ mm e } \leq 8 \text{ mm}$

4.4. Monitoramento da Produção de Biogás

Após o enchimento dos biorreatores iniciou-se o monitoramento da produção de biogás, por meio do acompanhamento diário da temperatura e volume dos gasômetros e quinzenal da composição do biogás.

A composição do biogás foi realizada com o analisador de gás portátil GEM 5000 Landtec® (Figura 4.15) e dada pela leitura das porcentagens de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio (O₂), além da concentração de H₂S em ppm.



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.15: Analisador de gás GEM 5000 Landtec® e medição da composição de biogás no gasômetro

Cada biorreator foi conectado a um gasômetro, constituído por um tubo de PVC graduado e imerso em água. O biogás produzido chegava ao gasômetro, promovendo deslocamento vertical do mesmo, permitindo, assim, a determinação do volume produzido (Figura 4.16).



Fonte: iX Estudos e Projetos (2015)

Figura 4.16: Gasômetros

O volume de biogás produzido e encaminhado aos gasômetros era correspondente ao produto da área circular da base do gasômetro com a altura de deslocamento (Equação 4.1).

$$V_{\text{biogás}} = (\pi \cdot r^2 \cdot h) \quad 4.1$$

Onde:

$V_{\text{biogás}}$ = volume de biogás produzido (m^3);

r = raio do gasômetro (m);

h = deslocamento vertical do gasômetro (m).

Para a obtenção da massa total do biogás produzido foi, primeiramente, aplicada a Lei dos Gases Ideais, de acordo com a Equação 4.2.

$$\rho = \frac{R_{gás} \cdot T}{p} \quad 4.2$$

Onde:

ρ = massa específica do gás (kg/m^3);

$R_{gás}$ = constante do gás (kJ/kg.K);

T = temperatura (K);

p : pressão do gás (Pa).

O cálculo da massa específica foi realizado separadamente para cada gás e para cada medição. Os dados de pressão e temperatura foram obtidos diretamente por meio do Analisador de gás GEM 5000 Landtec®. O valor para a constante do gás ($R_{gás}$) foi obtido pela 4.3.

$$R_{gás} = \frac{R}{M} \quad 4.3$$

Onde:

$R_{gás}$ = constante do gás (kJ/kg.K);

R = constante universal dos gases ($8,3143 \text{ kJ/kmol.K}$);

M = massa molar do componente do biogás (kg/kmol).

Em seguida foi calculada a massa total de gás produzida a partir da massa parcial de cada gás, respeitando o correspondente percentual, obtido por meio do analisador de gás, conforme Equação 4.4.

$$m_{total} = V_{total} \cdot \sum \rho_n \cdot \frac{n}{100} \quad 4.4$$

Onde:

m_{total} = massa total de biogás produzida (kg);

ρ = massa específica do componente do biogás (kg/m^3);

n = fração volumétrica dos gases (CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2) presentes no biogás (%);

V_{total} = volume total de biogás produzido (m^3).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos Resíduos

De acordo com Barcelos (2009), a análise química dos resíduos identifica a composição do substrato, possibilitando a avaliação do grau de resistência à atividade enzimática e da disponibilidade de nutrientes para os microrganismos. De acordo com a Tabela 5.1, os parâmetros físico-químicos analisados nos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores indicaram a presença de significativa fração orgânica, e conseqüentemente grande potencial de biodegradabilidade. Ao final do experimento, os resíduos demonstraram que houve degradação, contudo ainda detinham elevadas frações de matéria orgânica e a umidade dos resíduos diminuiu significativamente durante o estudo.

Tabela 5.1: Parâmetros físico-químicos dos resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores.

Parâmetro físico-químico	Biorreator com Resíduo de Maior Granulometria		Biorreator com Resíduo de Menor Granulometria		Biorreator Controle	
	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
pH	7,19	8,04	7,75	7,14	6,08	7,17
Sólidos totais (mg/L)	4.982	10486	2.340	10486	3.153	18155
Sólidos totais fixos (%)	47,4	59,5	39,9	49	32	36,8
Sólidos totais voláteis (%)	52,6	40,5	60,1	51	68	63,2
Demanda química de oxigênio (mg/L)	1.190	5911	1.056	7729,0	1.024	17112,0
Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)	755,4	1875	632,5	2453,6	515,9	6581,33
Nitrogênio total (mg/L)	31,15	-	7,35	-	29,12	-
Carbono orgânico total (mg/L)	850,4	-	862,8	-	1292	-
Umidade (%)	60%	13%	60%	19%	56%	13%
Material Seco (%)	40%	87%	40%	81%	44%	87%

Os valores de pH no início do experimento variaram de 6,08 a 7,75 e, segundo Monteiro et al. (2001), valores de pH próximos à faixa de 4 a 7 revelam a presença de matéria orgânica fresca e livre da decomposição avançada. Ao final do experimento, a faixa de pH foi de 7,14 a 8,04. A grande maioria das bactérias permite variações de pH entre 5 e 9, no entanto, para a produção de biogás, necessitam de um pH compreendido entre 6,5 e 7,5. De maneira geral houve aumento do pH durante o experimento, o que pode indicar a ocorrência da degradação dos resíduos, pois este parâmetro aumenta à medida que ocorrem as fases da digestão anaeróbia (LIMA, 2004).

Os percentuais de sólidos totais voláteis, inicialmente, estiveram entre 52,6 e 68% e, ao final, entre 40,5 e 63,2%. Segundo Remédio, Mancini e Zanin (2002), os valores de sólidos totais fixos representam, em sua grande maioria, materiais inorgânicos e os voláteis representam os orgânicos. Assim, foi verificado que nos biorreatores a porcentagem de sólidos totais voláteis diminuiu ao longo do experimento, indicando que houve degradação da matéria orgânica.

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) corresponde à quantidade de oxigênio consumido na degradação da matéria orgânica por processos biológicos enquanto que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) mensura a quantidade de matéria orgânica em uma amostra líquida suscetível à oxidação por meios químicos. Os valores destes parâmetros apresentaram aumento entre o início e o fim do experimento, possivelmente devido à heterogeneidade dos resíduos.

A relação DQO/DBO é muito importante na análise da biodegradabilidade dos resíduos. Materiais que apresentam valores de DQO/DBO de até 2,5 possuem fração biodegradável elevada, materiais com a relação entre 2,5 e 3,5, a biodegradabilidade é intermediária. Já valores superiores a 3,5 representam materiais com alta fração não biodegradável (VON SPERLING, 2005). Os resíduos apresentaram, inicialmente, elevada fração biodegradável, pois os valores variaram de 1,57 a 1,98, corroborando com os valores de sólidos totais voláteis, que indicam a presença de matéria orgânica passível de degradação. De maneira geral, os resíduos apresentaram elevada ou intermediária fração biodegradável, sendo observada a diminuição dessa relação entre o início e o fim do experimento.

