

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

ESTUDO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM CAMPO GRANDE/MS

RILDO DE OLIVEIRA TENORIO

CAMPO GRANDE

2015

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

**ESTUDO PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS EM CAMPO GRANDE/MS**

RILDO DE OLIVEIRA TENORIO

Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional apresentado na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração de Biocombustíveis.

Orientador: Prof. Flávio Aristone

CAMPO GRANDE

AGOSTO/2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória de meu avô Francisco, que em todos os momentos na sua grandeza de simplicidade soube ao seu modo estimular a erudição como um estilo de vida.

AGRADECIMENTO

Durante a elaboração deste trabalho estive cercado por pessoas inspiradoras que me encorajaram a seguir firme com o propósito de concluí-lo da melhor maneira possível. Família, colegas de trabalho, amigos pessoais e companheiros de turma e demais pessoas que contribuíram ao seu modo e que sempre ofereceram grandes doses de motivação algumas delas por serem modelos exemplares. Este trabalho é reflexo de muita inspiração dessas pessoas e espero que este por sua vez sirva de inspiração para muitas outras.

Agradeço aos solícitos colaboradores da empresa SOLURB senhores Bruno Velloso Vilela, Gustavo Marques Pitaluga e Julio Cesar Varas dos Santos que sempre quando necessário estiveram à disposição de forma muito atenciosa, disponibilizando informações que foram de vital importância para a execução deste trabalho.

Agradeço ao professor Amancio Rodrigues da Silva Junior pelo convite ao ingresso no programa de mestrado desta universidade.

Ao professor Luiz Henrique Viana pelo incentivo e por compartilhar suas experiências pessoais acadêmicas que por muitas vezes serviram de referência para este trabalho.

E por último dentre os docentes, mas não menos grato, agradeço ao meu orientador professor Flavio Aristone que ao longo desse trabalho ofereceu sua imensurável experiência acadêmica e acima de tudo por seu crédito em minha peculiar interpretação de prazos.

Agradeço à família “Vaz dos Santos” por me dar a oportunidade de compreender que ao longo da estrada o conceito de “família” se torna mais abrangente.

Agradeço à Mariana Wolf Fedrizzi que mesmo na distância foi sem dúvida a pessoa que mais esteve presente, testemunhando de forma honesta os sucessos e frustrações, apoiando e encorajando a seguir à diante.

Por fim, agradeço à minha família que dentre as infinitas coisas que com ela aprendi: determinação, coragem e persistência definitivamente são características que trago da minha mãe a quem eu agradeço minha existência.

“Deixe o mundo um pouco melhor do que o encontrou.”

Robert Baden-Powell

SUMÁRIO

1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
1.1	Histórico do Biogás.....	20
1.2	Biodigestão	25
1.2.1	Hidrólise.....	27
1.2.2	Acidogênese	28
1.2.3	Acetogênese.....	29
1.2.4	Metanogênese	30
1.3	Biodigestores.....	33
1.3.1	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA).....	39
1.3.2	Balanço de massa e métodos	43
1.4	Biogás	53
1.4.1	Características do Biogás	53
1.4.2	Geração de Biogás em aterros	58
1.4.3	Fatores influentes na geração de biogás em aterros.....	62
1.5	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	66
1.5.1	Geração e Coleta de RSU.....	67
2.	ESTUDO DE CASO.....	76
2.1	Localização do aterro Dom Antônio Barbosa II	76
2.2	Estimativa do Potencial de Geração de Metano.....	88
2.2.1	Modelos teóricos de geração de energia a partir do biogás de aterros.	89
2.3	Resultados de produção de Biogás para o aterro Dom Antônio Barbosa II	93
2.3.1	Cálculo de COD.....	94
2.3.2	Cálculo de L_0	96
2.3.3	Cálculo da emissão de metano	97
2.3.4	Incertezas associadas	99

2.4	Aproveitamento energético do aterro	100
2.4.1	Motor de combustão interna – ciclo Otto.....	101
2.4.2	Microturbinas a gás.....	102
2.4.3	Tecnologias de conversão	102
2.5	Informação sobre as emissões produzidas.....	103
3.	ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE NESTE CASO	106
3.1	Análise social envolvida neste estudo	109
3.2	Análise ambiental do estudo	110
3.3	Análise econômico/energético	110
4.	CONCLUSÃO.....	113
5.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obra de Alessandro Volta <i>Aria infiammabile nativa delle Paludi</i>	21
Figura 2 – Biodigestor dinamarquês de larga escala.	23
Figura 3 – Etapas do processo de Digestão Anaeróbica (adaptado de Gujer e Zehnder).....	26
Figura 4 - Hidrólise, esquema representativo.....	27
Figura 5 - Acidogênese, esquema ilustrativo.	28
Figura 6 - Acetogênese, esquema ilustrativo.....	30
Figura 7 - Metanogênese, esquema ilustrativo.	31
Figura 8 - Modelo de Biodigestor Indiano	37
Figura 9 - Modelo de Biodigestor Chinês	38
Figura 10 - Modelo de Biodigestor Canadense	38
Figura 11 - Esquema de funcionamento de um reator UASB (Fonte: adaptado de CHERNICHARO, 1997).....	40
Figura 12 - Esquemas mais comuns utilizados em reatores UASB. (Fonte: FRANCISCO DA SILVA, 2007)	41
Figura 13 - Balanço de massa e fluxo de materiais de uma planta padrão de biometanização (OSTREM, 2004).....	44
Figura 14 - Balanço energético característico de planta de biometanização de RSU.....	44
Figura 15 - Modelo de digestor de mistura completa (Fonte: OGEJO <i>et al</i> , 2009).	51
Figura 16 - Representação esquemática de um reator de fluxo pistão (Fonte: OGEJO <i>et al</i> , 2009)	52
Figura 17 - Fases de formação do biogás em aterros (BRITTO, 2006).....	59
Figura 18 - Quantidade de RSU/habitante/ano em alguns países (OECD, 2008).	68
Figura 19 - Índice per capita e absoluto de geração de RSU (Fonte: ABRELPE e IBGE).	69
Figura 20 - Índice per capita e absoluto de coleta de RSU (Fonte: ABRELPE e IBGE).	71
Figura 21 - Proporção das regiões brasileiras na coleta de RSU no Brasil.	72
Figura 22 - Proporção de cobertura de coleta de RSU por região do Brasil.	73
Figura 23 - Destinação final de RSU em toneladas/dia por tipo de unidade.....	74
Figura 24 - Destinação final de RSU no MS por tipo de unidade (t/dia).....	75
Figura 25 - Localização do aterro de Campo Grande (SEINTHRA 2008).....	76
Figura 26 - Quantidade de RSU coletado em Campo Grande (ton.) (MME, 2015).....	77

Figura 27 - Vista aérea do aterro Dom Antônio Barbosa II e adjacências.....	78
Figura 28 - Foto do Aterro Dom Antônio Barbosa em operação no período matutino (08/05/2015).....	78
Figura 29 - Coleta de lixo em Campo Grande por setor, frequência e período.....	79
Figura 30 - Quantidade de toneladas de RSU coletados mensalmente em Campo Grande (SOLURB, 2014).....	80
Figura 31 - Composição Gravimétrica dos RSU em Campo Grande 06/14 (SOLURB, 2014).	80
Figura 32 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando manta de PEAD.....	81
Figura 33 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando manta de PEAD (detalhe).....	81
Figura 34 – Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando dreno horizontal.....	82
Figura 35 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando dreno horizontal e caixa de coleta de chorume.....	83
Figura 36 - Caixa de passagem do percolato captado.....	83
Figura 37 - Interior de uma caixa de passagem com o Chorume evidenciado.....	84
Figura 38 - Lagoa de Decantação.....	84
Figura 39 - Vista frontal da lagoa de decantação.....	85
Figura 40 - Lagoa de recepção da captação pluvial.....	85
Figura 41 - Preparação do talude para o posterior recebimento de cobertura vegetal.....	86
Figura 42 - Cobertura vegetal parcial do talude.....	86
Figura 43 - Dreno vertical de Biogás em fase de implantação em nova camada de aterro.	87
Figura 44 - Dreno vertical de Biogás revestido com brita e tela.....	87
Figura 45 - Dreno vertical de Biogás revestido com brita e tela (detalhe).....	88
Figura 46 - Gráfico da quantidade em toneladas de RSU/mês coletado em Campo Grande...	95
Figura 47 - Diagrama de interação dos três princípios da sustentabilidade.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de Biodigestores instalados em alguns países da Europa. (IEA, 2007)	24
Tabela 2 - Principais marcos históricos do Biogás	24
Tabela 3 - Quantidade de energia livre de Gibbs para as reações de digestão anaeróbicas.	32
Tabela 4 - Constituintes típicos do Biogás de aterro de RSU	54
Tabela 5 – Composição característica de Biogás em aterro	55
Tabela 6 - Tabela comparativa dos principais gases.....	56
Tabela 7 – Composição química e respectivos poder calorífico do Biogás.....	57
Tabela 8 - Equivalência do biogás em comparação com outros combustíveis.	57
Tabela 9 - Período médio de duração das fases de digestão de RSU em aterros sanitários.....	61
Tabela 10 - Metais pesados e suas respectivas concentrações inibitórias na digestão anaeróbia.	65
Tabela 11 - Fatores externos e internos influentes na geração de Biogás em aterros.....	66
Tabela 12 - Evolução da quantidade de lixo/hab/ano no Brasil.	68
Tabela 13 - Avaliação do segmento resíduos sólidos no Brasil.	69
Tabela 14 - Evolução da coleta de lixo no Brasil.	70
Tabela 15 - Orçamento municipal destinado à limpeza urbana e coleta de lixo.	71
Tabela 16 - Proporção de domicílios com coleta de lixo por município do Brasil.	73
Tabela 17 - Unidades de destinação final de RSU, por categoria, na região Centro-Oeste.....	74
Tabela 18 - Coleta e Geração de RSU em MS (2012 e 2013).....	75
Tabela 19 - Modelos teóricos de geração de biogás em aterros.	89
Tabela 20 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo.	91
Tabela 21 - Valores de FCM de acordo com o tipo de local.	92
Tabela 22 - Gravimetria do RSU coletado em Campo Grande.	94
Tabela 23 - Valor de COD para a composição de RSU do aterro Dom Antônio Barbosa II...	95
Tabela 24 - Comportamento da geração de gás metano e biogás.....	98
Tabela 25 - Incertezas associadas aos parâmetros sugeridos pelo IPCC.	99
Tabela 26 - Fatores de conversão de unidades de energia.	100
Tabela 27 - Comparativo de tecnologias para conversão do Biogás	103
Tabela 28 - Volume de chorume produzido pelo aterro.	104
Tabela 29 - Resultados analíticos das amostras de chorume.....	104

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A.C.	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AND	Autoridade Nacional Designada
AOV	Ácidos Orgânicos Voláteis
BEN	Balanço Energético Nacional
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural
CQO	Carência Química de Oxigênio
DAFA	Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente
ECO-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Cnumad) realizada em junho de 1992
EODs	Entidades Operacionais Designadas
EPA	US Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FORM	Fração Orgânica de Resíduos Municipais
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GSS	Gás Solid Separator – Separador de Fases
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPT/CEMPRE	Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Compromisso Empresarial para Reciclagem
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MIT	Massachusetts Institute of Technology

MME	Ministério de Minas e Energia
ONU	Organizações das Nações Unidas
PC	Potencial Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RAFA	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente
RAFAALL	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente Através de Leito de Lodo
RAFAMAL	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
RALF	Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado
RCE	Redução Certificada de Emissões
RSD	Resíduo Sólido Doméstico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente
UNCHE	United Nations Conference on the Human Environment – Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente Humano
UNEP	United Nations Environment Programme – Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas
UTR	Usina de Tratamento de Resíduo

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄	Metano
CO ₂	Gás carbônico
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Gás sulfídrico
O ₂	Oxigênio
N ₂	Nitrogênio
°C	Unidade de medida de temperatura Graus Celsius
GWh	Unidade de medida de geração de energia em Giga-Watt-hora
atm	Unidade de medida de pressão em atmosferas
kJ	Unidade de medida de energia em Quilo-Joule
kg	Unidade de medida de massa em Quilo-grama
C/N	Relação Carbono Nitrogênio
NaCl	Cloreto de Sódio
Cu	Cobre
Cr	Cromo
NH ₃	Amônia
K	Potássio
Mg	Magnésio
Ni	Níquel
CO	Monóxido de Carbono
t/dia	Unidade de medida de massa de resíduo por período em tonelada por dia
m ³	Unidade de medida de volume em metro cúbico
kW	Unidade de medida de energia em Quilo-watt
TWh	Unidade de medida de geração de energia em Tera-Watt-hora
kcal/m ³	Unidade de medida de energia por massa em Quilo-caloria por metro cúbico
mm/ano	Unidade de medida de pluviosidade em milímetros por ano
mV	Unidade de medida de diferença de potencial em milivolt
g/cm ³	Unidade de medida de densidade em grama por centímetro cúbico

kg CH ₄ / Kg RSD	Unidade de medida de concentração de massa de biogás por massa de resíduo em Quilo-grama de metano por Quilo grama de resíduo sólido doméstico
ton/m ³	Unidade de medida de densidade em tonelada por metro cúbico
m ³ biogás / tonRSD	Unidade de medida de densidade em metro cúbico de biogás por tonelada de resíduo sólido doméstico
J	Unidade de medida de energia em Joule
Btu	Unidade de medida de energia térmica em British-thermal-unit (unidade térmica britânica)
Tep	Unidade de medida de equivalência energética em tonelada equivalente de petróleo
kWh	Unidade de medida de produção de energia em Quilo-watt-hora
MWh	Unidade de medida de produção de energia em Mega-watt-hora
MW	Unidade de medida de potência elétrica em Mega watt

RESUMO

O aumento da emissão de gases de efeitos estufa e consequente aquecimento global tem incentivado a pesquisa e o desenvolvimento de soluções que diminuam a emissão desses gases na atmosfera. Dentro dessa premissa, o presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da utilização do biogás de aterro proveniente da biodigestão, composto em sua maioria por gás metano, como fonte de geração de energia limpa e sustentável, analisando sua viabilidade e características físico, química e energética como opção para geração de energia elétrica, evitando seu lançamento direto na atmosfera. Para tanto foram aplicadas análises gravimétricas em resíduos sólidos urbanos cuja composição orgânica média é de 43%, produzindo um biogás de aterro com riqueza de 50% de metano em sua composição. Para análise do comportamento da geração de biogás de aterro foi adotada a metodologia proposta pelo Banco Mundial e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima das Nações Unidas. Os resultados obtidos indicaram que esta é uma opção economicamente interessante e sustentável, especialmente dos pontos de vista, social, ambiental. Nossos resultados propõem a possibilidade da utilização de 524 m³ de biogás produzidos por hora no aterro estudado para a geração de energia elétrica.

Palavras-chaves: biodigestão, biogás, metano.

ABSTRACT

The increase of greenhouse gases emissions in the atmosphere and consequent global warming has encouraged the research and development of systems that would reduce greenhouse gas emission production. Within this premise, this work aims to study the use of landfill biogas from the biodigestion, composed mostly of methane gas as a source of clean and sustainable energy generation, analyzing its viability, as well as its, physical, chemical and energy capacity characteristics as an option for electricity generation, preventing its free emission into the atmosphere. Therefore, we applied gravimetric analyzes to the city solid waste with an average of 43% organic composition, producing a biogas with methane fullness of 50% in its composition. To analyze the behavior of landfill biogas generation it was adopted the methodology proposed by the World Bank and the Intergovernmental Panel on Climate Change of United Nations. The results indicated that this process can be an viable economically option, and further interesting regarding environmental and social issues. From our results we conclude that it is possible to make use of approximately 524 m³ of biogas produced per hour in the analysed landfill to generate electricity.

Keywords: biodigestion, biogas, methane.

INTRODUÇÃO

As constantes transformações climáticas que o mundo vem passando tornaram-se mais intensas e severas devido à ação antrópica nas últimas décadas, especialmente após a revolução industrial com a larga utilização de motores movidos à combustíveis fósseis. As mais recentes previsões divulgadas para as próximas décadas pelas agências internacionais especializadas em estudos do clima, e também pela ONU em seus relatórios anuais sobre o tema, justificam essas alterações, em grande parte, pela emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, tornando-os protagonistas na autoria pelo aquecimento global.

A principal matriz energética do globo é hoje baseada em geração de energia através do uso de matéria prima de origem fóssil (81,6%), conforme relatório divulgado pela Agência Internacional de Energia (IEA) no ano de 2013, o petróleo é empregado em 31,5%, o carvão em 28,8% e o gás natural em 21,3% em geração de energia elétrica no mundo, sendo o restante compartilhado por energia nuclear 5,1%, fontes renováveis 13% e outros 0,3%. A utilização dos combustíveis fósseis como carro chefe na geração de energia elétrica mundial tem sido interpretada na atualidade, como um modelo a ser urgente e gradativamente desestimulado dado o seu caráter finito, e principalmente, danoso ao meio ambiente. A principal problemática reside em como transformar as futuras e as já existentes fontes de energias tidas como limpas em modelos eficazes, abundantes e baratos para atendimento a um mundo onde, na contrapartida a essa ideia, existe uma sociedade onde a demanda do consumo de energia elétrica vem aumentando de forma sem precedentes na história, o que exige uma ampla discussão e providências à cerca do emprego de novos e sustentáveis modelos de geração de energia elétrica.

Diversos estudos recentemente publicados como o conduzido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (Schreiber, 2007) indicam que a crescente carência mundial por energia elétrica aliada às questões de sustentabilidade não terão seus entraves solucionados por uma única solução ou adoção de uma alternativa energética limpa de forma singular e isolada, e sim por uma aposta em tecnologias amplamente estudadas e desenvolvidas pelo homem no que diz respeito ao uso de fontes de energias renováveis como o Sol, o vento, a água, a biomassa e os bio-resíduos.

É importante assegurar a garantia inquestionável e permanente do fornecimento ininterrupto de energia elétrica do Brasil, descentralizar a geração hidrelétrica com o uso da cogeração sustentável e encontrando nessa opção uma das saídas para a solução parcial à recente situação de estiagem que ocasionou baixa dos reservatórios d'água, ou seja, o uso da energia elétrica coloca em risco o abastecimento de água de parte do país, por ser fundamentalmente dependente da geração em hidroeletricidade (81,9%) segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2012.

O município de Campo Grande produz hoje 757 toneladas de lixo domiciliar diariamente, sendo que desse montante 57,2% (433 toneladas) é de matéria orgânica putrescível. Essa matéria orgânica é responsável pela liberação de Biogás na atmosfera, gás esse composto de 50 a 90% do seu volume (vol.) de metano (CH_4), 10 a 50% vol. de gás carbônico (CO_2) e 1 a 5% (vol.) de hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S) e oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2) (ALVES, 2000). Dessa composição o metano é o substrato que interessa ao nosso estudo por ser ele o principal agressor ao meio ambiente e a matéria prima utilizada para queima e geração de energia elétrica bem como geração de créditos de carbono. Quanto maior a concentração de metano no Biogás maior o seu poder calorífico. Por ser uma fonte de energia renovável, a recuperação para uso energético do Biogás apresenta vantagens sociais, estratégicas e tecnológicas significativas. Levando em consideração que os lixões, aterros sanitários e aterros controlados produzem altas quantidades de Biogás em função dos processos de biodigestão permanente, emitindo esse gás na atmosfera e colaborando para o aquecimento global, a sua captação e comercialização no mercado de energia e no mercado de crédito de carbono tornam-se opções comerciais duplamente interessantes onde por um lado encontra-se a opção da venda de energia e por outro a geração de crédito de carbono. Vários países da União Europeia comprometidos com a redução das emissões de gases efeito estufa estão investindo significativamente em projetos de geração de energia com Biogás (Nota Técnica VII – CENBIO, 2001).

Com o objetivo de explorar formas de aproveitamento do Biogás proveniente da biomassa existente nos resíduos sólidos urbanos, esse trabalho propõe um estudo de aproveitamento dessa matéria prima para a geração de energia elétrica trazendo como valor agregado a redução da emissão de GEE, geração de emprego, descentralização da geração de energia elétrica, corroborar para o saneamento urbano, proporcionar menor rejeição às instalações de tratamento de lixo urbano e por fim, apresentar sugestões para a correta

destinação, para os resíduos sólidos urbanos orgânicos e seus produtos energéticos da cidade de Campo Grande capital do estado de Mato Grosso do Sul.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Histórico do Biogás

A maior parte das pessoas que se interessa pela pauta “geração de energia limpa”, “sustentabilidade” e “fontes renováveis”, tomou recém-conhecimento da existência do Biogás, da sua origem e de sua utilidade, porém, o seu funcionamento ainda é um mistério para a maioria delas. Por ser uma fonte de energia não muito divulgada e pelo seu uso ser concorrente ao petróleo e aos combustíveis fósseis, o Biogás permanece no anonimato para a maior parte da população. Os micro-organismos que produzem o Biogás estão entre as primeiras formas de vida existentes no planeta Terra. Eles surgiram cerca de 3 bilhões de anos antes das plantas, animais e matéria orgânica que se transformaram no petróleo extraído nos dias atuais.

O Biogás, também conhecido como “gás do pântano”, é uma mistura de gases composta em sua maior parte por metano (CH_4), que é produzido durante a decomposição natural de matéria orgânica num ambiente anaeróbico. O metano é o mesmo componente inflamável encontrado no gás natural, um combustível fóssil que leva cerca de 65 milhões de anos para ser produzido, ao passo que o Biogás começa a ser produzido num período de 48 a 72 horas após a deposição de matéria orgânica (Weisman, W. Gas from the Past: Biogas 101, 2011).

Evidências históricas apontam que o uso mais antigo registrado do Biogás data do século 10 (dez) antes de Cristo (A.C.) na Assíria (hoje região do Iraque), onde era utilizado para aquecimento de águas para banhos. Outros registros históricos apontam também que essa finalidade do Biogás se manteve na antiga Pérsia no século 16 A.C. (Lusk, 1998). Considerando que é mais fácil produzir fogo utilizando o Biogás e não a madeira como combustível, é possível que o uso do Biogás para aquecimento remonte o período Neolítico.

Jean Baptista van Helmont foi o primeiro estudioso a constatar por volta de 1630 que um gás inflamável era formado a partir de matéria orgânica em decomposição. Em 1667 Thomas Shirley no Reino Unido descreveu o vazamento de um gás inflamável de uma mina de carvão na cidade de Wigan. Benjamin Franklin descreveu no ano de 1764 que foi capaz de incendiar a superfície de um lago lamacento na cidade de Nova Jersey e essa experiência foi

registrada e relatada numa carta encaminhada a Joseph Priestley na Inglaterra, já este publicou suas experiências com o “gás inflamável” em 1790 (Tietjen, 1975).

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta concluiu com seus estudos em 1776 que havia uma relação direta entre a quantidade de matéria orgânica em decomposição com a quantidade de gás inflamável que se era obtida. Volta foi o primeiro pesquisador a descrever de forma científica a formação do gás inflamável em sedimentos depositados no fundo de lagos e pântanos. Seus estudos intitulados “*Aria infiammabile nativa delle Paludi*”, como mostrado na Figura 1, foram publicados na Itália no mesmo ano de sua descoberta.

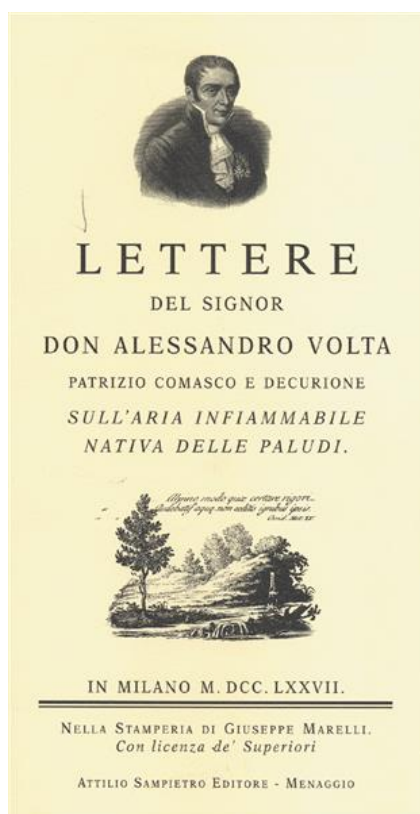


Figura 1 - Obra de Alessandro Volta *Aria infiammabile nativa delle Paludi*

A importância das descobertas de Volta foi amplamente reconhecida pela comunidade científica da época, prova disso foi que seu material foi totalmente traduzido para o idioma alemão apenas 2 anos após a sua publicação (Volta, 1778). No ano de 1804, Dalton escreveu a fórmula correta do gás metano, principal componente do biogás, até então conhecido por “gás inflamável”. A publicação mais antiga que relata a influência da temperatura na formação de

metano foi registrada por Popoff (1875). Sua descoberta foi que os sedimentos de um rio poderiam formar biogás à uma temperatura inferior limite de 6°C e que com o aumento da temperatura até um máximo de 50°C a produção de gás era acelerada, Popoff observou também em seus estudos que a composição dos gases não mudava com a variação de temperatura.

A primeira planta biodigestora foi construída em 1859 na cidade de Bombaim na Índia (Meynell, 1976). O experimento realizado em 1883-84 por Louis Pasteur coletou gás a uma temperatura de 35°C. Na ocasião, o volume coletado foi tão grande que Pasteur concluiu que sob determinadas circunstâncias a fermentação anaeróbica de dejetos deveria ser capaz de suprir as necessidades de aquecimento e iluminação da cidade de Paris (Titjen, 1975). No ano de 1895 a digestão anaeróbica chegou à Inglaterra, o biogás era recuperado de uma estação de tratamento de esgoto e utilizado para abastecer a iluminação da cidade de Exeter (McCabe, 1957).

Baseado na informação de que temperaturas mais elevadas estimulavam a formação de biogás, vários sistemas de aquecimentos foram desenvolvidos com o propósito de elevar a temperatura dos digestores, até que Imhoff and Blunk patentaram entre os anos de 1914 a 1921 diversos procedimentos como trocadores de calor de membrana dupla, adição de água quente ao dejetos fresco, agitação do conteúdo do digestor ou ingestão de biogás quente, mesmo assim, problemas técnicos até então desconhecidos impossibilitaram o desenvolvimento completo de suas invenções. Os trocadores de calor internos feitos de cobre sofriam corrosão em um curto espaço de tempo. A adição de água ou vapor levava a uma indesejada diluição dos dejetos. Tais empecilhos foram superados no ano de 1926 pelo primeiro digestor continuamente aquecido na cidade de Essen na Alemanha (Roediger, 1955).

O desenvolvimento da microbiologia como ciência, permitiu que Buswell em 1930 identificasse a bactéria e os parâmetros que incrementavam a produção de metano (Buswell and Hatfield, 1936). Buswell realizou experimentos básicos de combinação de esterco animal com resíduos orgânicos para concluir seus experimentos.

