

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Nº 233

P
P
E
Q



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO
DE ESGOTO EM CONDIÇÕES MESOFÍLICAS E
TERMOFÍLICAS**

Micheline Ferreira de Lima

Prof^a. Dra. Maria de Los Angeles P. F. Palha
Prof. Dr. Mohand Benachour

MICHELINE FERREIRA DE LIMA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO EM
CONDIÇÕES MESOFÍLICAS E TERMOFÍLICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Química.

Área de concentração: Biotecnologia

Orientadores:

Prof^a. Dr^a. Maria de Los Angeles P.F. Palha

Prof. Dr. Mohand Benachour

Recife

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L732p

Lima, Micheline Ferreira de.

Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas / Micheline Ferreira de Lima. - Recife: O Autor, 2015.

115 folhas, il.

Orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria de Los Angeles P. F. Palha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, 2015.

Inclui Referências, apêndices e anexos.

1. Engenharia Química. 2. Biogás. 3. Biodigestor. 4. Metano. 5. Lodo de esgoto. 6. Biodigestão anaeróbia. I. Benachour, Mohand (Orientador). II. Palha, Maria de Los Angeles P. F. (Coorientadora). III. Título.

660.2 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2016-79

MICHELINE FERREIRA DE LIMA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO EM
CONDIÇÕES MESOFÍLICAS E TERMOFÍLICAS**

Linha de Pesquisa: Processos Bioquímicos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, defendida e aprovada em 07 de Dezembro de 2015 pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

Prof^o. Dr. Mohand Benachour/DEQ-UFPE
(Orientador)

Prof^a. Dr^a. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha/DEQ-UFPE
(Co-Orientadora)

Prof^o. Dr. Luiz Stragevitch/DEQ-UFPE
(Avaliador Interno)

Prof^o. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho/DEQ-UFPE
(Avaliador Interno)

Prof^o. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva/POLI-UPE
(Avaliador Externo)

Aos meus pais e irmã, sempre presentes em minha vida.

Ao meu querido avô, com quem pouco convivi, mas
sempre o terei comigo.

E, ao meu sobrinho, alegria em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, aos meus pais Luiz Amancio e Francisca de Lima, à minha irmã Patrícia de Lima, meu sobrinho Arthur Lima e aos familiares, especialmente, Damiana de Melo, Josinaldo Gomes, João Lucas, Ana Paula, Albanise da Silva, Marluce Ambrósio e Alexandre César, que sempre me apoiaram nessa jornada e que sem a ajuda e compreensão deles eu não teria alcançado este objetivo. E as minhas amigas de infância Kássia Pollyane e Roberta Viana que sempre estiveram ao meu lado nos momentos bons e difíceis.

À Universidade Federal de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Química e ao Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica de Pernambuco que me forneceram os meios materiais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Prof.^a Dr.^a Maria de Los Angeles, pela orientação, dedicação e transmissão de novos conhecimentos. Ao Prof. PhD. Sérgio Peres, pela oportunidade profissional, incentivo e orientação neste trabalho. E ao Prof. Dr. Mohand Benachour pela atenção, paciência e orientação.

À todos do POLICOM, em especial à Marina Monteiro, que compartilhou comigo todos os momentos durante esta jornada e à Mário Mazullo e Adalberto Freire Júnior por todo apoio e colaboração. À Avelino Cardoso, Ana Rita e todos que me ajudaram na realização dos experimentos, Rafael Vital, Alexandre Nunes, Otávio, Yves, Elmo Alencar, Shirlene Tamirys, Humberto Santos e Antônio Schmidt.

À CGTI na pessoa de Dr. Paulo Gama e a Thiago Caires, CELPE, e ao Prof. Dr. Sérgio Peres, Coordenadores do projeto “Arranjos técnicos e comerciais para inserção de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos/efluentes líquidos dentro de um modelo com biodigestores dispersos”.

À todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Química que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação profissional, principalmente, Conceição Andrade, Gisely Alves e Iago Silva e pelo auxílio e orientação em alguns experimentos, e à Kaio Cabral e Thiago pela ajuda durante as atividades nos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Microbiologia do DEQ/UFPE.

Ao Sr. Edmilson, da ETE Mangueira, sempre muito solícito no fornecimento do substrato e todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigada a todos!

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o mistério passará pela vida sem ver nada.”

Albert Einstein

RESUMO

O biogás é uma mistura gasosa produzida por digestão anaeróbia, a partir de dejetos animais, lodo de esgoto, lixo orgânico doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Pode ser usado como combustível, após purificação, não produz gases tóxicos durante a queima, aproveita o lixo orgânico e deixa como resíduo um biofertilizante. O destino final dos resíduos líquidos e sólidos produzidos pela população é considerado um grave problema ambiental. O tratamento de efluentes em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) é fundamental para remoção de substâncias contaminantes, para que não sejam dispostos no meio ambiente. Este processo de tratamento de águas residuais tem como principal resíduo gerado o lodo de esgoto e a gestão deste resíduo é um dos desafios significativos durante o processo. A produção de biogás é influenciada por alguns fatores, e um deles é a temperatura que pode ser mesofílica (entre 20°C e 45°C) ou termofílica (entre 45°C e 60°C). Tendo em vista o aproveitamento energético do lodo produzido em ETE's e a redução da poluição causada por este, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o processo de biodigestão do lodo produzido em ETE's com sistema de tratamento tipo UASB, em condições mesofílicas e termofílicas, analisando a composição do biogás produzido (CH_4 e CO_2). O substrato utilizado foi o lodo de esgoto com diferentes características (seco, pastoso e líquido), coletado na ETE Mangueira, localizada em Recife/PE. Para a caracterização do substrato, foram realizados alguns experimentos: pH, teor de umidade, DQO, DBO, sólidos totais, voláteis e fixos, contagem de micro-organismos, análises elementar e termogravimétrica. Foram construídos 72 reatores, sendo 16 com volumes de 1L incubados a 30°C, dos quais 8 foram de garrafas tipo PET e 8 de frascos tipo âmbar. Os outros reatores foram construídos com frascos de penicilina de 100mL e foram incubados em temperaturas mesofílicas (30°C, 35°C e 40°C) e termofílicas (45°C e 50°C). Entre os primeiros reatores de frascos de penicilina, a maior concentração de metano foi observada no reator com lodo pastoso a 45°C com 87,2% no 18º dia de fermentação. Para os reatores construídos em garrafas tipo PET (politereftalato de etileno), o meio mais adequado para produção de biogás nas condições estudadas, foi o lodo líquido que produziu o biogás com maior teor de metano no menor período de tempo (46,48% de metano no 8º dia de biodigestão). Entre os reatores incubados em diferentes temperaturas, o que apresentou resultados mais favoráveis foi o com lodo líquido a 30°C que apresentou 79,74% de metano em 11 dias de fermentação. Nos reatores em frascos tipo âmbar os resultados apresentaram baixo teor de metano, sendo o lodo pastoso o que proporcionou maior teor de metano com 26,0% no 12º dia de biodigestão anaeróbia. Esse baixo teor de metano deve-se a vazamentos ocorridos nas tampas dos reatores. Desta forma, o lodo líquido foi o substrato que proporcionou maiores teores de metano em temperatura ambiente e sem necessidade de neutralizar o meio.

Palavras-chave: Biogás. Biodigestor. Metano. Lodo de esgoto. Biodigestão anaeróbia.

ABSTRACT

Biogas is a gaseous mixture produced by anaerobic digestion of animal manure, sewage sludge, household organic waste, agricultural waste, industrial effluents and aquatic plants. This gaseous mixture can be used as fuel, produces non-toxic gases during combustion, values organic waste and its residue is an excellent bio-fertilizer. The final destination of liquid and solid domestic waste is considered a serious environmental problem. The wastewater treatment in Sewage Treatment Plants (STP) is essential to remove contaminants, so they are not disposed of in the environment. This wastewater treatment has sewage sludge as the main residue generated, and the management of this residue is one of the most significant challenges in the treatment process. The production of biogas is influenced by many factors, one of them is the temperature, that can be mesophilic (between 20°C and 45°C) or thermophilic (between 45°C and 60°C). In view of the energetic use of sludge produced in STP's and reduction of the pollution caused by it, the present study aims to evaluate the anaerobic digestion process of sludge produced in STPs, with treatment system type UASB, either under mesophilic or thermophilic conditions, through the analysis of the composition of the biogas produced (CH_4 and CO_2). The substrate used was sewage sludge under different conditions (solid, paste and liquid), collected in STP Mangueira, located in Recife-PE, Brazil. For the characterization of the substrate, the following experiments were carried out: pH, moisture content, COD, BOD, total solids, volatile solids and fixed solids, microorganisms counting, ultimate and proximate analyses. The 72 reactors were built, 16 with a volume of 1L incubated at 30°C, of which 8 were built using PET bottles (PET-polyethylene terephthalate) and 8 amber flasks. The last 56 reactors were made of penicillin bottles with a volume of 100mL each and incubated at mesophilic temperature (30°C, 35°C and 40°C) and thermophilic temperature (45°C and 50°C). Among the first reactors of penicillin bottles, the higher methane concentration was observed in reactor with sludge paste at 45°C, with 87.2% on the 18th day. As for the reactors built in PET bottles, the most appropriate medium for biogas production under the conditions studied was the liquid sludge, which produced biogas with higher methane concentration in the shortest period (46.48% of methane on day 8th). Among the reactors incubated at different temperatures, the one that presented results that are more favorable was with liquid sludge at 30°C. Regarding the reactors of amber flasks, the results showed low methane content, of which the pasty sludge provided the highest methane concentration of biogas produced with 26.0% on the 12th day of anaerobic digestion. Thus, the liquid sludge substrate provided higher methane content at ambient temperature and without the need to neutralize the substrate.

Keywords: Biogas. Biodigester. Methane. Sewage sludge. Anaerobic digestion.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Geração de resíduos agrícolas nacionais dos principais produtos	26
Tabela 2	Efetivo de animais no Brasil e Pernambuco e produção de dejetos em Pernambuco	28
Tabela 3	Composição do biogás	38
Tabela 4	Vantagens das faixas de temperatura mesofílicas e termofílicas	46
Tabela 5	Descrição dos reatores anaeróbios e os meios contidos neles	62
Tabela 6	Caracterização do lodo de esgoto da 1ª coleta	65
Tabela 7	Caracterização do lodo de esgoto da 2ª coleta	66
Tabela 8	pH, teor de umidade e relação C/N para o lodo de esgoto	67
Tabela 9	Sólidos totais, voláteis e fixos	68
Tabela 10	Composição elementar do lodo de esgoto	68
Tabela 11	Composição obtida pela análise imediata do lodo de esgoto	68
Tabela 12	Teores de CH ₄ e CO ₂ nos reatores com lodo seco a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C	72
Tabela 13	Teores de CH ₄ e CO ₂ nos reatores com lodo pastoso a 30°C, 35°C 40°C e 45°C	73
Tabela 14	Teores de CH ₄ e CO ₂ nos reatores com lodo líquido a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C	73
Tabela 15	Teores de CH ₄ e CO ₂ nos reatores com mistura dos três lodos a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma de processamento e aproveitamento dos subprodutos da decomposição anaeróbia	18
Figura 2	Matriz energética mundial de 1973	21
Figura 3	Matriz energética mundial de 2011	22
Figura 4	Geração de energia renovável por região	23
Figura 5	Esquema com as possíveis fontes de biomassa	25
Figura 6	Aterro sanitário	32
Figura 7	Esquema de uma Estação de Tratamento de Efluentes	35
Figura 8	Esquema de um biodigestor tipo UASB	35
Figura 9	Esquemas mais comuns de reatores UASB	36
Figura 10	Modelos de biodigestores	39
Figura 11	Biodigestor tipo canadense	40
Figura 12	Processo de decomposição anaeróbia	43
Figura 13	Amostras após estufa	48
Figura 14	Amostras retiradas da estufa para o teste de teor de umidade	48
Figura 15	Amostras retiradas da mufla (sólidos fixos)	49
Figura 16	Procedimento para realização da diluição seriada	51
Figura 17	Bloco digestor para DQO	52
Figura 18	Oxi-Direct Oberco Hellige, modelo BOD-System Oxi700	57
Figura 19	Balança termogravimétrica Shimadzu, modelo DTG-60	58
Figura 20	Reatores anaeróbios em frascos de penicilina	59
Figura 21	Reatores em garrafas PET	60
Figura 22	Reatores em frascos de vidro tipo âmbar	60
Figura 23	Cromatograma do biogás produzido no reator 9A2 com 23 dias de fermentação com 33,97% de metano e 25,98% de dióxido de carbono (cromatografia gasosa)	64
Figura 24	Produção de metano a partir de diferentes matérias-primas	71
Figura 25	Teores de metano no biogás produzido nos reatores 1B (lodo seco a 35°C), 2A (lodo pastoso a 30°C), 2B (lodo	

	pastoso a 35°C), 4A (mistura de lodo a 30°C) e 4D (mistura de lodo a 45°C)	75
Figura 26	Resultados dos teores de metano para os três tipos de lodo e a mistura dos três	76
Figura 27	Comportamento dos perfis de produção de metano a partir da mistura de lodos em reatores de 100mL variando-se a temperatura (reatores 9A1, 9B1, 9C1, 9D1 e 9E2)	77
Figura 28	Produção de CH ₄ em reatores de 100mL com lodo líquido em diferentes temperaturas (reatores 10A2, 10B2, 10C1, 10D2 e 10E1)	78
Figura 29	Produção de metano a partir do lodo seco em reatores de 100mL em diferentes temperaturas (reatores 11A1, 11B2, 11C2, 11D1 e 11E1)	78
Figura 30	Produção de metano nos reatores de 100mL com lodo pastoso em diferentes temperaturas (reatores 12A1, 12B1, 12C1, 12D1 e 12E1)	79
Figura 31	Melhores condições de temperatura encontradas para cada tipo de meio estudado em garrafas tipo PET	80
Figura 32	Produção de CH ₄ em reatores de 1L tipo âmbar com os três tipos de lodo e a mistura (reatores 13A1, 14A2, 15A1 e 16A1)	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	Aterro Sanitário
ASTM	American Society for Test and Materials (Sociedade Americana para Ensaios e Materiais)
PDA	Potato Dextrose Agar (BDA – Ágar Batata Dextrose)
BEN	Balanço Energético Nacional
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
2DS	2°C Scenario
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DTA	Differential Thermal Analysis (Análise Térmica Diferencial)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
ETP	Energy Technology Perspectives (Perspectivas das Tecnologias Energéticas)
FADE	Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente
FAS	Sulfato Ferroso Amoniacal
FID	Flame Ionization Detector (Detector de Ionização de Chama)
FPD	Flame Photometric Detector (Detector Fotométrico de Chama)
GL	Ágar Glicose e Levedura
HAB	Hydrolytic-Acidogenic Bactéria (Bactéria Hidrolítica-Acidogênica)
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MH	Mueller Hinton Ágar
MME	Ministério de Minas e Energia
MO	Matéria Orgânica

OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico)
OHPA	Obligate Hydrogean Producing Acetogenic (Produção Acetogênica Obrigatória de Hidrogênio)
p.a.	para análise
PCI	Poder Calorífico Inferior
PET	Politereftalato de Etileno
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCE	Reduções Certificadas de Emissão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SF	Sólidos Fixos
SMWW	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Métodos Padrões para Análise de Água e Esgoto)
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TCD	Thermal Conductivity Detector (Detector de Condutividade Térmica)
tep	tonelada equivalente de petróleo
TGA	Thermal Gravimetric Analysis (Análise Térmica Gravimétrica)
UASB	Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)
UFC	Unidade Formadora de Colônia

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Volume da solução de Sulfato Ferroso Amoniacal (FAS) gasto na titulação da amostra (mL)
A_p	Área do pico do componente presente no padrão
A_i	Área de um determinado componente i
B	Volume da solução de FAS gasto na titulação do branco (mL)
c	Número de moles do carbono
C_i	Concentração de um determinado componente i
C_p	Concentração do padrão
f_d	Fator de diluição da amostra
F_i	Fator de resposta para o padrão
f_s	Fator da solução de sulfato ferroso amoniacal
h	Número de moles do hidrogênio
m_0	Massa da cápsula calcinada (g)
m_1	Massa da cápsula com amostra após secagem a 105°C (g)
m_2	Massa da cápsula com amostra após calcinação a 550°C (g)
m_C	Massa de carbono em 100g de amostra (g)
M_C	Massa molar do carbono
m_H	Massa de hidrogênio em 100g de amostra (g)
M_H	Massa molar do hidrogênio
m_N	Massa de nitrogênio em 100g de amostra (g)
M_N	Massa molar do nitrogênio
m_O	Massa de oxigênio em 100g de amostra (g)
M_O	Massa molar do oxigênio
m_S	Massa de enxofre em 100g de amostra (g)
M_S	Massa molar do enxofre
n	Número de moles do nitrogênio
N	Concentração da solução de sulfato ferroso amoniacal (N)
N''	Concentração da solução de $K_2Cr_2O_7$ (N)
o	Número de moles do oxigênio
s	Número de moles do enxofre
SF	Sólidos fixos ($mg.L^{-1}$)
ST	Sólidos totais ($mg.L^{-1}$)
SV	Sólidos voláteis ($mg.L^{-1}$)
V_p	Volume prático da solução de FAS gasto na titulação do fator (mL)
V_a	Volume da amostra utilizado na análise (mL)
V_{t_f}	Volume teórico da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação (mL)
V''	Volume da solução de $K_2Cr_2O_7$ (mL)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	FONTES DE ENERGIA	20
3.1.1	Fontes de Energia Não Renovável	22
3.1.2	Fontes de Energia Renovável	22
3.1.2.1	Energia Renovável no Brasil	24
3.2	BIOMASSA	24
3.2.1	Biomassa no Brasil	26
3.2.1.1	Resíduos vegetais	26
3.2.1.2	Resíduos sólidos urbanos	27
3.2.1.3	Resíduos industriais	27
3.2.1.4	Resíduos animais	27
3.2.1.5	Resíduos florestais	28
3.3	TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	29
3.3.1	Redução e Reutilização de Resíduos	29
3.3.2	Reciclagem	30
3.3.3	Compostagem	30
3.3.4	Incineração	31
3.3.5	Aterros Sanitários	31
3.4	TRATAMENTO DE EFLUENTES	32
3.4.1	Estações de Tratamento de Efluentes	33
3.4.2	Lodo de Esgoto	36
3.4.2.1	Produção do lodo	37
3.5	BIOGÁS	38
3.5.1	Contexto Histórico	38
3.5.1.1	Biodigestor	40
3.5.1.2	Biogás no Brasil	41
3.5.2	Conversão do Biogás em Energia	41
3.5.3	Geração de Biogás	42
3.5.3.1	Formação do Biogás	42
3.5.3.2	Processo Microbiológico	42
3.5.3.3	Fatores que Influenciam a Produção de Biogás	45
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	47
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO	47
4.2.1	Teor de Umidade	47
4.2.2	Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Fixos (SF)	49
4.2.3	Contagem de Micro-organismos	50
4.2.4	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	51

4.2.4.1	Cálculo do Fator do Sulfato Ferroso Amoniacal	54
4.2.4.2	Cálculo da DQO	54
4.2.5	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	56
4.2.6	Análise Elementar	57
4.2.7	Análise Termogravimétrica (TGA e DTA)	57
4.3	PREPARAÇÃO DOS REATORES ANAERÓBIOS	59
4.4	PREPARAÇÃO DOS MEIOS	61
4.4.1	Neutralização dos Meios	61
4.4.2	Incubação dos Meios	61
4.5	ANÁLISE DO BIOGÁS	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO	65
5.1.1	Cálculo da Fórmula Molecular	69
5.1.1.1	Lodo de esgoto seco	70
5.1.1.2	Lodo de esgoto pastoso	70
5.1.1.3	Lodo de esgoto líquido	70
5.2	ANÁLISE DO BIOGÁS	71
5.2.1	Avaliação da Produção de Biogás	72
5.2.2	Produção de Biogás em Reatores em Maior Escala	75
5.2.3	Avaliação da Produção de Biogás em Diferentes Temperaturas	76
5.2.3.1	Mistura de lodos	77
5.2.3.2	Lodo Líquido	77
5.2.3.3	Lodo Seco	78
5.2.3.4	Lodo Pastoso	79
5.2.4	Produção de Biogás em Reatores de 1L em Frascos Tipo Âmbar	80
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	82
6.1	CONCLUSÕES	82
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICES	92
	ANEXOS	115

1 INTRODUÇÃO

O aumento da consciência mundial e a preocupação com os impactos ambientais dos combustíveis fósseis, juntamente com os aumentos acentuados ocorridos nos preços do petróleo, forneceram peso ao argumento de que os países devem passar a utilizar fontes de energia renováveis.