Tabela 5.2: Relação DQO/DBO dos resíduos no início e fim do experimento

Biorreator	Início	Fim
Controle 1	1,98	2,60
Resíduo Grande	1,57	3,15
Resíduo Pequeno	1,66	3,23

LEGENDA		Elevada fração biodegradável
		Fração biodegradável intermediária
		Elevada fração não-biodegradável

O bom desempenho dos processos biológicos requer a disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento microbiano em proporções adequadas. Diversos nutrientes têm se mostrado necessários ao processo de digestão anaeróbia, com destaque

para o carbono e o nitrogênio. Inicialmente, a concentração de carbono orgânico total esteve entre 850,4 e 1292 mg/L, enquanto que a de nitrogênio foi de 7,35 a até 31,15 mg/L. A proporção C:N é um parâmetro relevante e, segundo Barros (2013), proporções inadequadas de C:N podem prejudicar a digestão anaeróbia dos resíduos. Nesse estudo os valores da proporção C:N foi de 27,3 no biorreator de maior granulometria, 117,4 no de menor granulometria e 44,4 no biorreator controle, respectivamente.

Quanto à umidade, a manutenção da quantidade ideal de água é essencial para as reações bioquímicas, oferta de nutrientes e ajustamento do pH (LIBÂNIO et al, 2003). De acordo com Bidone e Povinelli (1999), a umidade ideal para a degradação dos resíduos está situada na faixa de 40-60%. Diante dos resultados obtidos, foi observado que após o enchimento dos biorreatores, a maioria dos resíduos utilizados no enchimento possuía umidade dentro dessa faixa. Entretanto, após a abertura, foi notado que a umidade em todos os biorreatores estava abaixo da ideal. Van Elk (2007) relata que os baixos teores de umidade podem comprometer a decomposição da matéria orgânica, pois os microrganismos decompositores necessitam da presença de água nos interstícios do maciço de resíduos, para que possam realizar o processo de degradação. Em estudos de campo, onde os experimentos estão sujeitos às variações climáticas, a manutenção da umidade é realizada pela percolação da água das chuvas. O mesmo não ocorre em biorreatores, onde a dificuldade na intervenção é muito maior.

5.2. Monitoramento da Produção de Biogás

O monitoramento dos gases gerados pela biodegradação auxilia na análise da evolução do processo de decomposição da matéria orgânica (ALCÂNTARA, 2007). Os resultados obtidos correspondem ao monitoramento realizado entre 01 de outubro de 2015 a 30 de setembro de 2016, totalizando 365 dias.

No biorreator controle (Figura 5.1) a produção de metano foi observada desde o início do monitoramento, sendo que a sua concentração máxima foi de aproximadamente 30% no dia 134 de monitoramento. A porcentagem máxima de metano observada foi inferior à preconizada na literatura. De acordo com Tchobanoglous, Theisen e Virgil (1993), o biogás proveniente da degradação anaeróbia de resíduos é composto, principalmente, por metano (45 a 60%) e gás carbônico (40 a 60%).

O valor máximo de dióxido de carbono de 38% no dia 148 do monitoramento. Este gás é o principal produto das reações iniciais de degradação anaeróbia, transformando-se em

substrato para a metanogênese. Assim, passa a ser consumido, o que justifica sua redução simultaneamente ao aumento da concentração de metano.

As reações de degradação dependem das baixas concentrações de O_2 , pois a porcentagem de metano aumenta à medida que o O_2 diminui. As concentrações de oxigênio no biorreator controle ficaram abaixo de 15%. O processo de digestão anaeróbia demanda um ambiente praticamente ausente desse gás, e caso haja aumento da sua concentração, a reação é prejudicada. Este comportamento foi observado para o biorreator uma vez que os períodos em que o biogás apresentou maiores concentrações de CH_4 , o O_2 estava com baixa concentração e vice-versa.

A concentração de H_2S variou de 3 a 408 ppm. A concentração típica desse gás no biogás é de 0 a 70 ppm (MAIA, 2011). Segundo Alcântara (2007), em ambientes predominantemente anaeróbios, na presença de uma fonte de carbono e sob condições favoráveis de pH, as bactérias redutoras de sulfato utilizam o sulfato e o sulfito como aceptor final de elétrons, produzindo o gás sulfídrico. Essa reação compete com a metanogênese pelos mesmos substratos. Observou-se que, as frações de metano diminuíram nos períodos em que foram observadas elevadas concentrações de H_2S .

No biorreator com resíduo de menor granulometria, foi observada a presença de metano no biogás desde o início do monitoramento, conforme Figura 5.2. A redução do tamanho da partícula associada à pequena disponibilidade de oxigênio (abaixo de 5%) favoreceu a degradação anaeróbia e conseqüentemente a síntese do metano, pois neste biorreator foi observada a maior porcentagem deste gás. Apesar das porcentagens de metano chegar a atingir 37%, esses valores estão abaixo do intervalo sugerido pela literatura (TCHOBANOGLOUS, THEISEN e VIRGIL, 1993).

O comportamento do dióxido de carbono, por sua vez, foi semelhante ao do biorreator controle, apresentando aumento no início e redução no restante do período de monitoramento, o que indica seu consumo no processo de produção do metano. Neste biorreator a concentração de H_2S variou de 4 a 478 ppm, mantendo-se, na maior parte do monitoramento, abaixo de 70 ppm, que corresponde à concentração máxima típica desse gás no biogás.

Em relação à composição do biogás no biorreator com o resíduo de maior granulometria (Figura 5.3), a fração de metano no biogás atingiu valor máximo de 20% com 288 dias de monitoramento, enquanto que o oxigênio (O_2) esteve com frações constantes próximas a 15% em grande parte do monitoramento.