A instalação da primeira planta de aproveitamento de larga escala do Biogás aconteceu no ano de 1938 na Argélia por Isman e Ducellier (van Brakel, 1980) e funcionava com resíduos sólidos urbanos, no entanto, o desenvolvimento e a propagação do emprego da tecnologia de larga escala para o Biogás foi interrompida em ocorrência da Segunda Guerra Mundial. Na Europa o racionamento do fornecimento de energia em função dessa guerra estimulou o

desenvolvimento de instalações de biodigestores anaeróbicos agrícolas, alguns cuja vida útil ultrapassou os 20 anos de funcionamento (LUSK, 1998). Nos anos 90 já havia mais de 600 biodigestores rurais em operação na Europa, a chave para o sucesso da sua ampla utilização vem da sua simplicidade de funcionamento. Outro fator que influenciou o sucesso da utilização dos biodigestores rurais europeus foram as regulamentações ambientais locais e outras políticas que regem o uso da terra e descarte de resíduos que tem sido uma preocupação global desde então.

Na década de 90 o país com maior experiência no uso de biodigestores em larga escala era a Dinamarca, onde na época eram utilizados 18 grandes plantas de biodigestão em operação conforme mostrado na figura 2. Na maioria delas era realizada a biodigestão de dejetos animal, resíduos orgânicos industriais e resíduos sólidos urbanos (selecionados na fonte).



Figura 2 – Biodigestor dinamarquês de larga escala.

O compromisso do país com o modelo de geração de energia pela digestão anaeróbica aumentou com uma iniciativa de incentivo fiscal do governo, onde os geradores de energia através do biogás recebiam benefícios fiscais, uma espécie de “valor verde”. A medida apresentou resultados, fazendo com que a biomassa no ano de 2012 representasse um montante de 15% do total da energia produzida no país.

No continente Europeu a produção de energia baseada em biogás se concentra em 04 países, são eles: Alemanha, Suécia, Dinamarca e Áustria, nem por isso, o resto do continente encontra-se com baixa produção de biogás. A tabela 1 mostra o número de instalações e a quantidade de energia produzida respectivamente até o final do ano de 2006 de 8 dos países que mais produzem biogás no continente Europeu.

Tabela 1 - Número de Biodigestores instalados em alguns países da Europa. (IEA, 2007)

Países	Nº de instalações em operação
Alemanha	3500
Reino Unido	1052
Itália	> 67
Dinamarca	80
Áustria	524
Suécia	163
França	203
Holanda	40
Suíça	620

A tabela 2 traz o resumo dos fatos históricos do biogás.

Tabela 2 - Principais marcos históricos do Biogás

Ano	Marco Histórico
Séc. 16 A.C.	Utilização do Biogás para aquecimento de águas para banhos.
Séc. 10 A.C.	Utilização do Biogás para mesma finalidade na Assíria.
1630	Helmont constata a formação de gás a partir de matéria orgânica em decomposição.
1667	Thomas Shirley detectou a presença de gás inflamável em minas.
1764	Benjamin Franklin incendiou a superfície de um lago provando a existência de gás inflamável.
1776	Volta comprova a relação da quantidade de matéria com a quantidade de gás.
1804	Dalton escreve a fórmula correta do Gás Metano.
1859	Construção da primeira planta biodigestora na Índia.
1875	Popoff relata a influência da temperatura na formação de Biogás.
1883	Louis Pasteur conclui com seu experimento a possibilidade de aquecimento e iluminação de Paris através do Biogás.
1895	Utilização de Biogás recuperado de estação de tratamento para iluminação na cidade de Exeter na Inglaterra.
1914	Imhoff and Blunk patenteiam sistemas de aquecimento para biodigestores.
1930	Buswell identifica a bactéria produtora de metano.
1938	Instalação da 1ª planta de Biogás em larga escala na Argélia.
1990	Destaque para a implementação da “política verde” na Dinamarca, estimulando o uso de energia renovável através do Biogás.

1.2 Biodigestão

Desde a descoberta de Alessandro Volta em 1776 surgiram diversas constatações e desenvolvimentos tecnológicos que têm permitido, desde o fim do século XVIII, despertar o interesse científico sobre o processo de biodigestão propriamente dito (Santino, 2006).

No entanto, apenas no ano de 1981 surgiu o primeiro esquema quantificado de digestão anaeróbia em termos de porcentagem do fluxo de Carência Química de Oxigênio (CQO) e de energia consumida em cada fase desse esquema foi elaborado por Mc Carty (Santino, 2006) de forma simplificada, porém, admite a síntese do processo em três etapas:

- Hidrólise e Fermentação;
- Oxidação;
- Metanogênese;

A digestão anaeróbica metanogênica é possível devido ao surgimento equilibrado e simbiótico dos micro-organismos que nascem nessas fases. As bactérias anaeróbicas e as facultativas, que intervêm na fermentação ácida, tornam os substratos orgânicos quimicamente disponíveis para a etapa seguinte, eliminando ao mesmo tempo todo o oxigênio presente que é tóxico para as bactérias metanogênicas (Santino, 2006).

Em compensação, na metanogênese os ácidos voláteis e o hidrogênio são convertidos em subprodutos gasosos (CH_4 e CO_2) que evitarão a elevação da acidez do meio, por parte do CO_2 , e diminuirão a pressão parcial do hidrogênio possibilitando o seguimento do processo de degradação da matéria orgânica.

A Figura 3 esquematiza de forma sintética e sistematizada a relação de simbiose e sintropia existente no processo de biodigestão, onde:



Figura 3 – Etapas do processo de Digestão Anaeróbica (adaptado de Gujer e Zehnder)

1. Hidrólise de proteínas, hidratos de carbono e lipídios que serão transformados em monômeros, respectivamente: aminoácidos, açúcares e ácidos graxos de cadeia longa;
2. Fermentação de aminoácidos e açúcares;
3. Oxidação anaeróbia dos ácidos graxos de cadeia longa;
4. Oxidação anaeróbia dos produtos intermediários (ácidos voláteis) originando acetato e hidrogênio;
5. Homoacetogênese;
6. Conversão do acetato em metano pelas bactérias metanogênicas;
7. Conversão do hidrogênio a metano pelas bactérias metanogênicas hidrogenotróficas.

Essas sete etapas podem ser agrupadas em quatro sequências de síntese do processo de digestão anaeróbia, mostradas na figura 3: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

1.2.1 Hidrólise

A primeira etapa da degradação anaeróbica, é a hidrólise de compostos orgânicos complexos como os hidratos de carbono, as proteínas, os lipídios que no fim dessa etapa resultam em compostos solúveis de cadeias menores. Nessa etapa as proteínas, os polissacarídeos, os lipídios e os ácidos nucleicos resultam respectivamente em aminoácidos, monossacarídeos, ácidos graxos e purinas e pirimidinas através da ação de bactérias hidrolíticas, conforme demonstrado na figura 4.

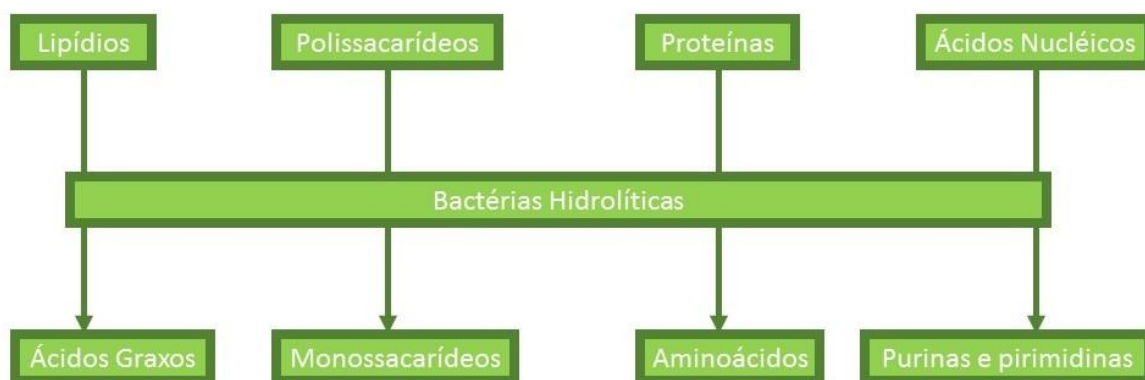


Figura 4 - Hidrólise, esquema representativo.

Na hidrólise a conversão de compostos insolúveis, tais como lenhina e o material celulósico, é um dos fatores limitantes do processo global. A hidrólise destas matérias está diretamente ligada à quantidade de carbono disponível para a produção de biogás, bem como, quantidade de nutrientes e tamanhos das partículas. Já para os resíduos em forma de partículas, provocam a inibição do processo em função do acúmulo excessivo de ácidos orgânicos voláteis em função de suas elevadas dimensões o que reduz a sua superfície de contato com os microorganismos (Ferreira, 2010).

Diversas obras (Chynoweth, 1987; Mata-Alvarez, 1987; Boone, 1993; Palmowski, 2000; Alvarez 2000; Mosier, 2005; Wyman, 2005; Siegert, 2005; Miadenovska, 2006; Santino, 2006; Lehtomäki, 2006; Ward, 2008; Hendriks, 2009) defendem que, esta fase, é a que limita o processo de digestão anaeróbica, dado que, sem a ocorrência da hidrólise dos compostos mais complexos, todo o processo fica comprometido, impedindo a produção do biogás.

A hidrólise é realizada por organismos exclusivamente anaeróbicos, bactérias pertencentes aos grupos: *Clostridium*, *Bacillus* e *Peptococcus* na digestão das proteínas, *Clostridium*, *Staphilococcus* e *Proteus* na digestão dos carboidratos e *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphilococcus* na digestão dos lipídios (Santino, 2006), que dão origem a compostos de cadeias mais simples.

1.2.2 Acidogênese

A acidogênese é um processo que se inicia a partir do momento que os produtos da hidrólise encontram-se disponíveis no sistema, durante esse processo, esses produtos serão consumidos por micro-organismos acidogênicos que, por sua vez, entregará ao sistema o produto dessa reação, sendo eles: ácidos orgânicos voláteis (AOV) e álcoois conforme ilustra a Figura 5.

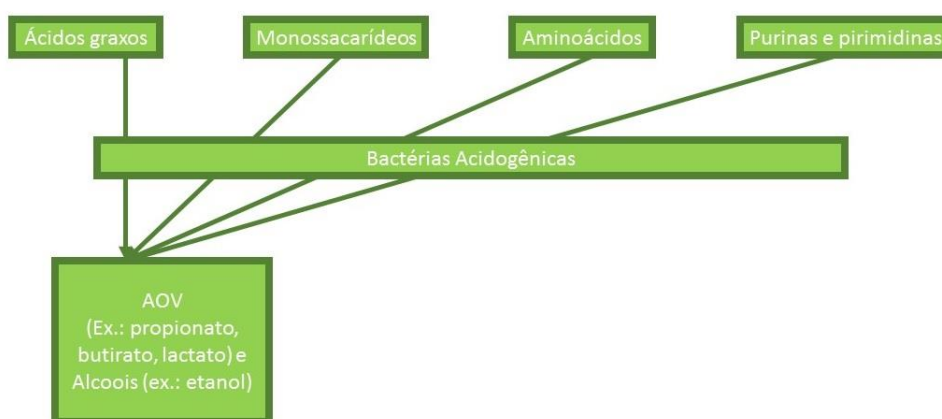


Figura 5 - Acidogênese, esquema ilustrativo.

Representada por 90% do total das bactérias, a população acidogênica é composta em sua maior parte por bactérias fermentativas anaeróbicas obrigatórias, existindo ainda a presença de algumas bactérias facultativas como as *Pseudomonas* e as *Streptococcus* (Ferreira, 2010).

A proporção e a variedade de tipos de bactérias acidogênicas envolvidas na cadeia da digestão anaeróbica estão diretamente ligadas com o tipo de composição do substrato orgânico em processo de digestão (Alves, 1998). Da mesma forma, o produto da acidogênese como resultado desse processo são essenciais para a continuidade e equilíbrio da cadeia, pois, estão imediatamente ligados à eficácia e ao equilíbrio da metanogênese.

1.2.3 Acetogênese

Na acetogênese realiza-se a conversão dos ácidos orgânicos voláteis, dos ácidos graxos, dos monossacarídeos e dos aminoácidos (purina / pirimidina) em hidrogênio, acetato, formiato, dióxido de carbono, metanol e metilaminas. Um fator danoso à esta etapa e prejudicial à toda cadeia é a alta concentração de hidrogênio produzida, caso este não seja consumido pelas bactérias metanogênicas que executarão a próxima etapa da cadeia.

Existem dois tipos de bactérias envolvidas nessa etapa: as homoacetogênicas (*Acetonaerium woodii* e *Colstridium acticum*) que produzem hidrogênio, dióxido de carbono, acetato, formiato e metanol a partir dos substratos multicarbonados, que são respectivamente ácidos graxos, monossacarídeos, aminoácidos, purinas / pirimidinas, ácidos orgânicos voláteis e álcoois. E existem também as bactérias sintróficas (*Syntrophobacter wolini*), produtoras de hidrogênio molecular (H_2), estas por sua vez produzem apenas hidrogênio a partir dos mesmos substratos multicarbonados, porém estas últimas são termodinamicamente desfavorecidas em condições normais, para se tornarem exergônicas a concentração de hidrogênio terá de ser da ordem de 10^{-4} atm ou inferior (Ferreira, 2010).

Em casos de ocorrência de pressões muito baixas de hidrogênio, ocorrerá a transformação do propionato em acetato, o que acarretará no acúmulo de propionato no digestor, provocando inibições no processo (Ferreira, 2010).

O consumo do hidrogênio resultante de todo o processo é de responsabilidade das bactérias redutoras de sulfato e das bactérias metanogênicas, caso exista sulfatos nos substratos submetidos ao processo de digestão anaeróbica conforme demonstrado na figura 6.

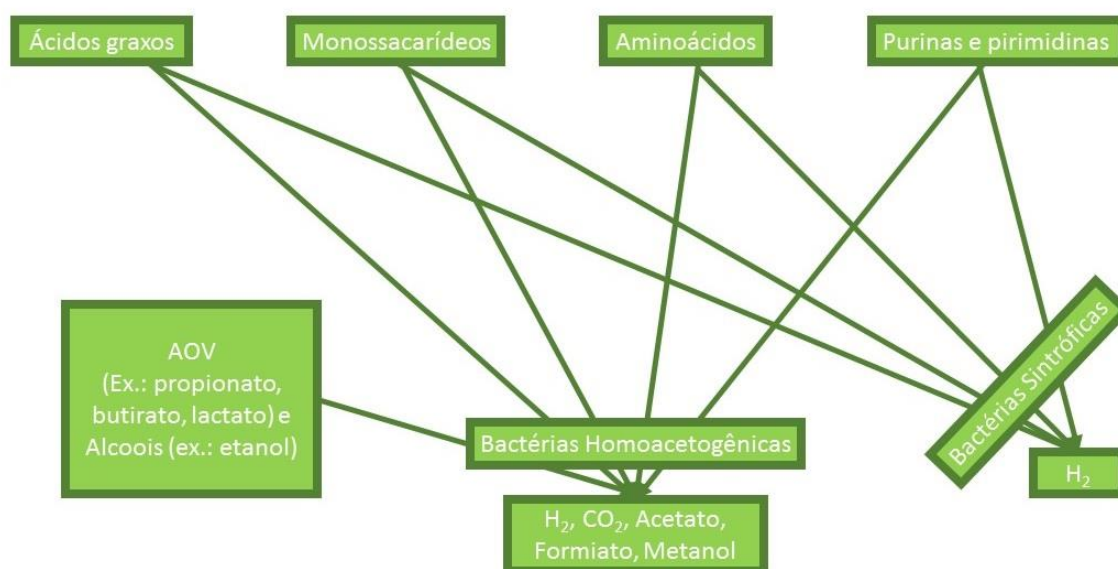


Figura 6 - Acetogênese, esquema ilustrativo.

1.2.4 Metanogênese

No final da cadeia de digestão anaeróbica ocorre a metanogênese, produzindo metano e dióxido de carbono originados a partir da redução de hidrogênio / dióxido de carbono e da descarboxilação do ácido acético (Figura 8) (O' Flaherty *et al.*, 2006), ainda de acordo com Solera (2008) em torno de 70% do metano produzido nesta etapa é originado do acetato.

As bactérias envolvidas nessa etapa são metanogênicas do domínio *Archea*, nesse caso, se incluem no grupo trófico especializado na sintetização desta última etapa da cadeia, levando os produtos das etapas anteriores da digestão anaeróbica a um dos seus produtos finais, o metano (Pereira, 2003). Esse grupo de micro-organismos ainda pode ser dividido em dois subgrupos menores o grupo das hidrogenofílicas (*Methanospirillum*) e o grupo das acetoclásticas (*Methanosarcina* e *Methanothrix*) que diferem entre si pelas suas características morfológicas e de utilização de substrato.

O processo metabólico das hidrogenofílicas é responsável pela formação do biogás fazendo uso basicamente de dois substratos o hidrogênio e o dióxido de carbono (Ferreira, 2010). Com um papel mais relevante nessa etapa da cadeia, as bactérias acetoclásticas através

do seu metabolismo, além de produzirem metano também realizam o controle do pH da etapa da acidogênese (fermentação). Esse processo se dá através da utilização do ácido acético como substrato pela bactéria para formação do dióxido de carbono, que, quando dissolvido produz uma solução de bicarbonato, levando o pH próximo à neutralidade (Ferreira, 2010).

Estima-se que em torno de 70% do metano é proveniente da descarboxilação do acetato e 30% seja proveniente da remoção do hidrogênio por parte das bactérias metanogênicas (Santino, 2006). A metanogênese é essencial para que a acetogênese não seja inibida, pois a remoção do hidrogênio, como mostrado na figura 7, é fundamental para que as bactérias sintróficas permaneçam em atividade.

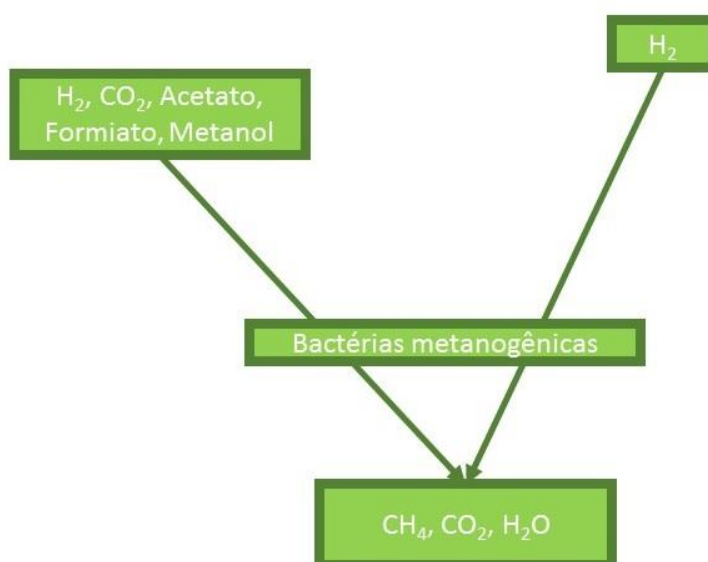


Figura 7 - Metanogênese, esquema ilustrativo.

As bactérias acidogênicas possuem taxas de crescimento de população muito mais elevadas do que as bactérias metanogênicas, em outras palavras, os micro-organismos responsáveis pela formação de ácidos orgânicos voláteis encontram-se em maior número em comparação aos formadores de metano, sendo dessa forma, a condição de acidez prevalece no ambiente o que provocará a diminuição da atividade das bactérias metanogênicas, provocando a inibição do processo. Nesse caso são necessárias a adoção de medidas que realizem o controle de alcalinidade e de concentração de ácidos orgânicos voláteis.

Uma das características fundamentais que levam a compreensão do metabolismo anaeróbico é a sua termodinâmica. Na tabela 3 estão representadas algumas das principais reações de redução e oxidação, com suas respectivas energias livres de Gibbs.

Tabela 3 - Quantidade de energia livre de Gibbs para as reações de digestão anaeróbicas.

Reação			ΔG ₀ (KJ)
#	Oxidação		
•	Propionato → Acetato	CH ₃ CH ₂ COO ⁻ + 3H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + HCO ₃ + 3H ₂	+76,1
•	Butirato → Acetato	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COO ⁻ + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + HCO ₃ + 2H ₂	+48,1
•	Etanol → Acetato	CH ₂ CH ₂ OH + H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + 2H ₂	+9,6
•	Lactato → Acetato	CH ₃ CHOHCOO ⁻ + 2H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 2H ₂	-4,2
•	Lactato → Propionato	3CH ₃ CHOHCOO ⁻ → 2CH ₃ CH ₂ COO ⁻ + CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + HCO ₃ ⁻	-165
•	Lactato → Butirato	2CH ₃ CHOHCOO ⁻ + 2H ₂ O → CH ₃ CH ₂ CH ₂ COO ⁻ + 2HCO ₃ ⁻ + 2H ₂	-56
•	Acetato → Metano	CH ₃ COO ⁻ + 2H ₂ O → HCO ₃ ⁻ + CH ₄	-31
•	Glicose → Acetato	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 4H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + 2HCO ₃ ⁻ + 2H ₂	-206
•	Glicose → Etanol	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2H ₂ O → 2CH ₃ CH ₂ OH + 2HCO ₃ ⁻ + 2H ⁺	-226
•	Glicose → Lactato	C ₆ H ₁₂ O ₆ → 2CH ₃ CHOHCOO ⁻ + 2H ⁺	-198
•	Glicose → Propionato	C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2H ₂ → 2CH ₃ CH ₂ COO ⁻ + 2H ₂ O + 2H ⁺	-358
Redução			
•	HCO ₃ → Acetato	2HCO ₃ ⁻ + 4H ₂ + H ⁺ → CH ₃ COO ⁻ + 4H ₂ O	-104,6
•	HCO ₃ → Metano	HCO ₃ ⁻ + 4H ₂ + H ⁺ → CH ₄ + 3H ₂ O	-135,6
•	Sulfato → Sulfureto	SO ₄ ²⁻ + 4H ₂ + H ⁺ → HS ⁻ + 4H ₂ O CH ₃ COO ⁻ + SO ₄ ²⁻ + H ⁺ → 2HCO ₃ ⁻ + H ₂ S	-151,9 -59,9
•	Nitrato → Amônia	NO ₃ ⁻ + 4H ₂ + 2H ⁺ → NH ₄ ⁺ + 3H ₂ O CH ₃ COO ⁻ + NO ₃ ⁻ + H ⁺ + H ₂ O → 2HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺	-599,6 -511,4
•	Nitrato → Nitrogênio Gasoso	2NO ₃ ⁻ + 5H ₂ + 2H ⁺ → N ₂ + 6H ₂ O	-1120,5

Nesse viés é importante entender que as reações só são favoráveis se a energia livre de Gibbs for negativa, ou seja, o produto da reação deverá ter menos energia que seus substratos (Hoh e Cord-Ruwisch, 1996).

Esta fase da biodigestão diminui a velocidade da cadeia do processo principalmente pelo fato da formação de bolhas de metano e de dióxido de carbono ao redor das bactérias, isolando-as do contato direto com a matéria orgânica. Por esse motivo a agitação do material no interior do biodigestor é uma solução altamente recomendável, podendo ser utilizado pás em seu interior para a execução da tarefa.

1.3 Biodigestores

A energia, sempre foi reconhecidamente protagonista no desenvolvimento de civilizações. Após a revolução industrial, ocorrida no século XIX, o mundo se modernizou especialmente pela descoberta de novas fontes de energia (ALVES et al, 2009).

Dentre essas “descobertas” figura-se o biodigestor, também comumente conhecido como digestor ou biorreator, que por definição é uma câmara de fermentação fechada, onde a biomassa sofre a digestão pelas bactérias anaeróbicas produzindo biogás. Ou seja, trata-se de um local completamente fechado, isolado e vedado com o objetivo de impedir qualquer entrada de ar. Esse local pode ser construído de alvenaria fazendo uso de concreto ou de outros materiais. Nesse ambiente deposita-se o substrato (matéria orgânica) a ser degradado através do processo de fermentação.

Existem diversos tipos de biodigestores, dentre eles os mais populares são os modelos canadense, o indiano e o chinês. Cada um desses três tipos possui sua característica peculiar que o diferencia dos demais, porém, todos têm o mesmo objetivo que é o de propiciar um ambiente que esteja livre da presença do ar, criando uma condição anaeróbica para que o substrato ali depositado seja degradado, produzindo biofertilizante e biogás que posteriormente pode ser utilizado para calefação e também para geração de energia elétrica (GASPAR, 2003).

Os biodigestores podem ser separados em dois grupos de acordo com a alimentação de substrato de matéria orgânica: biodigestor de forma contínua e biodigestor de forma descontínua ou batelada (DESGANUTTI, et al 2002). É importante salientar que a espécie de bactéria atuante na digestão existente no biodigestor é sensível à presença de ar, por isso a

presença do mesmo se torna um risco para o processo, sendo imprescindível a vedação do biodigestor.

O biofertilizante, que é a matéria orgânica resultante da biomassa após a fermentação, pode ser usado como adubo orgânico para o fortalecimento do solo e o crescimento de plantas. A vantagem é que na sua composição estão presentes altas concentrações de nutrientes livres de parasitas, vírus e bactérias. Seu uso beneficia a recuperação de solos empobrecidos pela utilização de adubos inorgânicos, tornando-se uma ferramenta poderosa para o combate a erosão o fato do mesmo possuir grande umidade faz com que o solo se mantenha enriquecido especialmente em épocas de longas estiagens.

A biodigestão anaeróbica realizada nos biodigestores é uma importante solução para as questões de poluição ambiental, pois além de uma das suas características ser a de reduzir o caráter poluidor dos processos de tratamento de resíduos, torna a opção de recuperação de energia na forma de biogás e a reciclagem dos efluentes uma realidade (LUCAS JUNIOR, 1998). Esse processo de obtenção de energia, não requer gastos de energia, portanto, no final obtém-se um saldo positivo de 100% (ALVES, et al 1997).

Pode-se usar para esse tipo de fermentação: esterco bovino, suíno, equino, caprino, de aves, esgoto doméstico, vinhoto, plantas herbáceas, rejeitos agrícolas e capim em geral. Nesse sentido as bactérias agem em silêncio em favor do progresso e conforto da humanidade produzindo energia, fertilizando o solo e evitando contaminação da água e do solo. (ALVES, et al 1997).

O Brasil ocupa hoje a 1ª posição no ranking global de produção de carne bovina e a fermentação que ocorre no sistema digestivo de um bovino de corte produz de 40 a 70 kg/animal/ano de metano (CH_4). É importante salientar que o metano possui um potencial 25 vezes maior de contribuição para o efeito estufa quando comparado ao dióxido de carbono (CO_2) (MELADO, 2007). Já um bovino leiteiro, em lactação de alta produção, gera entre 100 a 150 Kg de metano por ano.