As fontes alternativas mais interessantes são as menos caras, ambientalmente amigáveis, renováveis, limpas e disponíveis. A biomassa é uma das principais matérias-primas para produção de combustíveis alternativos e pode ser encontrada em diversas áreas como os resíduos orgânicos, urbanos, da construção civil e o lodo de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE).

Quatro tipos de processos de conversão são usados para quebrar a biomassa: termoquímicos, biológicos, físicos e químicos. Estes processos, quando combinados com métodos como a fermentação, combustão e digestão anaeróbia resultam em vários combustíveis alternativos, como o biogás e o etanol (ARTHUR e BREW-HAMMOND, 2010).

Segundo Arthur e Brew-Hammond (2010), o biogás é uma mistura de gases resultante da degradação bioquímica da matéria orgânica mediada por micro-organismos em ambiente livre de oxigênio. Essa mistura gasosa pode ser usada como combustível, pois possui alto poder calorífico inferior (PCI) (20 a 30 MJ.m⁻³), próximo ao do gás natural (31,4 MJ.m⁻³).

O biogás é produzido através da degradação anaeróbia da matéria orgânica realizada por micro-organismos. O processo ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O uso de biodigestores permite que uma ampla gama de consumidores seja beneficiada por essa tecnologia, atingindo setores com insumos como: estrume de gado, fezes de galinha, resíduos da indústria alimentícia, de cana-de-açúcar, entre outras.

Essa fonte de energia limpa e renovável que pode ser empregada em atividades como aquecimento de animais (aves e suínos), incubação de ovos, secagem de grãos, moagem de grãos para rações, movimentação de motores elétricos para bombeamento de água e esgoto, entre outros. Sendo assim, o aproveitamento do biogás na geração de energia resulta na

diminuição da poluição, pois queima seu principal composto (geralmente, 65% de metano) (SILVA, BERWIG e DETTMER, 2014; COLDEBELLA *et al.*, 2008) que é prejudicial ao meio ambiente e reduz a quantidade de resíduos domésticos e industriais.

No Brasil, há um potencial significativo de produção de biogás, por causa da elevada população concentrada em grandes centros urbanos e da expressiva produção agropecuária e agroindustrial. Este potencial de produção é superior a 50 milhões de m³ de CH₄ por dia. O aproveitamento energético depende da escala dos projetos que, geralmente, são viáveis para aterros e estações de tratamento de efluentes de uma população superior a 50.000 habitantes e para fazendas de suínos com mais de 5.000 animais e de pecuária leiteira com 1.000 animais, no mínimo (QUADROS *et al.*, 2009).

A difusão da tecnologia anaeróbia no Brasil é resultado da crescente demanda de soluções simples e econômicas devido à falta de tratamento sanitário no país. Apenas 53%, aproximadamente, dos domicílios particulares urbanos, estão conectados a redes coletoras e 31% dos esgotos gerados passam por algum tipo de tratamento. As estações de tratamento apresentam baixa eficiência e problemas operacionais frequentes. Além disso, o quadro epidemiológico e o perfil socioeconômico das comunidades brasileiras reforçam a importância da implantação de sistemas simples de coleta e tratamento de esgoto (CHERNICHARO, 2007). Na Figura 1, observa-se um fluxograma de produção e aproveitamento dos subprodutos da digestão anaeróbia do lodo de esgoto.

O esgoto doméstico é coletado e tratado, resultando no efluente e no sedimento chamado de biossólido. O efluente é devolvido aos rios, mas o destino do sedimento é um problema. Devido a esta dificuldade, tem-se estudado algumas possibilidades para o destino final (PAULINO *et al.*, 2001) e uma delas é a produção de biogás. Por sua vez, o uso de biodigestores permite que uma ampla gama de consumidores seja beneficiada por essa tecnologia, atingindo setores com insumos como: estrume de gado, fezes de galinha, resíduos da indústria alimentícia, de cana-de-açúcar, entre outras, favorecendo tanto famílias e pequenas comunidades como grandes produtores industriais.

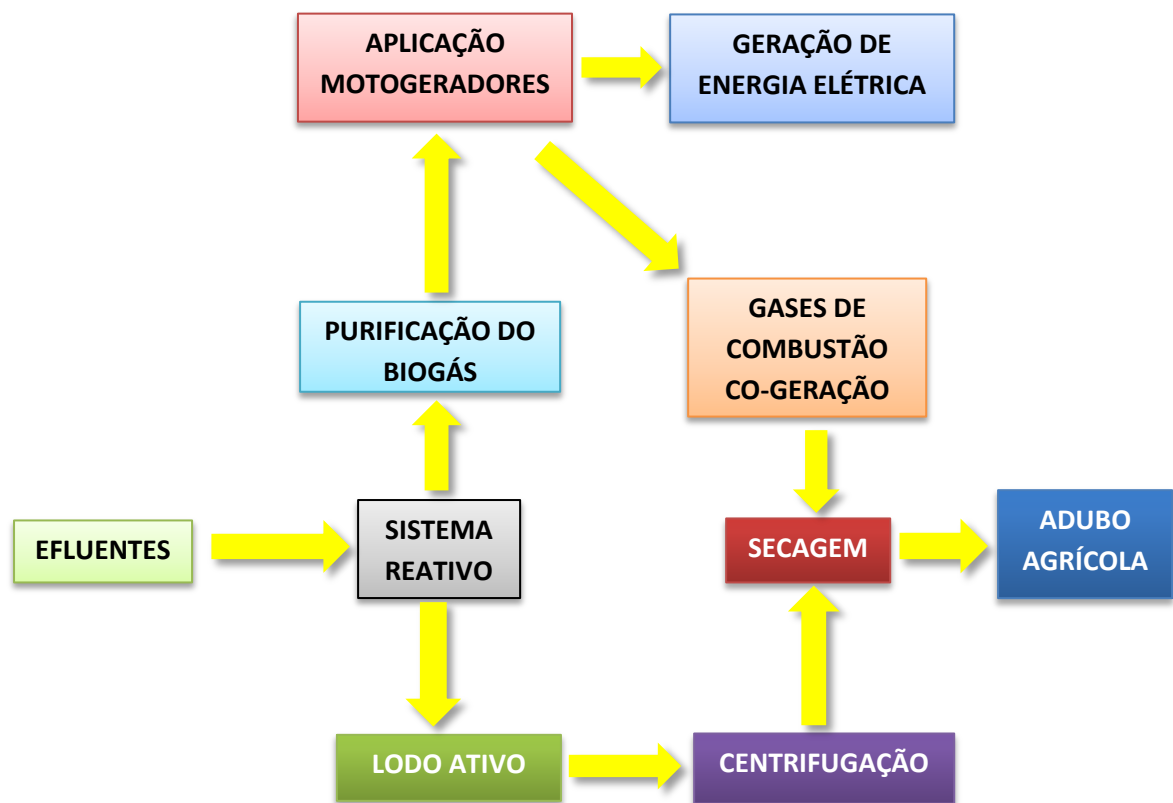


Figura 1 – Fluxograma de processamento e aproveitamento dos subprodutos da decomposição anaeróbia

Fonte: Autora

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto de pesquisa de dissertação de mestrado visa produzir biogás a partir do lodo de Estação de Tratamento de Efluentes, com diferentes características (líquido, pastoso, seco e a mistura dos três) e temperaturas (mesofílicas e termofílicas), avaliando-se quais as melhores condições de trabalho para obtenção do biogás com melhor qualidade e, conseqüentemente, maior poder energético, promovendo a possibilidade de inserção desta tecnologia na matriz energética nacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho de pesquisa envolvem os itens seguintes:

- Caracterizar o lodo de esgoto;
- Analisar a viabilidade técnica de produção de biogás a partir do lodo de esgoto com diferentes características;
- Analisar o processo de fermentação em condições mesofílicas (30°C, 35°C e 40°C) e termofílicas (45°C e 50°C);
- Estudar a variação na produção de biogás com diferentes características do substrato (seco, pastoso e líquido) e mistura dos três lodos;
- Analisar quantitativamente o biogás produzido, observando as variações na formação de metano e gás carbônico; e
- Determinar a temperatura mais adequada para produção de biogás e utilizar reatores em maior escala (volume de 1L) para quantificação do gás formado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, o uso de combustíveis renováveis tem aumentado, não só para reduzir a dependência de combustíveis de petróleo, mas também para melhorar os danos causados por combustíveis fósseis ao meio ambiente. Paralelamente a isso, o destino final dos resíduos líquidos e sólidos produzidos pela população é considerado um grave problema. A coleta, tratamento e disposição adequada destes resíduos refletem na qualidade de vida da população e na qualidade das águas dos rios e subterrâneas. Esses efluentes são tratados em Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) e são despejados nos rios, mas resultam em um resíduo (lodo de esgoto) altamente poluente que pode causar contaminação de solos, da água e do ar. O uso deste lodo como fonte de energia sustentável e renovável permite a diversificação da matriz energética nacional, além de reduzir a contaminação do meio ambiente.

3.1 FONTES DE ENERGIA

Na década de 70 do século passado, as estruturas energéticas vigentes foram abaladas pelo aumento dos preços do petróleo, surgindo uma dúvida em relação à disponibilidade energética para o desenvolvimento das sociedades, pois a política energética mundial é baseada, essencialmente, na queima de combustíveis fósseis. Com isso, a energia passou a ser vista como um bem escasso (BLEY JR., 2010a) e, a procura por novas fontes de energia tornou-se inevitável. As energias renováveis ganharam destaque recebendo recursos para pesquisas sobre diversas formas de utilização. Mas, é preciso observar a viabilidade destas fontes de energia, pois há uma crescente ameaça de alterações climáticas e escassez de água doce (BLEY JR., 2010b) devido a crescente poluição do meio ambiente.

No século XX a produção mundial de energia era dominada por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) com uma produção de energia total de 9.109×10^6 tep¹ em 1973, como mostrado na Figura 2 com, aproximadamente 80% da energia mundial produzida a partir de combustíveis fósseis. Outras fontes de energia também tinham uma pequena

¹ tep – unidade primordial de energia para apresentação de balanços energéticos nacionais, definida como a quantidade de calor liberada na combustão de uma tonelada de petróleo cru, aproximadamente 42GJ. Este valor é definido por convenção, pois o valor calórico do petróleo cru depende de sua exata composição química, e esta varia bastante.

participação na matriz energética mundial, sendo 10% originadas de fontes renováveis e os outros 10% de outros tipos de energia (GOLDEMBERG, 2009; BEN, 2014).

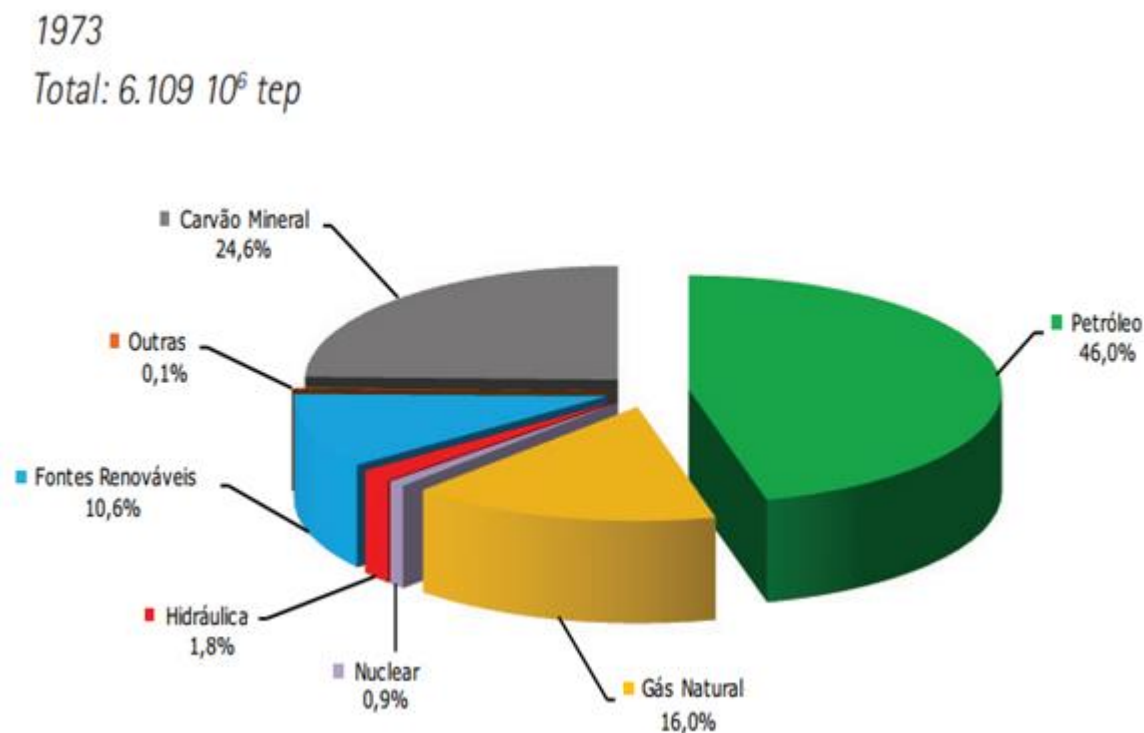


Figura 2 – Matriz energética mundial de 1973

Fonte: Adaptado de BEN (2014).

Atualmente, a matriz energética mundial apresenta-se como mostrado na Figura 3 com produção total de 13.113×10^6 tep em 2011 evidenciando um consumo de petróleo em diminuição, mas houve um aumento da quantidade de carvão e gás natural, mantendo o uso de combustíveis fósseis acima de 80%. O uso de outras fontes não renováveis, como a nuclear e a hidroelétrica também é maior.

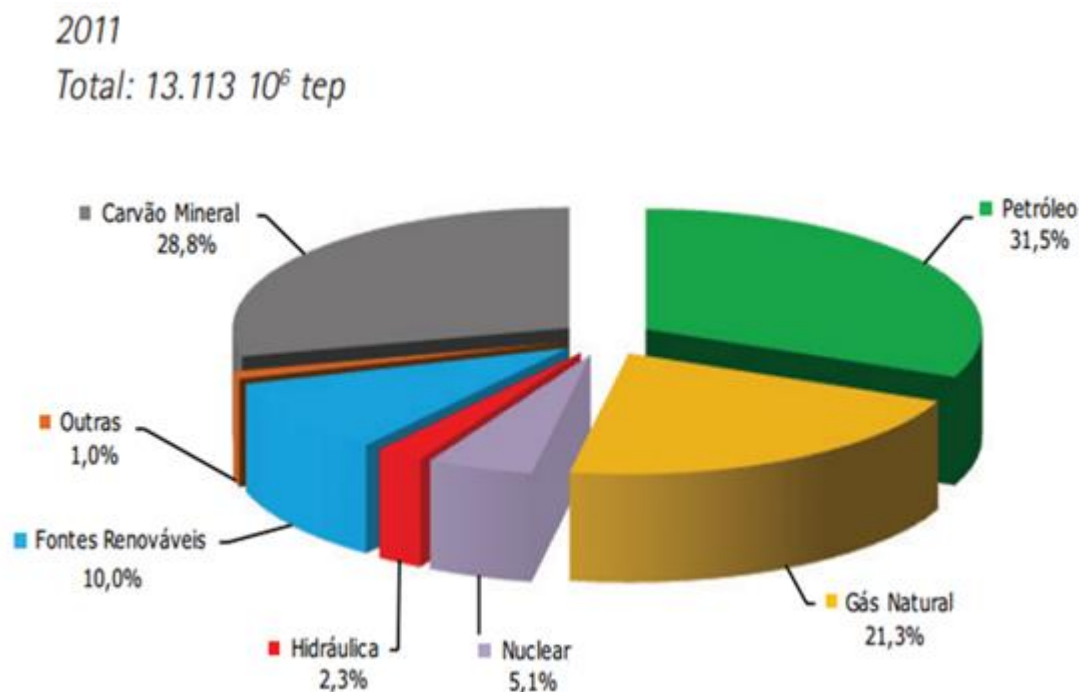


Figura 3 – Matriz energética mundial de 2011
Fonte: Adaptado de BEN (2014).