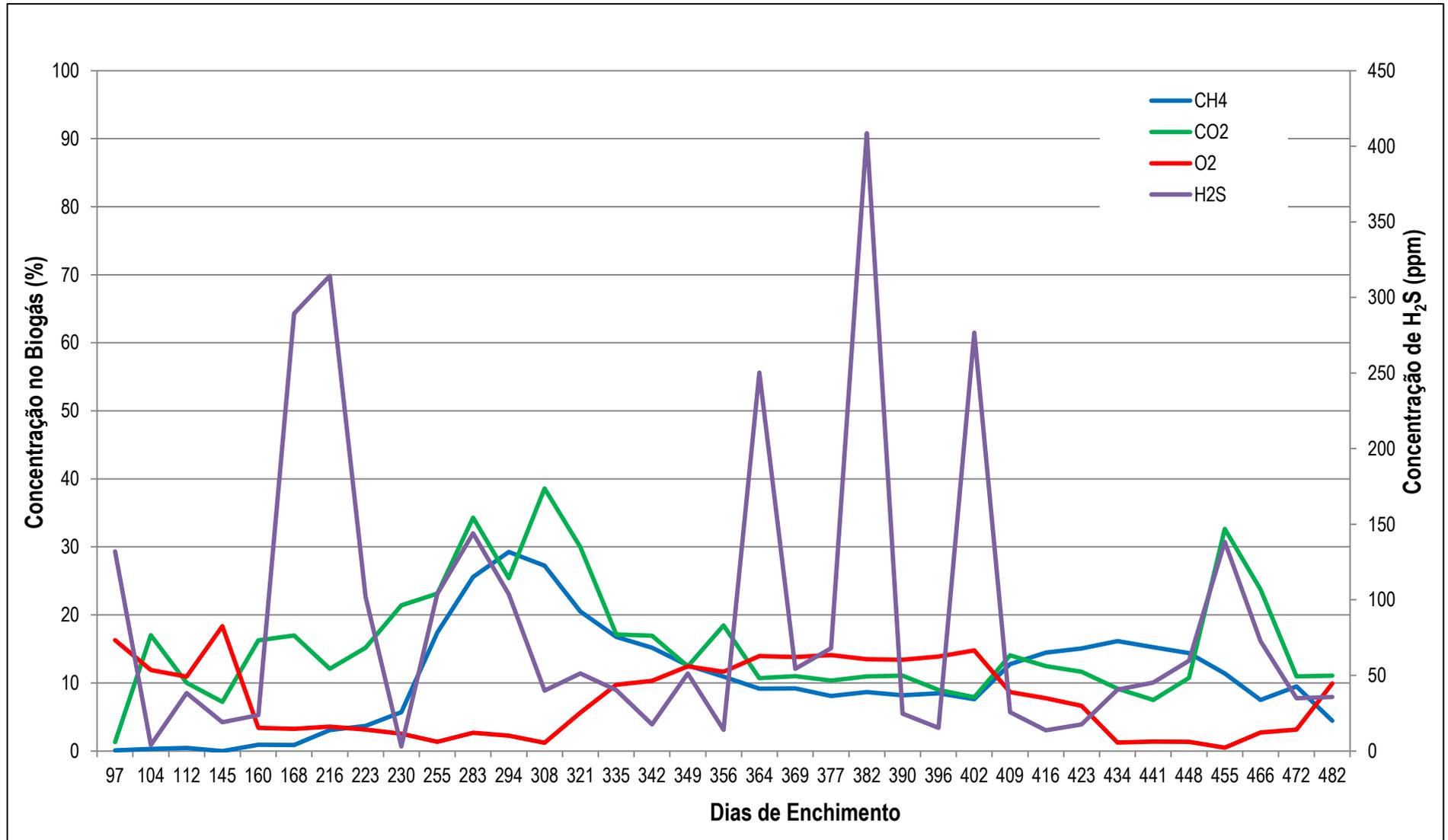


Figura 5.1: Monitoramento do biogás no biorreator controle referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016

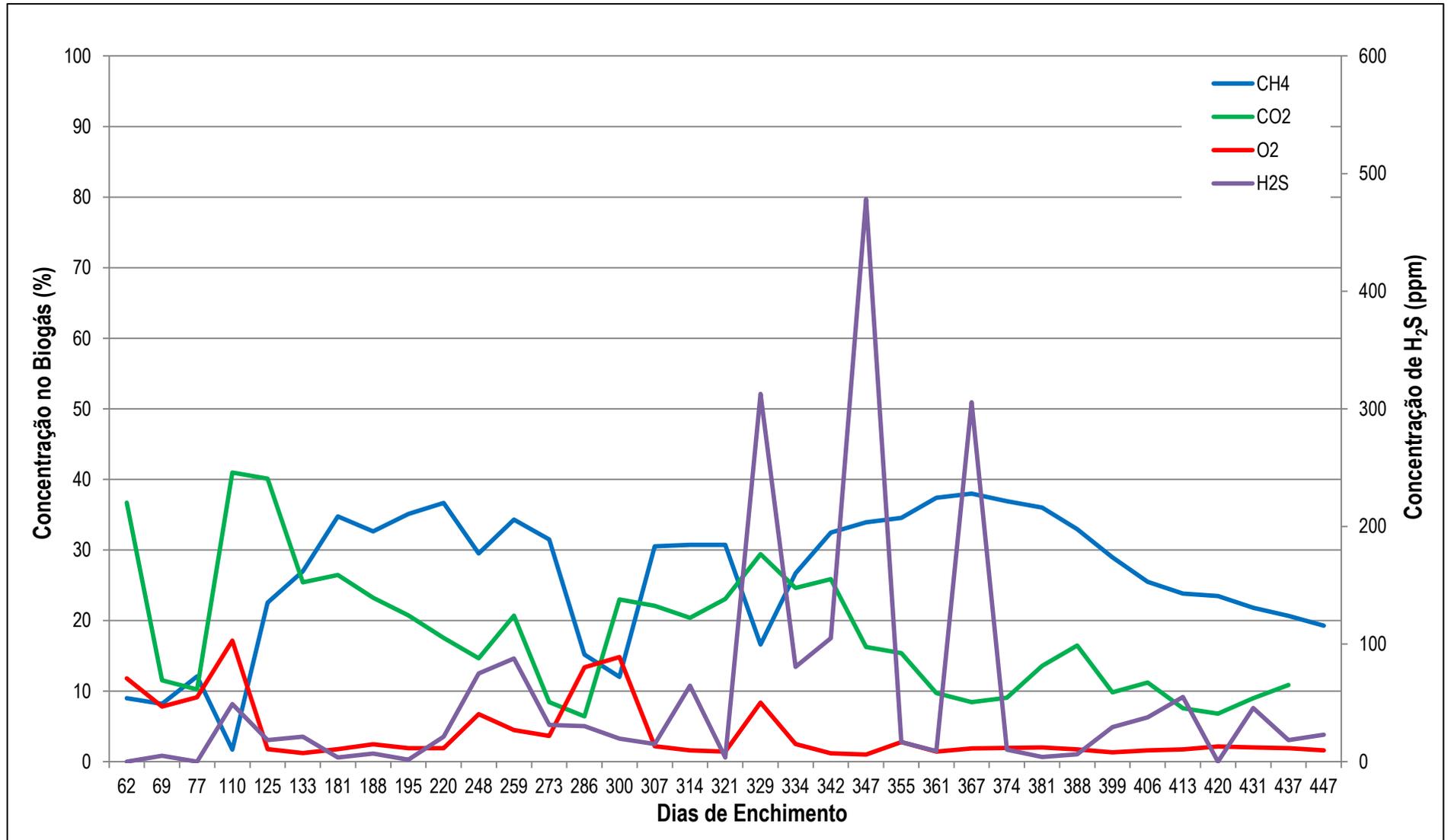


Figura 5.2: Monitoramento do biogás no biorreator com resíduo de menor granulometria referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016