Aliada à produção de carne bovina existe um aumento crescente da população de suínos no Brasil, que hoje chega ao número de 36,5 milhões de animais. Com esses valores torna-se necessária a adoção de técnicas para lidar com os resíduos produzidos por esses animais inseridos nessa cadeia produtiva, objetivando qualidade ambiental, reutilização dos resíduos e efluentes gerados e a recuperação de energia em forma de biogás como dito anteriormente

(LUCAS JUNIOR, 1998). O problema existente na criação de suínos em regime de confinamento é a grande quantidade de dejetos gerados por esses animais numa área reduzida.

Uma velha prática adotada era o lançamento desses dejetos em cursos d'água feito de forma controlada, o que atualmente passou a se tornar uma ameaça para o meio ambiente, pois ocasiona a mortalidade acentuada de peixes e favorece a eutrofização. A eutrofização é um processo sofrido por rios e lagos quando recebem uma alta carga de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, o que limita a atividade biológica causando um processo de degradação (BRANCO, 1971).

Uma característica do gás metano é a de ser antidetonante, assim, ele tem a capacidade de tolerar nos motores uma relação volumétrica maior que as melhores gasolinas. É altamente inflamável e produz uma chama pouco visível, por ser menos denso que o ar no caso de vazamentos a tendência é escapar para cima. Na natureza quando se desprende de regiões subterrâneas, inflama-se facilmente quando em contato com o ar, o que provoca explosões denominadas grisú.

As condições consideradas ótimas para a fermentação no digestor são:

- Impermeabilidade do ar: em nenhuma das etapas da digestão biológica que ocorre no digestor existe demanda de oxigênio por parte dos microrganismos, pois eles são altamente sensíveis ao mesmo. A digestão do substrato na presença de oxigênio produz dióxido de carbono ao invés de metano, o que reforça a necessidade de vedação do biodigestor;
- Temperatura: em torno de 30°C, alterações muito bruscas na temperatura do ambiente afeta a atividade bacteriana, tornando-a lenta ou em alguns casos até mesmo interrompendo o processo;
- Nutrientes: Nitrogênio, sais orgânicos e carbono, observando-se sempre que a relação Carbono/Nitrogênio (C/N) deve ser conservada no patamar entre 20:1 e 30:1;
- Água: a concentração de água do substrato deve manter-se desejavelmente em torno de 90% do peso total do conteúdo podendo sofrer alteração de acordo com a tecnologia adotada;

- Substancias nocivas: NaC, Cu, Cr, NH₃, K, Mg, Ni. São substâncias nocivas, porém, podem atuar harmonicamente com o processo desde que mantidas em quantidades limitadas;
- Tempo de retenção: de 35 a 45 dias em linhas gerais;
- Demais substâncias: não se deve colocar fertilizantes fosfatados na ausência de ar, caso contrário, haverá formação de fosfina, substância tóxica de contato letal.

O Brasil possui condições de clima que favorecem o uso e exploração desse tipo de tecnologia produtora de energia a partir do Biogás, o que seria uma alternativa ao uso do gás de botijão e dos combustíveis líquidos no meio rural e que, conseqüentemente, diminuiria a demanda da importação dos derivados de petróleo.

A China é um país que investe fortemente nesse tipo de tecnologia, e com atuais 7,2 milhões de biodigestores em produção. A quantidade de energia elétrica gerada pelos mesmos é equivalente de cinco usinas de ITAIPÚ, ou ainda, 48 milhões de toneladas de carvão mineral (BARUFI, et al 2002).

Além da produção do Biogás para a utilização do seu alto poder energético, os resíduos de biodigestão apresentam alta qualidade para o uso como fertilizante agrícola, pois há o aumento no teor de nitrogênio e demais nutrientes em consequência da perda de carbono, diminuição da relação C/N da matéria orgânica o que melhora as condições do material para fins agrícolas, maiores facilidades de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao material já se encontrar em avançado grau de decomposição, o que aumenta sua eficiência e solubilização parcial de alguns nutrientes, poupa as matas da retirada de lenha, reduz custo de transporte e poluição por hidrocarbonetos vindos do petróleo (BARUFI, et al 2002).

No que diz respeito à combustão do biogás, existem duas situações possíveis: **na combustão completa** do metano encontrado no Biogás, não há produção de gases tóxicos, com exceção do dióxido de carbono que contribui de forma positiva para a manutenção da temperatura global, porém, se presente em grandes quantidades, o mesmo favorece o aumento do efeito estufa.

Já na **combustão incompleta** ocorrida pela carência de oxigênio, é produzido monóxido de carbono (CO), que é um gás venenoso que em contato com o sangue é aceito por ele no lugar do oxigênio ligando-se à hemoglobina entrando no processo de hematose, o que acarretaria a

morte do indivíduo por asfixia. Além dessa situação, a fuligem provocada pela combustão incompleta penetra no sistema respiratório provocando danos à saúde.

Os modelos de biodigestores são construídos para se adaptar à realidade e às necessidades locais. Numa breve descrição do funcionamento dos biodigestores vê-se que o modelo indiano se caracteriza por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode ou não estar mergulhada sobre a biomassa que já se encontra em fermentação, ou em uma lâmina de água externa. Esse tipo de biodigestor possui uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras conforme mostrado na figura 8. Essa divisão tem a função de fazer o substrato circular pelo interior do sistema de fermentação (DEGANUTTI, et al 2002).

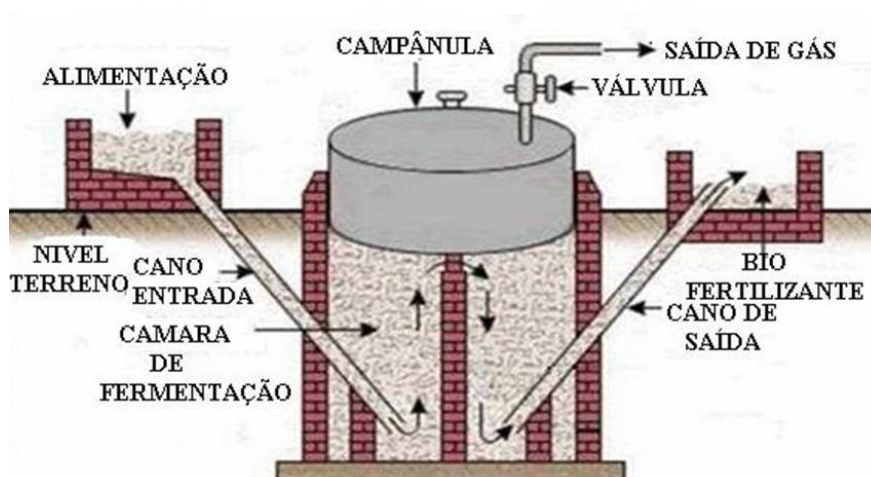


Figura 8 - Modelo de Biodigestor Indiano

O modelo chinês de biodigestor tem como característica uma câmara cilíndrica onde ocorre a fermentação, e a parte superior em forma de abóbada onde fica retido o biogás produzido, como mostrado na figura 9.

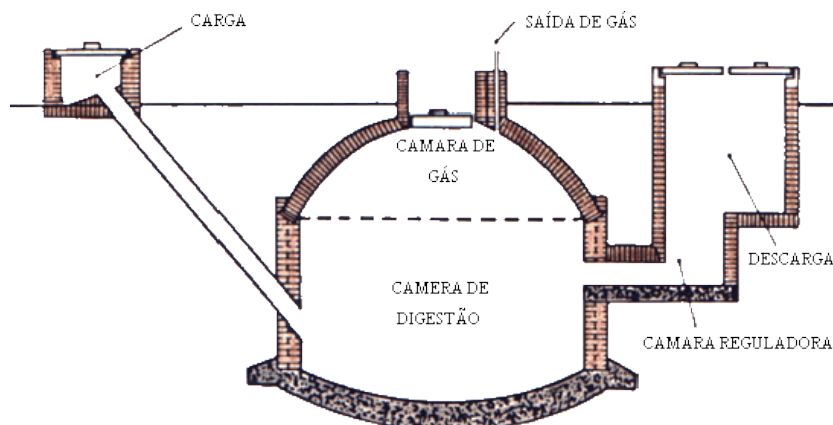


Figura 9 - Modelo de Biodigestor Chinês

O modelo canadense de biodigestor trabalha com uma lona de PVC em um tanque revestido e coberto pela mesma. Totalmente vedado, esse tipo de biodigestor pode ser alimentado continuamente ou por batelada. Como dito anteriormente, dependendo das necessidades locais.

Esse é o tipo mais utilizado e difundido no Brasil e sua característica mais forte é sua fácil adaptação para o uso em grandes ou pequenas propriedades. Sua ilustração pode ser verificada na figura 10.

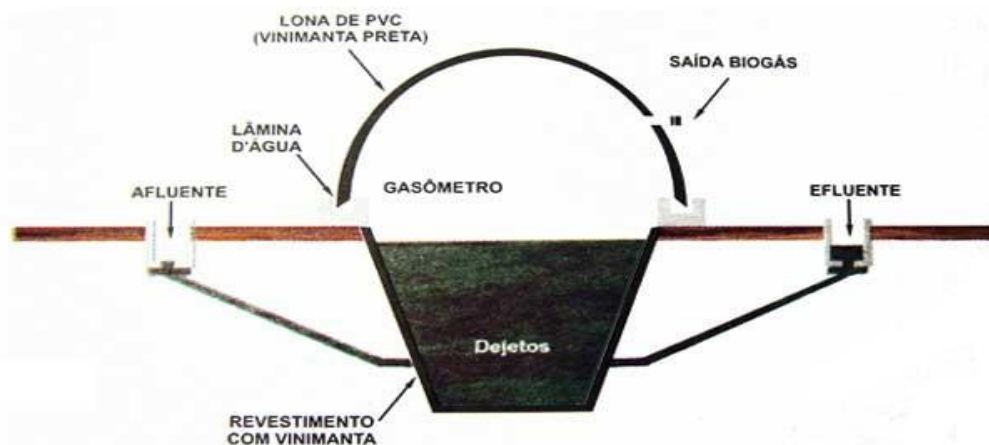


Figura 10 - Modelo de Biodigestor Canadense

1.3.1 Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA)

A sigla UASB em inglês significa Upflow Anaerobic Sludge Blanket, em português, Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente, no Brasil esse tipo de biodigestor também é conhecido pelas siglas:

- DAFA (Digestor Anaeróbico de Fluxo Ascendente);
- RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente);
- RALF (Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado);
- RAFAMAL (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo);
- RAFAALL (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente através de Leito de Lodo).

Os UASB são biodigestores de manta de lodo, nesse tipo de reator o afluente que vai ser tratado entra no fundo do reator e tem um movimento ascendente atravessando uma camada composta por lodo biológico logo na parte inferior da primeira camada e depois é escoado através de um separador de fases encontrado já na superfície, ou seja, na parte superior do digestor.

Esse tipo de biodigestor foi desenvolvido para utilização no tratamento de águas residuais sejam domésticas ou industriais. Seu sucesso na execução da função de tratamento de águas garantiu a sua ampla empregabilidade nesse tipo de uso.

O reator possui uma coluna ascendente, como o próprio nome diz, e a mesma consiste em um leito de lodo (sludge bed), uma zona de sedimentação (sludge blanket), e um separador de fase (gas-solid separator – GSS).

Seu funcionamento consiste essencialmente na água residual que segue uma trajetória ascendente dentro do digestor, desde a sua parte mais inferior, atravessando a zona de digestão e logo em seguida escoando através do separador de fases onde então alcança a zona de sedimentação na parte superior do reator, como ilustrado na figura 11.

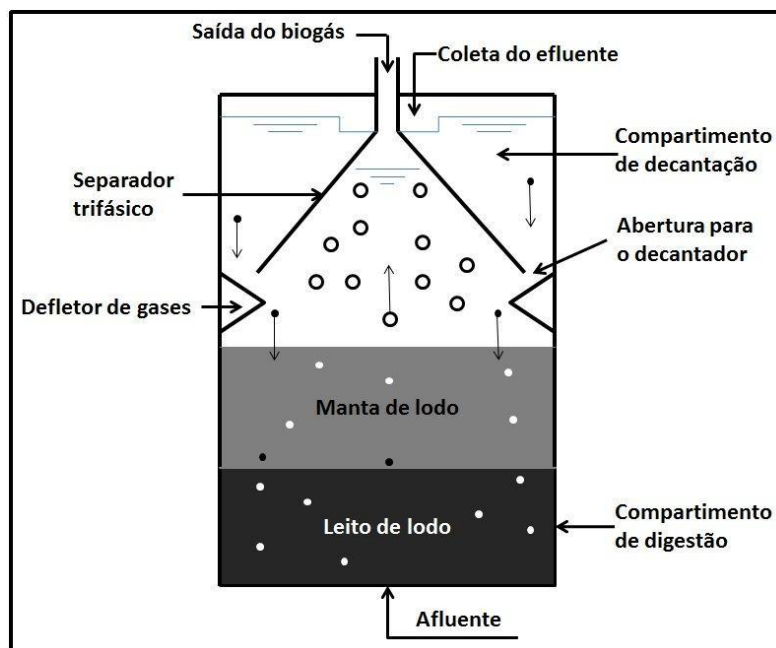


Figura 11 - Esquema de funcionamento de um reator UASB (Fonte: adaptado de CHERNICHARO, 1997).

A água residual quando é inserida no reator se espalha pelo fundo, fluindo pela zona de digestão onde está o leito de lodo. Naquela região ocorrerá então a mistura do material orgânico trazido pela água injetada e o material orgânico já presente no reator. Os sólidos em suspensão são então dissolvidos, biodegradados e então digeridos pelo processo de fermentação anaeróbica, produzindo biogás e contribuindo para o aumento da população bacteriana. O biogás produzido ascende em conjunto com o líquido depois de ter ultrapassado a camada de lodo, dirigindo-se para o separador de fases.

No separador de fases, a área disponibilizada para o ascendente líquido escoar deve ser projetada para que ao se aproximar da superfície líquida livre, o líquido ascendente sofra uma desaceleração de velocidade gradativa de modo a ser superada pela velocidade de sedimentação das partículas provenientes de flocos de lodo levados pelas condições hidráulicas ou flotados. Dessa forma é possível que o material sólido que conseguiu passar pela abertura do separador de fases e alcançou a parte superior do reator possa se sedimentar na região de decantação. Se as condições hidráulicas forem favoráveis, o acúmulo desse material depositado acarretará no seu próprio deslizamento para a zona de digestão que se encontra na parte inferior do digestor. Sendo assim, é possível dizer que a existência de uma região de decantação acima do separador de fases corrobora para a preservação e retenção do lodo aumentando a massa biológica na zona

de digestão, elevando seu rendimento e consequentemente descarrega-lo efluentes relativamente livres de sólidos sedimentáveis.

A figura 12 ilustra os modelos utilizados para o reator RAFA.

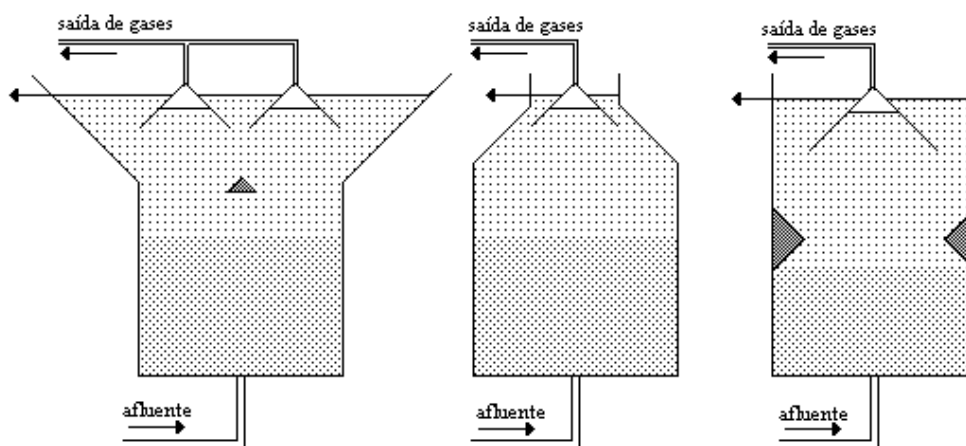


Figura 12 - Esquemas mais comuns utilizados em reatores UASB. (Fonte: FRANCISCO DA SILVA, 2007)

Dentro do separador de fases existe a câmara onde é realizado o acúmulo do biogás formado durante a biodigestão. O reator tipo RAFA assegura as duas condições fundamentais para a digestão anaeróbia: o fluxo contínuo do afluente em processo de subida e descida através da câmara de lodo promove um elevado contato do material orgânico com o lodo, bem como, a decantação na parte superior do separador de fases promove a preservação e retenção da maior parte do lodo dentro do reator. A estabilização da matéria orgânica ocorrida na zona da manta de lodo e seu fluxo ascendente dispensa a necessidade de misturadores, substituídos pelo fluxo vertical das bolhas de gás.

Dados publicados pelo IBGE no ano de 2010 apontam que o Brasil coleta diariamente o equivalente a 228,4 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) e ainda de acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Compromisso Empresarial Para Reciclagem (IPT/CEMPRE) 52% desse montante é composto de matéria orgânica, o que equivaleria a 95.414 t/dia de resíduos orgânicos. A quantidade de biogás produzida por tonelada de resíduo sólido orgânico processado em uma unidade de biometanização de RSU varia de 100 a 200 m³ e o biogás gerado nessas condições possui uma concentração de metano de 55 a 70% (RISE-AT, 1998).

Se adotarmos o valor médio de produção de gás de 150 m³ por tonelada de resíduo sólido orgânico/dia com uma concentração, também média, de metano igual a 62,5% no biogás formado, conclui-se que o potencial do Brasil nessas condições de produção de biogás a partir do tratamento de resíduos sólidos urbanos em unidades de biometanização é de 5,2x10⁹m³ por ano. Desse total, 3,3x10⁹m³ de metano puro.

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás, segundo ICLEI (2009), pode ser calculado de acordo com as seguintes equações:

$$P_x = \frac{Q_x \times PCI_{\text{metano}}}{860} \quad (\text{Equação 1.1})$$

onde:

P_x = Potência disponível (kW);

Q_x = Vazão de Metano (m³CH₄/hora);

PCI_{metano} = Poder Calorífico Inferior Metano 8.500kcal/m³CH₄ (Pecora et al., 2009);

860 = fator de conversão de kcal para kW.

$$E_{\text{assegurada}} = P_x \times \eta \times k \quad (\text{Equação 1.2})$$

onde:

$E_{\text{assegurada}}$ = Energia assegurada (kW);

P_x = Potência disponível (kW);

η = eficiência elétrica do motor de cogeração (48%) (Fonte: General Eletric Power);

k = Fator de capacidade (88%) (EPE, 2008);

Com base nos dados apresentados e fazendo uso das equações (1.1) e (1.2), calcula-se que, no Brasil o potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás gerado em unidades de biometanização de RSU é de 1,436 MW, o que corresponde à uma geração anual de 12,5 TWh de energia elétrica. A geração elétrica no Brasil no ano de 2008 foi de 463,1 TWh, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética publicados no ano de 2009, com base nesse valor temos que o biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos e seu potencial energético equivaleria a 2,7% da geração elétrica nacional.

1.3.2 Balanço de massa e métodos

Pela existência da alta complexidade do processo biológico e, também, pelas tecnologias de processamento dos resíduos sólidos urbanos serem comparativamente recente, os métodos de biometanização de RSU não estão atualmente consolidadas de forma plena. Sendo assim, não está estabelecido um senso comum quanto ao método mais eficaz para a realização desse processo (VANDEVIVERE, *et al* 2002).

Métodos existentes diferenciam-se entre si de acordo com a necessidade, disponibilidade e capacidade, como por exemplo, a adição de água ou de efluente líquido para a variação e controle da umidade presente no substrato, o que influi diretamente na operação no reator, pois a adição de parte líquida de efluente de forma realimentada estimula um acúmulo de amônia no lixiviado (OSTREM, 2004).

Como já foi apresentado, a variação da composição do biogás e a sua produtividade está diretamente relacionada com a composição do resíduo empregado. As variáveis partem de 100 e atingem 200 m³ de volume de biogás produzido com uma concentração de 55 a 70% do gás metano por tonelada de matéria orgânica processada (RISE-AT, 1998).

A figura 13 representa o balanço de massa e fluxo de materiais para uma unidade padrão de biometanização de RSU de fração orgânica de resíduos municipais (FORM).

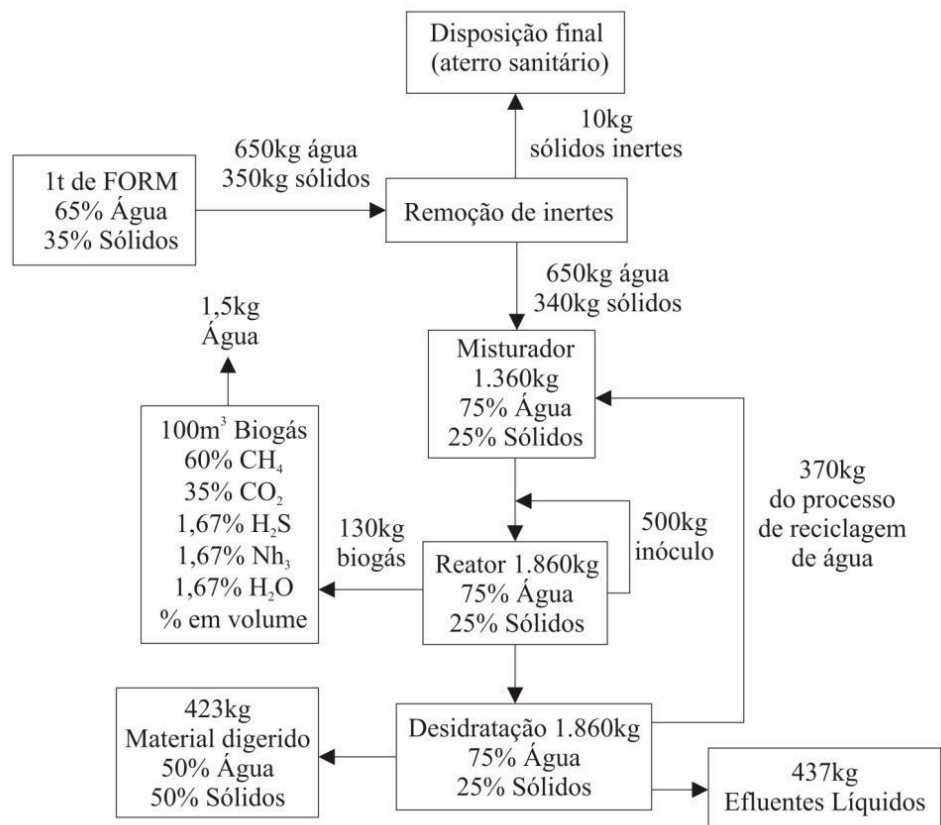


Figura 13 - Balanço de massa e fluxo de materiais de uma planta padrão de biometanização (OSTREM, 2004).

O balanço energético típico pode ser representado pela figura 14.

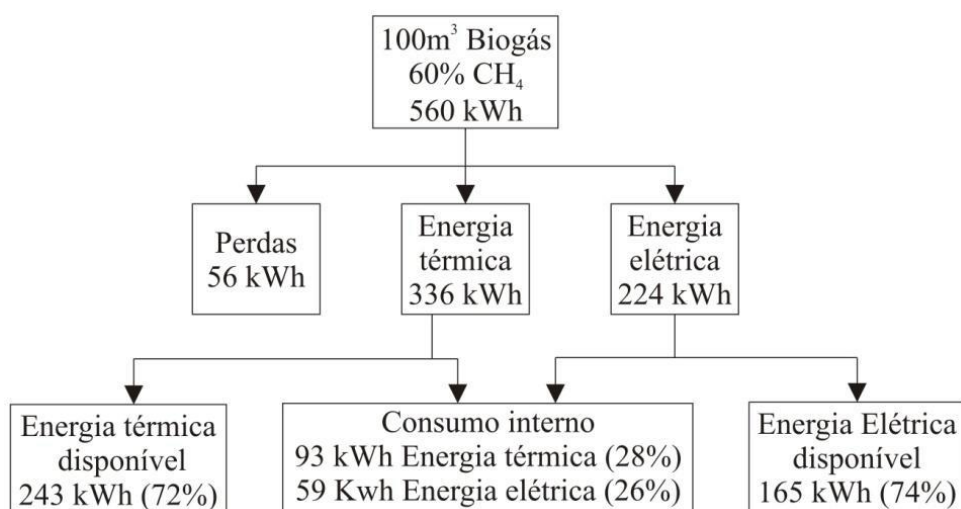


Figura 14 - Balanço energético característico de planta de biometanização de RSU.

No mundo atual a biometanização, que se difere do processo de compostagem pelo fato de o primeiro ser anaeróbico e o segundo um processo aeróbico, é um processo essencial para a gestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, industriais e agrícolas. Esse processo realiza a estabilização dos resíduos, redução do volume, controle de odores e patogênicos e pôr fim a recuperação energética em atendimento à legislação em vigor. Como resultado desse processo obtém-se vários produtos, o que motiva cada vez mais a implementação desse tipo de tratamento dos RSU com foco no aproveitamento desses produtos. Os biodigestores podem ser divididos em diversas categorias de acordo com suas características de operação.

Segundo Austermann (*et al.*, 2007) os processos de biometanização são classificados observando-se alguns parâmetros, como: concentração de sólidos totais, tipo de agitação utilizada, bactérias atuantes no processo, quantidade de estágios e modo de alimentação adotada para o biodigestor.

Concentração de sólido totais: via seca ou via úmida

O sistema de via úmida é aquele onde há a diluição do material orgânico a ser digerido, fazendo uso de água ou de efluente proveniente do próprio resultado de digestão do reator, a um ponto de concentração de sólidos totais de 15%, ainda que, a maioria dos processos de via úmida trabalhe com um sistema de sólidos totais de concentração mínima de 3 e máxima de 7% para sólidos totais. Já um sistema de via seca é operado com teor de sólidos totais numa taxa superior a 15%. A caracterização da operação do reator quanto à concentração de sólidos totais em via seca ou via úmida é um primeiro indício do nível de complexidade da etapa de pré-tratamento demandada pelos resíduos para atender aos padrões necessários no sistema de biometanização, e também é uma indicação do modelo de reator a ser utilizado (AUSTERMAN *et al.*, 2007).