3.1.1 Fontes de Energia Não Renovável

O petróleo e o gás natural, principais fontes de energia, são fluidos e fáceis de armazenar e de transportar. Mas, a queima destes combustíveis provoca efeitos ambientais com consequências ao clima e a saúde pública e são de demorada reposição. Produzem grandes quantidades de vapor de água, particulados e dióxido de carbono (CO₂), sendo esse um dos principais causadores do efeito estufa. Por isso, este modelo energético, centrado no consumo dos combustíveis fósseis, pressupõe dois grandes problemas: ambiental e o fato de os recursos energéticos fósseis serem esgotáveis.

3.1.2 Fontes de Energia Renovável

A maioria dos países promove ações para aumentar a participação de energias alternativas renováveis em suas matrizes energéticas, para redução do uso de derivados do petróleo e, consequente, diminuição de poluentes. A biomassa, quando utilizada em processos com elevada eficiência, pode suprir a demanda de energia elétrica e do setor de transportes (CORTEZ, LORAS e GÓMEZ, 2008).

Segundo a International Energy Agency (IEA) (2014), a geração de energia renovável continua a progredir rapidamente e é um bom caminho para cumprir metas do Energy Technology Perspectives 2014 (ETP 2014) *2°C Scenario*² (2SD). No período 2006 - 2013 a geração de energia renovável cresceu 5,5% ao ano, entre 2000 e 2006 o crescimento foi maior que 3% ao ano, e é esperado um aumento de cerca de 40% entre 2013 e 2018 (aproximadamente 5,8% ao ano), podendo chegar a 35% da produção de energia global, em 2025. Este crescimento e as projeções são apresentados na Figura 4, onde a Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) é uma organização econômica internacional de 34 países fundada em 1961 para simulação do progresso econômico e do comércio mundial.

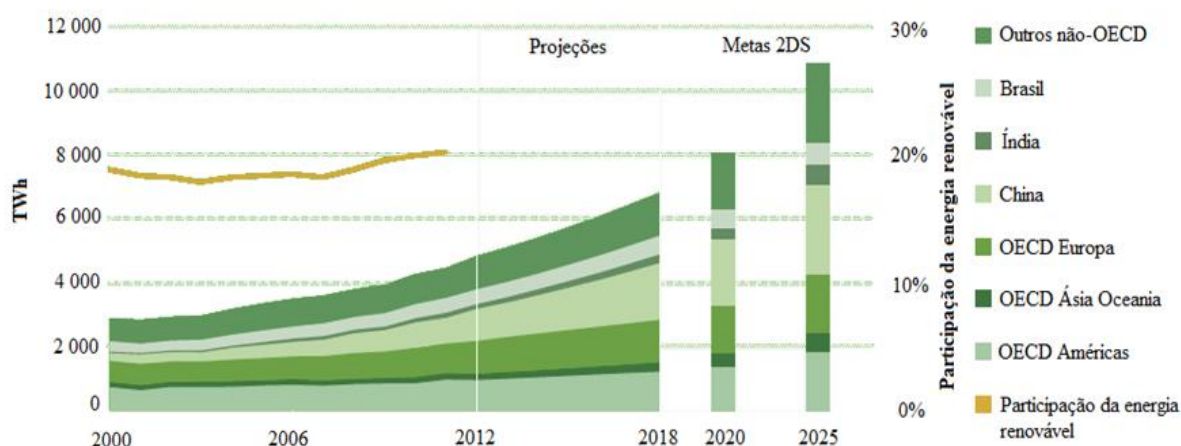


Figura 4 – Geração de energia renovável por região
Fonte: Adaptado de IEA (2014).

Através da Figura 4 observa-se que o crescimento da produção de energia não renovável está se deslocando para além dos mercados tradicionais, principalmente na Europa, entre os países não membros da OECD. Em 2013, o número de países com capacidade instalada de energia eólica *onshore* e *offshore*, bioenergia e energia solar fotovoltaica acima de 100 megawatts (MW) aumentou significativamente, em comparação com os níveis de 2006.

² *2°C Scenario* – (Cenário 2°C) é o principal foco da ETP 2014. Descreve um sistema de energia consistente com uma trajetória de emissões obtida a partir de pesquisas recentes da ciência climática, que indica 50% de chance de limitar o aumento médio da temperatura global a 2°C.

Liderados por China, Índia e Brasil, países não-OECD agora dominam a geração de energia renovável com cerca de, 54% do total que foi de 52% em 2012. E deverá aumentar ainda mais até 58% em 2018. Esta tendência está de acordo com os resultados 2DS, onde a maior proporção de energia renovável em 2025 seria da China (26%), seguido pela OECD Europa (17,3%), os Estados Unidos (11%), Brasil (6,3%) e Índia (6,1%) (IEA, 2014).

3.1.2.1 *Energia Renovável no Brasil*

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil apresenta uma das matrizes energéticas mais limpas e renováveis do mundo. Grande parte da energia elétrica aproveita o potencial hídrico dos rios, possui a maior frota *flex* (carros com uso alternativo entre gasolina e etanol) em operação no mundo e faz uso de outras fontes de energia como, solar, eólica, entre outras (BLEY JR., 2010b).

3.2 BIOMASSA

Segundo Oliveira, Ribeiro e Passos (2014), biomassa é todo recurso renovável, constituído de matéria orgânica (animal, vegetal e micro-organismos). É a matéria-prima mais utilizada para fins energéticos pois, em geral, está entre as fontes renováveis com maiores vantagens em relação a tecnologias de conversão em produtos energéticos. Pode ser obtida de vegetais lenhosos (madeira e seus resíduos) e não lenhosos, de resíduos orgânicos, urbanos e industriais e dos biofluidos (óleos vegetais).

Segundo Fernando *et al.* (2015), Caldeira *et al.* (2008) e Bassetto *et al.* (2011), os resíduos são a principal fonte de geração de energia da biomassa, sendo os vegetais como, cana (bagaço), arroz (casca), mandioca (rama), milho (palha e sabugo), soja (restos de cultura), algodão (folhas e sementes) e beterraba (cascas) os mais utilizados na tentativa de estimar o potencial energético. Os resíduos sólidos urbanos e industriais também são importantes. Os resíduos florestais vêm encontrando mercado como fonte energética, devido ao desenvolvimento tecnológico e aos baixos custos de sua utilização. Os resíduos animais dos principais rebanhos (bovino, ovino e suíno) representam uma quantidade significativa de matéria-prima para obtenção de energia.

Antes de utilizar a biomassa como fonte energética é importante saber se a mesma não tem usos mais importantes como, industrial ou alimentício, e se os custos de exploração

são compatíveis com os benefícios energéticos e comparáveis com os demais combustíveis. As culturas de fibras, um dos principais grupos de plantas com importância econômica, apresentam diversos usos e aplicações industriais, tais como têxteis, papéis, tapetes, chapéus, e cordas, aplicações como também compósitos para a indústria automotiva e de construção. Alguns exemplos da produção em grande escala da energia da biomassa é o bioetanol e o carvão no Brasil, o biogás na China e o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar nas Ilhas Maurício (CORTEZ, LORAS e GÓMEZ, 2008; FERNANDO, 2015).

Na Figura 5 encontra-se o esquema das fontes de biomassa e as possibilidades de conversão de cada uma delas.

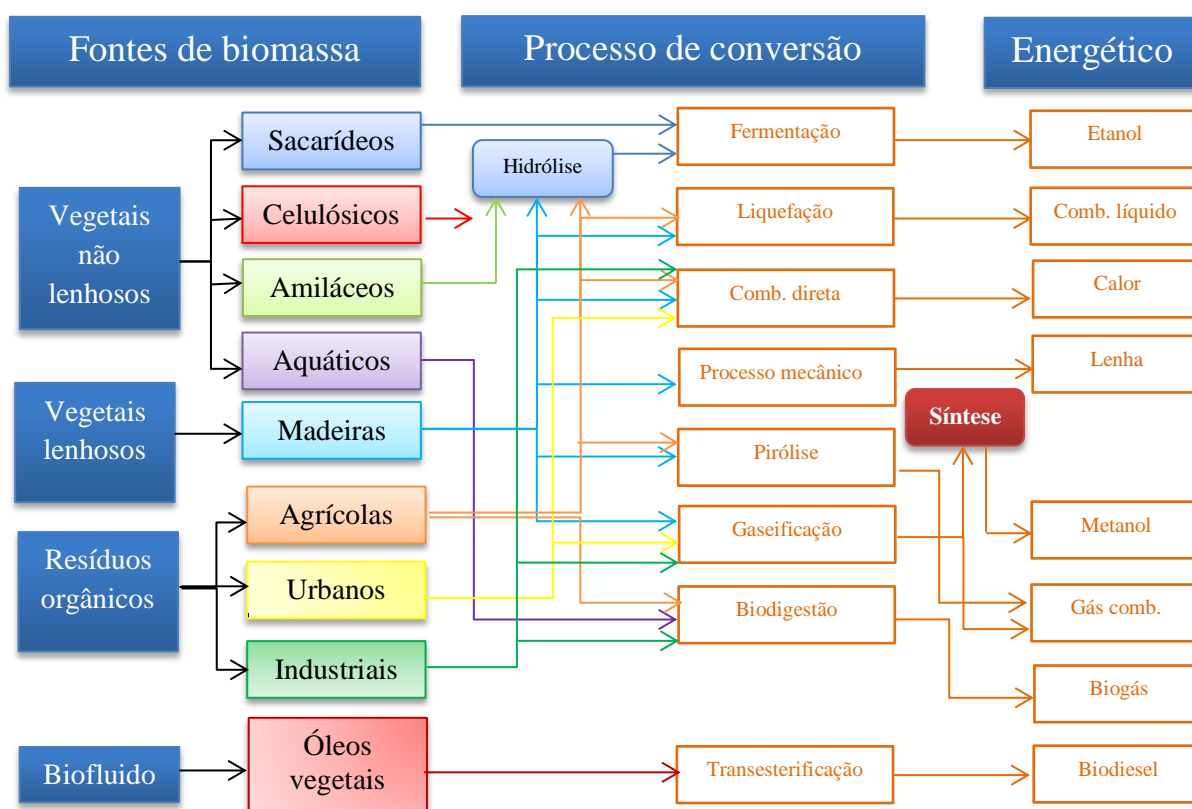


Figura 5 – Esquema com as possíveis fontes de biomassa

Fonte: Adaptado de BEN (1982).

3.2.1 Biomassa no Brasil

Cortez, Loras e Gómez (2008) afirmam que as primeiras biomassas utilizadas no Brasil para geração de energia foram resíduos vegetais, sólidos urbanos, industriais, animais e florestais.

3.2.1.1 Resíduos vegetais

São produzidos no campo, resultantes de atividades agrícolas, onde o Brasil é um grande produtor, mas grande parte desta matéria-prima não é aproveitada para produção de energia. Os resíduos vegetais são constituídos basicamente de palha de cana e milho, folhas e caules de árvores e tem poder calorífico médio de $15,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$ de matéria seca. Na Tabela 1, estão os dados de produção de resíduos agrícolas dos principais produtos no Brasil (CORTEZ, LORAS e GÓMEZ, 2008; PAVAN, 2010).

Tabela 1 – Geração de resíduos agrícolas nacionais dos principais produtos

Produtos Agrícolas	Produção (ton)	Fator residual ³ (%)	Resíduos Gerados (ton)
Trigo	5.055.525	60	3.033.315
Café	2.440.057	50	1.220.028
Arroz (em casca)	12.152.406	20	2.430.481
Feijão (em grão) 1ª safra	1.434.813	53	760.451
Cana-de-açúcar (bagaço e torta de filtro)	671.294.957	30	201.388.487
Milho (em grão) 1ª safra	30.717.681	58	17.816.255
Soja (em grão)	86.310.460	73	63.006.636
Cacau	218.487	38	83.025
Banana	6.642.739	50	3.321.370
Laranja	18.385.991	50	9.192.996
Coco-da-baia	964.303	60	578.582
Castanha-de-caju	220.505	73	160.969
Uva	1.365.720	40	546.288

Fonte: Adaptado IBGE (2014) e IPEA (2012).

³ Fator residual – Indica o percentual de resíduo gerado em relação à produção de produtos agrícolas.

3.2.1.2 *Resíduos sólidos urbanos*

São os resíduos gerados em domicílios, locais públicos, comércio e na agricultura. Podem ser plásticos, papéis, madeiras, fibras, borrachas, metais, vidros, cerâmicas, restos de alimentos, entre outros. No Brasil, o lixo possui aproximadamente 60% de matéria orgânica (C, H, O, N), possuindo um bom potencial energético, com Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de $5,44 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ($1.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$) (PAVAN, 2010).

3.2.1.3 *Resíduos industriais*

São resíduos provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico e do gás de alto-forno a carvão vegetal.

Na maioria dos casos, o uso energético dos resíduos agroindustriais é obtido por meio de queima direta em fornos e caldeiras, ou por meio de biodigestão anaeróbia, dependendo se o resíduo for de matéria orgânica biodegradável. Sendo assim, o processo a ser utilizado é escolhido a partir do teor de umidade, pois só é possível queimar resíduos com até 50% de umidade, acima deste valor o resíduo torna-se apropriado para a produção de biogás (PAVAN, 2010).

3.2.1.4 *Resíduos animais*

São excrementos das criações mais importantes e variam de acordo com as práticas culturais, pois para criações em confinamento o custo e a viabilidade são melhores. Os rebanhos com produção significativa de resíduos para aproveitamento energético são bovino, suíno, caprino e ovino. Os dejetos suínos também são utilizados como fertilizantes reduzindo a poluição e melhorando as características físicas, químicas e biológicas do solo. A Tabela 2 apresenta o efetivo de animais no Brasil e em Pernambuco de acordo com o IBGE e a estimativa da produção de dejetos em Pernambuco.

Tabela 2 – Efetivo de animais no Brasil e Pernambuco e produção de dejetos em Pernambuco

Efetivo de animais	Brasil ($\times 10^3$)	Pernambuco ($\times 10^3$)	Produção diária de dejetos em PE* (ton)
<i>Grande porte</i>	6.796.877	60.982	731.787
Bovinos	6.590.105	56.739	680.867
Bubalinos	41.461	259	3.110
Equinos	165.312	3.984	47.810
<i>Médio porte</i>	1.954.751	133.896	267.791
Suínos (inclui matrizes de suínos)	1.143.461	12.426	24.853
Matrizes de suínos	143.625	2.994	5.988
Caprinos	273.209	61.506	123.011
Ovinos	538.081	56.970	113.939
<i>Pequeno porte</i>	39.427.717	1.234.311	222.176
Galináceos (inclui galinhas)	38.862.206	886.724	159.610
Galinhas	6.904.360	329.932	59.388
Codornas	565.511	17.655	3.178
<i>Total</i>	48.179.345	1.429.189	1.221.754

*Valores obtidos considerando os dados a seguir

Fonte: Adaptado IBGE (2012-2013)

Segundo Oliver *et al.* (2008) e Santos e Nardi Jr. (2013), os rebanhos de grande porte produzem em média 12kg de esterco por animal por dia, os rebanhos de médio porte produzem por volta de 2kg de dejetos por animal durante um dia e os animais de pequeno porte (aves) produzem cerca de 180g de dejetos por unidade por dia.

3.2.1.5 Resíduos florestais

Resíduos da coleta de madeira em florestas e bosques naturais e da serragem e aparas produzidas no processamento da madeira, considerando-se o poder calorífico deste resíduo de $13,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ de resíduo produzido (PAVAN, 2010).

3.3 TRATAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

O destino final de resíduos sólidos sempre foi uma questão fundamental para sociedade, em geral. Nas últimas décadas, devido ao elevado crescimento populacional e da política de consumo iniciada com a industrialização e com a cultura do capitalismo, vêm aumentando este problema de destinação dos resíduos. E com isso, a necessidade de recolher e afastar dos meios familiares os resíduos descartados torna-se uma necessidade sanitária visando um bem-estar socioambiental e a preservação da saúde de todos na sociedade.

As modificações econômicas e transformações tecnológicas influenciam o modo de vida dos centros urbanos, e o lixo urbano acompanha tais modificações. A quantidade de resíduos aumenta e sua composição muda com o surgimento de novas matérias-primas nos processos produtivos, observando-se predominância de materiais como papéis, metais, plásticos e vidros nos países desenvolvidos, devido ao alto grau de industrialização e ao maior poder aquisitivo da população. Desta forma, a gestão para resíduos sólidos, segundo Baptista (2004), Kastner, Somitsch e Schnitzhofer (2012) e Wan *et al.* (2013), ocorre de acordo com a Lei 12.305/2010 onde é dito que deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos e disposição final adequada dos rejeitos.

O Projeto de Lei 639/2015 altera a Lei 12.305/2010 para incluir no plano municipal de gestão integrada, a queima de resíduos sólidos para geração de energia, bem como, conceder incentivo tributário para as empresas constituídas para este fim.

3.3.1 Redução e Reutilização de Resíduos

De acordo com o inciso VIII do Art. 3º da Lei 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos define a reutilização de resíduos como processo de aproveitamento sem transformação biológica, física ou físico-química dos resíduos.

Para uma redução dos resíduos é preciso que haja uma conscientização da população e de agentes políticos e econômicos. É preciso que medidas legislativas sejam tomadas e complementadas com incentivos fiscais para encorajar as empresas a mudar de atitude, diante deste problema. Na indústria, a redução pode ser feita através de alterações tecnológicas e de formação do pessoal da produção e manutenção e adoção de um programa de minimização da

produção de resíduos sólidos que seja baseado em dois aspectos: redução na fonte e separação na fonte e reciclagem.

3.3.2 Reciclagem

Silva, Fugii e Marini (2015) afirmam que reciclagem é o processo de transformação dos resíduos com alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, objetivando à transformação destes em insumos ou novos produtos.

Segundo Monteiro *et al.* (2001), os materiais recicláveis podem ser separados nas residências, sendo agrupados em um único recipiente. Um modelo de coleta bem utilizado é aquele que é separado pela população em dois grupos:

- Materiais orgânicos – materiais úmidos, compostos de restos de alimentos e não recicláveis. São coletados pelo sistema de coleta de lixo domiciliar regular;
- Materiais recicláveis – materiais secos, compostos por papéis, metais, vidros e plásticos. São coletados separados dos materiais orgânicos em dias específicos da coleta seletiva.

A reciclagem é a parte vital da estratégia integrada de gestão de recursos, mas para reciclar, a utilização de resíduos como matéria-prima deve ser vantajosa. A reciclagem tem vantagens como, minimização de resíduos para deposição final, melhoramento das condições de saúde, redução dos impactos ambientais, economia de energia e de recursos naturais. Depende de medidas governamentais, incentivos fiscais, taxação de produtos de baixa vida útil e da não deposição de recicláveis em aterros sanitários.