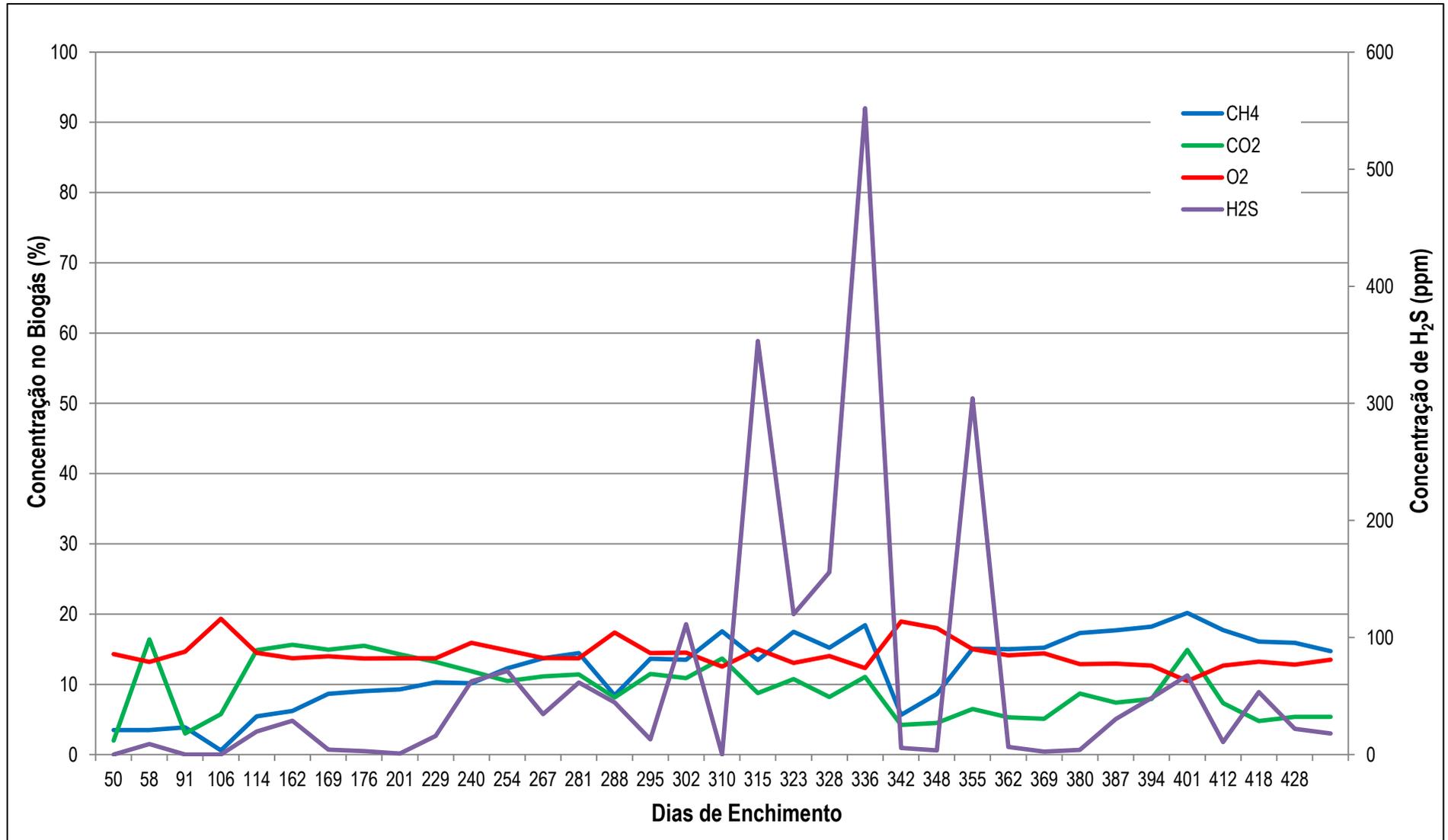


Figura 5.3: Monitoramento do biogás no biorreator com resíduo de maior granulometria referente ao período de 01/10/2015 a 30/09/2016

De maneira geral, na composição do biogás dos biorreatores, percebeu-se que as porcentagens de metano foram superiores ao de CO₂. Este comportamento difere-se do proposto por Bidone e Povinelli (1999) que apontaram em experimentos realizados em lisímetros, que o tamanho das partículas influenciou a composição do biogás gerado, ou seja, quando o tamanho das partículas foi reduzido de 250 para 25 mm, a geração de gás aumentou cerca de 4,4 vezes, entretanto a composição do biogás demonstrou predominância de CO₂ e não de CH₄ que é o gás de interesse.

As porcentagens de metano registradas nesse trabalho, cujos valores máximos atingiram 37%, estão inferiores dos valores reportados na literatura, que indicam concentração de metano produzido pela biodegradação anaeróbia da matéria orgânica, entre 45 a 60%.

Observou-se que o biogás com a maior porcentagem de metano (37%) foi gerado no biorreator com resíduo de menor granulometria e, de forma contrária, o biorreator com resíduo de maior dimensão gerou biogás com menores porcentagens de metano (18%). Frações intermediárias de metano foram verificadas no biorreator controle. A diminuição da granulometria de 8 mm para 4 mm, duplicou a fração de metano no biogás nestes biorreatores. Resultados semelhantes foram observados por Kayahanian et al. (1991) que utilizou materiais com diferentes tamanhos e promoveu aumento de 25% na produção de metano quando o diâmetro das partículas foi reduzido de 215 mm para 41 mm. A redução granulométrica de resíduos orgânicos favoreceu a produção de biogás, fato que pode ser atribuído ao aumento da área de superfície de contato disponível do substrato, onde os microrganismos se aderem, aumentando assim a degradação do material orgânico.

Em relação à massa total de biogás produzida (Figura 5.4), o biorreator com resíduo de menor granulometria apresentou maior produção de biogás (0,54 kg), seguido pelo biorreator controle (0,51 kg). O biorreator com resíduo de maior granulometria produziu em torno de 0,45 kg de biogás, sendo a menor quantidade de biogás observada nos três biorreatores. De acordo com os resultados apresentados, a redução do tamanho das partículas colaborou positivamente no processo de digestão anaeróbia dos resíduos e conseqüentemente na quantidade de biogás gerado. Resultados semelhantes foram encontrados por Warith (2002) em estudo experimental realizado para determinar o efeito da granulometria de resíduos sólidos na taxa de biodegradação de resíduos sólidos urbanos. O autor concluiu experimentalmente que a fragmentação dos RSU é um método eficaz para melhorar a biodegradação dos resíduos, em comparação com as tendências estabelecidas com os resíduos sólidos não triturados.