A quantidade de efluentes líquidos produzidos em um processo de via seca é menor, dessa forma, demanda instalações menores e menos complexas no que diz respeito ao desaguamento do material produzido e tratamento dos efluentes líquidos produzidos. A desvantagem da utilização do sistema de via seca e fluxo contínuo é a necessidade de uma unidade de pré-tratamento do substrato que será utilizado no digestor para que haja inoculação e homogeneização antes da sua introdução do reator.

Uma característica desse tipo de biodigestor é a possibilidade de utilização de uma quantidade maior de carga orgânica, ou seja, uma maior quantidade de massa por m³ de digestor, o que implica em menor demanda por volume quando comparado com os de via úmida. Todavia, o substrato que sofrerá digestão possui maior densidade, o que implica em uma maior robustez nos equipamentos.

A caracterização de um reator de via seca no que diz respeito à porcentagem na concentração de sólidos totais varia de acordo com a concentração de sólidos totais:

- Alto teor de sólidos (seco)
 - 15% de ST, 85% de umidade (Díaz et al., 2003);
 - 20 a 40% de ST, 80 a 60% de umidade (Mata-Alvarez, 2003);
 - ST > 20% (Brummeler, 1993).

Na maioria dos casos, os processos de via úmida fazem uso de reatores do tipo mistura completa e a agitação do material em digestão no seu interior pode ser realizada de três formas: utilizando-se agitadores mecânicos internos, realizando a recirculação do material em digestão ou ainda a injeção de biogás comprimido no sistema. Um problema encontrado em digestores de via úmida é a formação da espuma, uma capa flutuante composta por material de baixa densidade como plásticos por exemplo. Esse tipo de material se acumula ao longo do processo no interior do biodigestor que leva a formação de uma dura crosta acima do material em digestão. O problema na criação da espuma no interior dos digestores está na dificuldade que ela cria para se realizar a movimentação do material digerido pelos agitadores mecânicos, bem como o comprometimento da extração do biogás.

Os materiais inorgânicos de alta densidade também provocam problemas nos digestores de via úmida. Materiais como pedras, vidros e areias acabam sedimentando em seu interior levando à redução do volume útil (AUSTERMANN *et al*, 2007). O manuseio do biodigestor de via úmida realimentado por seus efluentes enfrenta também mais uma problemática, a alta concentração de amônia. O nível dessa substância necessita de acompanhamento rigoroso pois, fora de controle, tais níveis tendem a se elevar intoxicando o meio biológico inibindo a realização do processo de digestão. Uma opção à realimentação de efluente seria a adição de água nova aos resíduos que serão introduzidos no digestor, acarretando a diminuição da concentração da toxicidade dos compostos inibidores do processo biológico, No entanto, isso

aumentaria os custos do processo e o volume de efluente a ser tratado no fim do processo (VANDEVIVERE, 2002).

Em linhas gerais os processos de via úmida demandam um pré-tratamento dos resíduos, o que provoca perda de sólidos voláteis e como consequência redução na produção de biogás (KELLEHER, 2007). A alta complexidade e número maior de equipamentos demandados pelos sistemas de via úmida levam esse tipo de processo a terem uma demanda interna de energia elétrica (cerca de 50%) mais elevada do que os sistemas via seca (entre 20% a 30%).

Um experimento realizado por Bouallagui (2003) procurou constatar a influência da quantidade de concentração de substrato oriundo de resíduos vegetais coletados num mercado público da Tunísia no processo de fermentação de um biodigestor anaeróbico com alimentação semicontínua. Conclui-se que a produção do gás se elevou à medida em que a concentração de substrato também cresceu de 4 para 6% de sólidos totais (ST). No entanto, quando a referida concentração de ST foi elevada de 6 para 8% ocorreu um decréscimo na produção do biogás. E quando a concentração de sólidos totais atingiu 10% foi observada após 1 semana que o pH do sistema reduziu de 7,2 para 5,3 em função da alta produção de ácidos voláteis, o que provocou a interrupção da produção de gás metano em tais circunstâncias.

A definição de digestor via úmida também tem parâmetros variáveis dentro da bibliografia do assunto para alguns autores:

- Baixo teor de sólidos (convencional)
 - 5 a 10% de ST, 90 a 95% de umidade (Díaz *et al*, 2003);
 - 10 a 15% de ST, 80 a 85% de umidade (Mata-Alvarez, 2003);
 - ST < 12% (Brummeler, 1993).

Estágio único ou multiestágio

Nos biodigestores de estágio único, todos os processos que envolvem a fermentação do substrato (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) acontecem concomitantemente em um único ambiente de mistura. Deve-se observar que de todos os grupos de bactérias que são envolvidos no processo de biodigestão, as responsáveis pela metanogênese possuem características metabólicas bem específicas e também possuem uma taxa de crescimento menor

se comparadas aos demais. Sendo assim, no que se refere a esse tipo de bactérias o biodigestor deve ser manipulado de forma que proporcionem condições favoráveis à ele, por ser mais sensível às alterações do meio.

A taxa de crescimento das bactérias responsáveis pela hidrólise, acidogênese, e acetogênese são mais elevadas que das bactérias metanogênicas, o que faz com que o biodigestor produza um ambiente de elevada produção ácida. Se isto ocorrer, haverá inibição por substrato, prejudicando o grupo metanogênico e interrompendo o processo. Para aperfeiçoar cada uma das etapas de biometanização, desenvolveram-se digestores de mais de um estágio (AUSTERMAN et al, 2007).

Nos sistemas de dois e de multi-estágios é possível que sejam otimizadas cada uma das etapas da digestão anaeróbia (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) de forma sequencial em digestores separados, atingindo níveis maiores de degradação num intervalo de tempo menor. Em contrapartida, essa otimização também eleva a dificuldade de controle de manutenção, exigindo um maior investimento econômico, o que faz com que esse tipo de sistema de multi ou de dois estágios representem apenas 8% da capacidade total instalada na Europa para o tratamento de resíduos orgânicos. (DE BAERE, 2003).

As vantagens dos sistemas de dois e de multi-estágios se apresentam quando se refere ao tratamento de resíduos onde a degradação do substrato é limitada pela etapa metanogênica do processo ao invés de hidrólise, como quando se refere ao tratamento dos resíduos de cozinhas por exemplo que são muito biodegradáveis. Por esse motivo esses tipos de substrato são facilmente acidificados, de forma que, se o processo de digestão ocorrer num sistema de estágio único, poderá ocorrer o impedimento da ocorrência da metanogênese, isso implica que, o substrato não foi devidamente dosado e homogeneizado, e também, não foram feitas as adições de forma correta de substâncias químicas com capacidade tampão (RODRIGUES, 2005).

Nesse tipo de sistema de multi estágio, geral mas não restritamente, faz-se uso de dois tanques. No primeiro executa-se a hidrólise, a acidogênese e a acetogênese dos resíduos, e no segundo digestor de forma isolada ocorre a metanogênese pelo seu caráter de maior vulnerabilidade às mudanças. Por possuir a possibilidade de maior controle nas etapas individuais do processo de fermentação, esse tipo de biodigestor proporciona um ganho de produtividade de biogás e também um melhor desempenho do processo num âmbito global. No entanto, a implementação de dois ou de mais tanques de digestão em série demandam uma

complexidade operacional ampliada na manutenção das condições adequadas em cada um dos estágios.

Essa demanda implica em maior investimento por necessitar de equipamentos adicionais como bombas e digestores e uma maior área para operação. Observa-se também que a interdependência dos digestores é um ponto crítico, pois a desestabilidade de um deles compromete o estágio subsequente (AUSTERMAN et al., 2007).

Esse tipo de sistema de multi-estágio é especialmente interessante quando se trabalha com resíduos sólidos de alto teor de celulose e de outros compostos de difícil degradabilidade. Sendo assim, a demanda por maiores cuidados faz com que a preferência por um sistema de estágio único de formato simplificado, maior robustez operacional e menor custo seja responsável por 92% das plantas de biodigestão instaladas (VANDEVIVERE et al., 2002).

Alimentação batelada ou contínua

Analisando a alimentação dos biodigestores anaeróbicos, os sistemas de tratamento de resíduos sólidos ou biometanização podem ser classificados como **reatores de alimentação contínua ou descontínua (batelada)**.

Os digestores de alimentação descontínua ou batelada possuem um design mais simples e barato, operam por meio de via seca, ou seja, não demandam diluição de material. A forma descontinuada de alimentação, conseqüentemente, faz com que a produção de biogás e a extração de efluente também seja descontínua. Esse tipo de reator pode trabalhar com estágio único ou multiestágio. Geralmente, são adotados por usuários de pequeno porte onde a recuperação da energia não é a prioridade do processo.

Na alimentação descontínua, os resíduos orgânicos são injetados no reator em conjunto ou não com injeção de inoculo e lá permanecem durante todo o período de retenção de sólidos. Quando o período de digestão anaeróbica cessa, a matéria orgânica já completamente processada é descarregada e então o processo é iniciado novamente. Para suprir a necessidade de abastecimento com biogás e de tratamento de dejetos, geralmente são necessários vários sistemas de alimentação descontínua trabalhando em paralelo de modo a propiciar a

continuidade do sistema, promovendo a realização de partidas e esvaziamentos sequenciais dos digestores (VANDEVIVERE *et al.*, 2002).

Nos reatores de alimentação continua os resíduos orgânicos que serão digeridos são injetados de forma ininterrupta e regular no digestor e simultaneamente a este processo é retirada uma quantidade equivalente de resíduos já processados. Dessa forma a produção do biogás é contínua. No entanto, esse sistema apresenta a desvantagem de que no momento da retirada da matéria orgânica esta pode não estar completamente processada ou digerida (RODRIGUES, 2005). Podendo operar tanto em via seca como em via úmida, esse processo produz um fluxo de biogás mais constante, permitindo a otimização dos sistemas de geração de energia (AUSTERMANN *et al.*, 2007).

Os sistemas de alimentação descontinua são tecnologicamente mais simples, mais robustos e mais baratos, porém, a desvantagem desse tipo de sistema é a necessidade de uma área maior e menor produtividade de biogás. Como os digestores desse tipo são completamente esvaziados ao fim do seu ciclo, sua vantagem operacional é o não acúmulo de inertes no interior do reator devido à manutenção. No entanto, pode ocorrer a colmatção ou entupimento da base do reator que compromete o processo de recirculação do lixiviado. A formação de zonas mortas devido a criação de caminhos preferenciais pelo lixiviado também é uma desvantagem característica do sistema. Em suma, o sistema de alimentação descontinua ou batelada é mais interessante para países em desenvolvimento devido ao seu menor custo operacional.

Fluxo Pistão ou Mistura completa

Os biodigestores de mistura completa possuem como características a alimentação e extração de material digerido realizada de forma ininterrupta e alto grau de mistura do substrato, seja por agitadores mecânicos, por injeção de biogás ou ainda por recirculação de material. Essas condições são recomendadas para o tratamento de efluentes que possuem uma alta concentração de sólidos na sua composição por possibilitar a estabilidade da biomassa em seu interior. Uma vantagem do biodigestor de mistura completa é a garantia de “diluição” de qualquer provável carga tóxica afluyente que seja inserida no sistema para processamento. Na figura 15 temos um modelo esquemático de digestor tipo mistura completa representado.

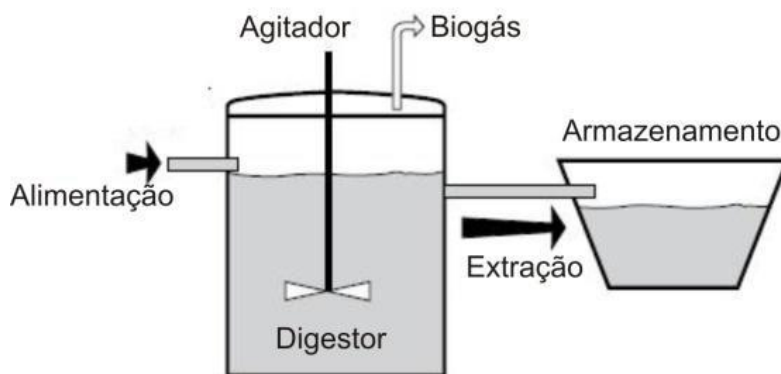


Figura 15 - Modelo de digestor de mistura completa (Fonte: OGEJO *et al*, 2009).

Os reatores de fluxo pistão, em comum com os digestores de mistura completa, também possuem uma alimentação e extração de substrato contínua. O material a ser digerido é inserido no biodigestor na extremidade de entrada e na extremidade oposta é retirada uma mesma quantidade de material já processado. O comportamento do fluxo do material no interior desse tipo de reator é similar ao de um êmbolo e não há nenhum tipo de processo de mistura no sentido longitudinal. O substrato mantém as suas características e é mantido no interior do digestor pelo tempo de detenção hidráulico (TDH) previsto em projeto. Para que haja garantia do fluxo do material em seu interior, os digestores de fluxo pistão possuem alta relação comprimento-largura, garantindo uma distribuição longitudinal mínima (VON SPERLING, 1996).

A disposição espacial interior dos biodigestores de fluxo pistão lhes garantem uma “setorização” dos micro-organismos anaeróbicos envolvidos no processo de biodigestão. Como o substrato segue um fluxo unidirecional, os micro-organismos acidogênicos responsáveis pela realização da primeira fase do processo de digestão se concentram predominantemente na primeira região do digestor, e assim sucessivamente, sendo os acetogênicos na região intermediária e por fim os micro-organismos metanogênicos. Essa forma de operação de reator minimiza sensivelmente a possibilidade de inibição do processo de produção do biogás por acúmulo de ácidos ou redução do pH. É observado também nesse modelo de operação de fluxo pistão um aumento na eficiência do processo devido a questões cinéticas. Na figura 16 apresenta-se a representação esquemática do tipo de reator de fluxo pistão.

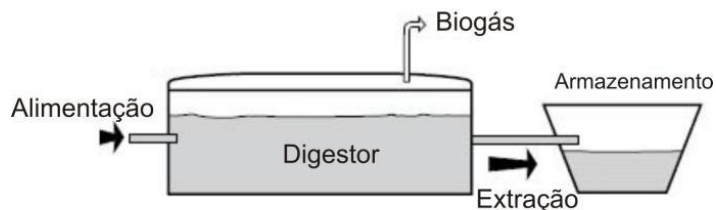


Figura 16 - Representação esquemática de um reator de fluxo pistão (Fonte: OGEJO et al, 2009)

Na biodigestão de forma geral os dois principais grupos de micro-organismos atuantes no processo de digestão anaeróbica de um digestor são: bactérias mesofílicas e bactérias termofílicas. O primeiro grupo, composto pelas bactérias mesofílicas são micro-organismos que apresentam taxa alta de crescimento quando a temperatura do ambiente em que se encontram está em torno de 37°C. O segundo grupo, composto pelas bactérias termofílicas, possui uma taxa alta de crescimento em torno dos 55°C. Quando são comparados esses dois grupos de bactérias conclui-se que os micro-organismos do grupo termofílico possui uma taxa de reprodução maior, o que elevaria o rendimento do sistema, consequentemente, aumentaria a produção de biogás. No entanto, a maior demanda de energia para manter o biodigestor em temperaturas elevadas, que são ideais para a operação deste grupo de bactérias, é um fator que seria uma limitação. Sendo assim, algumas tecnologias optam por trabalhar na faixa das bactérias mesofílicas (AUSTERMANN *et al*, 2007).

Com a característica de maior rendimento, os biodigestores termofílicos necessitam de menor tempo de detenção hidráulico (TDH), atingindo a maior produção de biogás em uma janela de tempo reduzida, viabilizando dessa forma a construção de reatores que ocupem menor espaço com suas dimensões físicas. Consequentemente, é necessária uma área reduzida para a implantação desses biodigestores, que traria como vantagem um menor investimento em terrenos. No entanto, como dito anteriormente, devido a necessidade que esse biodigestor teria de trabalhar com temperatura elevada, o mesmo demandaria de maior carga energética adquirida através de vapor ou energia para se elevar a temperatura dos reatores, especialmente em estações mais frias como no inverno (AUSTERMANN *et al*, 2007).

1.4 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa proveniente da fermentação anaeróbica de material orgânico, sua composição básica é metano, dióxido de carbono contendo também pequenas quantidades de ácido sulfídrico e amônia (ZANETTE, 2009). Onde existe decomposição de matéria orgânica existe formação de biogás, sendo assim, a geração de biogás é possível em reatores anaeróbicos, lagoas anaeróbicas, lixões, aterros sanitários e aterros controlados.

Quando nos referimos ao biogás como fonte de energia térmica, elétrica ou automotiva, estamos falando de uma fonte de energia diretamente ligada ao conceito de sustentabilidade, pois o mesmo é obtido, dentre inúmeras formas, pelo tratamento sanitário de resíduos e efluentes orgânicos. No entanto, essa fonte é desprezada e jogada fora. Infelizmente as políticas públicas nacionais de energia através de seus planejadores, enxergam o biogás como uma fonte de energia cuja demanda de esforços é alta demais para que o mesmo ingresse no sistema em escala compatível com as outras fontes de energia que constituem a matriz energética do país (BLEY JUNIOR, 2014).

O Biogás também pode ser definido simplesmente como uma das inúmeras formas de fixação de energia proveniente do Sol na forma de energia química através de queima simples. Para ABREU (2009), é uma das formas de se produzir energia elétrica renovável e limpa com consequências benéficas para o meio ambiente como redução dos impactos globais causados pela queima dos RSU e a geração de energia elétrica através do lixo em aterros sanitários.

O gás de aterro ou biogás é composto de vários outros gases, alguns deles presentes em grandes concentrações e outros em concentrações menores. Todavia, todos eles são procedentes da decomposição da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos. É importante salientar que parte da composição do biogás carrega gases que oferecem riscos à saúde pública.

1.4.1 Características do Biogás

O Biogás é fundamentalmente composto por:

- Amoníaco (NH_3);

- Dióxido de Carbono (CO₂);
- Hidrogênio (H₂);
- Sulfeto de Hidrogênio (H₂S);
- Metano (CH₄);
- Nitrogênio (N₂);
- Oxigênio (O₂);

O dióxido de carbono e o metano são os principais componentes do biogás, sendo o segundo de especial interesse para este estudo. As concentrações típicas de cada um dos gases, segundo Tchobanoglous (1994), podem ser verificadas na tabela 4.

Tabela 4 - Constituintes típicos do Biogás de aterro de RSU

Componente	Porcentagem (base volume seco)
Metano	45 – 60
Dióxido de Carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1
Sulfetos, disulfetos,	0 – 1
Amoníaco	0,1 – 1
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0 – 0,2
Demais gases	0,01 – 0,6

Fonte: Tchobanoglous *et al.*, 1994

Como dito anteriormente, o gás Metano em contato com o ar (Oxigênio) é explosivo, no entanto, a possibilidade de explosão torna-se real à uma concentração a partir de 5 a 15%. No caso dos aterros, quando o metano alcança essa concentração a disponibilidade de oxigênio é muito limitada, diminuindo assim exponencialmente o risco de uma explosão em função da mistura desses dois gases.

As concentrações individuais de cada um dos gases que fazem parte do Biogás são variáveis, e aumentam ou diminuem de acordo com o tipo de resíduo que é digerido, uma variável também que vem a influenciar nas referidas concentrações é a idade do aterro. Para

Nishimura (2008) as concentrações obedecem a valores de uma faixa mais ampla de concentração, conforme apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Composição característica de Biogás em aterro

Componente	Porcentagem (base volume seco)
Metano	50 – 80
Dióxido de Carbono	20 – 40
Nitrogênio	0,5 – 3
Sulfetos, disulfetos e outros	1 – 5
Hidrogênio	1 – 3

Fonte: Nishimura, 2008

Um componente incluído na concentração dos “demais gases” nas concentrações citadas, são os compostos orgânicos voláteis (COV). É importante salientar que a constância com que os compostos orgânicos voláteis apresentam concentrações relevantes no biogás geralmente está associada a aterros antigos onde são aceitos resíduos do tipo industrial e comercial que possuem COV. Nos aterros mais recentes, onde há um controle mais rigoroso do tipo de resíduo que são ali aceitos, as concentrações desse tipo de composto são extremamente baixas.

Compostos orgânicos voláteis são COVs que possuem alta pressão de vapor sob condições normais, a tal ponto de vaporizar significativamente e entrar na atmosfera. Uma grande variedade de moléculas a base de carbono, tais como aldeídos, cetonas, e outros hidrocarbonetos leves são definidos como COVs. O termo é frequentemente utilizado no contexto legal ou regulatório e em tais casos a definição exata depende da legislação. Tais definições podem ser contraditórias e podem conter falhas. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) define COV como qualquer composto orgânico que participa em uma fotorreação. Outros acreditam que tal definição é muito abrangente e vaga pois compostos orgânicos não voláteis (no sentido de vaporizar sob condições normais) podem ser considerados voláteis pela definição da EPA. O termo pode se referir tanto para compostos orgânicos bem caracterizados quanto misturas de composição variada (CAMPOS, 2007).

Comumente o Biogás, por desconhecimento, vem a ser equivocadamente confundido com outros tipos de gases que possuem características e finalidades semelhantes e podem ser utilizados de forma combustível. No entanto, cada um desses gases possui uma origem bem definida e distinta quando comparados entre si, e suas diferenças não cessam apenas em sua origem, mas as diferenças se ampliam quando observadas outras propriedades como peso molecular, poder calorífico, densidade relativa, composição, principal utilidade e pressão de armazenamento. A tabela 6 compila as principais características e os valores individuais típicos de cada um desses gases.

Tabela 6 - Tabela comparativa dos principais gases.

Tipos de gás Características	Biogás	Gás Natural	Gás Liquefeito de Petróleo	Gás de Rua	Gás de Refinaria
Origem	Aterros sanitários	Reservatórios de petróleo e de gás	Destilação de petróleo e processamento de gás natural	Reforma termocatalítica de gás natural ou de nafta petroquímica	Processos de refino de petróleo
Peso Molecular	27	17 a 21	44 a 56	16	24
Poder Calorífico	5.600	Rico: 10.900 Processado: 9.300	24.000 a 32.000	4.300	10.000
Densidade Relativa	0,923	0,58 a 0,72	1,5 a 2,0	0,55	0,82
Principais Componentes	Metano, dióxido de carbono e hidrogênio	Metano e etano	Propano e butano	Hidrogênio, metano, nitrogênio, monóxido de carbono	Hidrogênio, nitrogênio, metano, etano
Principais Utilizações	Industrial, geração de energia elétrica e automotivo	Residencial, comercial, automotivo e industrial	Residencial e comercial	Residencial e comercial	Industrial
Pressão de Armazenamento	60 a 70	200	15	-	-

Fonte: Programa nacional da racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural – CONPET, 1997.

É sabido que o potencial energético do biogás tem sua variação determinada principalmente pela concentração de metano e ausência de outras impurezas na sua composição,

quando tal situação é satisfeita o resultado é um gás com um potencial energético elevado. Silva (2009) diz que o poder calorífico do biogás varia de 5000 a 7000 kcal/m³, dependendo da variação da concentração do metano, e também afirma que se todos os contaminantes, impurezas e todo o dióxido de carbono for retirado da mistura o poder calorífico do Biogás pode atingir 12000 kcal/m³. A tabela 7 traz o poder calorífico do biogás em situações de diversas concentrações do metano e do dióxido de carbono.

Tabela 7 – Composição química e respectivos poder calorífico do Biogás.

Metano (%)	Gás Carbônico (%)	Outros Gases (%)	Poder Calorífico (Kcal/m ³)
60	30	10	5.374
50	40	10	4.613
45	45	10	4.094
40	50	10	3.333
35	55	10	3.240

Fonte: (MAIA, 2011).

Dependendo de seu uso final, o biogás demanda a utilização de processos de filtragem e purificação mais ou menos elaborados. O processo de purificação objetiva a remoção de H₂S, água, CO₂ e outras impurezas. É importante salientar também que a utilização de processos de filtragem no biogás promove o aumento de seu poder calorífico e padronização do gás produzido, bem como a especificidade para sua utilização: geradores de energia elétrica, caldeiras, combustível veicular (ZANETTE, 2009). A possibilidade de utilização do biogás como combustível torna possível sua comparação com outros tipos de combustíveis como demonstrado na tabela 8.

Tabela 8 - Equivalência do biogás em comparação com outros combustíveis.

Combustível	Quantidade que se equivale a 1m ³ de biogás
Carvão Vegetal	0.8 kg
Lenha	1.5 kg
Óleo diesel	0.55 L
Gasolina Amarela	0.61 L
Elettricidade	1.43 kWh
Álcool carburante	0.74 Kg

Fonte: (FIGUEIREDO, 2007)

1.4.2 Geração de Biogás em aterros

O biogás produzido em aterros é consequência de uma série de processos de natureza físico-química, física e microbiológica que os resíduos ali depositados sofrem. Dentre esses o de maior relevância é o processo microbiológico dada a natureza orgânica da maioria dos resíduos (CHRISTENSEN, 1989). Existem inúmeras condições resultantes de agentes naturais e da ação do homem que afetam diretamente a população microbiológica responsável pela execução do processo de geração de biogás nos aterros. Como trata-se de um processo sensível ao meio-ambiente, tais condições afetam consequentemente a produção do gás de aterro.

Estudos realizados em aterros de grande porte utilizando dados de testes de produção de gás de aterro registram uma produção compreendida entre 0,05 e 0,40 m³ de gás de aterro por quilograma de resíduo instalado e colocado em aterro (HAM, 1989). A massa em questão compreende tanto os materiais de composição sólidas que correspondem de 75 a 80% e à umidade de 20 a 25% da massa.

A composição dos resíduos sólidos urbanos é o principal fator a ser levado em consideração quando se deseja avaliar o potencial de geração de biogás de aterro de uma localidade. O volume de biogás de aterro é dependente diretamente da porcentagem e do tipo de composição orgânica dentro da massa de resíduos sólidos urbanos, uma vez que sua decomposição é a fonte do biogás ali produzido. Existem outros fatores que influenciam no volume de biogás produzido em aterro, como por exemplo: taxa de umidade, conteúdo de nutrientes, população de bactérias, pH, temperatura, e de natureza antrópica temos o projeto e operação do aterro em questão. Caracteristicamente o tipo de resíduo sólido urbano produzido na América Latina, incluindo o Brasil, possui alto teor de umidade e material orgânico quando comparado com o de outras regiões como Europa e América do Norte. Dessa forma, seu potencial de geração comparativamente é mais elevado que das demais regiões do globo.

A umidade é o fator limitante primordial na taxa de decomposição de RSU (McBean *et al.*, 1995), estando ligada a diversos fatores dentro de um aterro. A construção dos aterros é feita tipicamente por preenchimentos sequenciais em camadas. Essa informação é de alta relevância para entendermos como a umidade se comportará através dos resíduos.