3.3.3 Compostagem

Segundo Silva *et al.* (2014), a compostagem é um processo de transformação de matéria orgânica como: palhadas, esterco de animais, e papéis, em um composto com características nutritivas às plantas. É um processo de reciclagem da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos. Esse processo favorece o aproveitamento de resíduos orgânicos que não seriam aproveitados em sua forma natural.

É um processo aeróbio controlado onde, na primeira fase, diversos micro-organismos realizam transformações bioquímicas nos resíduos e humificação, na segunda fase. A

degradação bioquímica da matéria orgânica processa-se em ambiente termofílico (fase de maturação) durante 25 a 30 dias. A humificação, em leiras de compostagem, ocorre entre 30 e 60 dias dependendo de umidade, temperatura, arejamento e composição da matéria orgânica. O composto formado pode ser usado na agricultura, é ótimo quando usado na contenção de encostas e no combate a erosão e reduz a produção de lixiviados e de biogás nos aterros sanitários. A compostagem reduz o uso de fertilizantes inorgânicos e contribui para a manutenção da flora microbiana do solo, aumentando a sustentabilidade (SILVA *et al.*, 2014).

3.3.4 Incineração

Antigamente, os resíduos eram incinerados apenas para redução de massa, volume e periculosidade, como resíduos hospitalares e industriais perigosos, devido aos elevados custos financeiros e ambientais. Hoje em dia, além dessa finalidade os resíduos são incinerados para aproveitamento da energia térmica liberada durante a combustão. É limitado ao estritamente necessário devido aos inconvenientes como dioxinas, furanos, gases de mercúrio e ácidos, elevado teor de metais pesados nas cinzas produzidas durante a combustão do processo (MACHADO, 2015).

3.3.5 Aterros Sanitários

Os resíduos restantes dos tratamentos anteriores seguem para os aterros sanitários (AS) e são depositados ali para tratamento e destino final (aterro de rejeitos). Quanto menor a quantidade de resíduos a aterrar maior a vida útil do AS e menor o custo de exploração. Se a escala do aterro for adequada pode haver o aproveitamento do biogás produzido (aterro energético). Se a disposição mínima não for atingida o biogás deverá ser queimado em tocha para destruir e minimizar o efeito dos gases nocivos. As principais vantagens dos aterros são: flexibilidade (recebe grande quantidade de resíduos), fácil operacionalidade, baixo custo, comparando com outros tipos de soluções, disponibilidade de conhecimento, potencia a recuperação de áreas degradadas e possibilidade de reutilização do espaço do aterro (COELHO *et al.*, 2015). A Figura 6 mostra o corte da seção de um aterro sanitário.



Figura 6 – Aterro sanitário
Fonte: Gordilho *et al.* (2012).

Segundo Miranda e Barella (2014), a Lei 12.305/2010 foi criada para proibir lixões a céu aberto e a construção de aterros municipais, determinando que o prazo máximo de construção de aterros é de quatro anos com a deposição apenas de resíduos sem possibilidade de reaproveitamento ou reciclagem. A Lei 12.305 também responsabiliza os fabricantes, distribuidores e comerciantes pelo recolhimento e encaminhamento das embalagens de plásticos, papel, papelão, vidro e metálicas para a reciclagem e a construção civil deve providenciar o destino adequado aos resíduos de demolição e construção.

3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES

Para uma boa qualidade de vida é necessário a existência de saneamento básico. A falta deste serviço básico resulta na poluição de recursos hídricos, causando prejuízo à saúde da população. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) (2010), pouco mais da metade dos municípios brasileiros possuem serviço de esgotamento sanitário por rede coletora (serviço mais adequado para o tratamento de efluentes), 38% da população brasileira possuem soluções inadequadas para tratar os esgotos e apenas 53% dos esgotos coletados recebem algum tipo de tratamento antes da disposição final.

A maior parte destes resíduos, tratados ou não, são despejados diretamente em rios ou no solo, havendo a contaminação de recursos hídricos. Esta contaminação, atualmente causa preocupação à população, principalmente nas grandes metrópoles onde a água, cada vez mais, tem se tornado um bem escasso. Diante desta problemática, a recuperação ou regeneração dos recursos hídricos torna-se imprescindível. Para isto, as Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) são usadas amplamente, devolvendo aos rios a água tão limpa quanto a que foi retirada deles ou próxima a isso, gerando um resíduo sólido rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto (LEONETI, PRADO e OLIVEIRA, 2011).

3.4.1 Estações de Tratamento de Efluentes

O tratamento de efluentes em ETE's é fundamental, para remoção de substâncias contaminantes, para que não sejam devolvidas ao meio ambiente. Para isto, existem algumas tecnologias disponíveis para tratar o efluente das redes coletoras de esgoto sanitário.

Os processos físicos possuem a finalidade de separar sólidos em suspensão (grosseiros, sedimentáveis, flutuantes) e remover umidade do lodo. Os processos biológicos decompõem, através da digestão e oxidação biológica, o máximo de matéria orgânica presente no efluente. Os processos químicos ocorrem com o uso de produtos químicos, mas costuma ser evitado, sendo usado apenas quando os processos físicos e biológicos não são eficazes na purificação do esgoto tratado. Os processos mais adotados são a cloração, correção do pH, precipitação química e floculação (JORDÃO e PESSOA, 1995; BUENO *et al.*, 2013). A Figura 7 apresenta um esquema genérico de uma estação de tratamento em uma ETE.

Segundo Andreoli (2006), nas ETE's, além do lodo biológico, são retidos outros tipos de sólidos em diferentes operações durante o tratamento, como:

- Material gradeado ou sólidos grosseiros – Deve ser retido no gradeamento para não provocar danos nos equipamentos e pontes giratórias de decantadores ou obstrução nas tubulações. Este material segue para aterro sanitário;
- Sólidos inorgânicos – São removidos por diferença de densidade (areia $2,65 \text{ kg.L}^{-1}$, orgânicos $1 \text{ a } 1,1 \text{ g.L}^{-1}$), através de sedimentação simples em uma caixa de areia ou usando um ciclone. Se esta areia não for removida pode provocar sérios problemas

operacionais ou desgastes nos equipamentos mecânicos. A disposição é feita em aterros sanitários;

- Material flutuante ou espuma – Composto de materiais com densidade menor que a água como óleos, graxas, plásticos, papel, resíduos de alimentos, etc. É retirado através de raspagem superficial dos decantadores e câmara de gás de reatores anaeróbios. Este material é encaminhado para outros métodos de tratamento ou dispostos em aterros sanitários;
- Lodo – São os sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgoto. Divide-se em lodo primário, gerado nos processos primários de tratamento, e lodo secundário, produzido nos sistemas de tratamento biológico e possui altos teores de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, podendo ser utilizado, após tratamento adequado, na agricultura, como fertilizante.

Jordão e Pessoa (1995) e Bueno *et al.* (2013) afirmam que as ETE's podem ser classificadas em função da eficiência das unidades de tratamento, agrupando-se em quatro etapas:

- Tratamento preliminar – Consiste na remoção do material grosseiro (garrafas, papéis, madeiras, metais, areia, entre outros) através de gradeamento e caixas de areia;
- Tratamento primário – O processo adotado depende do projeto da Estação de Tratamento de Efluentes. O processo mais utilizado consiste na remoção de grande parte dos sólidos em suspensão (lodo primário) através da sedimentação em decantador primário. Neste tipo de tratamento ainda podem ser usados reatores tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), flotação, digestão e secagem do lodo, lagoas anaeróbias e sistemas compactos de sedimentação e digestão ou uso do Tanque Imhoff (ANDRADE NETO, 1997; NUVOLARI, 2011);
- Tratamento secundário – Tratamento dos sólidos suspensos, dissolvidos e não sedimentáveis do efluente, podendo-se usar filtros biológicos, lodos ativados ou lagoa de estabilização.
- Tratamento terciário – É a etapa de remoção por processos biológicos ou químicos, do nitrogênio, fósforo e patógenos presentes no efluente. Os processos mais comuns são a desinfecção, a remoção de nutrientes, lagoas de estabilização e filtração.

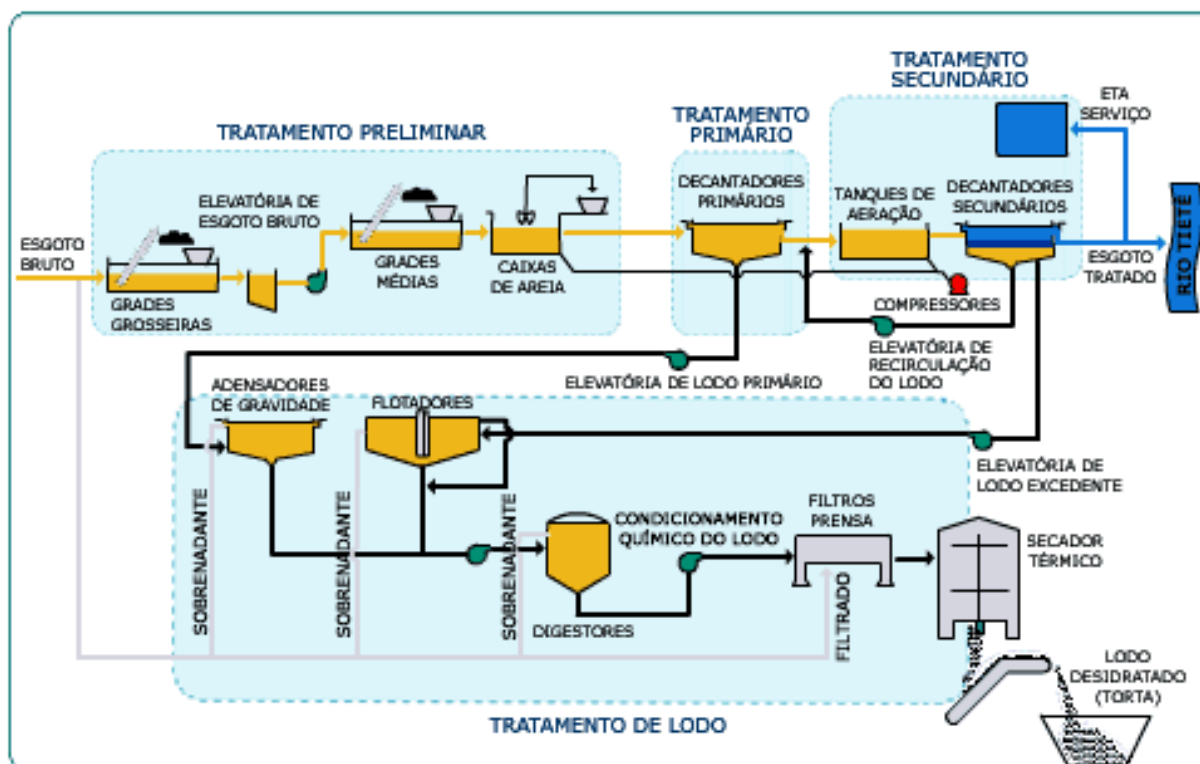


Figura 7 – Esquema de uma Estação de Tratamento de Efluentes
Fonte: Mendes, 2010.

O lodo utilizado nesta dissertação foi obtido na ETE Mangueira, que dispõe de reator anaeróbio tipo UASB (Figura 8), onde o lodo sai estabilizado e segue apenas para secagem, antes de ser removido para um aterro sanitário. O esquema representativo desse tipo de tratamento é mostrado na Figura AN1 (Anexo).

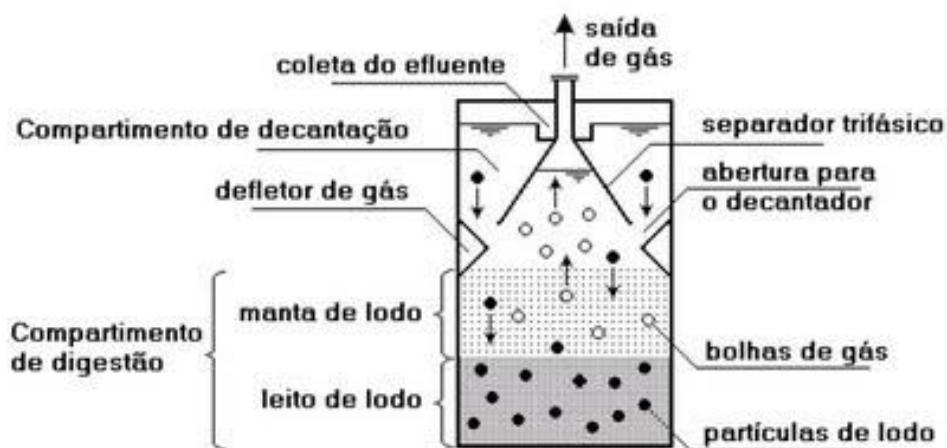


Figura 8 – Esquema de um biodigestor tipo UASB
Fonte: Chernicharo (2007).

Segundo Chernicharo (2007), o processo consiste de um fluxo ascendente de esgotos que passa através de um leito de lodo denso e de elevada atividade. A Figura 9 mostra as mais frequentes formas de reatores do tipo UASB.

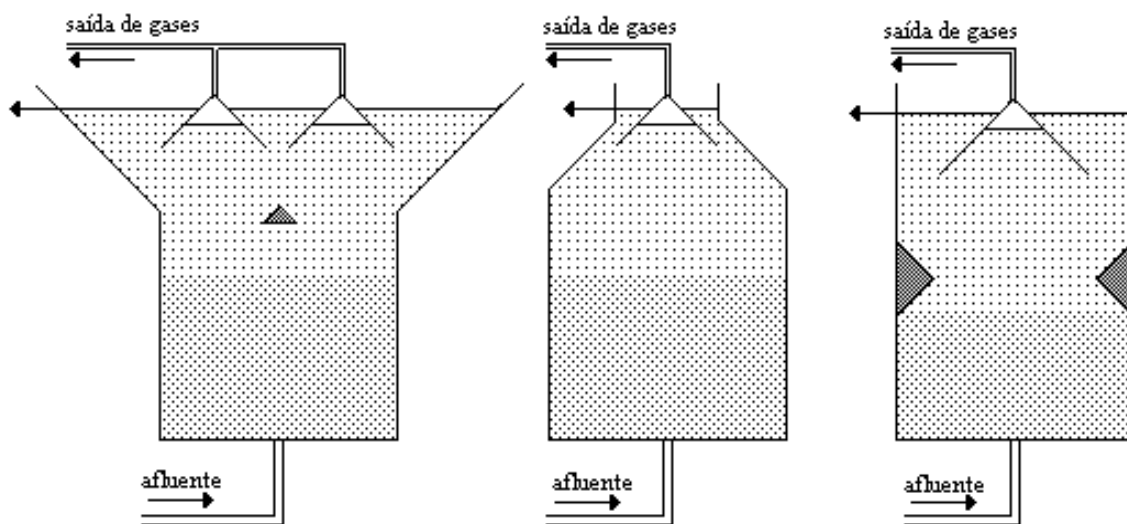


Figura 9 – Esquemas mais comuns de reatores UASB

Fonte: Fernandes, 2006.

3.4.2 Lodo de Esgoto

O lodo é um subproduto obtido a partir de diferentes operações unitárias de ETE's durante os diferentes processos físicos, químicos e biológicos que incluem clarificador, reator biológico, centrífuga, entre outros. O lodo obtido deve ser tratado antes da sua eliminação porque contém matéria orgânica e patógenos (RAO e BARAL, 2011). O lodo de esgoto é o principal resíduo gerado no processo de tratamento de águas residuais e, consequentemente, a gestão deste resíduo é um dos desafios mais significativo no tratamento de águas residuais (FONTS *et al.*, 2012; QIAO *et al.*, 2011a).

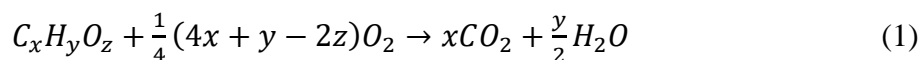
O lodo de esgoto é uma mistura heterogênea de micro-organismos, materiais orgânicos não digeridos, tais como papel, resíduos vegetais, óleos ou material fecal e materiais inorgânicos. Os materiais orgânicos não digeridos, devido ao baixo tempo de retenção hidráulica, contém uma mistura complexa de moléculas formadas a partir de proteínas e peptídeos, lipídeos, polissacarídeos, macromoléculas vegetais com estruturas fenólicas (ligninas, taninos) ou estruturas alifáticas (cutinas e suberinas), bem como macropoluentes tais como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) ou dibenzofuranos. O potencial de geração de energia do lodo de esgoto depende de sua composição, uma mistura

de matéria orgânica (volátil), matéria inorgânica (material inerte) e água. A energia contida no lodo provém dos sólidos voláteis que são subdivididos em: facilmente degradáveis e não facilmente degradáveis (TYAGI e LO, 2013).

Para que o lodo seja utilizado como fertilizante é necessário corrigir suas características indesejáveis, tais como: presença de patógenos, metais pesados e odor desagradável. A fração biodegradável é reduzida através de processos biológicos (digestão anaeróbia ou aeróbia). Antes da disposição final este material é secado para redução do volume, facilitando o manejo (ANDREOLI, 2006).

3.4.2.1 *Produção do lodo*

Segundo Andreoli (2006), no tratamento biológico de esgoto há uma massa de micro-organismos que degrada a matéria orgânica. Estes micro-organismos são protozoários, vírus, rotíferos, ciliados e bactérias (em maior quantidade). Como as bactérias usam o material orgânico como fonte de material e de energia são denominadas heterotróficas. Quando a matéria orgânica é usada como material, é transformada em massa celular pelo processo de anabolismo ou assimilação. O desenvolvimento do anabolismo depende da disponibilidade de energia química para a bactéria. A transformação da matéria orgânica em produtos é chamada de catabolismo e distingue-se em dois processos: oxidativo e fermentativo. Para a oxidação, considerando um composto orgânico com composição $C_xH_yO_z$, tem-se a seguinte reação:



O catabolismo fermentativo consiste na transferência intramolecular de elétrons e o catabolismo oxidativo na transferência intermolecular. No catabolismo fermentativo, o composto se decompõe ao menos em duas partes.