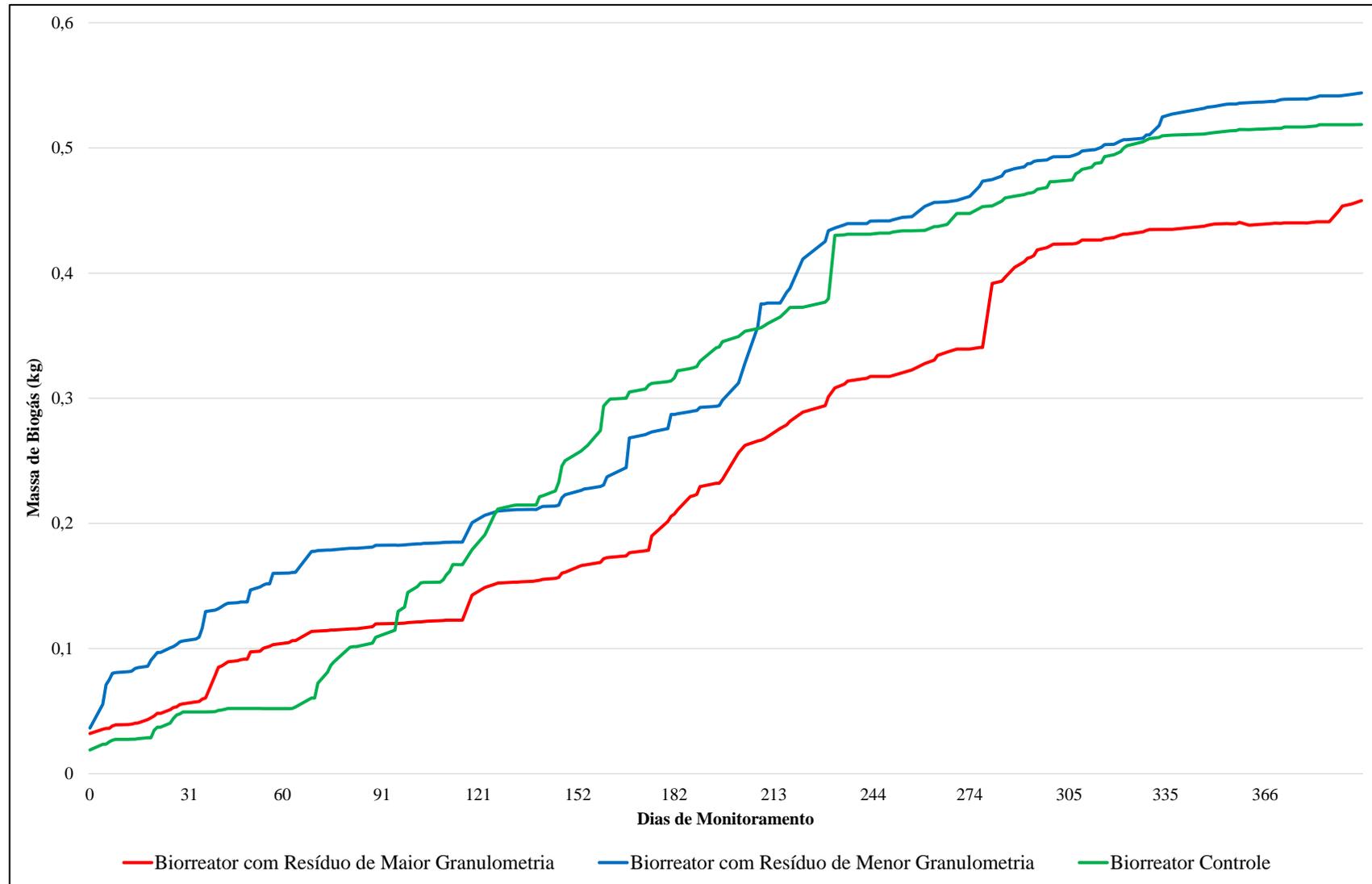


Figura 5.4: Monitoramento da massa de biogás produzida nos três biorreatores no período de 01/10/2015 a 30/09/2016

Mshandete et. al., (2006) apontaram que a quantidade de biogás pode ser significativamente aumentada através da redução granulométrica do substrato assim como a produção de metano. Os autores constataram que sua produção foi inversamente proporcional ao tamanho da partícula.

A partir dos dados obtidos da massa total de biogás e do resíduo disposto em cada biorreator, foi possível determinar a quantidade de biogás produzida por quilograma de resíduo disposto (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Relação entre a massa de biogás produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator

Resultados	Biorreator com resíduo de maior granulometria	Biorreator com resíduo de menor granulometria	Biorreator Controle
Biogás produzido (kg)	0,45	0,54	0,51
Quantidade de resíduo disposta no biorreator (kg)	490,0	498,6	491,4
Relação entre a massa de biogás produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator (g biogás/ kg resíduo)	0,92	1,08	1,04

De acordo com a Figura 5.5 que contem o monitoramento da massa total de metano produzida nos biorreatores, observou-se que o biorreator com resíduo de menor granulometria apresentou maior massa de metano, seguido pelo biorreator controle e finalmente pelo biorreator com resíduo de maior granulometria. Esposito et. al., (2011) observaram que o aumento da granulometria da fração orgânica do RSU implica em menor taxa de produção de metano. Observou-se, então, a interferência do tamanho da partícula na quantidade de metano produzido nos biorreatores estudados, ou seja, a redução da granulometria do resíduo acarretou no aumento da quantidade de metano no biogás produzido.

A redução granulométrica de resíduos orgânicos favoreceu a produção de biogás, fato que pode ser atribuído ao aumento da área de superfície de contato disponível do substrato, onde os microrganismos se aderem, aumentando assim a degradação do material orgânico (SANDERS et al, 2001).