Uma das características desse tipo de preenchimento por camadas é o fluxo diferenciado que existe no deslocamento do chorume e a infiltração da água pelo aterro. Essas informações

objetivam um esforço para controlar o teor de umidade no ambiente do aterro, pois, esse fator é altamente determinante na população de bactérias que por sua vez são as responsáveis pela formação do biogás de aterro, aumentando ou diminuindo significativamente a quantidade de gás formado. Sendo assim, é possível controlar de certa forma a produção de biogás de aterro através do manejo adequado dos resíduos.

Existem também projetos de aterros sanitários que tem por objetivo evitar ao máximo que a água entre em contato com os resíduos e o chorume atinja o lençol freático. Essa modalidade de aterro foi adotada pelos Estados Unidos nas décadas de 1970 e 1980 e são referidos como “tumbas secas”. Embora cumpra seu objetivo em evitar a contaminação do lençol freático com êxito, sua desvantagem é a baixa atividade anaeróbica nos resíduos que ali se encontram.

Atualmente a tendência das tecnologias para tratamento de resíduos sólidos urbanos é contrária à adotada pelos Estados Unidos, ou seja, faz-se uso de um sistema que aumenta o volume de água em contato com os resíduos para que estes rapidamente se estabilizem, por meio da tecnologia dos Biodigestores de Aterro Sanitário.

Esse tipo de sistema possui uma característica alta taxa de produção de biogás de aterro no início das atividades e essa vai decrescendo progressivamente com o passar do tempo. A variação das taxas de produção de biogás em aterros é dividida em 5 fases de acordo com o tempo de disposição dos resíduos. Estas serão descritas a seguir e podem ser verificadas na figura 17:

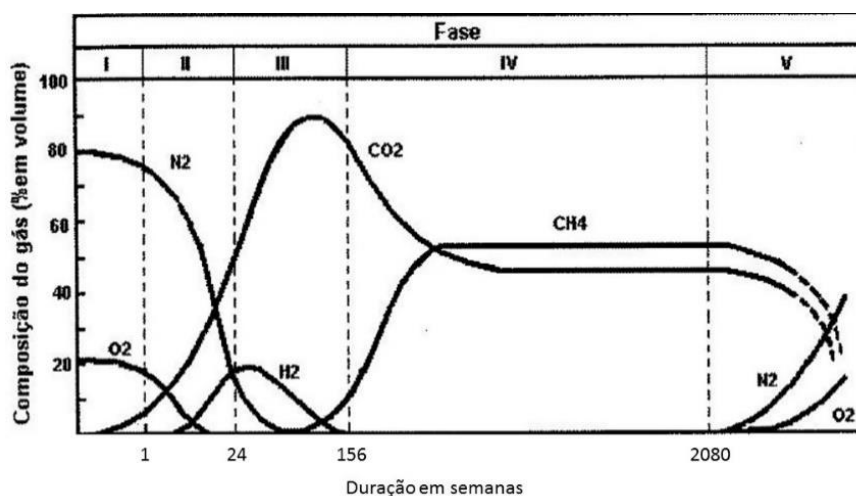


Figura 17 - Fases de formação do biogás em aterros (BRITTO, 2006)

Fase I – Ajuste Inicial: Nessa fase a decomposição da matéria orgânica é realizada em condições aeróbias, por existir oxigênio no interior da célula do aterro. A principal fonte de micro-organismos aeróbios e anaeróbios que trabalham nessa fase é a terra proveniente da cobertura dos resíduos.

Fase II – Transição: Nessa fase existe um decréscimo progressivo da quantidade de oxigênio disponível dando início então às atividades anaeróbicas. Nessa etapa também ocorre uma continua queda do potencial de oxido-redução, e devido a isso os micro-organismos responsáveis pela fermentação da matéria orgânica transformando-a em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão dessa matéria orgânica em produtos intermediários, os ácidos orgânicos. Como consequência da formação de ácidos e da elevação da presença do dióxido de carbono, ocorre o decaimento do pH do chorume no interior da célula.

Fase III – Ácida: Com o decaimento da quantidade de hidrogênio e a elevação da produção de ácidos orgânicos, as reações da Fase II são aceleradas, dando início à hidrólise que irá transformar os compostos de maior massa molecular em compostos menores e mais adequados ao uso como energia pelos micro-organismos. Outra atividade também realizada pelos micro-organismos nessa etapa é a acidogênese, consumindo os compostos de maior massa molecular provenientes da primeira etapa e transformando-os em compostos de menor massa molecular e pequenas concentrações de ácidos mais complexos. O principal gás gerado nessa etapa é o dióxido de carbono produzido pelos micro-organismos anaeróbicos não metanogênicos envolvidos na atividade.

Fase IV – Metanogênica: A predominância nessa fase é das bactérias metanogênicas, estas são estritamente anaeróbicas e convertem o ácido acético e o hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A formação do metano e de ácidos ocorrem simultaneamente, no entanto, a formação de ácidos é consideravelmente reduzida. Nessa fase o pH do chorume começa a se elevar, permanecendo na faixa entre 6,8 a 8,0.

Fase V – Maturação: Nessa fase restam apenas substratos de lenta decomposição. Aqui grande parte do material orgânico já foi digerida e convertida em biogás e sua produção diminui drasticamente, haja visto que, não existe mais nutriente nem matéria orgânica em quantidade suficiente para tal, tendo esses sido digeridos nas fases anteriores do processo.

A duração de cada fase de produção do biogás depende de vários fatores, não apenas pelo teor de umidade como já foi dito anteriormente, mas, a quantidade de biogás produzido

em aterro também é resultado de outras variáveis como uma função do tamanho e idade do volume de resíduo e também o tipo de resíduo, umidade, quantidade de nutrientes disponível, grau de compactação dos resíduos.

Tabela 9 - Período médio de duração das fases de digestão de RSU em aterros sanitários.

Fase	Condição	Período típico de duração
I	Aeróbia	Algumas horas a 1 semana
II	Anóxica	1 a 6 meses
III	Anaeróbia, metanogênica instável	3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica estável	8 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica declinante	1 ano a mais de 40 anos

Fonte: BANCO MUNDIAL (2003)

O volume de gases que contribuem para o efeito estufa (GEE) liberado é diretamente proporcional ao potencial de geração de biogás de aterro. Não restrito ao efeito estufa, a geração de biogás em aterro também possui impactos no que diz respeito ao mau cheiro e à saúde pública. De forma geral, quanto mais gás um aterro produz, maior é a ocorrência de questões relacionadas à saúde, segurança e incômodo odorífero.

Inicialmente, para definição da estimativa da produção de biogás em aterro, o aterro precisa ser classificado como seco ou molhado. Basicamente a diferença está em que um aterro seco terá uma produção de biogás menor e um maior tempo de produção de biogás em função de uma decomposição mais lenta quando comparado com um aterro molhado.

A quantidade de umidade presente em um aterro pode ser definida por:

- Precipitação;
- Temperatura;
- Tipo de cobertura e tipo de base do aterro ou alinhamento natural do aterro;
- Condições da cobertura do aterro (irregular, íntegra);
- Sistemática adotada para coleta de chorume;

Uma técnica tradicional muito utilizada para a definição de um local como “seco ou molhado” é a média anual de precipitações e a infiltração das mesmas na massa de lixo:

- Local relativamente seco: Precipitação < 500 mm/ano;
- Local relativamente molhado: 500 mm/ano < Precipitação < 1000 mm/ano;
- Local molhado: Precipitação > 1000 mm/ano.

Na América Latina a maioria dos aterros são considerados molhados ou relativamente molhados. Dois outros fatores que devem ser levados em consideração na produção do biogás de aterro é: a **migração subsuperficial** do gás determinada pela permeabilidade do solo adjacente à região do aterro e também pelo tipo de cobertura da superfície ao redor da região do aterro; e o **tipo de cobertura** da superfície do aterro, pois esta é afetada pela ventilação da região que pode levar ao escape de gás para a atmosfera. Superfícies pavimentadas limitam essa influência da ventilação no aterro.

1.4.3 Fatores influentes na geração de biogás em aterros

Existem vários fatores que influenciam ao seu modo a capacidade de um aterro em gerar biogás. Como já citados anteriormente, esses fatores são: composição dos resíduos, umidade, tamanho das partículas, idade do resíduo, pH, temperatura e outros. Na teoria, a produção de biogás é possível por um período maior de 30 anos, alcançando em alguns casos até 100 anos de produção. Porém, na prática o que vemos é uma produção elevada por um período de tempo bem menor (McBean et al., 1995; EMCON, 1998).

A seguir serão detalhados individualmente os fatores influentes na geração.

Os resíduos residenciais e comerciais depositados em um aterro de resíduos sólidos municipal são em sua maioria decompostos e produzem o biogás, o que sobra dessa decomposição, em linhas gerais, são materiais inertes (concreto, cinza, solo, metais, plásticos, etc.) não decomponíveis. A fração orgânica, incluindo resíduos de alimentos, quanto mais facilmente é decomposta, mais rápida será a produção do biogás. Sendo assim, conclui-se que

uma elevada porcentagem na presença de restos de alimentos nos resíduos acarreta numa acelerada taxa de produção de gás. Existem também casos de resíduos que sofrem decomposição, no entanto, necessitam de uma janela temporal elevada para se decomporem como é o caso de grandes pedaços de madeira. Esse tipo de resíduo não tem influência significativa na produção de gás de aterro.

No grau de relevância dos fatores que mais influem na geração de biogás em aterros, a composição dos resíduos (composição gravimétrica) encontra-se a umidade da constituição dos resíduos. Quanto mais elevado for o teor de umidade, maior será também a produção de gás. Esse índice de umidade varia ao longo do tempo em um aterro convencional. Essas variações podem ser consequências de fatores como: mudanças na infiltração de águas superficiais, liberação de água como resultado da decomposição dos resíduos, e variações sazonais do teor de umidade dos resíduos.

Quanto menor a partícula dos resíduos dispostos, maior a área de superfície específica, conseqüentemente uma maior área superficial existirá proporcionando uma decomposição mais rápida do que uma partícula maior de resíduo. Como o exemplo do pedaço de madeira dado anteriormente, é mais interessante que ele seja cortado em pedaços menores acelerando sua decomposição. Isso explica o fato de um aterro que aceita somente pedaços de resíduos ter uma produção de biogás de aterro mais rápida e completa quando comparado com aterros que aceitam pedaços somente de resíduos inteiros.

A geração de biogás em aterros sanitários é baseada em duas variáveis de tempo, o tempo de atraso que é o período compreendido entre a disposição do resíduo e o início da geração do gás, e o tempo de conversão, que é o tempo compreendido da disposição até o final da geração do biogás. O tempo de atraso e o tempo de conversão variam de acordo com o tipo de resíduo. Os resíduos provenientes de jardim têm um tempo de atraso e conversão menores quando comparados por exemplo com o couro que possuem tempos de atraso e conversão maiores.

A maior parte das bactérias que realizam processos anaeróbicos trabalham com pH ótimo entre 6,7 a 7,5 (McBean et al., 1995). Nessa faixa de trabalho, o desempenho é otimizado especialmente quando falamos das bactérias metanogênicas, cujo processo faz com que a produção de metano nessa faixa de pH seja maximizada. Fora dessa faixa de trabalho, ou seja,

com um pH menor do que 6 ou maior que 8 a produção do metano fica comprometida, na maioria dos aterros o pH natural do ambiente é levemente ácido.

As condições de temperatura de um aterro influenciam não só na produção do biogás, mas também nos tipos de bactérias predominantes no ambiente de produção. A faixa de temperatura ideal para as bactérias mesofílicas vai de 30 a 35°C, já para as bactérias termofílicas vão de 45 a 65°C. A temperatura máxima em um aterro, em vias gerais, é alcançada em torno de 45 dias a partir da disposição dos resíduos. Essa temperatura dá-se em função das atividades aeróbias. Após essa fase ser finalizada tem-se início a fase anaeróbia e a temperatura no aterro começa a diminuir.

As variações de temperatura em um aterro ocorrem em sua superfície devido às alterações climáticas externas, os resíduos depositados em regiões mais profundas em torno de 15 metros, por exemplo, não sofrem influência das variações climáticas externas (McBean et al., 1995).

A elevação da temperatura em um aterro é resultado das atividades bacterianas que ali ocorrem, tipicamente essas temperaturas variam de 30 a 60°C, estando a faixa ótima compreendida entre 30 a 35°C. É importante salientar que temperaturas abaixo de 15°C prejudicam gravemente as atividades das bactérias metanogênicas (McBean et al., 1995).

O potencial de oxido redução, também chamado de energia primária, é a energia fornecida pelos compostos inorgânicos e orgânicos enquanto são realizadas as reações químicas. Essa energia está relacionada com as transferências de elétrons existentes nas reações de oxido-redução.

A energia primária disponível é por sua vez influenciada pelo pH e pela temperatura no ambiente dos resíduos do aterro. O valor ideal do potencial de oxido-redução para a produção de metano deve ser menor que -200mV (BIDONE & POVINELLI, 1999).

Alguns autores definem quimicamente metais pesados como sendo um grupo de elementos localizados entre o chumbo e o cobre na tabela periódica, cujos pesos atômicos variam de 63,546 e 200,590 e densidade maior que 4,0 g/cm³ (DUFFUS, 2002). Esses elementos estão presentes nos resíduos urbanos em grande quantidade, encontrando-se em enlatados, tecidos, tintas, jornais, baterias, pilhas, entre outros. No caso das pilhas e baterias, seu princípio básico de operação é a transformação de energia química em energia elétrica fazendo uso desses metais (chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), níquel (Ni), prata (Ag),

lítio (Li), zinco (Zn), manganês (Mn)) como combustível. Os metais pesados em determinadas concentrações estão entre os principais inibidores de processos anaeróbicos em função da sua toxicidade (MONTEIRO, 2001).

A tabela 10 traz os valores das concentrações inibitórias de metais pesados (Ferro (Fe), Zinco (Zn), Cádmio (Cd), Cobre (Cu)) para processos de digestão anaeróbica de matéria orgânica em aterros sanitários.

Tabela 10 - Metais pesados e suas respectivas concentrações inibitórias na digestão anaeróbia.

Cátions	Concentração Inibitória (mg/L)
Fe ⁺⁺	1 -10
Zn ⁺⁺	4 -10
Cd ⁺⁺	7 – 10
Cu ⁺	10 – 12
Cu ⁺⁺	10 – 16

Fonte: Lima & Nunes (1994).

Os metais não são elementos biodegradáveis, o que podem leva-los ao acúmulo em determinadas concentrações que os tornam potencialmente tóxicos. Estudos recentes apontam que a toxicidade por metais pesados é uma das maiores causas de falhas em digestores quando nos referimos ao desempenho anaeróbico dos mesmos. O efeito tóxico é atribuído à ligação dos metais pesados com grupos orgânicos em moléculas proteicas, causando distúrbios nas funções e estruturas enzimáticas (CHEN *et al.* 2008). A presença de metais pesados provoca alteração no metabolismo dos micro-organismos, comprometendo sua respiração e síntese proteica diminuindo seus níveis de crescimento.

Com menor relevância existem outros fatores que influenciam no volume de gás produzido em um aterro, são eles: nutrientes, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento dos resíduos.

A tabela 11 traz uma síntese dos fatores internos e externos influentes na na geração de Biogás em aterros.

Tabela 11 - Fatores externos e internos influentes na geração de Biogás em aterros.

Geometria e Operação do aterro	Características iniciais dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente Externo
Dimensão do aterro;	Composição do lixo;	Umidade da massa na degradação;	Precipitação e infiltração;
Impermeabilização do aterro;	Umidade do lixo;	pH;	Variação da pressão atmosférica;
Compactação do lixo.		Temperatura;	Temperatura;
		Disponibilidade de nutrientes/bactérias;	
		Presença de agentes inibidores.	Evapotranspiração;
			Umidade relativa do ar.

1.5 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída através da lei Nº 12.305 sancionada em 02 de agosto de 2010 e regulamentada em dezembro do mesmo ano, reúne em seu conteúdo uma série de definições de termos para a correta referência no que diz respeito a esse assunto, incluindo a definição de resíduo sólido:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos ainda podem ser classificados quanto à sua origem. Sendo (OLIVEIRA, 2004):

- Resíduos urbanos: Provenientes de residências, atividades comerciais, varrição de ruas, podas de árvores e similares;
- Resíduos industriais: gerados pelos processos de transformação;

- Resíduos agrícolas: decorrentes de atividades produtivas do setor primário.

É possível ainda, segundo OLIVEIRA (2004), a definição dos resíduos quanto as suas qualidades físicas:

- Materiais inertes: vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes;
- Materiais combustíveis: papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

É importante que haja claro discernimento entre a definição de “resíduo sólido” e “lixo”. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) traz na norma NBR 10004 a definição de lixo como sendo:

Restos de atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semissólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional (ABNT, 2004).

Ainda segundo o Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas (United Nations Environment Programme – UNEP), RSU é um termo normalmente aplicado a um conjunto heterogêneo de resíduos produzidos nas áreas urbanas, cuja natureza varia de região para região. As particularidades e o volume de RSU gerado em uma determinada localidade está diretamente ligada ao nível econômico e ao estilo de vida dos habitantes que nela moram, bem como das fontes e abundâncias de recursos naturais nela disponível.

A disposição correta dos RSU, bem como seu tratamento e coleta refletem a qualidade de vida da população, a qualidade de água nos rios e águas subterrâneas, vetores de doenças e atividades pesqueiras. É possível então que haja a partir desse momento uma correta definição do ponto de vista técnico e legal de o que se entende por “resíduo sólido urbano”.

1.5.1 Geração e Coleta de RSU

A disposição final dos resíduos produzidos nas cidades é um grave problema ambiental nos centros urbanos do mundo todo. Essa problemática tende a aumentar com o passar do

tempo, haja vista que existe atualmente uma tendência para o aumento do consumo de bens descartáveis que compõe cada vez em volume maior a sua participação no lixo gerado pela população. A quantidade de resíduo gerado está diretamente ligada ao desenvolvimento de cada país, quanto mais elevado seu nível de vida e seu crescimento, mais lixo produzirá aquele país, como mostrado na figura 18.

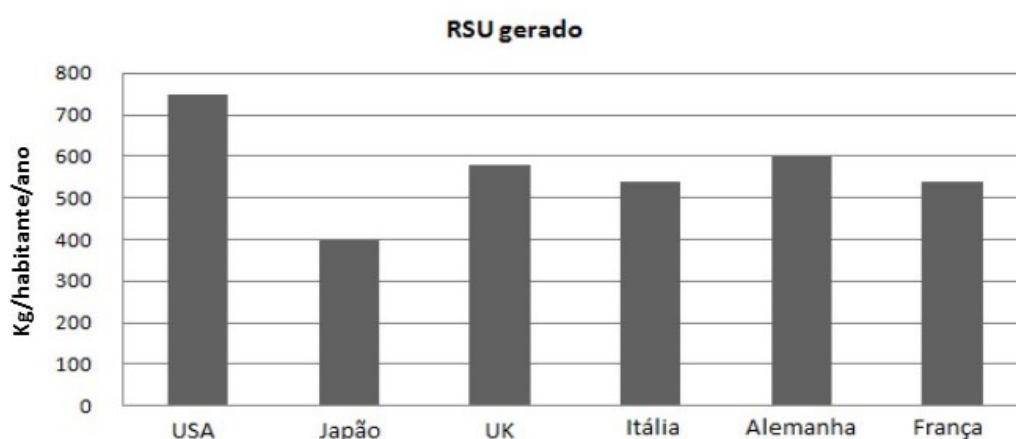


Figura 18 - Quantidade de RSU/habitante/ano em alguns países (OECD, 2008).

Arelado à essa situação temos o aumento do consumo, o constante aumento populacional, o veloz processo de urbanização, a industrialização e o aumento do poder aquisitivo.

Não diferente, o Brasil atravessa o mesmo processo de aumento da quantidade de resíduos produzidos ao longo do tempo em função das variáveis acima citadas. Segundo o IBGE, as quantidades de resíduos coletados no território nacional podem ser verificadas na tabela 12 que segue:

Tabela 12 - Evolução da quantidade de lixo/hab/ano no Brasil.

Ano	Quantidade de lixo total (Milhões de t/ano)
1989	35
2000	83

Fonte: IBGE, 2004.

Vemos por esses dados que em pouco mais de uma década a quantidade de lixo produzido no Brasil aumentou em 48 milhões de toneladas por ano, o que demonstra a necessidade urgente de uma gestão adequada, sustentável e eficiente para tal, desenvolvendo a consciência da necessidade de coleta seletiva, triagem, aproveitamento, tratamento ou destino dos resíduos sólidos urbanos, elaborando análises e desenvolvendo técnicas que objetivem o seu aproveitamento (HENRIQUES, 2009).

No ano de 2013 a geração total de RSU no Brasil foi de 76.387.200 toneladas (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE), o que representa um aumento de 4,1% em relação ao ano anterior. É importante chamar a atenção que o aumento da população foi menor de 10% do aumento do índice de geração de RSU, conforme mostrado na figura 19 que segue.

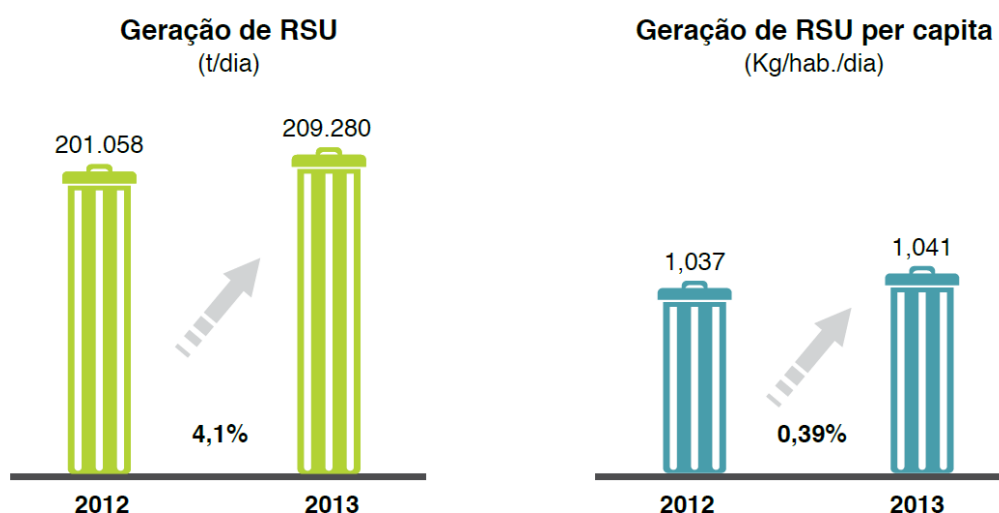


Figura 19 - Índice per capita e absoluto de geração de RSU (Fonte: ABRELPE e IBGE).

No que diz respeito aos serviços de limpeza urbana e coleta de lixo, o Brasil atinge a maior parte da sua população com essa prestação de serviço como mostrado na tabela 13.

Tabela 13 - Avaliação do segmento resíduos sólidos no Brasil.

Serviço	% dos distritos com o serviço prestado
Limpeza urbana e coleta de lixo	85,1%
Drenagem urbana	58,5%

Fonte: Exame, 2008.

Existe um aumento constante do número da população atendida por esses tipos de serviços. Do ano de 2001 ao ano de 2007 houve um acréscimo de 8 milhões de domicílios atendidos pela coleta de lixo no Brasil, dados esses que se referem apenas aos números quantitativos.

Paralelamente ao aumento da quantidade de pessoas atendidas, houve também um incremento da qualidade do serviço com o aumento da coleta direta. O percentual no ano de 2001 passou de 82,9% para em 88,4% em 2007, dados referentes ao milhões de domicílios atendidos como trazido na tabela 14.

Tabela 14 - Evolução da coleta de lixo no Brasil.

Ano	Domicílios (em milhões)	% com coleta direta
2001	46,9	82,9%
2002	48,0	84,8%
2003	49,7	85,7%
2004	51,0	85,8%
2005	52,3	86,8%
2006	53,8	87,6%
2007	55,5	88,4%

Fonte: Exame, 2008.

Já no ano de 2013 comparativamente a 2012 houve um aumento de 4,4% na quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados. Quando comparado com o crescimento da geração de RSU per capita percebemos um incremento discreto na cobertura do serviço de coleta no Brasil, chegando a uma cobertura correspondente a 90,4% totalizando 69.064.935 toneladas de RSU coletadas em 2013, esse dados são ilustrados na figura 20.

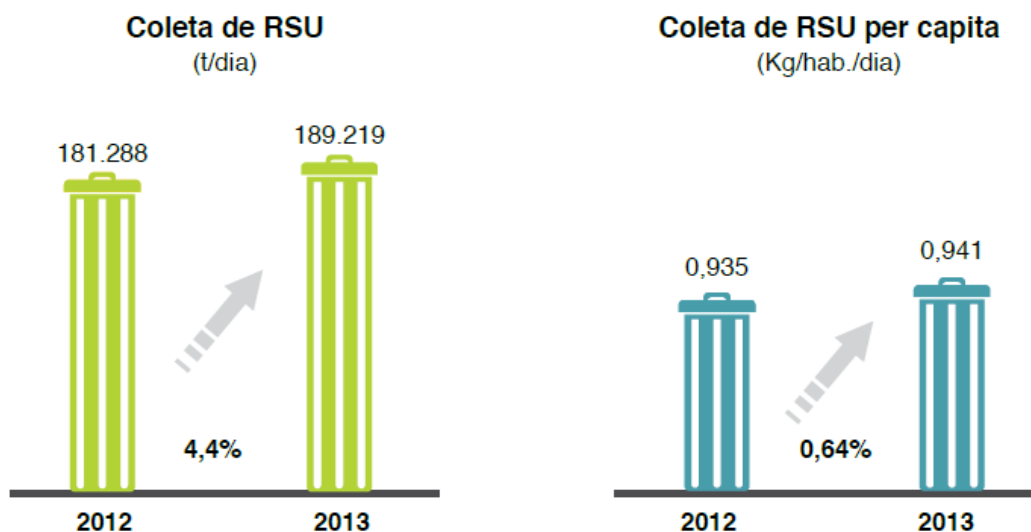


Figura 20 - Índice per capita e absoluto de coleta de RSU (Fonte: ABRELPE e IBGE).

Existe uma série de fatores que influenciam na abrangência do atendimento de coleta seletiva nas cidades, dentre eles esta a limitação orçamentária do município, ou ainda, o orçamento destinado para este fim. Sabemos que mais de 78% dos municípios brasileiros destinam para o investimento em coleta seletiva menos de 5% da sua dotação orçamentária e que 2% desses municípios não possuem sequer uma previsão de recursos para tal esse investimento, conforme detalhado na tabela 15.

Tabela 15 - Orçamento municipal destinado à limpeza urbana e coleta de lixo.

Proporção	Municípios	% do total de municípios
Menos de 5%	4.338	78,8%
5% a 10%	872	15,8%
10% a 20%	156	2,8%
> 20%	31	0,6%
Sem previsão orçamentária	110	2%

Fonte: Exame, 2008.