3.5 BIOGÁS

Segundo Zanetti, Arrieche e Sartori (2014) e Arthur e Brew-Hammond (2010), o biogás é uma mistura de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) resultante da degradação bioquímica da matéria orgânica mediada por micro-organismos em ambiente livre de oxigênio, conhecida como digestão anaeróbica. Pode ser produzido a partir de dejetos animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas. Esta mistura gasosa pode ser usada como combustível, não produz gases tóxicos durante a queima após purificação, aproveita o lixo orgânico e deixa como resíduo um biofertilizante. Esse gás possui tais características devido ao metano, presente em maior quantidade (CURRY e PILLAY, 2012; NKEMKA e MURTO, 2013; MARKOWSKI *et al.*, 2014). A composição do biogás está mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição do biogás

Constituinte	Composição
Metano (CH_4)	55 – 75%
Dióxido de carbono (CO_2)	30 – 45%
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	1 – 2%
Nitrogênio (N_2)	0 – 1%
Hidrogênio (H_2)	0 – 1%
Monóxido de carbono (CO)	Traços
Oxigênio (O_2)	Traços
Amônia (NH_3)	Traços

Fonte: Adaptado de Igoni *et al.* (2007).

3.5.1 Contexto Histórico

Acredita-se que o biogás foi descoberto por Shirley em 1667, mas a presença do metano no gás dos pântanos (como era chamado o biogás) apenas foi reconhecida por Alessandro Volta, cerca de um século depois. Em 1857, foi realizada a primeira experiência de utilização direta do biogás em Bombaim, na Índia e em 1890 foi a vez da Europa, utilizando biogás para iluminação. Nas décadas de 50 e 60 do século XX, a recuperação do biogás, não era considerada nos países desenvolvidos por causa da relativa abundância das fontes de energia tradicionais. Mas, na Índia e na China o biogás teve grande importância

devido à escassez de recursos e energia. Após a crise energética, nos anos 70 do século passado, os outros países passaram a se interessar pelo metano obtido por digestão anaeróbia, mas não tanto como na Índia e na China (KUNZ e PAULILLO, 2010). Na Figura 10 são mostrados os modelos clássicos de biodigestores chinês e indiano.

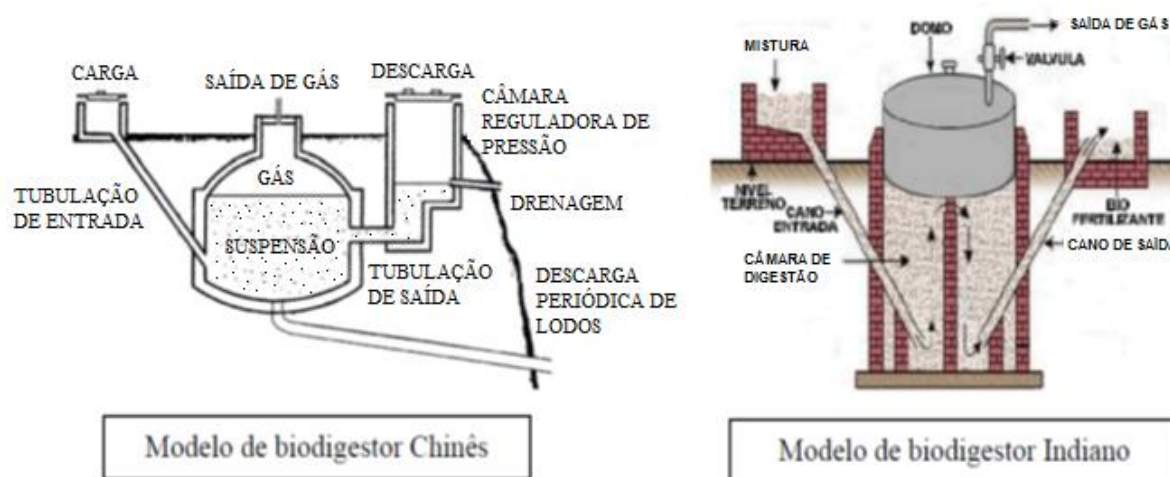


Figura 10 – Modelos de biodigestores

Fonte: Adaptado de Manual de Biodigestão Winrock International Brasil (2010).

A história da exploração do biogás e utilização na China abrange um período de mais de 50 anos. As primeiras unidades de biogás foram construídas na década de 1940 por famílias prósperas. Desde a década de 1970, pesquisas sobre tecnologias para o biogás foram desenvolvidas rapidamente. Tais tecnologias foram vigorosamente promovidas pelo governo chinês. Nas áreas rurais, mais de 5 milhões de pequenos digestores de biogás foram construídos e, atualmente, mais de 20 milhões de pessoas usam o biogás como um combustível. Na Índia, o desenvolvimento de simples plantas de biogás para as famílias rurais começou na década de 1950. O aumento maciço do número de unidades de biodigestores ocorreu na década de 1970 através de um forte apoio do governo. Por isso, mais de um milhão de unidades de biodigestores existem na Índia (HOERZ, *et al.*, 2010).

As experiências históricas na Alemanha, China, Índia e EUA demonstram claramente a forma como o desenvolvimento do biogás responde a condições favoráveis. Na Alemanha, a divulgação do biogás ganhou força através da necessidade de fontes alternativas de energia em uma economia devastada pela guerra e durante uma crise de energia ou mais tarde pela mudança de preço da eletricidade. Na Índia e na China, foram fortes programas de governo que promoveram a disseminação em massa da tecnologia do biogás (HOERZ *et al.*,

2010). Atualmente, existem 300 reatores anaeróbios em operação no Japão, mas cerca de 30% da energia produzida não é aproveitada, é apenas queimada em *flare's* (HIDAKA *et al.*, 2013).

3.5.1.1 Biodigestor

Segundo Blay Jr. *et al.* (2009), biodigestor é uma estrutura projetada e construída para produzir uma situação favorável para que a degradação de biomassa seja realizada sem contato com o ar, proporcionando condições ideais para as bactérias metanogênicas predominarem no meio provocando degradação de forma acelerada. Um exemplo de biodigestor bastante utilizado está mostrado na Figura 11.

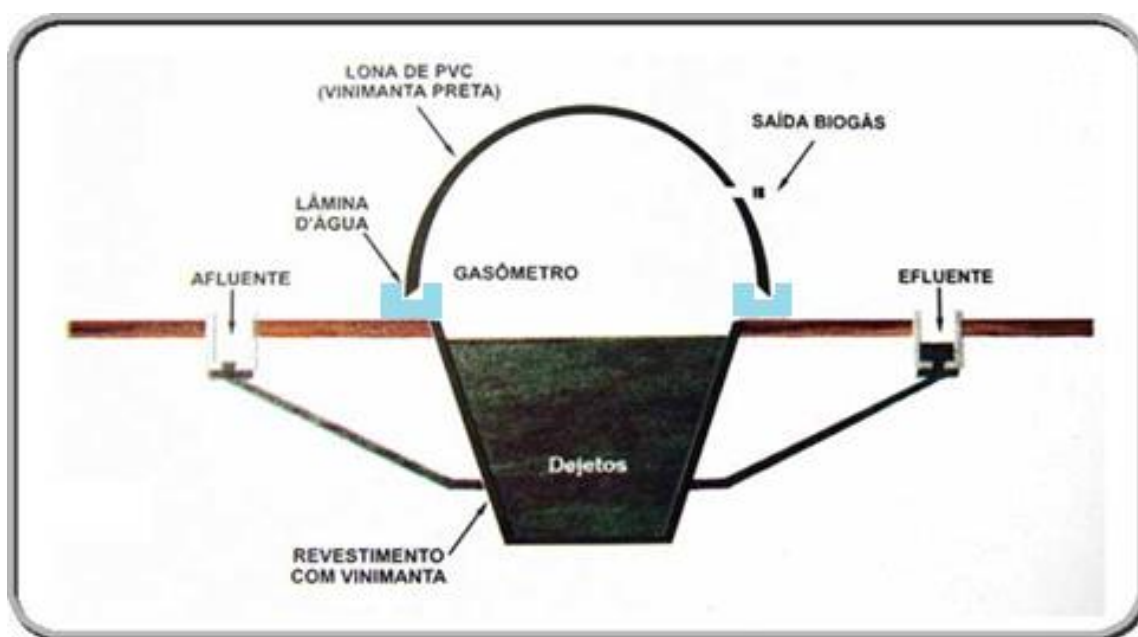


Figura 11 – Biodigestor tipo canadense

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009).

O efluente bruto chega até o biodigestor onde é criado um ambiente sem oxigênio propiciando condições para a liberação de gases que ficam armazenados na área livre da cúpula deste, ou podem ser transferidos para um gasômetro. O biogás pode ser canalizado para os diversos usos (BLAY JR. *et al.*, 2009).

3.5.1.2 Biogás no Brasil

No Brasil, o interesse pelo biogás cresceu nas décadas de 70 e 80 do século XX, quando programas oficiais estimularam a implantação de vários biodigestores para produção de energia térmica para substituição da lenha. E, assim, reduzir a dependência das pequenas propriedades rurais na aquisição de adubos químicos, de energia térmica e também diminuir a poluição causada pelos dejetos animais, aumentando a renda dos criadores. Entretanto, os resultados não foram os esperados e a maior parte dos sistemas foi desativada. Na década de 90 do século passado, o interesse no biogás voltou a surgir devido a possibilidade de inserção no mercado de carbono via Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e em 2005, houve grande euforia para que os projetos e as Reduções Certificadas de Emissão (RCE) viabilizassem os empreendimentos. Nos últimos anos, a geração de energia a partir do biogás passou a ter importância no Brasil e, atualmente, este mercado está aquecido devido à publicação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2009, da instrução normativa 390/09 regulamentando a geração de energia elétrica com biogás e saneamento ambiental (KUNZ e PAULILLO, 2010).

3.5.2 Conversão do Biogás em Energia

Conversão de energia é o processo que transforma um tipo de energia em outro. O biogás é bem versátil como fonte energética renovável, pois pode ser convertida em energia mecânica, por combustão em motores estacionários que movem geradores promovendo a conversão em energia elétrica, pode ser utilizada na cogeração de energia térmica para aquecimento de água e produção de vapor quando queimado em caldeiras (BLEY JR., 2010b).

Para utilização do biogás como combustível em motores, turbinas a gás ou microturbinas é importante ter conhecimento da vazão, composição química e poder calorífico. Isto permite determinar o potencial de geração de energia elétrica e permite o dimensionamento dos processos de pré-tratamento (remoção de gás sulfídrico e umidade) para o biogás (COELHO *et al.*, 2006). O potencial energético provindo do biogás se deve principalmente ao metano, que puro e em Condições Normais de Pressão e Temperatura (CNP) apresenta um poder calorífico inferior (PCI) de 594kJ.m^{-3} , logo, o biogás com concentração de metano entre 50% e 80% apresenta um PCI entre 297kJ.m^{-3} e $475,2\text{kJ.m}^{-3}$ (COLDEBELLA, 2008).

3.5.3 Geração de Biogás

A digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos tem aumentado, nos últimos anos, devido ao potencial tecnológico para produção de biogás rico em metano e/ou hidrogênio e para redução do uso de energia fóssil. O aumento da produção de metano tem como finalidade maximizar a receita de geração de energia, construindo instalações mais rentáveis e realizando a otimização do processo. Combina, principalmente, os benefícios de recuperação de energia, redução da poluição e produção de produtos finais estáveis que podem ser melhorados como adubo para aplicações de uso na terra (FDEZ-GUELFO *et al.*, 2012; ZESHAN, KARTHIKEYAN e VISVANATHAN, 2012; CHO *et al.*, 2013; ZAHEDI *et al.*, 2013b).

3.5.3.1 Formação do Biogás

Digestão anaeróbica é uma degradação bioquímica da matéria orgânica complexa até compostos orgânicos complexos e nutrientes dissolvidos, mediada por micro-organismos em um ambiente livre de oxigênio (MARKOWSKI *et al.*, 2014). No final do processo, a matéria orgânica é degradada até dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Esta mistura constitui assim, o biogás (BALDACIN E PINTO, 2015; ALVES, 2011; KASTNER, SOMITSCH E SCHNITZHOFFER, 2012; LIEW, SHI e LI, 2012).

A decomposição da matéria orgânica, na ausência de ar é provocada por processos físicos ou químicos a alta temperatura e/ou pressão ou pela utilização de micro-organismos a temperatura ambiente e pressão atmosférica. Entretanto, independentemente do método, o gás produzido é considerado como um resultado da ação de micro-organismos sobre resíduos orgânicos, sendo considerado um subproduto da decomposição biológica (IGONI *et al.*, 2007; ZAHEDI *et al.*, 2013b).

3.5.3.2 Processo Microbiológico

Baldacin e Pinto (2015), Rohstoffe, Paterson e Kuhn (2010), Huang *et al.* (2015), Zahedi *et al.* (2013a) e Pecora (2006) afirmam que processo de decomposição anaeróbia ocorre em quatro etapas. Este processo é apresentado no esquema da Figura 12 com as etapas descritas a seguir.

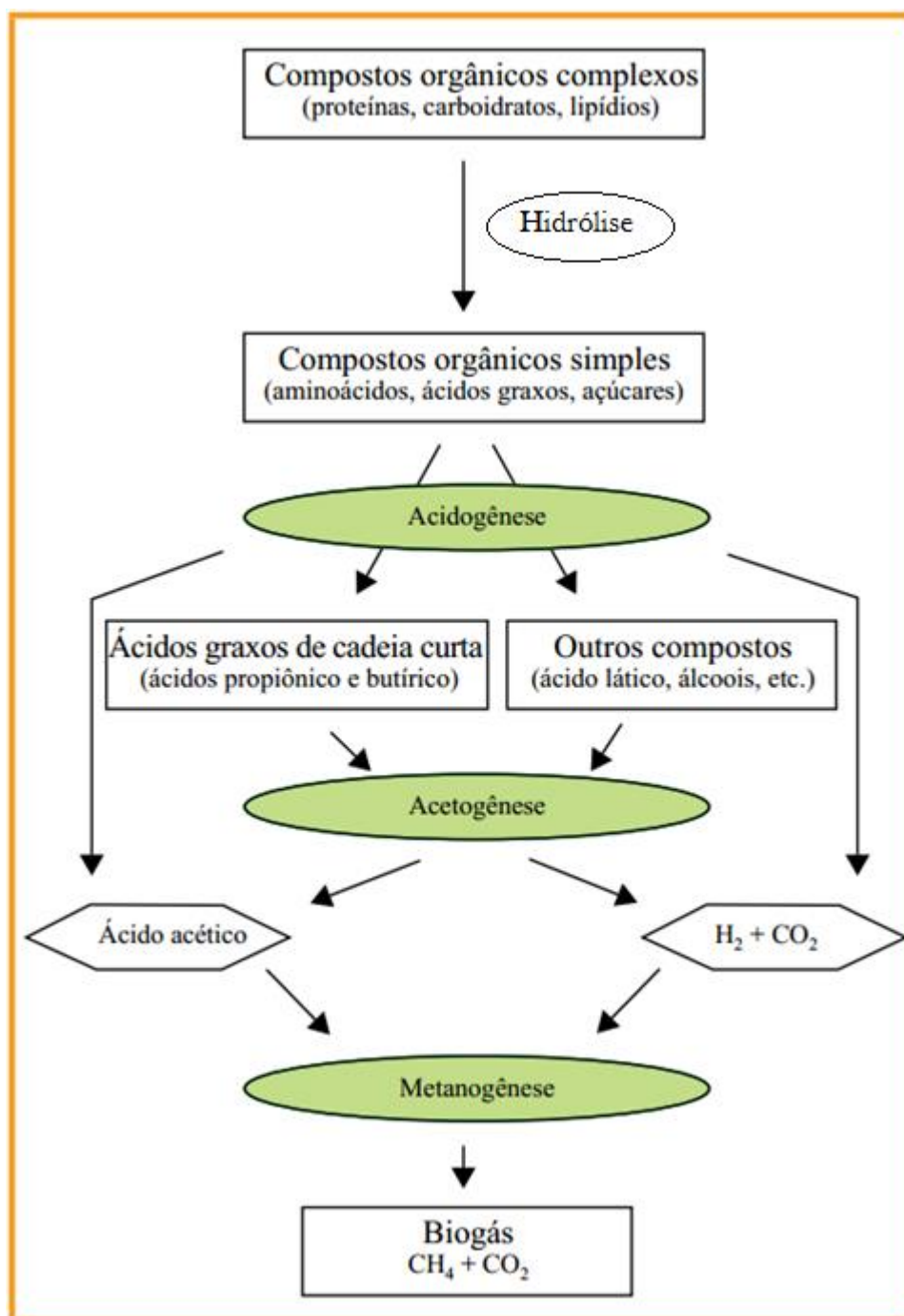


Figura 12 – Processo de decomposição anaeróbia
 Fonte: Adaptado de Rohstoffe, Paterson e Kuhn (2010).

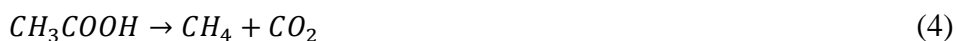
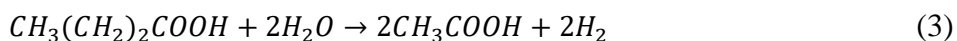
Hidrólise – Com a diminuição da quantidade de oxigênio durante o processo anaeróbio os micro-organismos anaeróbios facultativos predominam convertendo compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios em compostos dissolvidos (aminoácidos, açúcares e ácidos graxos). As bactérias que atuam são as hidrolíticas, que liberam enzimas que decompõem o material através de reações bioquímicas. Segundo Zahedi *et al.* (2013b), nesta fase é produzida uma grande quantidade de hidrogênio.

Acidogênese – Os compostos intermediários formados durante a hidrólise são decompostos, por bactérias fermentativas acidogênicas, em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico), dióxido de carbono, hidrogênio, ácido lático e álcoois.

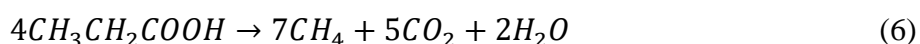
Acetogênese – Os metabólitos finais são excretados pelas bactérias hidrolíticas acidogênicas e entram em solução no meio, são substratos para as bactérias acetogênicas que produzem hidrogênio, ácido acético e dióxido de carbono (precursores do biogás), como metabólitos obrigatórios (OHPA – Obligate Hydrogean Producing Acetogenic). Nessa fase, a pressão parcial do hidrogênio é importante, pois uma alta concentração de hidrogênio impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese, resultando no acúmulo de ácidos orgânicos inibidores da metanogênese (ácidos propiônico, isobutírico, isovalérico e capróico). As bactérias acetogênicas devem estar associadas às arqueas metanogênicas, porque estas consomem hidrogênio e dióxido de carbono durante a formação do metano (transferência interespecífica de hidrogênio).