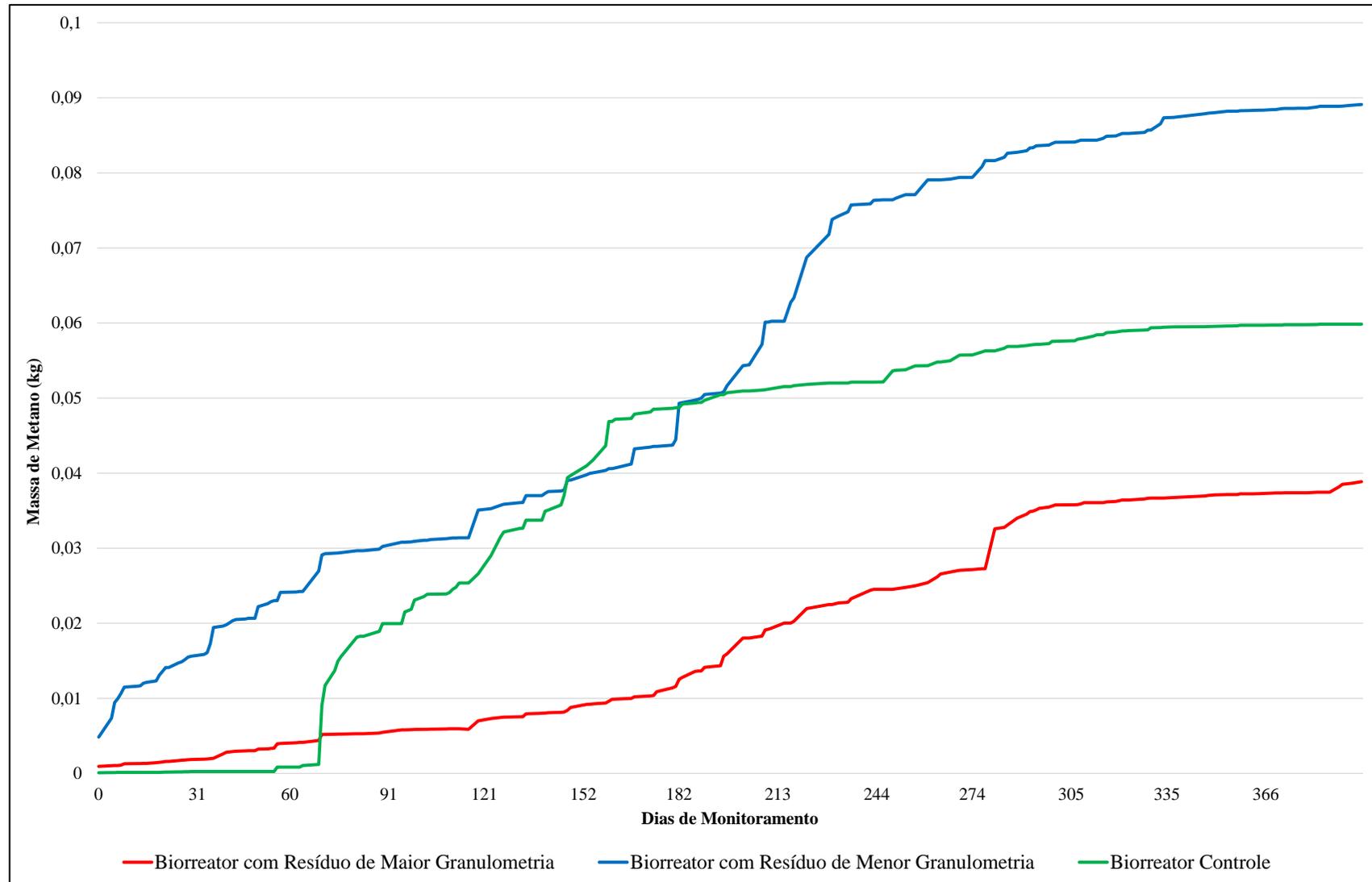


Figura 5.5: Monitoramento da massa de metano produzida nos três biorreatores no período de 01/10/2015 a 30/09/2016

A partir dos dados obtidos da massa total de metano e do resíduo disposto em cada biorreator, foi possível determinar a quantidade de metano produzido por quilograma de resíduo disposto (Tabela 5.4). O biorreator com resíduo de menor granulometria apresentou a maior relação (0,178 g CH₄/ kg de resíduo), demonstrando significativo aumento de metano com a redução da granulometria do resíduo.

Tabela 5.4: Relação entre a massa de metano produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator

Resultados	Biorreator com resíduo de maior granulometria	Biorreator com resíduo de menor granulometria	Biorreator Controle
Metano produzido (kg)	0,039	0,089	0,059
Quantidade de resíduo disposta no biorreator (kg)	490,0	498,6	491,4
Relação entre a massa de metano produzida e a massa de resíduo disposta no biorreator (g CH₄/ kg resíduo)	0,079	0,178	0,120

Considerando as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), o volume total de biogás produzido pelos biorreatores foi de 0,52 m³ no biorreator de menor granulometria, 0,38 m³ no biorreator controle e 0,39 m³ no biorreator com resíduo de maior granulometria. Foi verificado que a produção de biogás nos biorreatores foi baixa e muito aquém dos valores reportados na literatura. A ABRELPE considera o potencial de geração de biogás cerca de 100 m³ por tonelada de RSU (ABRELPE, 2015). Nesse cenário teórico, considerando a quantidade total de RSU disponibilizado em cada biorreator, o potencial de produção seria cerca de 50 m³ de biogás.

O volume de metano produzido foi 0,145 m³ no biorreator de menor granulometria, 0,047 m³ no biorreator de maior granulometria e 0,072 m³ no biorreator controle. Considerando o volume produzido e a quantidade de resíduo disposto nos biorreatores, tem-se a relação de 0,095 m³ CH₄ / t resíduo no biorreator com resíduo de maior granulometria, 0,292 m³ CH₄ / t resíduo no de menor granulometria e 0,146 m³ CH₄ / t resíduo no controle. Conforme dados obtidos, a produção de metano por massa de resíduo ficou abaixo do reportado pela literatura. Considerando que a capacidade potencial de geração de metano depende, principalmente, do tipo de resíduos presentes, e varia entre 5 e 300 m³ CH₄ / t resíduo (BANCO MUNDIAL, 2005), os biorreatores tinham potencial para produzir, cada um, de 2,5 a 150 m³ de metano.

A baixa produção de biogás verificada nos três biorreatores, tanto em quantidade quanto em qualidade (baixo percentual de metano), pode estar associada a alguns fatores. No

que tange aos fatores operacionais, mesmo com todos os esforços no sentido de evitar tais prejuízos, foram observados vazamentos e danos no aparato experimental.

Em relação às condições do meio, o principal parâmetro interveniente foi o teor de umidade. A água é importante para a digestão anaeróbia, pelo fato deste processo ser biológico e de que todo ser vivo é dependente de água, além disso, funciona como um meio fluído, onde ocorre a maioria das reações bioquímicas celulares. Além de suprir as necessidades dos micro-organismos através da mobilização de nutrientes e substratos, a umidade também possibilita o transporte de enzimas e outros produtos metabólicos. A manutenção da quantidade ideal de água é essencial para as reações bioquímicas, oferta de nutrientes e ajustamento do pH (LIBÂNIO et. al, 2003).

A literatura recomenda desde um mínimo de 25% até a umidade ótima de 40 a 60% (BIDONE e POVINELLI, 1999; CINTRA, 2003; ALVES, 2008). Diante dos resultados obtidos, foi observado que após o enchimento dos biorreatores, a maioria dos resíduos utilizados no enchimento possuía umidade dentro dessa faixa ideal. Entretanto, após a abertura, notou-se que a umidade em todos os biorreatores estava abaixo da ideal, ou seja, os valores de umidade estavam inferiores a 20%.

Van Elk (2007) relata que os baixos teores de umidade podem comprometer a decomposição da matéria orgânica, pois os microrganismos decompositores necessitam da presença de água nos interstícios do maciço de resíduos, para que possam realizar o processo de degradação.

Em experimentos de campo e aterros sanitários, a umidade é fornecida tanto pela composição dos resíduos quanto pelas chuvas. Em experimentos laboratoriais, como os biorreatores, há dificuldade na intervenção das condições do meio, como a disponibilização de água, que mantém o teor de umidade adequado.