A comparação da quantidade de RSU e a quantidade de RSU coletada entre os anos de 2012 e 2013 nos mostra que diariamente mais de 20.000 toneladas de lixo deixam de ser

coletadas no território nacional, consequentemente, tomando destinação inapropriada. A proporção nacional de coleta de RSU, está ilustrada na figura 21.

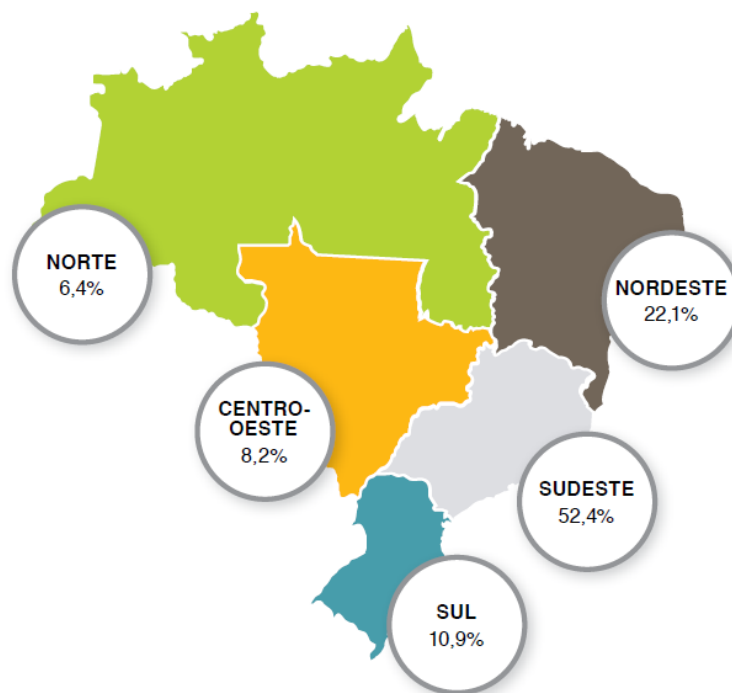


Figura 21 - Proporção das regiões brasileiras na coleta de RSU no Brasil.

Uma problemática conhecida no que diz respeito aos RSU é a cobertura da coleta. Embora seja o ideal, é sabido que não se atinge 100% de coleta dos resíduos sólidos domésticos produzidos no Brasil. Como consequência, a população que não é atendida com esse serviço acaba destinando seus resíduos em locais inadequados como rios, terrenos baldios, praias, praças, e demais localidades provocando a contaminação das águas e a proliferação de vetores e doenças.

Um dos fatores de maior influência negativa nessa proporção de domicílios atendidos é a impossibilidade de acesso ao local de coleta pelos caminhões de lixo para a coleta direta. Em situações como essa é importante que se adote uma estratégia para a correta destinação desses resíduos não coletados para que não haja criação de lixões clandestinos nessas áreas, que, sem tratamento adequado causam todas as consequências já aqui abordadas.

O lixo descartado de forma inadequada também provoca entupimentos em canais de escoamento de águas pluviais e bueiros causando enchentes a tabela 16 traz com detalhes a amplitude desse serviço.

Tabela 16 - Proporção de domicílios com coleta de lixo por município do Brasil.

Proporção	Municípios	% do total de municípios
< 50%	489	8,9 %
50% a 70%	728	13,2 %
70% a 80%	771	14 %
80% a 90%	955	17,3 %
90% a 99%	526	9,6 %
100%	1.814	32,9 %
Sem informação	224	4,1 %

Fonte: Exame, 2008.

A abrangência da coleta de resíduos sólidos urbanos no ano de 2013 em nível nacional chegou a 90,41% da população, com as seguintes proporções em território nacional conforme mostrado na figura 22:

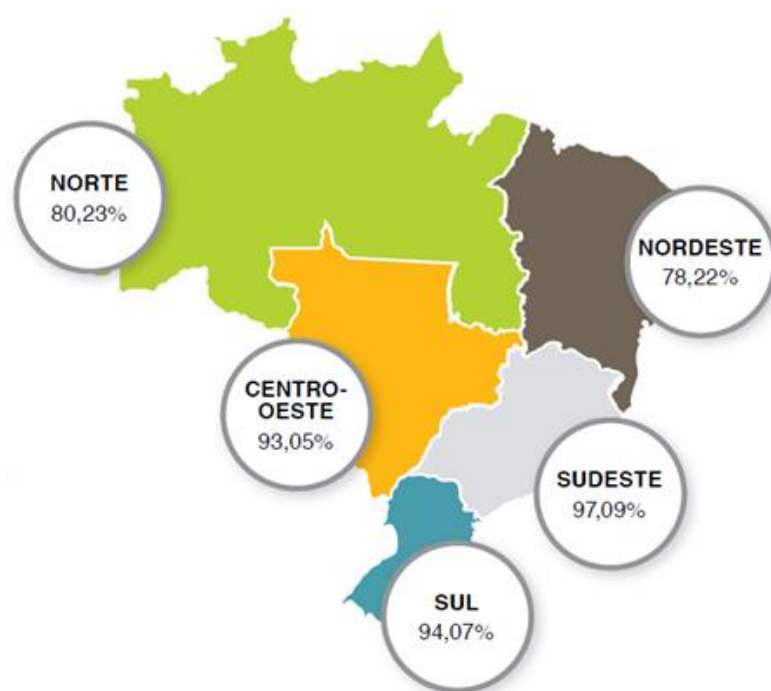


Figura 22 - Proporção de cobertura de coleta de RSU por região do Brasil.

A destinação final de RSU no Brasil é realizada basicamente em aterros sanitários, aterros controlados e lixões na proporção mostrada na figura 23.

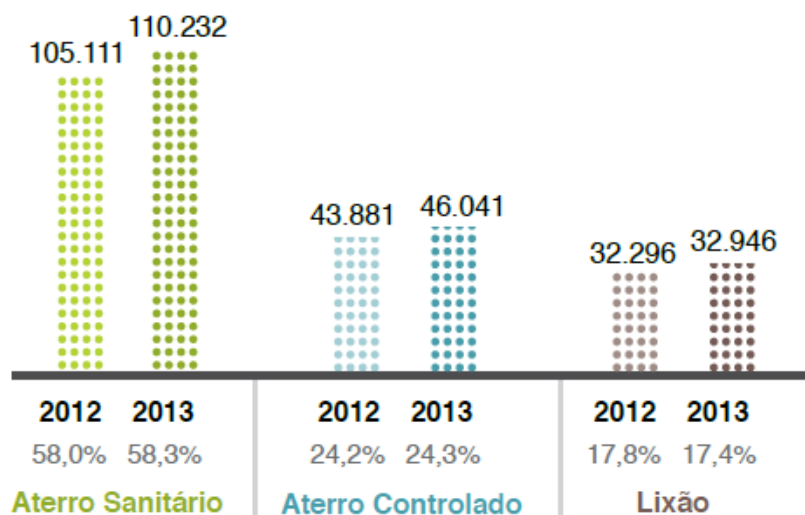


Figura 23 - Destinação final de RSU em toneladas/dia por tipo de unidade.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo IBGE no ano de 2000, e os levantamentos realizados pela ABRELPE em 2012 e 2013, a região centro-oeste possui o seguinte panorama de unidades de destinação final de RSU mostrados na tabela 17.

Tabela 17 - Unidades de destinação final de RSU, por categoria, na região Centro-Oeste.

Unidade de destinação final de RSU	2000	2012	2013
Lixão	406	160	158
Aterro Controlado	132	149	148
Aterro Sanitário	125	157	161

Fonte: PNSB – IBGE – 2000, ABRELPE.

A região centro-oeste com seus 467 municípios divididos em 3 estados e o Distrito Federal geraram, no ano de 2013, 16.636 toneladas/dia de RSU. Desse montante 93% foi coletado. Dos resíduos coletados, 70% (10.834 toneladas/dia) ainda são encaminhados para

aterros controlados que, do ponto de vista ambiental, pouco se diferem dos próprios lixões por não possuírem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e saúde pública.

A tabela 18 traz a quantidade de RSU gerado e coletado nos anos de 2012 e 2013 no estado de Mato Grosso do Sul.

Tabela 18 - Coleta e Geração de RSU em MS (2012 e 2013).

População Total		RSU Coletado				RSU Gerado (t/dia)	
		(Kg/hab./dia)		(t/dia)			
2012	2013	2012	2013	2012	2013	2012	2013
2.505.088	2.587.269	0,891	0,896	2.232	2.317	2.520	2.548

Fonte: ABRELPE, 2013.

A destinação final dos resíduos sólidos urbanos no estado de Mato Grosso do Sul obedece a seguinte proporção entre aterros sanitários, aterros controlados e lixões conforme mostrado na figura 24.

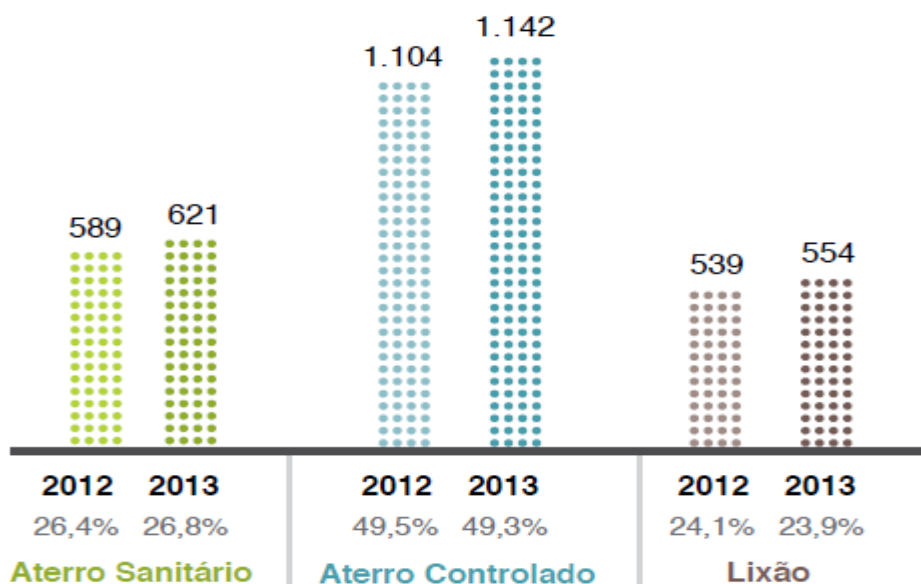


Figura 24 - Destinação final de RSU no MS por tipo de unidade (t/dia).

2. ESTUDO DE CASO

2.1 Localização do aterro Dom Antônio Barbosa II

Os resíduos sólidos urbanos de Campo Grande – MS depois de coletados são dispostos no aterro Dom Antônio Barbosa II, apontado no mapa apresentado na figura 25, que teve o início de suas atividades em 21 de novembro de 2012. O aterro localiza-se no anel viário BR-060 e ocupa uma área de 11,5 hectares (115 000 m²). Sua gestão está sob responsabilidade da empresa CG SOLURB Soluções e da Prefeitura Municipal de Campo Grande (PMCG). O aterro está localizado na região sul da cidade.

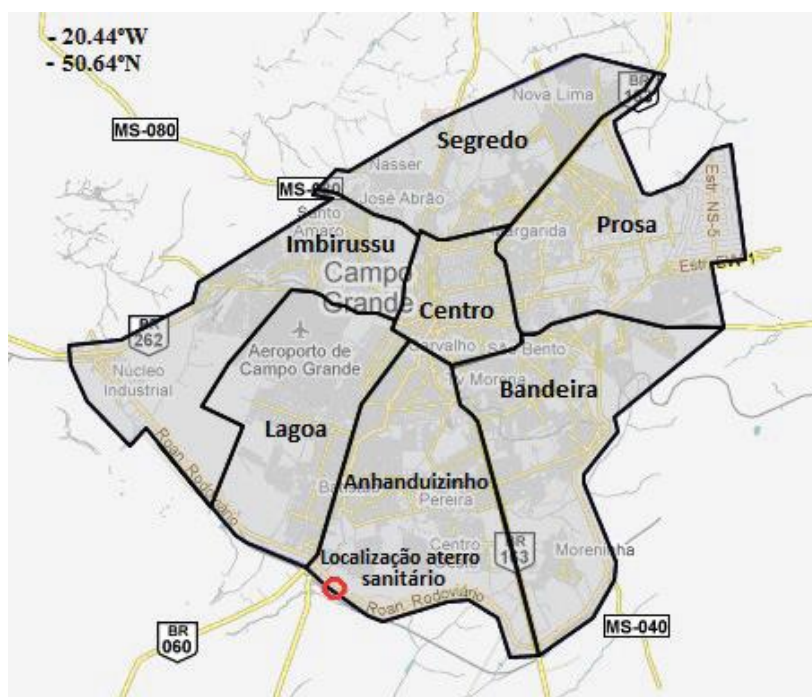


Figura 25 - Localização do aterro de Campo Grande (SEINTHRA 2008).

No ano de 2005 o montante total de resíduos sólidos urbanos coletados em Campo Grande ultrapassou as 172 mil toneladas, um valor quatro vezes superior ao de 1985 que não atingia 44 mil toneladas ano (MME, 2008). A figura 26 traz um gráfico demonstrando a evolução da quantidade de RSU produzido em toneladas na cidade de Campo Grande no período de 20 anos compreendido do ano de 1985 a 2005 em toneladas.

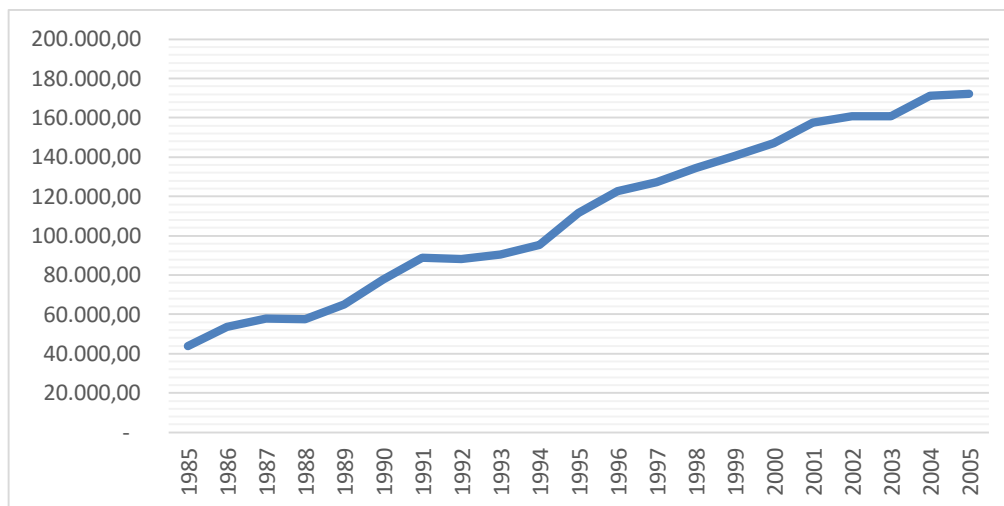


Figura 26 - Quantidade de RSU coletado em Campo Grande (ton.) (MME, 2015).

É importante salientar que nesse período os resíduos sólidos coletados na cidade eram depositados no então “lixão” existente na cidade sem qualquer tipo de cuidados com esse tipo de atividade.

Atualmente o aterro Dom Antônio Barbosa II é classificado como um aterro para “resíduos de classe II A – Não inertes”. Segundo a NBR 10004/2004 são contempladas nessa categoria os resíduos que possuem propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A figura 27 é uma vista aérea da região do Aterro Dom Antônio Barbosa II, nela estão evidenciadas 05 localidades. São elas:

1. **Lixão:** Trata-se do lixão usado previamente para destinação dos RSU da cidade, foi desativado em novembro de 2012;
2. **Aterro Controlado:** É o atual aterro em utilização para destinação dos RSU da cidade, encontra-se em operação desde novembro de 2012;
3. **Lagoa de Decantação:** Recebe toda o chorume que é captado pelos drenos horizontais instalados no aterro controlado, para posterior bombeamento para a ETE Los Angeles para tratamento;
4. **Captação Pluvial:** Lagoa de recepção das águas pluviais captadas pelas valetas instaladas nas margens do Aterro Controlado;
5. **ETE Los Angeles:** Estação de Tratamento de efluentes, recebe o chorume bombeado do aterro para tratamento.



Figura 27 - Vista aérea do aterro Dom Antônio Barbosa II e adjacências.

A figura 28, traz um registro do aterro em atividade em 08/05/2015.



Figura 28 - Foto do Aterro Dom Antônio Barbosa em operação no período matutino (08/05/2015).

Segundo o Perfil Socioeconômico da cidade de Campo Grande (2012), o serviço de coleta RSU cobre 98% da área urbana da cidade, com exceção dos loteamentos e assentamentos clandestinos (Plano Municipal de Saneamento Básico de Campo Grande, 11/2013), conforme dados trazidos na figura 29.

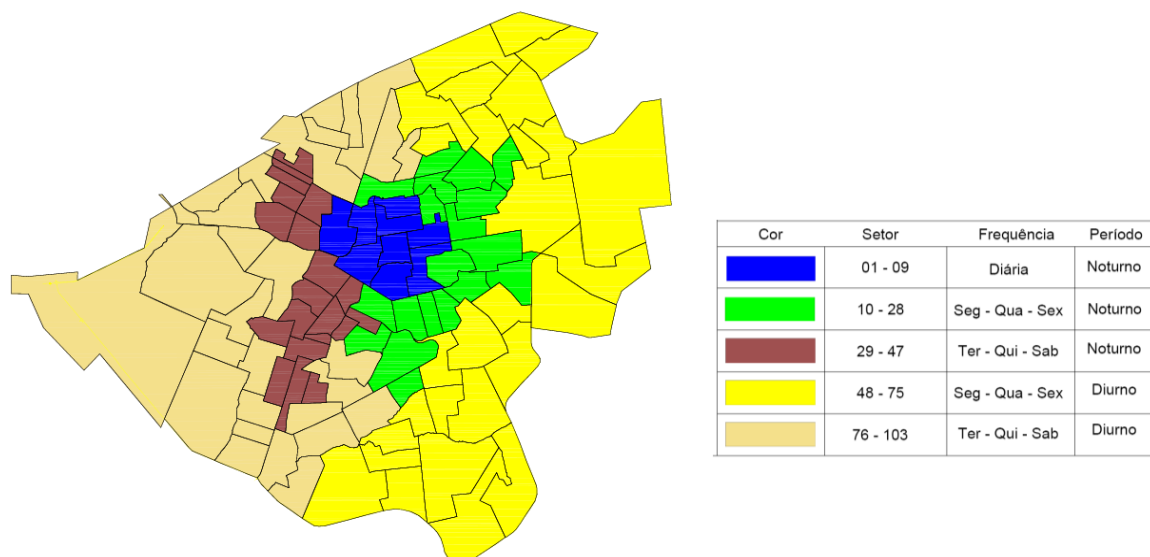


Figura 29 - Coleta de lixo em Campo Grande por setor, frequência e período.

O roteiro da coleta de RSU é otimizado e subdivide a cidade em 103 setores, com frequências distintas de acordo com as regiões da cidade. Sendo 47 setores noturnos (nove diários, e trinta e oito, três vezes na semana) e 56 diurnos (três vezes na semana). Na área central a coleta é feita diariamente no período noturno, e na periferia, 3 vezes por semana. Atualmente, coleta-se em média 734,60 toneladas/dia de RSU.

A empresa responsável pela operação do aterro realiza a cada quadrimestre uma análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados na capital. A análise gravimétrica consiste em determinar a quantidade proporcionada de um elemento ou composto presente em uma amostra, no caso, os resíduos sólidos urbanos, realiza-se então a conversão do constituinte em um composto de composição definida, a ser pesado.

Com base nas informações obtidas através da gravimetria do RSU foi possível quantificar o peso total em toneladas/mês que são coletados em Campo Grande no período de 1 ano, 05/2013 a 04/2014, conforme mostrado na figura 30.

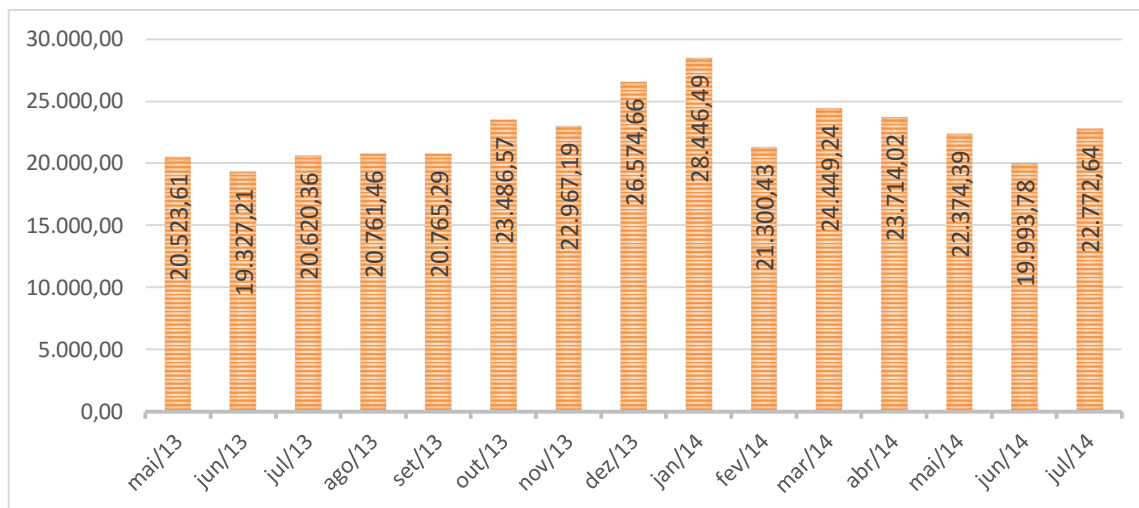


Figura 30 - Quantidade de toneladas de RSU coletados mensalmente em Campo Grande (SOLURB, 2014).

A avaliação gravimétrica realizada nos resíduos coletados no último quadrimestre do período acima mostrado indica a seguinte composição dos resíduos sólidos urbanos coletados conforme destacado na figura 31:

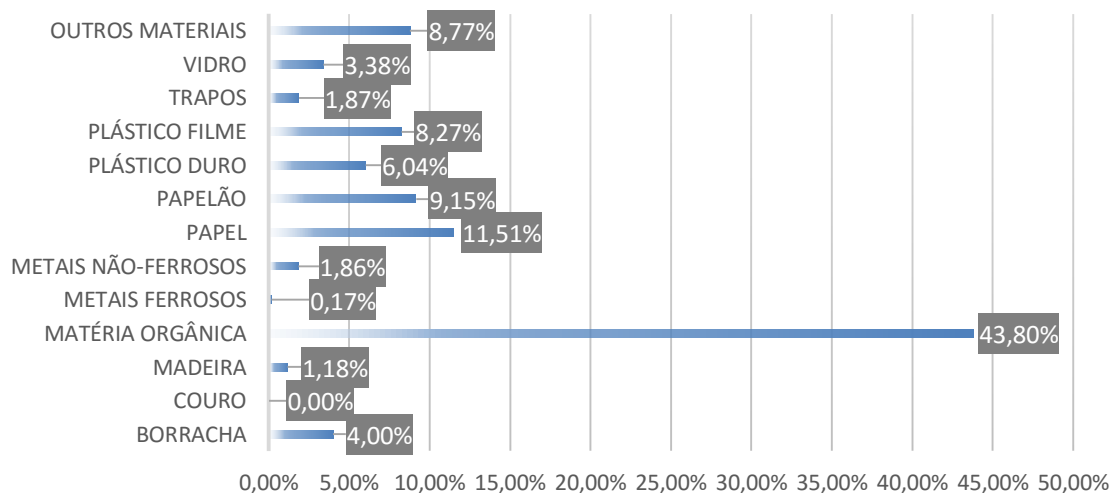


Figura 31 - Composição Gravimétrica dos RSU em Campo Grande 06/14 (SOLURB, 2014).

Através do estudo gravimétrico realizado é possível verificar, como mostrado, que mais de 43% da composição total dos RSU coletados em Campo Grande é constituído de matéria

orgânica sem contar papel, papelão, trapos, etc. Como dito anteriormente neste trabalho esse tipo de material sofre uma forte atividade biológica que tem início imediatamente após depósito no aterro produzindo percolato.

Com o objetivo de prevenir a contaminação do solo e do lençol freático da região com o percolato (chorume) produzido, toda a área onde há deposição de resíduo é preparada e coberta com uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2 mm de espessura como mostrado em detalhe na figura 32 e 33.



Figura 32 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando manta de PEAD.



Figura 33 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando manta de PEAD (detalhe).

O sistema de drenagem de efluentes percolados, em detalhe na figura 34 e 35, é interligado aos drenos verticais de gases instalados que são alteados conforme o aumento da massa de RSU depositada.

Assim, apesar desses drenos trabalharem com a função de permitir o escape de gases contidos na massa de resíduos sólidos para a atmosfera, também propiciam a percolação do chorume, por gravidade, até a rede de drenos horizontais na fundação do aterro.



Figura 34 – Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando dreno horizontal.

A drenagem interna do chorume é constituída de drenos cegos de brita que se desenvolvem ao longo do pé dos taludes internos e transversalmente a base da célula interligando-se com o dreno central, conforme evidenciado nas figuras 35 e 36.

O dreno central com elevada capacidade de vazão é constituído de um tubo de polietileno de alta densidade, ranhurado, com diâmetro de 300 mm, envolvido por camadas de transição constituídas de brita (8-16 mm) e de pedriscos (4-8 mm).



Figura 35 - Aterro Dom Antônio Barbosa II evidenciando dreno horizontal e caixa de coleta de chorume.

As caixas de passagem, trazidas nas figuras 36 e 37, e poços de acumulação são responsáveis por receber o chorume percolado dos RSU e posteriormente encaminhá-lo para a lagoa de decantação, mostrada nas figuras 38 e 39.



Figura 36 - Caixa de passagem do percolado captado.