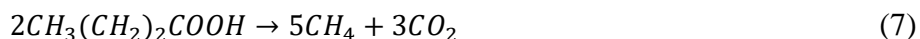
Metanogênese – Nessa fase, as arqueas metanogênicas estritamente anaeróbias convertem o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano. As arqueas metanogênicas são responsáveis pela grande parte da produção de metano, principalmente a partir de ácido acético (MARKOWSKI *et al.*, 2014). Os metanógenos hidrogenotróficos convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano e os metanógenos acetoclásticos produzem metano a partir da redução de ácido acético.

Sachs *et al.* (2003) afirmam que as reações dominantes durante a metanogênese são:



Considerando que não há nenhum enriquecimento de hidrogênio no sistema, têm-se as seguintes reações globais para a degradação dos ácidos propiônico e butírico:





Em outras palavras, o hidrogênio formado a partir dos Ácidos Graxos Voláteis (AGV) nas reações (2) e (3) é completamente consumido na reação (5).

Zahedi *et al.* (2013b) afirmam que as bactérias hidrolíticas-acidogênicas (HAB's), acetogênicas e metanogênicas não diferem apenas na nutrição e o pH requerido, são diferentes em sua fisiologia, cinética de crescimento, absorção de nutrientes e adaptação ao meio. Os micro-organismos metanogênicos crescem mais lentamente que as HAB's com uma taxa de crescimento próxima da acetogênese (3,6 dias). O pH ótimo para a metanogênese e acetogênese é na faixa entre 6,5 e 8,5.

3.5.3.3 Fatores que Influenciam a Produção de Biogás

A temperatura pode influenciar a atuação bacteriana, bem como a quantidade de umidade e a concentração de contaminantes no biogás. Cada micro-organismo presente nos processos metabólicos tem uma faixa ideal de temperatura. Temperaturas acima ou abaixo dessa faixa ideal podem inibir os micro-organismos. Flutuações de temperatura podem ser prejudiciais para o processo de digestão, especificamente para a metanogênese. Normalmente, bactérias mesofílicas suportam flutuações na temperatura de $\pm 3^\circ\text{C}$, sem redução significativa na produção de biogás (BEAM, 2011).

Os micro-organismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica são divididos em psicrófilos (abaixo de 25°C), mesofílicos (entre 37°C e 42°C) e termofílicos (entre 50°C e 60°C). Abaixo de 25°C , a decomposição é lenta e a produção de biogás é reduzida. Em condições mesofílicas estão os picos de crescimento da maior parte dos micro-organismos, sendo estas mais comumente usadas em plantas de biogás. As condições termofílicas são mais adequadas em processos que precisam da eliminação de germes nocivos do substrato. Apesar disso, não existem limites rígidos entre as faixas de temperatura e o que mais prejudica os micro-organismos são as bruscas variações na temperatura, pois os micro-organismos metanogênicos, por exemplo, podem adaptar-se a diferentes níveis de temperatura quando variam lentamente (ROHSTOFFE, PATERSON e KUHN, 2010).

Na Tabela 4 estão algumas vantagens das faixas de temperatura mesofílicas e termofílicas.

Tabela 4 – Vantagens das faixas de temperatura mesofílicas e termofílicas

Mesofílicas (30°C – 40°C)	Termofílicas (45°C – 60°C)
Menos energia para manutenção da temperatura	Aumento da redução de sólidos
Menor potencial de odor	Maior taxa metabólica
Baixa taxa de mortalidade bacteriana	Aumento da eliminação de patógenos
Menores concentrações de efluentes AGV	Maior taxa de crescimento específico de metanogênicas
Maior estabilidade	Tempos de retenção reduzidos

Fonte: Adaptado de Beam, 2011.

Monitorar e manter o pH durante o processo anaeróbio é de grande importância pois os diferentes micro-organismos atuantes na digestão apresentam valores ótimos de pH diferentes, mas os mais importantes são os metanogênicos. As três primeiras fases da digestão, mostradas anteriormente na Figura 11 têm micro-organismos capazes de trabalhar ao longo de uma grande faixa de pH, entre 4,0 e 8,5 enquanto as metanogênicas operam dentro de uma faixa de pH mais estreita, geralmente entre 6,5 e 8,5. O desvio da faixa de pH ótimo para as bactérias metanogênicas resulta na diminuição da atividade destas bactérias havendo um acúmulo dos produtos finais da acetogênese. Desta forma, o pH diminui mais, devido a quantidade de Ácidos Graxos Voláteis (AGV) no sistema. Se o pH não for corrigido, o aumento no acúmulo destes ácidos irá resultar numa interrupção da atividade metanogênica (BEAM, 2011; ROHSTOFFE, PATERSON e KUHN, 2010; WAN *et al.*, 2013). Segundo Huang *et al.* (2015), a redução de pH no processo de digestão anaeróbia diminui o teor de metano e aumenta o teor de hidrogênio no biogás produzido.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Microbiologia Industrial da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e no Laboratório de Combustíveis e Energia da Escola Politécnica de Pernambuco (POLICOM/POLI/UPE).

A metodologia está dividida nas principais etapas apresentadas a seguir.

- Coleta das amostras.
- Caracterização do lodo de esgoto.
- Preparação dos reatores anaeróbios.
- Preparação dos meios.
- Incubação dos meios.
- Avaliação dos principais componentes (CH_4 e CO_2) do biogás produzido.

4.1 COLETA DAS AMOSTRAS

A matéria-prima (lodo de esgoto) foi obtida na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) Mangueira, localizada na zona Oeste do Recife, no bairro da Mangueira.

Foram coletadas três amostras de lodo de esgoto em diferentes concentrações: seco, pastoso e líquido.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

Realizaram-se alguns testes de caracterização da matéria-prima obtida para estimar a quantidade de biogás que será produzida a partir da mesma. Tais testes estão descritos a seguir.

4.2.1 Teor de Umidade

Prepararam-se os cadinhos de porcelana para a análise, levando-os à estufa QUIMIS, modelo Q-317B222 por 1 hora a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ para retirada da umidade contida neles.

Após este tempo os cadinhos (Figura 13) foram retirados da estufa e levados ao dessecador por 40 minutos, para esfriar. Depois de frios, foram pesados em balança analítica.

As amostras foram inseridas nos cadinhos e, estes foram levados à estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas. Em seguida, os cadinhos foram levados ao dessecador por 40 minutos e pesados, novamente e levados à estufa.

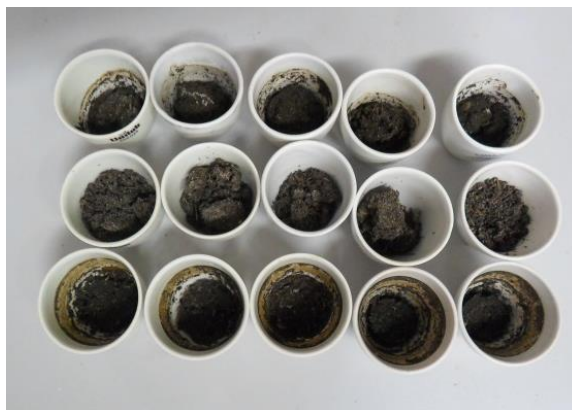


Figura 13 – Amostras após estufa
Fonte: Autora.

Repetiu-se este procedimento até obtenção de peso constante das amostras. Calculou-se a diferença entre as massas antes e depois da amostra ser levada para estufa e, a partir destes resultados, o teor de umidade (método da estufa) foi calculado (adaptado de ABNT NBR 14929, 2003). Os cadinhos com as amostras, após o processo de secagem, estão mostrados na Figura 14.



Figura 14 – Amostras retiradas da estufa para o teste de teor de umidade
Fonte: Autora.

4.2.2 Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Fixos (SF)

A quantidade de sólidos totais, voláteis e fixos foi determinada através da gravimetria, de acordo com a metodologia SMWW (2012a), como descrito a seguir.

Prepararam-se as cápsulas de porcelana para análise levando-as ao forno mufla micro processado da marca QUIMIS, modelo Q318M24 a 550°C, durante 1 hora. As cápsulas foram retiradas da mufla e levadas ao dessecador (Figura 15), por 40 minutos para esfriar, e serem pesadas (m_0), em seguida. Após este procedimento, adicionaram-se 100mL de amostra em cada cápsula, levando-as ao banho-maria termostático da marca CienlaB, modelo CE-100/22-B a 100°C, para evaporação do excesso de umidade das amostras. As cápsulas com as amostras foram transferidas para estufa a 105 °C durante 2 horas, colocadas em dessecador novamente por 45 minutos para esfriar e pesadas em seguida. Repetiu-se o processo até atingir uma massa constante, obtendo-se m_1 usado para calcular os ST da amostra. Em seguida, as amostras foram levadas para o forno mufla a 550°C durante 1 hora e esfriadas no dessecador por 45 minutos. Após este tempo os cadinhos foram pesados (m_2) para determinação de SF, por calcinação. Para obtenção dos SV, calculou-se a diferença entre ST e SF.

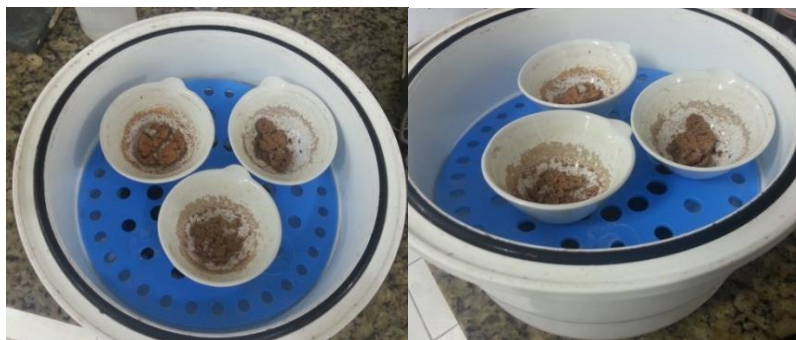


Figura 15 – Amostras retiradas da mufla (sólidos fixos)

Fonte: Autora.

O cálculo para determinação dos ST, SF e SV foi realizado de acordo com as Equações de 8 a 10.

$$ST = (m_1 - m_0) \times 10.000 \quad (8)$$

Sendo: ST : sólidos totais (mg.L^{-1})

m_0 : massa da cápsula calcinada (g)

m_1 : massa da cápsula com amostra após secagem a 105°C (g)

$$SF = (m_2 - m_0) \times 10.000 \quad (9)$$

Sendo: SF : sólidos fixos (mg.L⁻¹)

m : massa da cápsula calcinada (g)

m_2 : massa da cápsula com amostra após calcinação a 550°C (g)

$$SV = (m_1 - m_2) \times 10.000 \quad (10)$$

Sendo: SV : sólidos voláteis (mg.L⁻¹)

m_1 : massa da cápsula com amostra após secagem a 105°C (g)

m_2 : massa da cápsula com amostra após calcinação a 550°C (g)

4.2.3 Contagem de Micro-organismos

A determinação de bactérias, fungos e leveduras foi realizada através de contagem padrão da placa, onde as amostras foram inoculadas em placas de Petri, adicionando-se os meios de cultura adequados. O procedimento utilizado foi adaptado da Instituição Normativa nº 62 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (2003) para análise microbiana em alimentos.

Foram realizadas duas inoculações de cada amostra até seis diluições sucessivas. O meio para bactérias foi o Mueller Hinton Ágar (MH) e as amostras foram incubadas durante 48 horas a 35°C. Para fungos, o meio utilizado foi o Ágar Batata Dextrose (BDA), com tempo de incubação de sete dias a 25°C. O meio para contagem de leveduras foi o Ágar Glicose e Levedura (GL) com incubação de 48 horas a 25°C. O meio de cultura para bolores (BDA) deve ser acidificado (pH próximo de 3,5), usando ácido láctico p.a. antes da inoculação das amostras para inibição do crescimento de bactérias. Esta acidificação foi feita usando uma proporção de 1mL de ácido para cada 250mL de meio.

As amostras foram diluídas conforme orientação da Figura 16. As amostras concentradas, e todas as diluições feitas, foram inoculadas nos meios de cultura citados anteriormente.

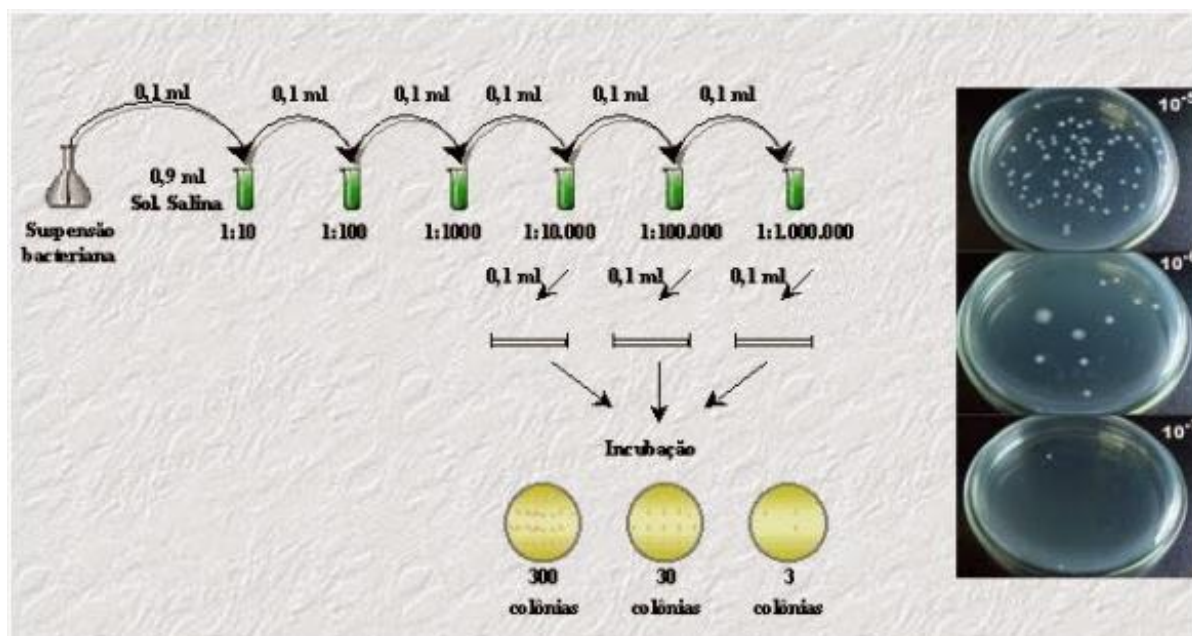


Figura 16 – Procedimento para realização da diluição seriada

Fonte: Adaptado de Dias (2013).

Inicialmente, prepararam-se as diluições de 10^{-1} até 10^{-7} da amostra com água salina peptonada. De cada diluição, foi transferido 1mL para cada placa de Petri, adicionando-se, em seguida, 15mL de cada meio, citados anteriormente, fundidos e a 45°C . Esperou-se a solidificação dos meios antes da incubação. Todo o material usado na contagem de micro-organismos foi previamente esterilizado e todos os procedimentos foram realizados assepticamente. Após a incubação, foi realizada a contagem das colônias que se desenvolveram nas placas de Petri com o meio de cultura.

As placas escolhidas para contagem foram as que apresentaram um número de colônias entre 30 e 300 unidades formadoras de colônias (UFC).

4.2.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

O teste da DQO mede a quantidade de oxigênio (em $\text{mg de O}_2\cdot\text{L}^{-1}$) que é consumida pela matéria orgânica e inorgânica existente na água e compostos oxidáveis. A amostra reage com um agente químico fortemente oxidante. Este oxidante foi o dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) em meio ácido. A DQO determina as substâncias facilmente putrescíveis, orgânicas de difícil decomposição e substâncias minerais (sulfetos, nitritos, etc.). O valor obtido é, portanto, uma indicação indireta do teor de matéria orgânica presente.

A metodologia para determinação da DQO está descrita em SMWW (2012d) e consiste no método titulométrico, baseado na oxidação com excesso de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) a quente, em uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) com sulfato de prata (Ag_2SO_4) como catalisador. Este método é apropriado para DQO entre 0 e $600mg.L^{-1}$. Para DQO mais alta, são feitas diluições adequadas. Após duas horas no bloco digestor micro processado para determinação de DQO da marca QUIMIS, modelo Q325M, mostrado na Figura 17, titula-se o dicromato de potássio residual com solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal, utilizando-se ferroína como indicador. As determinações foram feitas em triplicata (inclusive o branco).

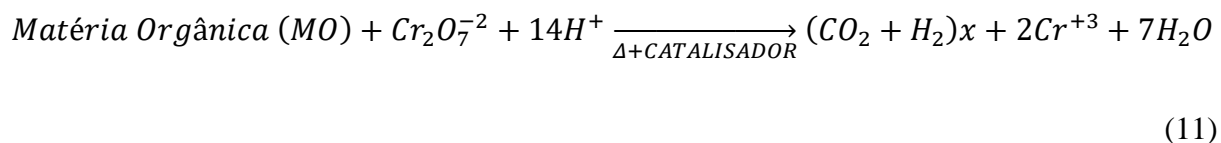


Figura 17 – Bloco digestor para DQO
Fonte: Autora.

O resultado final do teste expressa a quantidade de oxigênio equivalente proporcional ao $K_2Cr_2O_7$ consumido para oxidação da matéria orgânica de um litro de amostra.

Para este teste, pipetou-se $6,00 \pm 0,01mL$ da solução de digestão ($K_2Cr_2O_7$, 0,208N) no tubo. Adicionou-se $10,00 \pm 0,02mL$ da amostra (diluída ou não) homogeneizada e $14,00 \pm 0,05mL$ da solução catalisadora (ácido sulfúrico – sulfato de prata). Os tubos foram fechados adequadamente e seu conteúdo foi homogeneizado. As amostras que apresentaram uma coloração verde foram desprezadas e foram feitas novas diluições da amostra, anotando-se o

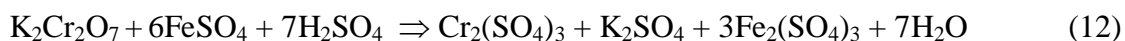
fator de diluição. Os tubos foram levados ao bloco digestor a $150 \pm 2^\circ\text{C}$ por 2 horas \pm 5 minutos. Durante este período de tempo ocorre reação a seguir.



Após este período de tempo os tubos foram retirados do bloco para esfriar. Transferiram-se os conteúdos dos tubos para Erlenmeyers de 200mL, lavando-se o restante com água destilada suficiente para produzir um volume de 100mL. Adicionaram-se algumas gotas de solução indicadora de ferroína e misturou-se bem. Titulou-se cada Erlenmeyer com a solução de sulfato ferroso amoniacal até uma coloração vermelha. O volume de sulfato ferroso amoniacal (FAS) gasto nesta titulação foi chamado de A.