Segundo Alves (2008), em muitos estudos em escala de laboratório, a respeito dos efeitos da umidade na decomposição dos resíduos, o rendimento do metano tem sido inferior à quantificação em campo em virtude do conteúdo de umidade. Quando esse parâmetro está abaixo do ideal (40-60%), há a limitação do transporte de massa, existindo pouca penetração e distribuição dos microrganismos na extensão do substrato.

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos estudos realizados e as sugestões para futuras pesquisas.

- Os resíduos utilizados no enchimento dos biorreatores eram detentores de grande carga orgânica, evidenciado, principalmente, pelas frações de sólidos totais voláteis, superiores a 60% e pela relação DQO/DBO inferior a 2,5. A umidade estava dentro da faixa ideal (40-60%) para a degradação anaeróbia.
- Ao final do experimento os parâmetros físico-químicos demonstraram que houve degradação do material depositado nos biorreatores, uma vez que ocorreu a redução da porcentagem de sólidos totais voláteis e o aumento da relação DQO/DBO. A umidade final esteve abaixo dos valores ideais, podendo ser considerada como o principal parâmetro relacionado à baixa produção de biogás e, conseqüentemente, metano.
- Em relação à composição do biogás, o produzido no biorreator de menor granulometria apresentou a maior fração de metano (37%), enquanto que o biogás produzido no biorreator de maior granulometria apresentou a menor fração de metano (20%). O biorreator controle, por sua vez, obteve frações de metano intermediárias. A presença de metano nos biorreatores indicou que houve a degradação anaeróbia dos resíduos, contudo em nenhum deles a concentração de metano atingiu a fração ideal, de 45 a 60%.
- A massa total de biogás produzida pelo biorreator de menor granulometria (0,54 kg) foi superior à do biorreator controle (0,51 kg), que por sua vez, foi maior a do biorreator com menor granulometria (0,45 kg).
- O volume de biogás produzido variou de 0,38 a 0,52 m³. Os valores obtidos são inferiores aos reportados pela literatura (ABRELPE, 2015), que indica capacidade teórica de produção de até 50 m³ para cada biorreator.
- O volume de metano produzido variou de 0,145 a 0,047 m³. Os valores obtidos são inferiores aos reportados pela literatura (BANCO MUNDIAL, 2005), que indica capacidade teórica de produção de 2,5 a 150 m³ de metano para cada biorreator.
- A redução da granulometria foi favorável, tanto no aumento do percentual de metano como na quantidade de biogás produzida, visto que o biorreator de menor granulometria apresentou a melhor relação entre a quantidade de biogás

produzida por quilograma de resíduo disposto no biorreator, assim como a relação entre a quantidade de metano produzida por quilograma de resíduo.

- Considerando o potencial de geração e o teor ideal de metano no biogás reportados na literatura, os biorreatores não atingiram os resultados esperados, possivelmente pela baixa umidade dos resíduos, evidenciando a importância deste parâmetro para a degradação anaeróbia dos resíduos.
- Baseado neste trabalho recomenda-se, para futuras pesquisas, um método de disponibilização de água nos biorreatores de forma a simular as chuvas do município de Itanhandu- MG. Incluir, no aparato experimental, uma maneira de realizar a coleta de resíduos dentro do biorreator, de forma que haja o monitoramento dos parâmetros físico-químicos ao longo do experimento e acrescentar o acompanhamento da geração de outros gases no monitoramento do biogás.

REFERÊNCIAS

ABE, H. S. S. **Avaliação experimental da geração de biogás em célula experimental de aterro sanitário e a correlação com o Índice de Desenvolvimento Humano.** (Iniciação Científica). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações para Geração.** 2016. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 22/07/2016

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados.** (Tese de Doutorado). Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

ALVES, I. R. F. S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos.** (Dissertação de Mestrado). Recife: UFPE, 2008.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters**, 1998.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters**, 1998.

ARAÚJO, E. P.; COSTA, S. S. S.; PEREIRA, F. T. G.; COSTA, E. P.; MONTEIRO, V. E. D.; ARAÚJO, J. M. Estudos de geração de biogás com base em parâmetros microbiológicos em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2010. Disponível em:< <http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1790.pdf>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2014.** São Paulo: ABRELPE, 2015. Disponível em:
<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:< <http://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/ABNT-NBR-10005-Lixiviacao-de-Residuos.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.007:** Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:< <http://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-10007-amostragem-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13.896:** Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em:< <ftp://ftp.cefetes.br/cursos/MetalurgiaMateriais/Joseroberto/P%D3S/NORMAS,%20ARTIGOS%20E%20EXERC%20CDCIOS/nbr13896.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8.419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em:< <http://licenciadorambiental.com.br/wp->

content/uploads/2015/01/NBR-8.419-NB-843-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-RSU.pdf>. Acesso em: 24 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Resíduos Sólidos- Classificação, **NBR 10.004**. Brasil, 2004.

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

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2013. 357 p.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120p.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. Brasília: Oficina de Textos, 2008

BRASIL. Projeto de Lei do Senado N° 425 de 2014. **Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Brasília, 2014.

BRASIL.. **Lei nº 12.305/10**, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Ministério Do Meio Ambiente (MMA), 2010. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 01 Set. 2015

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. (Dissertação de Mestrado). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

BRITO, L. M. **Potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário em Itajubá-MG no contexto MDL**. (Trabalho Final de Graduação). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2011.

CAMPELLO, R. P. **Desempenho de reatores anaeróbios de manto de lodo (UASB) operando sob condições de temperaturas típicas de regiões de clima temperado**. (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em:<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/19122/000713228.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Ed. 6. São Paulo: Ed. LTC, 2001.

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

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 2006.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias** – Vol. 5 – Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac, 1997. 246 p.

CINTRA, I; S. **Estudo da influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado na aceleração do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos**. 25 (Tese de Doutorado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG,

2003. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/38D.PDF>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

COMPANHIA DO DESENVOLVIMENTO URBANO DO ESTADO DA BAHIA (CONDER). **Manual de Operação dos Aterros Sanitários**. Bahia: CONDER, 2014.

Disponível em:<

<http://www.unipacvaleadoaco.com.br/ArquivosDiversos/Cartilha%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20Aterro%20Sanit%C3%A1rio%20CONDER.pdf>>. Acesso em: 31 Jan. 2017.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, B. R.

Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: **4º encontro de energia meio rural**. São Paulo, 2002. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. UNESP. São Paulo, 2002.

DUARTE, K. L. S. **Interferências das condições ambientais e operacionais nas concentrações de biogás em biorreatores de bancada com resíduos sólidos**.