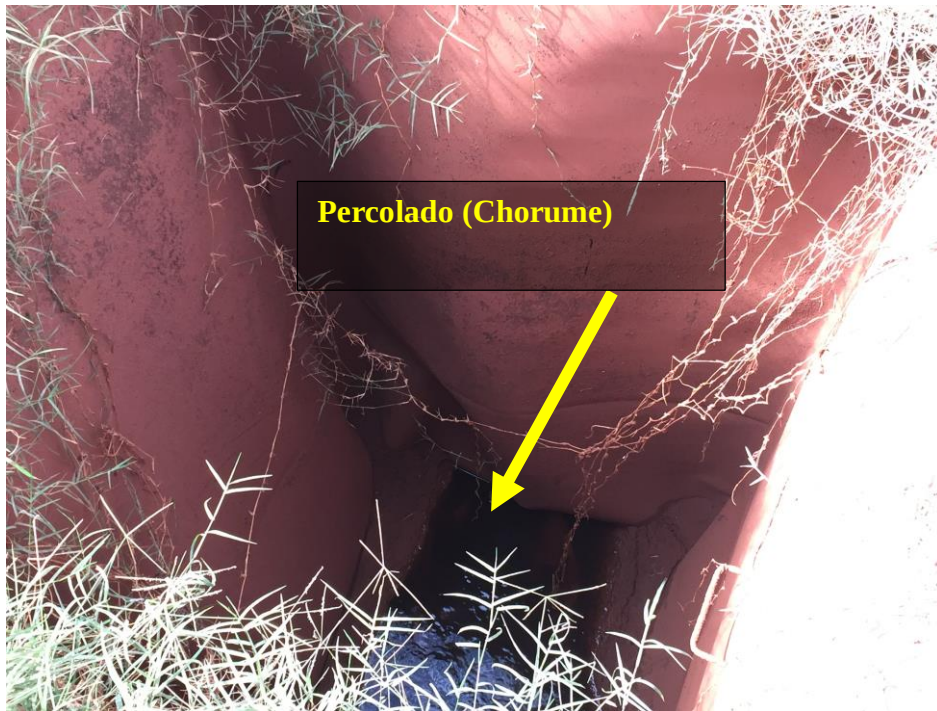


Figura 37 - Interior de uma caixa de passagem com o Chorume evidenciado.



Figura 38 - Lagoa de Decantação.



Figura 39 - Vista frontal da lagoa de decantação.

O tratamento de efluentes líquidos é realizado na estação de tratamento de efluentes (ETE) “Los Angeles”, a condução (bombeamento) do Chorume para a estação é subterrânea. O sistema de drenagem superficial visa promover o rápido e total escoamento das águas precipitadas no aterro, impedindo-as de entrar em contato com os resíduos depositados e também de iniciarem processos erosivos. Esse sistema é composto canaletas em concreto, tipo meia cana instaladas nos bordos do acesso ao aterro com o objetivo de captar as águas pluviais e conduzi-las até a região de sua concentração aqui tratada como lagoa pluvial.



Figura 40 - Lagoa de recepção da captação pluvial.

Os taludes são revestidos com uma densa e rasteira cobertura vegetal, que tem a finalidade de prevenir as erosões, de proteger, bem como evitar a lixiviação das águas pluviais. A proteção superficial com grama (plantio de vegetação) nas áreas com tendência a erosão tem a finalidade de protegê-las superficialmente (figuras 41 e 42).

Caixas de passagem também são utilizadas para a passagem das águas pluviais das canaletas para os bueiros que por sua vez, por serem subterrâneos, objetivam a transposição do acesso viário, de forma a conduzir as águas pluviais ao local de desague (lagoa pluvial).



Figura 41 - Preparação do talude para o posterior recebimento de cobertura vegetal.



Figura 42 - Cobertura vegetal parcial do talude.

O sistema de drenagem de gases é constituído de drenos verticais, com o objetivo de coletar o biogás na massa de resíduos, atravessando todas as camadas do aterro, até atingir a superfície. Os drenos verticais são constituídos de tubos, de diâmetro mínimo de 30 cm, devidamente perfurados como mostrado na figura 43.



Figura 43 - Dreno vertical de Biogás em fase de implantação em nova camada de aterro.

Ao redor dos tubos é disposta uma camada de brita ou pedra de mão, para sua proteção com espessura de 0,60 m e uma tela metálica de modo que a mesma permaneça estável, antes da disposição de resíduos sólidos ao redor do dreno como mostrado nas figuras 44 e 45.



Figura 44 - Dreno vertical de Biogás revestido com brita e tela.



Figura 45 - Dreno vertical de Biogás revestido com brita e tela (detalhe).

2.2 Estimativa do Potencial de Geração de Metano

Uma boa previsão da quantidade de emissões de um aterro é importante, não apenas para a sua avaliação técnica e econômica, que por sua vez irá definir a viabilidade da implantação do projeto de captação de gás, mas, também, para auxiliar a sua gestão e controle de emissões.

Estão disponíveis na bibliografia diversas metodologias para cálculos estimados de valores de produção de gás de aterro a partir de resíduos sólidos urbanos. Os modelos monofásicos e multifásicos de primeira ordem são os mais amplamente adotados para tal avaliação por determinarem o decaimento da geração de metano com o passar do tempo.

No entanto, é necessária uma validação desses modelos de acordo com a região onde serão aplicados em função da variação do clima e umidade da localidade. Essa validação é executada por meio de coleta e posterior medição da emissão do gás gerado determinando assim sua eficiência (SCHARFF, 2006).

A umidade de uma localidade é determinada com base no seu histórico pluviométrico indicando se a região é úmida, pouco úmida, ou seca.

2.2.1 Modelos teóricos de geração de energia a partir do biogás de aterros.

Os principais modelos de estimativa de primeira ordem de geração de biogás de aterro são divididos em monofásicos e multifásicos. Serão apresentadas aqui algumas dessas metodologias para previsão de geração do biogás de aterro: dois modelos monofásicos e quatro modelos multifásicos.

A diferenciação dos modelos monofásicos e dos modelos multifásicos, exemplificados na tabela 19, está no primeiro considerar toda a matéria orgânica que se encontra no aterro com uma taxa de degradação constante que é obtida a partir da média da quantidade de carbono biodegradável existente e característico de cada tipo de resíduo, já os multifásicos trabalham com várias categorias onde cada uma possui a sua respectiva taxa de degradação e potencial de degradação.

Tabela 19 - Modelos teóricos de geração de biogás em aterros.

Modelos Monofásicos	Modelo TNO
	Modelo LandGEM (US-EPA)
Modelos Multifásicos	Modelo TNO Multifásico (Afvalzorg)
	Modelo EPER Francês
	Modelo IPCC, 2006 e Banco Mundial

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o modelo multifásico IPCC. A referida metodologia que faz uso do modelo teórico de estimativa para a previsão do volume de metano será a proposta para utilização neste trabalho para um período de tempo considerado e o método utilizado é o modelo multifásico desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

O cálculo de potencial para a geração no aterro fez uso da metodologia contida no Módulo 6 – Lixo, do Guia para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (GEE); Volume 2: Livro de Trabalho; Módulo 5 – Resíduos, Volume 2: Geração de Resíduos, Composição e Gestão de Dados; e Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos.

Para o cálculo da geração de emissão de metano segundo a metodologia proposta no aterro Dom Antônio Barbosa II será utilizada a equação 2.1:

$$E_{CH_4} = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(x-T)} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

E_{CH_4} = Emissão de metano (m^3CH_4 / ano);

k = Constante de decaimento (valor obtido a partir da Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 2006, para clima tropical – resíduo úmido);

R_x = Fluxo de resíduos do ano (tonRSD);

L_0 = Potencial de Geração de metano (m^3 biogás / tonRSD);

X = Ano atual;

T = Ano de deposição do resíduo no aterro (início de operação).

Para efetuarmos este cálculo, contudo, é necessário obtermos por meio de cálculo a fração de carbono orgânico degradável no RSU (COD) depositado no aterro, para isso faremos uso da equação 2.2.

$$COD = \sum COD_i \times W_i \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

COD = Fração de carbono orgânico degradável do lixo (valor obtido a partir da composição do material depositado no aterro e da Tabela 2.5 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 2: Geração de Resíduos, de 2006. E será trazido na tabela 20.);

COD_i = Fração de carbono orgânico degradável do tipo de resíduo i ;

W_i = Fração do tipo de resíduo i por categoria do resíduo.

Tabela 20 - Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do lixo.

Componentes	Porcentagem COD (em massa)
Papel, papelão	40
Restos de alimentos	15
Resíduos de parques e jardins	17
Tecidos	40
Madeiras	30

Fonte: IPCC, 2006.

Após encontrado um valor para o COD, é então calculado o potencial de geração de metano no resíduo L_0 , efetuado pela equação 2.3:

$$L_0 = FMC \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

L_0 = Potencial de geração de metano do resíduo (m^3 biogás / tonRSD);

FMC = Fator de correção do metano;

COD_f = Fração altamente biodegradável do resíduo brasileiro;

$\frac{16}{12}$ = Conversão de carbono para metano (CH_4).

A fração de COD dissociada (COD_f), segundo Birgime (1987), indica a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida na equação 2.4, que segue:

$$COD_f = 0,014T + 0,28 = 0,77 \quad \text{(Equação 2.4)}$$

Onde:

T = Temperatura (°C) na zona anaeróbica dos resíduos, estimada em 35°C;

F = Fração de metano presente no Biogás. Caso o aterro não possua o valor real da quantidade de metano presente no Biogás, pode-se utilizar a estimativa de 0,5, pois geralmente a quantidade de metano presente no biogás de aterro está em torno de 50%;

O Fator de Correção do Metano (FCM), que avalia a qualidade do aterramento do lixo, considera o fato do resíduo aterrado de forma inadequada produzir menor quantidade de metano em relação àquele destinado a locais adequados, onde uma maior parte do lixo é decomposta em condições anaeróbicas.

Os valores recomendados pelo IPCC para o FCM são os que seguem na tabela 21:

Tabela 21 - Valores de FCM de acordo com o tipo de local.

Tipo de local	FCM – Fator de Correção de Metano
Adequado – aterro bem gerenciado	1,0
Inadequado – profundo (>5m de lixo)	0,8
Inadequado – raso (<5m de lixo)	0,4

O FCM foi estimado a partir dos critérios estabelecidos pela metodologia, pois o aterro Dom Antônio Barbosa II em Campo Grande tem características de aterro controlado, contando

com as medidas adequadas para confinamento ideal dos resíduos, drenagem do chorume, impermeabilização do solo, formação de células de lixo e cobertura com terra.

A unidade do potencial de geração de metano do resíduo (L_0), ao ser calculada através da equação 2.3 será “kg CH₄ / Kg RSD”. Portanto, será necessário dividir o valor obtido por 0,0007168 ton/m³ que é o valor da densidade do metano para que a unidade seja convertida para a recomendada pelo IPCC, que é “m³ biogás / tonRSD”.

Dessa forma, após serem obtidos L_0 , k , e o fluxo de resíduo no ano, aplicamos a equação 2.1 para se obter a quantidade de metano emitida por ano no aterro.

2.3 Resultados de produção de Biogás para o aterro Dom Antônio Barbosa II

As metodologias existentes na bibliografia para estimativa de produção de gás de aterro baseado no depósito de resíduos sólidos urbanos, incluindo as que aqui foram indicadas, diferem entre si pelas suas considerações inerentes ao método, pelas suas complexidades e pela quantidade de dados que demandam para execução dos cálculos.

O método utilizado neste trabalho é preconizado pelo IPCC e bastante difundido para a referida estimativa teórica. Mesmo sendo bastante fiel à realidade dos aterros onde já foram aplicados, uma melhor maneira de determinar o potencial de um aterro é a utilização de dados coletados em campo referente à quantidade de biogás, concentração de metano no biogás.

A metodologia do IPCC, por ser simplificada, foi escolhida para aplicação neste trabalho, pois demanda uma quantidade de dados reduzida para o levantamento das emissões de metano do aterro, quando comparada com as demais metodologias existentes para o mesmo cálculo, a partir de resíduos sólidos urbanos em regiões e países específicos. Outro motivo, foi a abertura do aterro ter sido realizada há pouco tempo (2 anos e 7 meses), bem como a pequena disponibilidade de dados para um levantamento mais acurado com outras metodologias.

Este método envolve a estimativa da quantidade do carbono orgânico degradável presente no RSU, possibilitando assim o cálculo da quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de lixo depositado, considerando categorias de resíduos sólidos domésticos, que no caso, é o tipo de resíduo atendido pelo aterro em questão.

Para o mesmo período a quantidade mensal em toneladas de RSU coletados que é verificada no gráfico da figura 46.

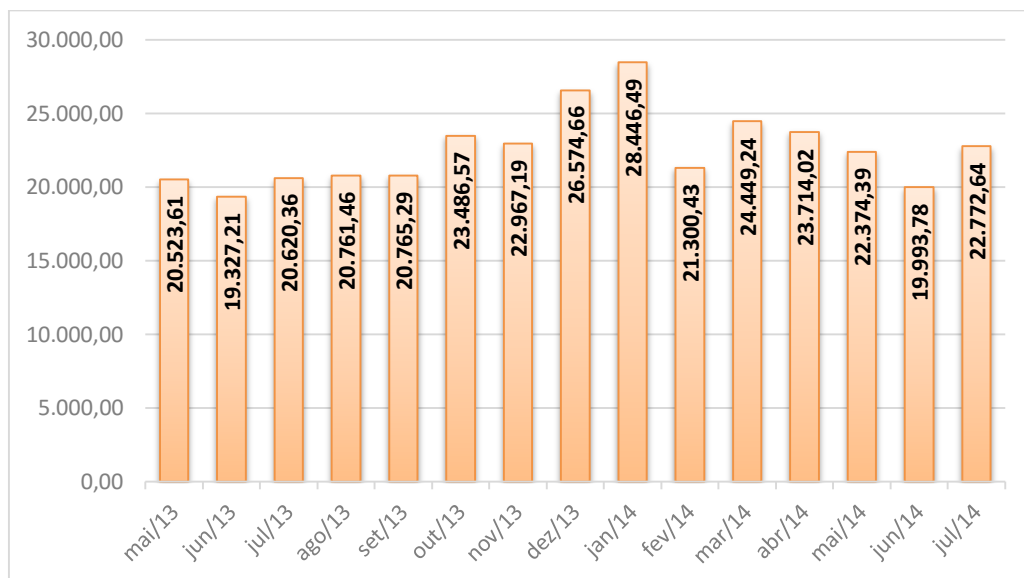


Figura 46 - Gráfico da quantidade em toneladas de RSU/mês coletado em Campo Grande.

Fazendo uso das proporções disponíveis na gravimetria é possível calcular os seguintes valores para COD no período citado em cada quadrimestre, obtendo-os conforme disposto na tabela 23.

Tabela 23 - Valor de COD para a composição de RSU do aterro Dom Antônio Barbosa II

Cálculo do COD	abr/2013	jul/13	out/13	jan/14	abr/14	jul/14
(A) papel e papelão	6,00%	4,22%	4,00%	11,60%	7,20%	8,26%
(C) restos de alimentos	8,10%	6,62%	7,65%	2,78%	3,60%	6,57%
(D) tecidos	0,96%	0,90%	0,48%	0,72%	5,04%	0,45%
(E) madeira	0,00%	0,26%	0,00%	0,15%	0,09%	0,35%
COD total	0,1506	0,119946	0,1213	0,15245	0,1593	0,156371

Utilizaremos como referência os valores de COD obtidos em jul/2014 para prosseguirmos com a realização dos cálculos e também para termos um valor padrão para a estimativa da quantidade de metano produzida:

$$COD = (0,4 \times A) + (0,15 \times B) + (0,30 \times C) + (0,24 \times D)$$

$$COD = (0,4 \times (11,51 + 9,15)) + (0,15 \times 43,80) + (0,30 \times 1,18) + (0,24 \times 1,87)$$

$$COD = 15,6371$$

$$COD = 0,156371$$

Divide-se o valor de COD obtido por 100 em função das porcentagens. Os valores de W_i (A, B, C, D) foram obtidos através da composição gravimétrica dos resíduos realizada em jul/2014, levou-se em consideração no presente estudo o cálculo de papel/papelão, matéria orgânica, madeira e trapos que foram destacados na tabela 22.

Os valores referentes aos resíduos provenientes de praças, parques e jardins não foram aqui considerados pelo motivo de os mesmos não serem depositados no aterro em questão, sendo encaminhados para uma outra localidade diferenciada.

2.3.2 Cálculo de L_0

$$L_0 = FMC \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 1 \times 0,156371 \times 0,77 \times 0,5 \times \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 0,0802 \text{ KgCH}_4/\text{KgRSD}$$

Considerando a densidade do CH_4 ($0^\circ C$ e 1,013 bar) como $0,0007168 \text{ t/m}^3$ (FIGUEIREDO,2007), tem-se:

$$L_0 = \frac{0,0802 \text{ KgCH}_4/\text{KgRSD}}{0,0007168 \text{ t/m}^3} = 111,886 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tRSD}$$

2.3.3 Cálculo da emissão de metano

De acordo com a Tabela 3.3 do Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, de 1996, tem-se o valor de k para clima tropical – resíduo úmido (de acordo com a composição do lixo), sendo que:

- Valor de k para papel: 0,07;
- Valor de k para resíduos orgânicos: 0,17;
- Valor de k para têxteis: 0,07;
- Valor de k para madeira: 0,035;
- Valor de k para médio: 0,09;

O valor de R_x refere-se ao fluxo de resíduo sólido doméstico (RSD) no período de um ano (ou 12 meses), de forma que o período que será considerado neste trabalho será os 12 primeiros meses demonstrados na figura 46 (05/2013 a 04/2014).

O valor de R_x para o período considerado é:

$$R_x = 20.526,61 + 19.327,21 + 20.620,36 + 20.761,46 + 20.765,29 + 23.486,57 + 22.967,19 + 26.574,66 + 28.446,49 + 21.300,43 + 24.449,27 + 23.714,02$$

$$R_x = 272.936,53 \text{ t}$$

Calculando E_{CH_4} ,

$$E_{CH_4} = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(x-T)}$$

$$E_{CH_4(05/2013 \text{ a } 04/2014)} = 0,09 \times 272.936,53 \times 111,886 \times e^{-0,09(2014-2012)}$$

$$E_{CH_4(05/2013 \text{ a } 04/2014)} = 2.295.656,560 \text{ m}^3CH_4/\text{ano}$$

$$E_{CH_4(05/2013 \text{ a } 04/2014)} = 262,061 \text{ m}^3CH_4/h$$

Se a fração de metano presente no biogás do aterro Dom Antônio Barbosa II for de 50%, a quantidade de biogás será o dobro de E_{CH_4} , ou seja, será duas vezes a quantidade de metano obtida na Equação 2.1. (ICLEI, 2009).

Dessa forma, a estimativa teórica da geração de biogás encontrada para o aterro Dom Antônio Barbosa II utilizando a metodologia proposta pelo IPCC é a que segue na tabela 24:

Tabela 24 - Comportamento da geração de gás metano e biogás.

Elemento	Emissão (m ³ /h)	Período	
		Inicial	Final
Metano	262,061	05/2013	04/2014
Biogás	524,122	05/2013	04/2014

A partir da metodologia adotada é possível calcular a vazão teórica de gás metano e biogás para o aterro Dom Antônio Barbosa II. Acredita-se que parte do fluxo de biogás gerado no aterro não esteja sendo devidamente conduzido para os drenos verticais de captação, escapando pela superfície do mesmo por meio de trincas, fissuras em função possivelmente de eventual falha de operação.

É possível fazer essa avaliação com visita *in loco*. No entanto, esse tipo de problema na estrutura do aterro é comum, sendo regularmente abordado pela literatura em outros trabalhos para outros aterros. Outra possibilidade é o vazamento de biogás pelos drenos horizontais para a condução do chorume na base do aterro, haja vista que, os mesmos são interligados.

2.3.4 Incertezas associadas

A tabela 25 traz a faixa de incerteza prevista para cada parâmetro calculado, ou seja, a taxa de recuperação de metano vai depender da maneira como são estimadas as quantidades de metano recuperado.

Os valores de incertezas apresentados são propostos pelo IPCC e são taxas inerentes à metodologia de cálculo, como segue:

Tabela 25 - Incertezas associadas aos parâmetros sugeridos pelo IPCC.

Parâmetro	Faixa de Incerteza
$RSU_T * R_X$	$> \pm 10\%$
$COD = 0,21$	-50%, +20%
$COD_F = 0,77$	-30%, 0%
$FCM = 1$	-10%, 0%
$F = 0,5$	-0%, 20%
Recuperação de metano (k)	A faixa de incerteza dependerá da forma em que são estimadas as quantidades de metano recuperado, mas é provável que essa incerteza seja relativamente pequena se comparada com outras quando se aplicam sistemas de medição.
OX	O fator OX deverá ser incluído na análise da incerteza quando tenha sido indicado um valor diferente de zero.
Taxa de geração de metano = 0,09	-40%, +300%

FONTE: IPCC (1996), adaptado.

2.4 Aproveitamento energético do aterro

Com os valores de produção de biogás obtidos para o aterro e adotando o valor do potencial calorífico (PC_{CH_4}) do Biogás da tabela 6, calculamos o aproveitamento energético do aterro fazendo uso dos fatores de conversão de energia propostos pelo Atlas de Energia Elétrica do Brasil (MME) que seguem na tabela 26.

Tabela 26 - Fatores de conversão de unidades de energia.

de >> para	Multiplicar por				
	J	Btu	cal	kWh	tep
Joule (J)	1,0	$947,8 \times 10^{-6}$	0,23884	$277,7 \times 10^{-9}$	$2,388 \times 10^{-11}$
Btu	$1,055 \times 10^3$	1,0	252,0	$293,07 \times 10^{-6}$	$2,52 \times 10^{-8}$
Caloria (cal)	4,1868	$3,968 \times 10^{-3}$	1,0	$1,163 \times 10^{-6}$	10^{-10}
Quilowatt-hora (kWh)	$3,6 \times 10^6$	3.412,0	$860,0 \times 10^3$	1,0	$8,6 \times 10^{-5}$
Ton. Equiv. de Petróleo (tep)	$41,87 \times 10^9$	$39,68 \times 10^6$	$10,0 \times 10^9$	$11,63 \times 10^3$	1,0

FONTE: Atlas de Energia Elétrica do Brasil (MME).

A equação 2. permite calcular o poder calorífico total (PCt) por hora da emissão estimada de gás metano do aterro:

$$PCt = E_{CH_4} \times PC_{CH_4} \quad \text{(Equação 2.5)}$$

Para o caso em estudo chega-se a:

$$PCt = 262,061 \, m^3 CH_4/h \times 5600 \, kcal/m^3$$

Utilizando os valores de conversão trazidos na tabela 26 para a transformação de kcal para kWh tem-se que 5600 kcal/m³ equivalem a 6,5128 kWh de energia. Adaptando na equação 5, conclui-se que:

$$\text{Pot. Geração} = 262,061 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h} \times 6,5128 \text{ kWh} \quad (\text{Equação 2.6})$$

$$\text{Potencial de Geração} = 1706,75 \text{ kWh} = 1,7 \text{ MWh}$$

Para se gerar energia elétrica a partir do biogás é necessário a ocorrência de uma combustão controlada. Nessa combustão a energia química é transformada em energia térmica ou mecânica, ativando um gerador que a converte em energia elétrica. Para esta utilização, segundo ICLEI (2010), temos duas tecnologias que se destacam: os motores de combustão interna (ciclo Otto) e as microturbinas a gás.

2.4.1 Motor de combustão interna – ciclo Otto

Os motores de combustão interna são bastante utilizados por possuírem a opção de trabalho com combustíveis líquidos ou combustíveis gasosos. São máquinas térmicas onde a energia química do combustível que está sendo utilizado se transforma em trabalho mecânico. Representam a tecnologia mais divulgada entre as máquinas térmicas, devido a sua simplicidade, robustez e alta relação potência/peso, o que faz com que esses acionadores sejam utilizados em larga escala na geração de eletricidade (SALOMON, 2007).

Seu princípio de funcionamento caracteriza-se por ignição à faísca e é o equipamento mais utilizado para queima do biogás, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo, quando se compara a outras tecnologias existentes. No entanto, para essa finalidade é necessário a realização de ajustes no sistema de alimentação, ignição e taxa de compressão (ICLEI, 2010).

Os motores de grande porte têm o inconveniente de serem importados, pois no Brasil a maior potência disponível desse tipo de equipamento é de 230 kW. O rendimento destes

motores é de aproximadamente 28% e a geração de energia elétrica é realizada pelo grupo gerador, acoplado diretamente ao motor. A eficiência do motor decresce violentamente quando o teor de metano do biogás é inferior a 50% e não é sensível às condições de temperatura, pressão e umidade locais o que não ocorre com as turbinas a gás. Atualmente os motores de combustão interna já vêm preparados para queimar o biogás com diferentes teores CH_4 , CO_2 e H_2S .

2.4.2 Microturbinas a gás

Provenientes das indústrias aeroespaciais e automotivas, as microturbinas evoluíram para uma utilização em sistemas elétricos de potência.

As microturbinas são turbinas de combustão que trabalham na faixa de 30kW até 1MW com elevada taxa de rotação e possibilidade de uso de diversos combustíveis, dentre eles, o biogás.

A utilização de gás de baixo poder calorífico (gás de aterro por exemplo) em uma microturbina demanda a observação de dois pontos relevantes que influenciam diretamente no rendimento da conversão de energia:

1. A remodelação para queima de um gás pobre;
2. Limpeza do gás antes da queima.

Sem esses ajustes a eficiência de uma microturbina gira entre 15 a 17%, já com os ajustes sugeridos a eficiência pode atingir um patamar de 33%.

2.4.3 Tecnologias de conversão

Para geração de energia de médias e grandes capacidades os motores de combustão interna são mais adequados devido ao seu menor custo e maior eficiência nessa faixa de

operação. Somente para altas capacidades as turbinas de gás passam a ter economicidade melhorada quando utilizadas em ciclos combinados (ABREU, 2011).

Os motores a combustão interna de ciclos Otto ou Diesel possuem maior eficiência na faixa de operação deste trabalho. Motores de ciclo Diesel trabalham com taxa de compressão mais elevada, sendo então mais difícil trabalhar com biogás neste modelo. Visto que no mercado brasileiro os motores de ciclo Otto podem ser mais facilmente adaptados para funcionar com biogás, torna-se recomendável a utilização dos mesmo no aterro estudado.

Na tabela 27 apresenta-se um compilado das vantagens e desvantagens das tecnologias de conversão de Biogás em energia elétrica utilizando-se os motores de combustão interna e as turbinas a gás. O compilado envolve análise de custo, valor de manutenção, espaço necessário para operação, modularidade, eficiência, etc.

Tabela 27 - Comparativo de tecnologias para conversão do Biogás

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Motor de Combustão Interna	Baixo custo de manutenção	Limitação de potência
	Pequeno tamanho de instalação	
	Rápida instalação	
	Modularidade do Sistema	
	Diversidade de fornecedores de equipamentos	
	Eficiência em carga total e parcial	
Turbina a gás	Sem formação de condensadores	Investimento inicial elevado
	Maior confiabilidade mecânica	Maior sensibilidade a partículas e impurezas
	Combustão mais completa	

Fonte: MMA (2005) citado em ABREU (2011).

2.5 Informação sobre as emissões produzidas

As informações sobre as vazões e as características do lixiviado (chorume) são fornecidas pela empresa gestora do aterro, e os registros de volume foram disponibilizados apenas para os meses de 05/2013, 06/2013 e 07/2013 e são apresentados na tabela 28.