Também foram preparadas amostras de branco com 10mL de água destilada substituindo as amostras. O volume de FAS gasto nesta titulação foi chamado de B.

Para a fatoração da solução de FAS (deve ser padronizada sempre que for usada), transferiu-se $6,00 \pm 0,01\text{mL}$ da solução de digestão para um Erlenmeyer de 200mL. Adicionou-se água destilada suficiente para produzir um volume final de 60mL e acrescentou-se $14 \pm 0,1\text{mL}$ de solução catalisadora, com agitação contínua. Após esfriar, adicionaram-se algumas gotas de solução indicadora de ferroína, preparada com $0,980 \pm 0,001\text{g}$ de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e $1,485 \pm 0,001\text{g}$ de 1-10 fenantrolina monohidratada ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dissolvidos e completados para 100mL com água destilada, e titulou-se com a solução de sulfato ferroso amoniacal $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ até a coloração vermelha. O volume de FAS gasto nesta titulação foi chamado de F ou V_p . O fator e a DQO foram calculados como descritos a seguir. A reação ocorrida na padronização é:



4.2.4.1 Cálculo do Fator do Sulfato Ferroso Amoniacal

O fator é calculado a partir da Equação 13.

$$f_s = \frac{V_{t_f}}{V_p} \quad (13)$$

Sendo: f_s : fator da solução de FAS

V_{t_f} : volume teórico da solução de FAS gasto na titulação (mL)

V_p ou F : volume prático da solução de FAS (mL)

E o volume teórico para solução de digestão (solução de $K_2Cr_2O_7$) 0,208N é obtido da Equação 14.

$$V_{t_f} \times N = V'' \times N'' \quad (14)$$

Sendo: V_{t_f} : volume teórico da solução de FAS gasto na titulação (mL)

N : concentração da solução de FAS (N)

V'' : volume da solução de $K_2Cr_2O_7$ (mL)

N'' : concentração da solução de $K_2Cr_2O_7$ (mL)

Então,

$$V_{t_f} = \frac{V'' \times N''}{N} = \frac{6mL \times 0,208N}{0,025N} = 49,92mL \approx 50mL$$

4.2.4.2 Cálculo da DQO

Para o cálculo da DQO (em mg de $O_2.L^{-1}$) a Equação 15 é utilizada.

$$DQO = \frac{(B-A) \times N \times f_s \times 8.000 \times f_d}{V_a} \quad (15)$$

Sendo: DQO : demanda química de oxigênio ($mg.L^{-1}$)

B : volume de FAS gasto na titulação do branco (mL)

A : volume de FAS gasto na titulação da amostra (mL)

N : concentração da solução de FAS (N)

f_s : fator da solução de FAS

f_d : fator de diluição da amostra

V_a : volume da amostra utilizado na análise (mL)

Substituindo a Equação 13 em 15 e o valor de V_{t_f} :

$$DQO = \frac{(B - A) \times 0,025N \times 50mL \times 8.000 \times f_d}{10mL \times F}$$

$$DQO = \frac{(B-A) \times 1.000 \times f_d}{F} \quad (16)$$

Sendo: DQO : demanda química de oxigênio ($mg.L^{-1}$)

B : volume de FAS gasto na titulação do branco (mL)

A : volume de FAS gasto na titulação da amostra (mL)

f_d : fator de diluição da amostra

F : volume de FAS gasto na titulação para fatoração (mL)

Os valores calculados da DQO só são considerados se o %DQO estiver na faixa entre 30% e 70%. Os valores fora desta faixa são desprezados e a análise é repetida para novas diluições. O %DQO é calculado como indicado na Equação 17.

$$DQO\% = \frac{B-A}{B} \times 100\% \quad (17)$$

Sendo: $DQO\%$: percentual da DQO da amostra em relação ao branco (%)

B : volume de FAS gasto na titulação do branco (mL)

A : volume de FAS gasto na titulação da amostra (mL)

4.2.5 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅)

O teste da DBO₅ mede a quantidade de oxigênio (em mg de O₂.L⁻¹) necessária para a completa oxidação biológica da matéria orgânica e química de substâncias presentes em um litro de água poluída, numa dada temperatura e pressão, através de processos bioquímicos por micro-organismos durante 5 dias a 20°C em condições aeróbicas. A DBO₅ se processa em dois estágios: o primeiro, em que a matéria carbonácea é oxidada, e um estágio subsequente, onde ocorre uma nitrificação.

O método da determinação da DBO₅ é um processo analítico, empírico, usado para avaliar o efeito produzido pelo impacto de despejos domésticos e/ou industriais nas instalações e nos corpos d'água. O principal efeito ecológico da poluição orgânica em um curso d'água é o decréscimo dos teores de oxigênio dissolvido. No caso da proliferação de micro-organismos, a demanda de oxigênio aumenta e a concentração de oxigênio na água cai. Quanto maior o valor de DBO₅, menos oxigênio sobra para os peixes respirarem e mais poluída é a água.

A metodologia utilizada está descrita no SMWW (2012c). A amostra foi diluída adequadamente com água de diluição, que consiste em água deionizada, saturada em oxigênio dissolvido e com nutrientes minerais (solução tampão de fosfato, MgSO₄.7H₂O, CaCl₂, FeCl₃.6H₂O). A diluição e o volume a ser colocado nos frascos dependem do valor da DQO da amostra encontrado anteriormente e da tabela fornecida no manual do equipamento. Em seguida, as amostras foram transferidas para os frascos de DBO₅ do equipamento Oxi-Direct da marca Oberco Hellige, modelo BOD-System Oxi700 (Figura 18). Foi introduzida uma barra magnética em cada um dos frascos, para homogeneização da amostra durante a incubação, e adicionou-se a solução anti-nitrificante fornecida pelo fabricante do equipamento. Tamparam-se os frascos, colocando-se três gotas da solução de hidróxido de potássio a 45% no local apropriado, logo abaixo a tampa. Ligou-se o equipamento e foram feitas as programações necessárias. O equipamento foi colocado em uma incubadora a 20°C durante cinco dias. Após este período, os resultados foram obtidos diretamente no equipamento.



Figura 18 – Oxi-Direct Oberco Hellige, modelo BOD-System Oxi700

Fonte: Autora.

4.2.6 Análise Elementar

A análise elementar foi realizada em equipamento Vario MACRO, modelo CHNOS-CL, de acordo com a norma ASTM D5373/2008: *Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal*. Esta análise determina o percentual em massa de carbono (orgânico e inorgânico, geralmente presentes na forma de carbonatos), enxofre, nitrogênio (também na forma de N_2), hidrogênio (orgânico e associado à água) e oxigênio. Através da composição química elementar, foi possível obter a fórmula molecular simplificada das amostras de lodo estudadas.

A amostra foi previamente preparada, retirando-se a umidade em estufa até obtenção de massa constante. As amostras foram pesadas e embrulhadas em folhas de estanho (branco) padronizadas que acompanham o equipamento e levadas para análise, inserindo-se os dados das amostras (massa, método de análise e tipo de amostra) no programa específico para o equipamento, que ao término da análise dispõe os resultados em uma planilha.

4.2.7 Análise Termogravimétrica (TGA e DTA)

Também chamada de análise aproximada ou imediata, determina o teor de umidade, o teor de material termicamente degradável (voláteis), o teor de carbono fixo e de cinzas. As normas utilizadas para esta análise foram ASTM *Standard Methods for Proximate analysis of Coal and Coke*, D 3172-73 1984 a D3175-73 1988. A análise termogravimétrica identifica as

etapas da carbonização da amostra, utilizando-se a micro balança Shimadzu, modelo DTG-60, Figura 19.

A amostra é inserida no cadinho e este, é colocado no equipamento que, através de uma rampa de aquecimento e da simulação de um ambiente inerte, determina as fases da degradação do material a ser analisado. Para obtenção de todos os dados foi utilizada uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$, desde 30°C até 900°C , utilizando uma atmosfera de nitrogênio no forno (inerte) como gás. Após esta temperatura a atmosfera do forno é trocada de nitrogênio para oxigênio ocorrendo desta forma uma reação entre o carbono fixo e o oxigênio, formando dióxido de carbono e obtendo como resultado o teor de cinzas. Os dados são obtidos através de um gráfico da massa da amostra em função da temperatura ou em função do tempo, chamado termograma.

A perda de água da amostra ocorre abaixo de 125°C , a perda de voláteis ocorre entre 200°C e 400°C . A 900°C , quando a atmosfera muda para oxigênio, o carbono residual é queimado, restando apenas cinzas. A curva de Análise Térmica Diferencial (DTA) mostra o calor requerido para volatilização da amostra, onde os picos negativos representam a perda endotérmica de água e materiais voláteis e os picos positivos representam a combustão (exotérmica) do carbono.



Figura 19 – Balança termogravimétrica Shimadzu, modelo DTG-60
Fonte: Autora.

4.3 PREPARAÇÃO DOS REATORES ANAERÓBIOS

Foram preparados três tipos de reatores. Os primeiros reatores foram frascos de penicilina com volume de 100mL com duas seringas de 10mL colocadas em suas tampas para observar a produção de gás, feitos para avaliar se o substrato produziria biogás (Figura 20).



Figura 20 – Reatores anaeróbios em frascos de penicilina

Fonte: Autora.

Estes frascos foram escolhidos devido a condições aproximadamente uniformes ao longo dos frascos e a possibilidade de serem bem lacrados. Estes reatores foram cobertos com papel alumínio para impedir a entrada de luz.

Os reatores em frascos de penicilina com o lodo da primeira coleta foram incubados nas temperaturas de 30°C, 35°C, 40°C e 45°C e com o lodo da segunda coleta foram incubados nas temperaturas de 30°C, 35°C, 40°C, 45°C e 50°C.

Após esta fase, foram construídos reatores maiores que foram incubados à temperatura que apresentou melhor produção de biogás nos frascos de penicilina com o lodo da 1ª coleta. Estes reatores foram construídos com garrafas tipo PET (politereftalato de etileno) com volume de 1L (Figura 21). Foram feitos furos nas tampas para saída do gás onde foram conectadas bolsas coletoras. Estes reatores também foram cobertos com papel alumínio, para impedir a incidência de luz nos meios.



Figura 21 – Reatores em garrafas PET

Fonte: Autora.

Outro tipo de reator foi construído utilizando frascos de vidro tipo âmbar com volume de 1L. Estes foram cobertos com papel alumínio da mesma forma que os outros reatores. As tampas foram furadas da mesma forma que nos reatores em garrafas PET e as bolsas de amostragem de gás foram conectadas como mostrado na Figura 22.



Figura 22 – Reatores em frascos de vidro tipo âmbar

Fonte: Autora.

Os frascos de penicilina foram incubados em temperaturas mesofílicas e termofílicas, enquanto os reatores construídos em garrafas tipo PET e tipo âmbar foram incubados apenas em uma temperatura, considerada a que proporcionou os melhores resultados nos reatores dos frascos de penicilina.

4.4 PREPARAÇÃO DOS MEIOS

Os primeiros meios foram preparados com o lodo coletado inicialmente para avaliação da possibilidade de produção de biogás. Em seguida coletaram-se novas amostras de lodo que foram usadas para preparo de todos os outros meios.

4.4.1 Neutralização dos Meios

Após preparação dos meios verificou-se o pH dos mesmos e esses, foram neutralizados com uma solução de hidróxido de potássio (KOH) 6mol.L^{-1} ou algumas gotas de ácido acético (CH_3COOH) concentrado.

4.4.2 Incubação dos Meios

Os meios colocados nos reatores de frascos de penicilina com os lodos da primeira coleta foram incubados em quatro temperaturas diferentes (30°C, 35°C, 40°C e 45°C) e os reatores de frascos de penicilina com os lodos da segunda coleta em cinco temperaturas diferentes (30°C, 35°C, 40°C, 45°C e 50°C). Os meios dos reatores feitos com as garrafas tipo PET e frascos tipo âmbar foram incubados a 30°C.

Os meios foram preparados em duplicata para um melhor acompanhamento dos experimentos e estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição dos reatores anaeróbios e os meios contidos neles

Descrição dos reatores anaeróbios e os meios contidos neles					
Biodigestor	Tipo de reator	Tipo de lodo	Massa de lodo (g)	Massa de água (g)	% lodo (% m/m)
Incubados a 30°C					
1A	frasco de penicilina 100mL	seco	50	30	62,5%
2A		pastoso	80	0	100%
3A		líquido	80	0	100%
4A		mistura	27 de cada	0	33,3% cada
5A1	garrafa tipo PET 1L	mistura	250 de cada	0	33,3% cada
5A2		mistura	250 de cada	0	33,3% cada
6A1		pastoso	750	0	100%
6A2		pastoso	750	0	100%
7A1		seco	650	100	86,7%
7A2		seco	650	100	86,7%
8A1		líquido	750	0	100%
8A2		líquido	750	0	100%
9A1	frasco de penicilina 100mL	mistura	20 de cada	0	33%
9A2		mistura	20 de cada	0	33%
10A1		líquido	60	0	100%
10A2		líquido	60	0	100%
11A1		seco	45	15	75%
11A2		seco	45	15	75%
12A1	frasco tipo âmbar 1L	pastoso	60	0	100%
12A2		pastoso	60	0	100%
13A1		mistura	250 de cada	0	33,3% cada
13A2		mistura	250 de cada	0	33,3% cada
14A1		pastoso	750	0	100%
14A2		pastoso	750	0	100%
15A1		líquido	750	0	100%
15A2		líquido	750	0	100%
16A1		seco	550	200	73,3%
16A2		seco	550	200	73,3%
Incubados a 35°C					
1B	frasco de penicilina 100mL	seco	50	30	62,50%
2B		pastoso	80	0	100%
3B		líquido	80	0	100%
4B		mistura	27 de cada	0	33,3% cada
9B1		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
9B2		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
10B1		líquido	60	0	100%
10B2		líquido	60	0	100%
11B1		seco	45	15	75%

continua...

Tabela 5 – Descrição dos reatores anaeróbios e dos meios contidos neles (continuação)

Biodigestor	Tipo de reator	Tipo de lodo	Massa de lodo (g)	Massa de água (g)	% lodo (% m/m)
Incubado a 35°C					
11B2	frasco de penicilina 100mL	seco	45	15	75%
12B1		pastoso	60	0	100%
12B2		pastoso	60	0	100%
Incubados a 40°C					
1C	frasco de penicilina 100mL	seco	50	30	62,5%
2C		pastoso	80	0	100%
3C		líquido	80	0	100%
4C		mistura	27 de cada	0	33,3% cada
9C1		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
9C2		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
10C1		líquido	60	0	100%
10C2		líquido	60	0	100%
11C1		seco	45	15	75%
11C2		seco	45	15	75%
12C1		pastoso	60	0	100%
12C2		pastoso	60	0	100%
Incubados a 45°C					
1D	frasco de penicilina 100mL	seco	50	30	62,5%
2D		pastoso	80	0	100%
2D		líquido	80	0	100%
4D		mistura	27 de cada	0	33,3% cada
9D1		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
9D2		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
10D1		líquido	60	0	100%
10D2		líquido	60	0	100%
11D1		seco	45	15	75%
11D2		seco	45	15	75%
12D1		pastoso	60	0	100%
12D2		pastoso	60	0	100%
Incubados a 50°C					
9E1	frasco de penicilina 100mL	mistura	20 de cada	0	33,3% cada
9E2		mistura	20 de cada	0	33,3% cada
10E1		líquido	60	0	100%
10E2		líquido	60	0	100%
11E1		seco	45	15	75%
11E2		seco	45	15	75%
12E1		pastoso	60	0	100%
12E2		pastoso	60	0	100%

4.5 ANÁLISE DO BIOGÁS

O acompanhamento da produção de gás durante determinado período de tempo foi realizado com análises periódicas dos gases produzidos em todos os reatores. A composição do biogás produzido foi analisada por cromatografia gasosa em equipamento da Thermo Scientific, modelo TRACE GC ULTRA.

As injeções das amostras se deram por válvula pneumática de seis vias, em equipamento dotado de Detector de Condutividade Térmica (TCD), com coluna capilar com fase estacionária mol Sieve 5A de 30m de comprimento por 0,53mm de diâmetro e com espessura do filme de 1 μ m. O fluxo do gás de arraste foi de 3,5mL.min⁻¹. O forno foi inicialmente aquecido a 150°C, onde permaneceu durante 2 minutos, em seguida foi aquecido a uma taxa de 20°C.min⁻¹ até uma temperatura de 280°C, onde permaneceu nesta temperatura por 1 minuto.

As amostras do primeiro lodo coletado, colocadas em frascos de penicilina, foram analisadas apenas quando observado o deslocamento dos êmbolos das seringas colocadas para observação da produção de gás. E o gás analisado, apenas o contido nas seringas. As amostras seguintes foram analisadas semanalmente e coletadas direto dos reatores, de modo a representar da forma mais real possível à composição do biogás em cada período de tempo. O cromatograma de uma das amostras está ilustrado na Figura 23.

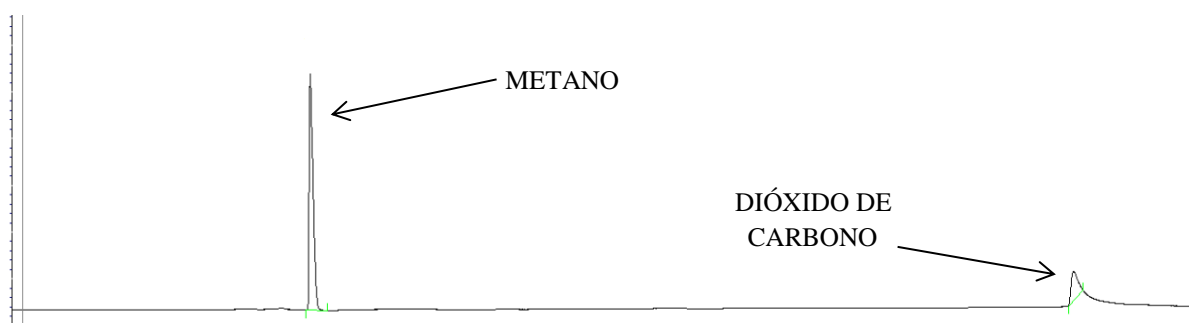


Figura 23 – Cromatograma do biogás produzido no reator 9A2 com 23 dias de fermentação com 33,97% de metano e 25,98% de dióxido de carbono (cromatografia gasosa)

Para a interpretação dos resultados do cromatógrafo a gás, foi realizada uma calibração externa (APÊNDICE A). Foram injetadas quantidades molares conhecidas de metano e dióxido de carbono, principais componentes do biogás.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das análises descritas anteriormente estão apresentados a seguir.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Nas Tabelas 6 e 7 estão os resultados da caracterização dos três tipos de lodo de esgoto utilizados nos experimentos.