(dissertação de mestrado). Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande: Centro Tecnologia e Recursos Naturais, 2014. Disponível em

<http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_500.pdf>. Acesso em 13 maio 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

ESPOSITO, G.; FRUNZO, L.; PIROZZI, F. Modelling the Effect of the OLR and OFMSW Particle Size on the Performances of an Anaerobic Co-digestion Reactor. **Process. Biochemistry**. v.46, n. 2, p.557-567, Jan. 2011.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário**

Experimental. (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2009. Disponível em:<<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/516M.PDF>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

GÜLZOW, P. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 5 ed. Alemanha:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010 . Disponível em:

<http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf>. Acesso em: 29 Abril 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, PNSB -2008. Rio de Janeiro: IBGE; 2010.

INSTITUTO PARA A DEMOCRATIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO BÁSICO E MEIO AMBIENTE. **Manual do Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. 2012. Disponível

em:<http://www.resol.com.br/cartilha4/residuossolidos/residuossolidos_3.php>. Acesso em: 19 Out. 2015.

JOHN, C. E. **Implantação de um biorreator para estudo de resíduos sólidos**

urbanos: Problemas, Ajustes e Soluções de Laboratório. (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

- KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. M.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual Básico de Biogás**. 1 ed. Lajeado: Editora Univates, 2014. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2016.
- KAYAHANIAN, M.; LINDENAUER, K.; HARDY, S.; TCHOBANOGLIOUS, G. **The Recovery of Energy and Production of Compost from the Biodegradable Organic Fraction of MSW using the High-Solids Anaerobic Digestion/ Aerobic Biodrying Process**. A Report prepared for the Prison Industry Authority. Davis: University of California, 1991.
- KIM, I.S., Kim, D.H. e Hyun, S-H. Effect of particle size and sodium ion concentration on anaerobic thermophilic food waste digestion. **Water Science and Technology**, Vol. 41, nº 3, pp. 67-73, 2000
- LANZA, V. C. V.; CARVALHO, A. L. **Orientações básicas para operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2006. Disponível em: <<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/Cartilha%20Aterro2.pdf>>. Acesso em: 20 Abril de 2017.
- LIBÂNIO, P. A. C.; COSTA, B. M. P.; CINTRA, I. S.; CHERNICARO, C. A. L. Evaluation of the start-up of na integrated municipal solid waste and leachate treatment system. **Water Science and Technology**, 48, 241-247. 2003
- LIMA, L. M. Q. **Lixo: Tratamento e Biorremediação**. 3. Ed. Campinas: Hemus, 2004.
- MAIA, D. C. S. **Remoção de H₂S e CO₂ de biogás para utilização energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá, Paraná, 2011. 86 p.
- MAZO-NIX, S. **Conceitos Básicos sobre Biogás de Aterro e as Tecnologias para o seu Aproveitamento Energético**. SCS Engineers: Global Methane Initiative, 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/atlas/sandra_mazo_nix.pdf>. Acesso em: 25 Jan. 2017.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE; CONSELHO INTERNACIONAL PARA INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/182/_arquivos/manual_de_residuos_solidos3003_182.pdf>. Acesso em 20 Abril 2017.
- MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 204 p. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2015.
- MOURA, J. S. **Avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de esgoto em uma simulação experimental de aterro sanitário**. (Dissertação de Mestrado). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2014.
- MSHANDETE, A. BJORNSSON, L., KIVAISI, A. K. RUBINDAMAYUGI, M. S. T. MATTIASSON, B. Effect of Particle Size on Biogas Yield Sisal Fibre **Waste. Renewable Energy**, 31, p. 2385-2392, 2006.
- PECORA, V; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia**

elétrica e iluminação a gás. Induscon (VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais) Poços de Caldas, 2008. 5p

PIERONI, M. F. **Avaliação do potencial de geração de metano para resíduos sólidos urbanos - estudo de caso: aterro sanitário Itajubá- MG.** (Trabalho Final de Graduação). Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2010.

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. **Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfill.** Tech. Project. n E20G01. Dec. 1985.

REICHERT, G. A. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. Disponível em:<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/III-242.pdf>>. Acesso em: 31 Maio 2016.

REMEDIO, M. V. P.; MANCINI, S. D.; ZANIN, M. **Potencial de reciclagem de resíduos em um sistema de coleta de lixo comum.** Engenharia Sanitária e Ambiental, [S.I.], v. 7, n. 1, jan/mar, 2002. Disponível em: <<http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v7n12/v7n12a04.pdf>>. Acesso em: 28 abril 2015.

SANDERS, W.T., GEERING, M., ZEEMAN, G., LETTINGA, G. Anaerobic Hydrolysis Kinetics of Particulate Substrates. **Water Science & Technology.** v. 41, n. 3, p. 17-24, Jun. 2001.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL (SNSA).

Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2014. 154 p. Brasília, 2016.

SILVA, D. L. M.; SILVA, W. P.; DUARTE, K. L. S.; RIBEIRO, L. S.; MELO, M. S. Análise da viabilidade na obtenção de biogás em biorreatores de bancada de resíduos orgânicos. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA (CONTECC), Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: CONTECC, 2015.

Disponível

em:<http://www.confrea.org.br/media/Quimica_analise_da_viabilidade_na_obtencao_de_biogas_em_biorreatores_de_bancada_de_residuos_organicos.pdf>. Acesso em: 17 Abril 2017.

SILVA, G. A. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP.** (Dissertação de Mestrado). João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2012. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/5524/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. **Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma Visão Multidisciplinar.** Editora FIOCRUZ, Rio de Janeiro, p. 62, 2000.

SOUSA, R. B. A.; AIRES, K. O.; DANTAS, E. R. B.; BATISTA, P. I. B.; MONTEIRO, V. E. D. Análise da composição de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos e sua relação com o pH do meio. In: SEMINÁRIO REGIONAL NORDESTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 4.,2012, São Cristóvão. **Anais...** São Cristóvão: [S. I.], 2012.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE.** São Paulo, v. 44, n. 137, 1984. Disponível em:

<http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_137_n_1173.pdf>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. (Dissertação de Mestrado). Araraquara: Universidade Estadual Paulista, 2001. Disponível em:<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88047/steil_1_me_araiq.pdf?sequence=1>. Acesso em: 19 Abril 2017.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIRGIL, S. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. McGraw-Hill, Inc., International Edition. 978 p. 1993.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO (UNESP). **Curso de Geologia Ambiental Via Internet**. Módulo 11: Disposição de Resíduos- Classificação. 2001. Disponível em:<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res07.html>>. Acesso em: 01 Set. 2015.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissão na disposição final**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

VIRIATO, C. L. **Influência da granulometria e da concentração de sólidos totais de resíduos sólidos vegetais no processo de bioestabilização anaeróbia**. (Dissertação de Mestrado). Campina Grande: Universidade Estadual da Paraíba, 2013.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005. 452 p

WARITH, M. Bioreactor landfills: experimental and fields results. **Waste Management**, v. 22, p. 7-17, 2002.