Tabela 28 - Volume de chorume produzido pelo aterro.

Mês	Volume de Chorume produzido pelo aterro (m³)
05/2013	1.423
06/2013	1.270
07/2013	1.288

Fonte: ETE Los Angeles (2015).

Os relatórios de ensaio apresentam as características físico-químicas do chorume em 10/2013, 01/2014 e 04/2014 e estão disponíveis na tabela 29.

Tabela 29 - Resultados analíticos das amostras de chorume.

Parâmetros	Unidades	Resultados		
		10/2013	01/2014	04/2014
Alcalinidade total	mg/L	810,0	1.998,5	4.275,3
Cloreto	mg/L	1.614,0	1.027,0	1.592,0
DBO _(5,20)	mg/L	999,9	1.450,0	2.390,0
DQO	mg/L	2.000,0	3.460,0	5.470,0
Fosfato total (como P)	mg/L	4,2	7,8	14,2
Nitrato (como N)	mg/L	< 1,0	< 0,1	< 0,1
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	388,0	212,0	650,7
Nitrogênio Orgânico	mg/L	93,0	67,0	289,3
Nitrogênio total kjeldahl	mg/L	471,0	279,0	940,0
Oxigênio dissolvido	mg/L	< 2,0	< 2,0	< 2,0
pH	-	7,94	7,82	7,83
Sólidos totais	mg/L	5.299,0	4.603,0	8.041,0
Turbidez	mg/L	130,0	223,3	266,4
Coliformes totais	NMP/100ml	$7,3 \times 10^5$	$2,7 \times 10^5$	$2,1 \times 10^5$
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100ml	$1,5 \times 10^3$	$5,3 \times 10^4$	$6,3 \times 10^3$
Alumínio	mg/L	0,414	1,717	0,678
Bário	mg/L	0,069	0,100	0,097
Cádmio	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chumbo	mg/L	< 0,01	< 0,01	0,013
Cobre	mg/L	< 0,005	< 0,005	0,029
Cromo	mg/L	0,059	0,034	0,072
Ferro	mg/L	9,3	14,1	9,4
Manganês	mg/L	0,392	1,4	0,837
Mercúrio	mg/L	0,00046	< 0,00025	< 0,00015
Níquel	mg/L	0,057	0,047	0,073

Fonte: Laboratório Biolaqua Ambiental.

O chorume produzido como resultado da biofermentação ocorrida no aterro, com seus parâmetros apresentados na tabela 29, pode ainda ser utilizado como biofertilizante para utilização em pastagens, plantações e também para recuperação de áreas degradadas, haja vista que é um produto natural do processo de fermentação biológica, não demandando nenhum investimento adicional para sua obtenção.

É necessário que se realizem estudos específicos mais acurados para uma avaliação das possibilidades do emprego desse produto, tendo em vista que em sua composição existem materiais tóxicos que quando em determinadas concentrações são altamente perigosos para o ambiente e para as pessoas.

3. ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE NESTE CASO

Sustentabilidade é uma condição de qualquer processo ou sistema que lhe permite permanência por determinado prazo. Esse conceito transformou-se no princípio segundo o qual o uso dos recursos naturais deve satisfazer as necessidades da geração atual sem comprometer a satisfação das necessidades das próximas gerações. Adaptando-se para o termo *sustentabilidade no longo prazo*, entendendo que a expressão “longo prazo” é um tempo indefinido.

Também pode ser entendido que sustentabilidade é a capacidade de o ser humano interagir com o mundo, preservando o meio e não comprometendo as gerações futuras. O Conceito de Sustentabilidade é complexo e relativo, pois atende a um conjunto de variáveis interdependentes, mas pode-se dizer que deve ter a capacidade de integrar:

- **Questões Sociais:** É preciso respeitar o ser humano, para que este possa respeitar a natureza. E do ponto de vista humano, ele próprio é a parte mais importante do meio ambiente;
- **Questões Energéticas/Econômicas:** Sem energia a economia não se desenvolve. E se a economia não se desenvolve, as condições de vida das populações se deterioram;
- **Questões Ambientais:** Com o meio ambiente degradado, o ser humano abrevia o seu tempo de vida; a economia não se desenvolve; o futuro fica insustentável.

Como o conceito de sustentabilidade pode ser aplicado a qualquer processo independentemente da sua grandeza, podemos dizer então que para um processo ou sistema seja considerado sustentável é preciso que ele seja:

- Ecologicamente correto;
- Economicamente viável;
- Socialmente justo.

Segundo o Relatório de Brundtland (1991), o uso sustentável dos recursos naturais deve “suprir as necessidades da geração presente sem afetar a possibilidade das gerações futuras de suprir as suas”. O conceito de sustentabilidade começou a ser trabalhado na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (United Nations Conference on the Human

Environment - UNCHE), realizada na Suécia, na cidade de Estocolmo de 5 a 16 de junho de 1972, a primeira conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente.

A conferência de Estocolmo lançou as bases das ações ambientais em nível internacional, chamando a atenção internacional especialmente para questões relacionadas com a degradação ambiental e a poluição que não se limita às fronteiras políticas, mas afeta países, regiões e povos, localizados muito além do seu ponto de origem. Embora a expressão “desenvolvimento sustentável” ainda não fosse usada, a declaração, já abordava a necessidade de “defender e melhorar o ambiente humano para as atuais e futuras gerações” - um objetivo a ser alcançado juntamente com a paz e o desenvolvimento econômico e social.

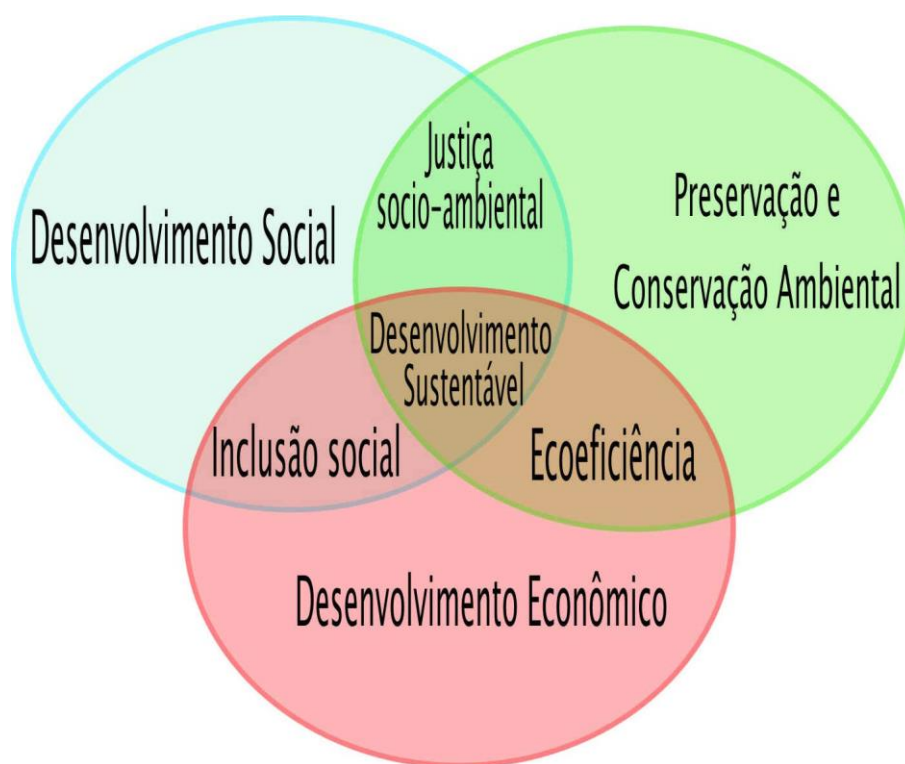


Figura 47 - Diagrama de interação dos três princípios da sustentabilidade.

A ECO-92, realizada em 1992, no Rio de Janeiro, consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável. A mais importante conquista da Conferência foi colocar esses dois termos, meio ambiente e desenvolvimento, juntos - concretizando a possibilidade apenas esboçada na Conferência de Estocolmo, em 1972, e fixando o uso do conceito de

desenvolvimento sustentável. Outra conquista da Conferência foi a Agenda 21, um amplo e abrangente programa de ação, visando a sustentabilidade global no século XXI.

O Protocolo de Quioto é um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que agravam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, como causas do aquecimento global. Discutido e negociado em Quioto no Japão em 1997, por ele se propõe um calendário pelo qual os países membros (principalmente os desenvolvidos) têm a obrigação de reduzir a emissão de gases do efeito estufa em, pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012, também chamado de primeiro período de compromisso (para muitos países, como os membros da UE, isso corresponde a 15% abaixo das emissões esperadas para 2008).

O protocolo estimula os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas ações básicas:

- Reformar os setores de energia e transportes;
- Promover o uso de fontes energéticas renováveis;
- Eliminar mecanismos financeiros e de mercado inapropriados aos fins da Convenção;
- Limitar as emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos;
- Proteger florestas e outros sumidouros de carbono.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um dos mecanismos de flexibilização criado pelo Protocolo de Quioto para auxiliar o processo de redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE) ou de captura de carbono (ou sequestro de carbono) por parte dos países signatários.

O objetivo do MDL é prestar assistência aos países não signatários do Protocolo de Quioto para que viabilizem o desenvolvimento sustentável através da implementação da respectiva atividade de projeto e contribuam para o objetivo final da convenção ao qual leva seu nome e, por outro lado, prestar assistência às signatárias para que cumpram seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões de gases do efeito estufa.

Países em desenvolvimento podem implementar projetos que contribuam para a sustentabilidade e apresentem uma redução ou captura de emissões de gases causadores do

efeito estufa, obtendo como resultado as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs, ou na sigla em inglês, CERs). Os RCEs emitidos pelo Conselho Executivo do MDL, podem ser negociados no mercado global.

O MDL visa o alcance do desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento (país anfitrião), a partir da implantação de tecnologias mais limpas nestes países. Para os países do Anexo I, o mecanismo facilita que cumpram suas reduções de emissão. Os projetos de MDL podem ser baseados em fontes renováveis e alternativas de energia, eficiência e conservação de energia ou reflorestamento. Existem regras claras e rígidas para aprovação de projetos no âmbito do MDL. Estes projetos devem utilizar metodologias aprovadas, devem ser validados e verificados por Entidades Operacionais Designadas (EODs), e devem ser aprovados e registrados pelo Conselho Executivo do MDL.

Os projetos devem ser aprovados pelo governo do país anfitrião através da Autoridade Nacional Designada (AND), assim como pelo governo do país que comprará os CERs. No Brasil, a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, estabelecida em 1999, atua como a AND Brasileira.

3.1 Análise social envolvida neste estudo

As tecnologias aqui propostas para a biometanização do aterro controlado Dom Antônio Barbosa II para atenuar a emissão de CH₄ na atmosfera apresentam baixo potencial de geração de empregos, necessita de mão de obra especializada. O número de empregados é pequeno, porém a mudança social pela qual passam as pessoas que dependem financeiramente da atividade de disposição de RSU é radical, o que é altamente relevante para reintegração social das pessoas envolvidas nesse tipo de atividade que geralmente vivem à margem da sociedade.

A recuperação do biogás para produção de energia também proporcionará a valorização da região do entorno do aterro, o que de certo ponto de vista, é uma melhoria no contexto social da área retirando o mal cheiro e melhorando a qualidade de vida da população na região.

De forma geral para a sociedade ocorrerá geração de emprego aliada à eliminação ou redução de sub-empregos, para a administração municipal e para a empresa uma menor rejeição

social das instalações de saneamento, uma vez que, elas passam a ser melhores gerenciadas e de forma mais adequada, representam um modelo a ser seguido e não mais um modelo a ser evitado.

Remanejamento da figura do “catador de lixo” para o trabalho através das cooperativas que trabalharão na triagem de recicláveis na usina de tratamento de resíduos (UTR) antes do mesmo ser encaminhado para a deposição final do aterro.

3.2 Análise ambiental do estudo

Por se tratar de uma forma de eliminação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, nesse aspecto, a geração de energia a partir do biogás de aterro contribui para a diminuição dos danos ao meio ambiente reduzindo a contribuição para o aquecimento global. Possibilidade de redução de consumo de combustíveis fósseis uma vez que o aproveitamento energético é uma realidade.

Prevenção da contaminação do solo e consequentemente do lençol freático da região em função da utilização da manta de PEAD para a condução do chorume para uma destinação correta, já em operação.

Possibilidade de utilização do chorume produzido no aterro para a recuperação de áreas degradadas, pelo fato do mesmo ser um biofertilizante natural de alta qualidade e parte espontânea e integrante do processo de biometanização do aterro. E a consequente diminuição dos vetores de doença inerente ao processo.

3.3 Análise econômico/energético

A análise da sustentabilidade econômica deste estudo será feita em conjunto com a energética haja vista que nos conceitos desenvolvidos durante o trabalho entendeu-se que esses dois vieses trabalham de forma concomitante.

Será levado em consideração também que a perda superficial de biogás no aterro será da ordem de 15%, que é uma média dos valores propostos nas bibliografias e está dentro dos parâmetros adotados em outros aterros que trabalham com recuperação de metano. Segundo Oonk & Boom (1995), a maior parte do biogás fugitivo, escapa por trincas e fissuras nas camadas de superfície do aterro e esse valor representa de 10 a 20% do metano produzido.

Tendo esses parâmetros como ponto de partida, temos à disposição um volume de metano de $210 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$ energeticamente correspondendo a 1,365 MW de energia disponível.

Para esse volume de biogás pode-se trabalhar, como exemplo, com um motor gerador da fabricante Caterpillar modelo G3520C que opera com uma potência máxima de 1,54MW de potência atendendo o aterro local. O equipamento tem uma eficiência máxima de 40% segundo a fabricante e foi adotado para o mesmo tipo de aplicação no Aterro de São João localizado na Zona Leste de São Paulo. No caso do aterro de São João o biogás que alimenta o grupo motor gerador possui uma concentração de metano que varia de 45% a 65% e o parque de geração possui 16 equipamentos totalizando 24,64 MW de capacidade instalada.

Uma comparação fiel seria a utilização do modelo da usina termelétrica de Bandeirantes que trabalham com o mesmo modelo de motogerador e segundo Just e Moliterno (2008) trabalham com a plena carga cada um recebendo $530 \text{ m}^3/\text{h}$ de biogás gera 925 kWh com uma concentração de metano de 50%. Para efeitos de cálculo energético será utilizado metade desses valores como referência, dada as similaridades dos sistemas, que no aterro Dom Antônio Barbosa II tem a mesma capacidade de vazão de biogás já consideradas as perdas.

Se essa quantidade calculada de geração recuperada pelo biogás fosse utilizada na própria empresa gestora do aterro, deixando de ser consumida em sua planta, sua autonomia seria em média de 666 MW disponíveis no mês o que aplicada nas condições determinadas pela concessionária local (ENERGISA), demonstradas na fatura, para consumidor do Grupo B de tarifação (baixa tensão), em 05/2015 com:

- Alíquota de ICMS a 17%;
- PIS 1,34120%;
- COFINS 6,17990%;
- TARIFA de 0,464700;
- Adicional de Bandeira Vermelha do período.

Com todas essas condições estabelecidas satisfeitas o valor de economia da empresa, caso a mesma tivesse um consumo correspondente da rede pública, em consumo de energia elétrica seria correspondente (em média) da ordem de R\$ 530.802,00 mensais.

Com esse potencial de geração segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 o consumidor poderia vender (creditar) essa minigeração de energia para a concessionária, o que não é possível definir ser mais ou menos interessante por não se ter acesso ao perfil de consumo de energia elétrica da empresa.

É importante salientar também que embora a comercialização da energia ou o próprio consumo da energia seja uma opção de renda, existe ainda a oportunidade de comercialização do chorume gerado pelo aterro, que atualmente é bombeado para a estação de tratamento de efluentes da concessionária local sem qualquer tipo de aproveitamento.

No momento não foram levados em consideração no estudo os parâmetros de investimento e avaliação como: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e Tributos aplicáveis em função da falta de dados obtidos, com relação ao aterro em questão.

4. CONCLUSÃO

Concluiu-se com o presente estudo que o aterro sanitário Dom Antônio Barbosa II localizado na cidade de Campo Grande no estado de Mato Grosso do Sul é um agente poluidor que contribui para o aquecimento global pelo fato de o mesmo não possuir mecanismos adequados de melhor aproveitamento do biogás gerado em sua massa, o que evitaria o escape para a atmosfera de uma média de 524,122 m³ de biogás por hora, sendo esse montante 50% composto de metano, altamente poluidor.

Aferiu-se através da aplicação da metodologia adotada do IPCC de cálculo para geração de energia com uso de biogás de aterro que, com o volume de 262,061 m³ de metano produzidos pelo aterro por hora durante o período analisado, existe a possibilidade real de uma minigeração própria de energia elétrica por meio de uma fonte sobretudo limpa. Com esse volume disponível, e com um potencial máximo de geração adotado de 925 kWh, baseado na concentração de metano e poder calorífico no estudo demonstrado, temos que, a quantidade de biogás gerada pelo aterro em 1 hora seria o suficiente para sustentar 8 casas populares com consumo mensal de energia elétrica de 115 kWh.

Como alternativa para o aproveitamento do biogás gerado no aterro, ainda surge a possibilidade do envasamento do metano produzido no aterro em botijões para seu aproveitamento, por exemplo, em veículos ou outras localidades. O volume de biogás produzido é correspondente a 26 botijões de 13kg por hora, ou, a metade desse valor (13 botijões) em metano.

O potencial de produção de biogás calculado neste estudo, por se tratar de uma fonte de energia renovável e sustentável, traz benefícios ambientais, sociais, e tecnológicos relevantes. A utilização dessa fonte no aterro Dom Antônio Barbosa II pode ser economicamente interessante, com potencial para atingir uma cifra de mais de R\$ 530.000,00 (quinhentos e trinta mil reais) mensais. Seu uso promove a descentralização, a cogeração e uma autonomia da empresa produzindo sua própria energia elétrica. Não foram analisadas para este estudo as possibilidades de comércio no mercado de carbono, por não haver interesse global atualmente, dados os baixos valores praticados quando comparados com os de outrora.

É importante continuar este estudo do ponto de vista econômico de forma mais rigorosa, levando em consideração a possibilidade de comercialização do chorume.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABREU, F.V. **Biogás – Economia, Regulação e Sustentabilidade**. Interciência. Rio de Janeiro. 2009.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico Técnico Institucional da Recuperação e Uso Energético do Biogás Gerado pela Digestão Anaeróbica de Resíduos**. Dissertação de Mestrado, PIPGE/USP, São Paulo, 2000.

ALVES, J.L.H.; PAULA, J.E.; **Madeiras nativas, anatomia, dendrologia, dendometria, produção e uso**. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Relatório Panorama dos Resíduos Sólidos. p. 38 – 85. 2013.

AUSTERMANN, S.; ARCHER, E.; WHITING, K.J. **Comercial Assessment – Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects**. 2007. Disponível em: < [http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/GUIDANCE/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20\(FULL%20REPORT\).PDF](http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/GUIDANCE/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20(FULL%20REPORT).PDF) >. Acesso em 24 de agosto de 2015.

BANCO MUNDIAL. Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe. 2003.

BARUFI, C.B.; SANTOS, E.M.; REIS, C. **Auto-suficiência energética e desenvolvimento: o comércio de gás natural entre Brasil e Bolívia**. Disponível em:< http://www.usp.br/prolam/downloads/2006_2_6.pdf >. 2002. Acesso em 24 de agosto de 2015.

BIDONE, F. R.A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. USP. São Carlos. 1999.

BLEY JR, C.; LIBANIO, J.C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M.M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas Energéticas, Ambientais e socioeconômicas**. Itaipu Binacional, Organização Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. TechnoPolitik. 2009.

BRAKEL, J.V. **The ignis fatuus of biogas**. Delft University Press. p.141. 1980.

BRANCO, S.M. **Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária**. CETESB. São Paulo. CETESB. 1971.

BRASIL, Política Nacional do Meio Ambiente – Lei nº 12.305/2010.

BUSWELL, A.M.; HATFIELD, W.D. **Anaerobic Fermentations**. Illinois. 1936.

CARVALHO, J.L.; PEREIRA, A.C.B.; VIEIRA, S.M.M. **Determinação da atividade metanogênica específica para acompanhamento de processos anaeróbicos de tratamento de efluentes**. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal, 2003.

CENBIO. Nota Técnica VII - **Geração de Energia a Partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais**, São Paulo, 2001.

CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. vol. 5. Belo Horizonte.1997.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSEN, P. **Basic Biochemical Process in Landfills**. Londres. 1989.

CONSELHO INTERNACIONAL PARA AS INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS (ICLEI). Manual para Aproveitamento de Biogás. vol. 1 - Aterros Sanitários. São Paulo, 2009.

DE BAERE, L. **State-of-the-art of anaerobic digestion of municipal solid waste**. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari. 2003.

DEGANUTTI, R. P. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Bauru. 2002.

DUFFUS, J.H. **Heavy metals - A meaningless term?** Pure and Applied Chemistry. v. 74. n. 5. p. 793-807, 2002.

EXAME. Anuário Exame de Infra Estrutura. Rio de Janeiro. 2008.

FERREIRA, V.; FABER, M. de O.; MESQUITA, S. da S.; PEREIRA Jr., N. Simultaneous saccharification and fermentation process of different cellulosic substrates using a recombinant

Saccharomyces cerevisiae harbouring the β -glucosidase gene. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 13, p. 1-7, 2010. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/producao-de-beta-glucosidase-em-saccharomyces.pdf>>. Acesso em: 24 agosto 2015.

GASPAR, R.M.B.L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo** - PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.

HOH, C. Y.; CORD-RUWISCH, R. **A practical kinetic model that considers end product inhibition in anaerobic digestion processes by including the equilibrium constant**: Biotechnology and Bioengineering. 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos**. 2010. Disponível em: <http://www.smis.gov.br/>. Acesso em 24 de agosto de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. 2000. Disponível em: <http://www.smis.gov.br/>. Acesso em 24 de agosto de 2015.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Guia para Inventários nacionais de gases de efeito estufa. Módulo 6: Lixo. vol. 2: Livro de Trabalho. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>>. Acesso em 24 de agosto de 2015.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T. F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. **Advances poultry litter disposal technology – a review**. Bioresource Technology. vol. 83. p. 27-36. 2002. Disponível em: <<http://josiah.berkeley.edu/2007Fall/ER200N/PolicyMemo/AdvancesInPoultryLitterDisposalTechnology.pdf>>. Acesso em 24 de agosto 2015.

KOSSMANN, W.; Ponitz U. Biogas Digest. Biogas Basics. Rural Development Series. vol. 1. Eschborn. 1997.

LUCAS JÚNIOR, J. **Aproveitamento energético de resíduos da suinocultura**. ENERGIA, Automação e Instrumentação. UFLA/SBEA. Lavras. 1998.

LUSK, P. **Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook**. U.S. Department of Energy, Washington, setembro 1998.

MCCABE, J. **Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes**. vol. 2. New York. Reinbold Publishing. 1957.

MELADO, J. **Pastagem ecológica e serviços ambientais da pecuária sustentável**. V CBA – Palestra. Rev. Bras. de Agroecologia. vol. 2. n.2. p. 1777-1783. 2007.

MEYNELL, P.J. **Methane: Planning a Digester**. New York. Schocken Books. 1976.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional (Ben). Rio de Janeiro: EPE. 2012. Anual.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro. 2008.

MONTEIRO, J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro. 2001.

NBR 10004: 2004 – Resíduos sólidos – Classificação.

NISHIMURA, C. M. O. **Análise comparativa de algoritmos de correlação local baseados em intensidade luminosa**. Dissertação de Mestrado. USP. São Paulo. 2008. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-14082008-082214/pt-br.php>>. Acesso em 24 de agosto 2015.

O'FLAHERTY, V.; COLLINS, G.; MAHONY, T. The microbiology and biochemistry of anaerobic bioreactors with relevance to domestic sewage treatment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**. v. 5. 2006.

OGEJO, J.; WEN, Z.; IGNOSH, J.; BENDFELDT, E.; COLLINS, E. **Biomethane Technology**. Virginia. 2009.

OSTREM, K. **Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes**. New York. 2004.

PANHOTA, R.S.; SANTINO, C.; BIANCHINI Jr. I., Consumos de oxigênio das mineralizações de lixiviados de *Salvinia auriculata* e de *Utricularia breviscapa* da lagoa do Óleo. **Estudos integrados em ecossistemas: Estação Ecológica de Jataí**. São Carlos: EDUFSCar. p. 259-273. 2006.

PROGRAMA NACIONAL DA RACIONALIZAÇÃO DO USO DOS DERIVADOS DO PETRÓLEO E GÁS NATURAL (CONPET). Disponível em <<http://www.conpet.gov.br/>>. Acesso em 24 de agosto de 2015.

RELATÓRIO BRUNDTLAND. Comissão Mundial Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Nosso futuro comum. 2ª. Rio de Janeiro: Ed. Rio de Janeiro, 1991.

RISE. A-T. **Review of current status of anaerobic digestion technology for treatment of municipal solid waste.** Chiang Mai. 1998.

Roediger, H. **Die anaerobe alkalische Schlammfäulung. Schriftenreihe Wasser, Abwasser.** vol. 1. Munique e Viena. 1955.

SCHARFF, H.; AFVALZORG, N.V. **Landfill gas production and emission on former landfills.** 2005.

SCHREIBER, W. **Solving the Energy Problem.** MITFaculty Newsletter, Massachusetts, n. 6, v. 19, maio 2007. Disponível em: < <http://web.mit.edu/fnl/volume/196/schreiber.html>>. Acesso em 24 agosto. 2015.

SILVA, L. L.; ALVES, M. S.; SIVA, V. C.; ROCHA A. L. **Princípios de Termoeletricas em Pequenas Propriedades Rurais.** International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2009.

SOLERA, R.; ROMERO, L.; SALES, D. **The evolution of biomas in a two-phase anaerobic treatment process during start-up.** 2008.

SOLURB. Relatório Caracterização Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos Domiciliares do Município de Campo Grande – MS. Campo Grande. 2014.

SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** vol 3. Belo Horizonte. 1996.

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

TIETJEN, C. **FAO Soils Bull.** n. 27. p. 211. Roma. 1975.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE W. **Types of anaerobic digesters for solid wastes**. 2002.

VOLTA, A. **Sull'ria Infiammabile Nativa Delle Paludi**. Milao. 1777.

WEISMAN, W. **Gas from the Past: Biogas 101**. janeiro 2011. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2011/01/gas-from-the-past-biogas-101.html>>. Acesso em: 24 agosto 2015.

WORLD ENERGY OUTLOOK. Paris: IEA. 2007. Stedi Media. Anual.

WORLD ENERGY OUTLOOK. Paris: IEA. 2013. Stedi Media. Anual.

ZANETTE A.L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no brasil**. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de janeiro. 2009.