Para o lodo da 1ª coleta foram analisados os parâmetros mostrados na Tabela 6. A caracterização do primeiro lodo coletado não foi concluída porque o uso deste lodo tinha como finalidade apenas uma análise primária quanto à produção de biogás. A biodigestão deste primeiro lodo foi uma forma de avaliar se a matéria-prima disponível proporcionaria bons resultados na produção de biogás.

Tabela 6 – Caracterização do lodo de esgoto da 1ª coleta

Parâmetros	<i>Lodo seco</i>	<i>Lodo pastoso</i>	<i>Lodo líquido</i>
Teor de umidade (%)	65,71 ± 1,15	91,77 ± 0,09	99,84 ± 0,03
pH	Não medido*	7,24 ± 0,00	7,25 ± 0,02
<i>Análise Elementar</i>			
N (%)	3,98 ± 0,05	2,30 ± 0,09	1,50 ± 0,02
C (%)	26,31 ± 0,30	20,61 ± 0,80	10,26 ± 0,11
H(%)	4,22 ± 0,05	3,80 ± 0,11	1,82 ± 0,09
S(%)	2,19 ± 0,02	1,86 ± 0,08	1,37 ± 0,02
C/N	6,63 ± 0,16	8,96 ± 0,70	6,84 ± 0,16

* Não foi possível medir o pH devido a baixa umidade apresentada pelo lodo seco.

O oxigênio não foi calculado para o primeiro lodo usado porque o teor de cinzas não foi determinado.

Na Tabela 7 observam-se os resultados da caracterização do lodo da segunda coleta.

Tabela 7 – Caracterização do lodo de esgoto da 2ª coleta

Parâmetros	<i>Lodo seco</i>	<i>Lodo pastoso</i>	<i>Lodo líquido</i>
Teor de umidade (% m/m)	63,003 ± 0,003	84,579 ± 0,002	96,150 ± 0,005
pH	5,91 ± 0,06	7,32 ± 0,07	7,06 ± 0,22
DQO (mg de O ₂ .L ⁻¹)	18 180 ± 639	29 783 ± 99	5 469 ± 409
DBO (mg de O ₂ .L ⁻¹)	2 954 ± 23	7 050 ± 2.450	2 735 ± 686
<i>Análise dos Sólidos</i>			
ST (mg.L ⁻¹)	172 104 ± 3 896	164 494 ± 6 817	34 334 ± 3 211
SV (mg.L ⁻¹)	72 887 ± 1 414	79 859 ± 2 838	20 332 ± 1 958
SF (mg.L ⁻¹)	99 218 ± 2 519	84 635 ± 3 979	14 002 ± 1 252
<i>Contagem de Micro-organismos</i>			
Bactérias (UFC ^{**} .mL ⁻¹)	4,90×10 ⁵	2,30×10 ⁷	8,50×10 ⁵
Fungos (UFC.mL ⁻¹)	3,00×10 ³	4,20×10 ⁶	8,20×10 ¹
Leveduras (UFC.mL ⁻¹)	4,40×10 ⁶	1,58×10 ⁵	3,40×10 ⁴
<i>Análise Elementar*</i>			
N (% m/m)	2,41 ± 0,03	2,96 ± 0,04	3,39 ± 0,09
C (% m/m)	21,81 ± 0,40	27,28 ± 0,27	32,08 ± 0,36
H (% m/m)	3,32 ± 0,06	4,10 ± 0,04	4,84 ± 0,07
S (% m/m)	2,83 ± 0,08	2,79 ± 0,06	2,24 ± 0,03
O (% m/m) ^{***}	14,97 ± 1,30	17,98 ± 1,31	18,50 ± 1,05
C/N	9,05 ± 0,18	9,22 ± 0,11	9,49 ± 0,35
<i>Análise Imediata</i>			
Umidade (% m/m)	3,18 ± 0,03	2,93 ± 0,11	3,73 ± 0,64
Voláteis [*] (% m/m)	43,24 ± 0,70	52,50 ± 0,81	58,38 ± 1,08
Cinzas [*] (% m/m)	54,66 ± 0,73	44,89 ± 0,90	38,95 ± 0,50
Carbono fixo [*] (% m/m)	1,90 ± 0,05	2,61 ± 0,09	2,12 ± 0,45

* Base seca

** Unidade Formadora de Colônia

*** Por diferença

De posse desses valores é possível fazer algumas observações sobre os substratos que serão utilizados para a produção de biogás.

Os três tipos de lodo diferem principalmente no teor de umidade e, consequentemente, nas DQO, DBO e série de sólidos. Com exceção do lodo da 1ª coleta, os valores de pH obtidos estão de acordo com o valor encontrado por Cho *et al.* (2013) de 8,2 e por Qiao *et al.* (2011b) de 7,5 e com a faixa encontrada por Silva *et al.* (2001) que é próximo a neutralidade, entre 6,83 e 8,39 para o biossólido da ETE Mangueira e com umidade na faixa de 86,4 – 94,78, que também corresponde aos valores encontrados. O pH do lodo seco está na faixa encontrada por Zahedi *et al.* (2013b) entre 4,8 e 6,2. Pecora (2006) afirma que o teor de umidade do lodo de ETE's está entre 60% e 90% e que para uma boa produção de metano a

relação C/N deve ser mantida entre 20:1 e 30:1, valores bem acima dos encontrados neste trabalho. A Agência de Recursos Renováveis (FNR/GIZ) (2013) explica que a relação C/N é considerada ideal quando situada entre 10 e 30, pois uma relação muito elevada reduz a atividade metabólica, resultando na degradação incompleta do carbono, ou seja, o rendimento da fermentação não é máximo e uma relação muito pequena favorece a formação excessiva de amônia, inibindo o crescimento das bactérias. Porém, o valor apresentado por Wan *et al.* (2013) de 9,0 corresponde aos encontrados, principalmente para o lodo da segunda coleta. O resíduo orgânico analisado por Curry e Pillay (2012) mostra que este possui uma relação C/N de 18,5, aproximadamente duas vezes maior que a do lodo de ETE. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – pH, teor de umidade e relação C/N para o lodo de esgoto

Parâmetros	pH	Umidade (% m/m)	Relação C/N
Silva <i>et al.</i> (2001)	6,83 - 8,4	86,4 - 94,8	-
Pecora (2006)	-	60-90	20-30
Cho <i>et al.</i> (2013)	8,2	-	-
Wan <i>et al.</i> (2013)	-	-	9,0
Resíduo orgânico por Curry e Pillay (2012)	-	-	18,5
Lodo seco por Qiao <i>et al.</i> (2011b)	7,5	-	-
RSU por Zahedi <i>et al.</i> (2013b)	4,8 – 6,2	-	-

ND – Não determinado

A Tabela 9 mostra resultados de sólidos totais, voláteis e fixos encontrados por alguns autores. Cho *et al.* (2013) utiliza o lodo de esgoto desidratado, que corresponde ao lodo seco que foi utilizado neste trabalho, com menor teor de umidade. Os resultados encontrados por este autor são mais próximos que os encontrados para o lodo seco, onde apresentaram maior quantidade de sólidos fixos que a de sólidos voláteis. Em relação aos resíduos orgânicos os valores de sólidos totais também são próximos, mas com uma maior quantidade de sólidos voláteis do que de sólidos fixos.

Os valores percentuais encontrados correspondem a 17,2%, 7,3% e 9,9%, respectivamente, para o lodo seco, a 16,4%, 8,0% e 8,5% para o lodo pastoso e 3,4%, 2,0% e 1,4% para o lodo líquido. Comparando estes valores entre si e com os encontrados por outros autores tem-se que o lodo seco e o pastoso apresentaram percentuais de sólidos próximos entre si e próximos aos valores encontrados por Qiao *et al.* (2011b).

Tabela 9 – Sólidos totais, voláteis e fixos

Parâmetros	ST	SV	SF
Cho <i>et al.</i> (2013)	298 g.L ⁻¹	125 g.L ⁻¹	173 g.L ⁻¹
Wan <i>et al.</i> (2013)	23,4%	89,3%	-
Ganesh <i>et al.</i> (2013)	7,2%	5,2%	-
Lodo seco por Qiao <i>et al.</i> (2011b)	14,58%	10,63%	-
Resíduos orgânicos por Cho <i>et al.</i> (2013)	211 g.L ⁻¹	174 g.L ⁻¹	37 g.L ⁻¹
Resíduos orgânicos por Wan <i>et al.</i> (2013)	18,9%	90,1%	-

Os resultados de DQO encontrados para Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por Zahedi *et al.* (2013b), entre 60g.L⁻¹ e 73g.L⁻¹, divergem dos valores observados no presente trabalho.

Comparando-se os resultados das análises elementar e imediata com os encontrados por outros autores, descritos nas Tabelas 10 e 11, tem-se que o lodo da ETE Mangueira apresenta alto teor de enxofre e de cinzas e baixo teor de oxigênio. Comparando com os valores para resíduos orgânicos encontrados por Curry e Pillay (2012), o lodo estudado apresentou baixos teores de carbono e oxigênio. O elevado teor de cinza encontrado deve-se a grande quantidade de areia presente no lodo estudado.

Tabela 10 – Composição elementar do lodo de esgoto (Base seca)

Composição elementar (% m/m)	C	H	N	S	O*
Fonts <i>et al.</i> (2012)	23,1-39,9	3,8-5,9	2,5-7,9	0,8-1,0	18,8-23,5
Wan <i>et al.</i> (2013)	19,9	-	2,2	2,24	-
Resíduos orgânicos por Curry e Pillay (2012)	48	6,4	2,6	0,4	37,6

ND – Não Definido

*Oxigênio calculado por diferença

Tabela 11– Composição obtida pela análise imediata do lodo de esgoto

Composição (% m/m)	Umidade	Cinzas*	Voláteis*	Carbono fixo*
Fonts <i>et al.</i> (2012)	1,5-7,1	22,6-52,0	38,3-66,8	0,8-19,7

*Base seca

A análise elementar fornece o percentual em massa dos principais elementos que constituem o lodo de esgoto. A partir destes resultados é possível encontrar sua fórmula molecular simplificada, como mostrado a seguir.

5.1.1 Cálculo da Fórmula Molecular

Segundo Tyagi e Lo (2013) e baseado nos dados da Tabela 7, é possível definir a proporção estequiométrica da reação que ocorre durante a biodigestão anaeróbia através das Equações de 18 a 25.

$$c = \frac{m_C}{M_C} \quad (18)$$

$$h = \frac{m_H}{M_H} \quad (19)$$

$$o = \frac{m_O}{M_O} \quad (20)$$

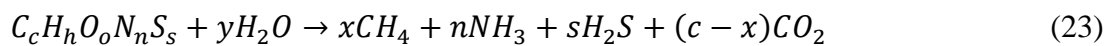
$$n = \frac{m_N}{M_N} \quad (21)$$

$$s = \frac{m_S}{M_S} \quad (22)$$

Sendo, c, h, o, n, s: números de mols de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, respectivamente.

m_C, m_H, m_O, m_N, m_S : massas de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, respectivamente, presentes em 100g da amostra.

M_C, M_H, M_O, M_N, M_S : massas atômicas de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, respectivamente.



$$x = 1/8(4c + h - 2o - 3n - 2s) \quad (24)$$

$$y = 2(c - x) - o \quad (25)$$

5.1.1.1 Lodo de esgoto seco

Cada 100g de lodo seco possui: 2,41g de nitrogênio; 21,81g de carbono; 3,32g de hidrogênio; 2,83g de enxofre e 14,97g oxigênio. Logo, usando as equações de 18 a 22 tem-se a seguinte fórmula molecular: $C_{20,2}H_{36,9}O_{10,4}N_{1,9}S$.

Calculando os valores de x e y com as equações 24 e 25: $x = 11,15$ e $y = 7,70$.

E a fórmula teórica aproximada, com a equação 23, para o lodo seco, resultando:

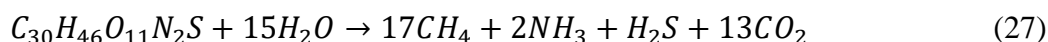


5.1.1.2 Lodo de esgoto pastoso

Cada 100g de lodo pastoso possui: 2,96g de nitrogênio; 27,28g de carbono; 4,10g de hidrogênio; 2,79g de enxofre e 17,98g oxigênio. Logo, usando as equações de 18 a 22 obtém-se a seguinte fórmula molecular: $C_{30,3}H_{45,6}O_{12,4}N_{2,3}S$.

Para encontrar os valores de x e y usando as equações 24 e 25, tem-se: $x = 16,64$ e $y = 14,92$

E com a equação 23 encontra-se a fórmula teórica aproximada para o lodo pastoso:

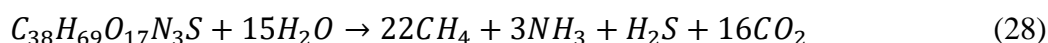


5.1.1.3 Lodo de esgoto líquido

Cada 100g de lodo líquido possui: 3,39g de nitrogênio; 32,08g de carbono; 4,84g de hidrogênio; 2,24g de enxofre e 18,50g oxigênio. Logo, usando as equações de 18 a 22 encontra-se a seguinte fórmula molecular para o lodo líquido: $C_{38,1}H_{69,1}O_{16,6}N_{3,4}S$.

Usando as equações 24 e 25, encontram-se os valores de x e y: $x = 22,01$ e $y = 15,58$

E com a equação 23, a fórmula teórica aproximada para o lodo líquido:



Pela estequiometria das reações obtidas para cada lodo, tem-se que o lodo líquido tem potencial para maior produção de metano, amônia e CO_2 .

Segundo Singh e Agrawal (2007), a composição do lodo de esgoto é variável dependendo dos hábitos alimentares, saneamento básico e do estágio de desenvolvimento industrial da sociedade, variando de um local para outro. Isto explica os diferentes resultados encontrados por diferentes autores.

5.2 ANÁLISE DO BIOGÁS

Para avaliação dos perfis de concentração obtidos nos reatores, em diferentes condições, estudados nesse trabalho considerou-se o estudo da velocidade de produção de metano durante o processo de fermentação considerando diferentes matérias-primas, representado no gráfico proposto pela KWS SAAT AG (2014) que mostra a velocidade de formação relativa a fermentações para diferentes tipos de cultura (Figura 24). Neste gráfico, observa-se que a fermentação está relacionada com o tipo da matéria orgânica a ser degradado em cada fase da digestão anaeróbica, ou seja, materiais ricos em monossacarídeos, dissacarídeos e amido são degradados rapidamente e os que apresentam maior quantidade de lignina e celulose precisam de um maior tempo de retenção para serem fermentados.

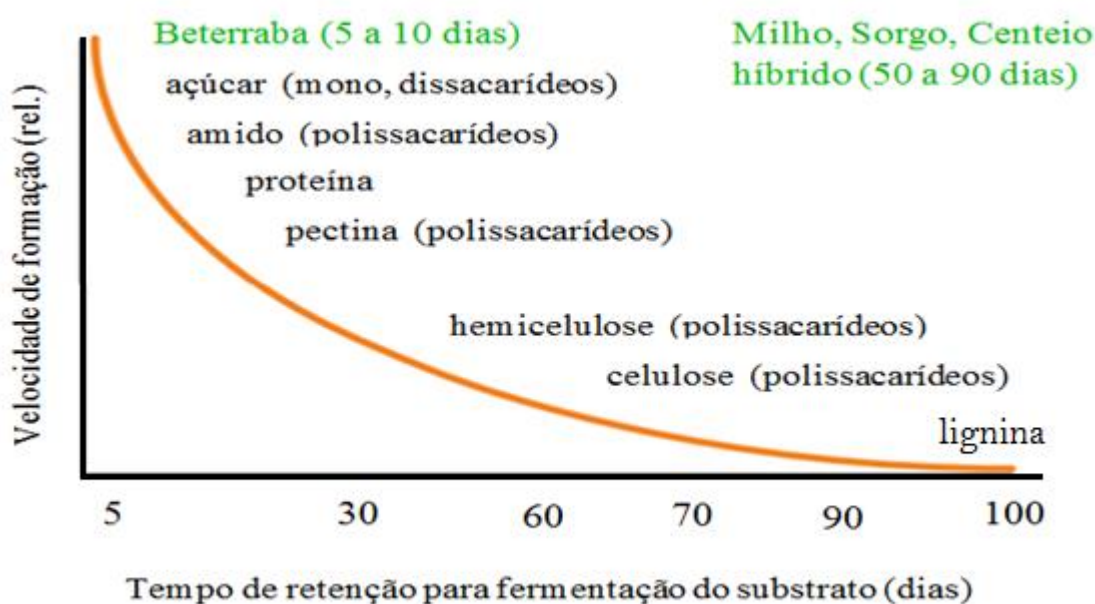


Figura 24 – Produção de metano a partir de diferentes matérias-primas
Fonte: Adaptado de KWS SAAT AG (2014).

Analizando o comportamento dos gráficos obtidos neste trabalho (APÊNDICE B), de acordo com o processo microbiológico de digestão anaeróbia, descrito anteriormente neste trabalho tem-se que a fase aeróbia inicial de transição é curta e a produção de metano é observada logo nos primeiros dias de fermentação. Dessa forma, a fase de metanogênese é atingida rapidamente, pois o ápice na produção de metano, na maior parte dos reatores estudado, é alcançado logo nos primeiros dias de fermentação e, em alguns, este valor se mantém por vários dias. Em seguida, o percentual de metano declina até valores próximos a zero, finalizando o processo de degradação.

5.2.1 Avaliação da Produção de Biogás

Inicialmente, prepararam-se os fracos de penicilina com os meios de lodo seco, pastoso, líquido e a mistura dos três para avaliação da viabilidade da matéria-prima a ser estudada. Analisou-se apenas a existência de metano e gás carbônico no biogás produzido. Estas amostras foram acompanhadas durante 225 dias. Nestes reatores observou-se a possibilidade de produção de biogás. Tais resultados seguem nas Tabelas de 12 a 15, com os reatores que produziram maior quantidade de biogás em destaque e representadas graficamente no APÊNDICE B1.

Tabela 12 – Teores de CH₄ e CO₂ nos reatores com lodo seco a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C

Dias	Teor de CH ₄ (% mol/mol)				Teor de CO ₂ (% mol/mol)			
	(1A) 30°C	(1B) 35°C	(1C) 40°C	(1D) 45°C	(1A) 30°C	(1B) 35°C	(1C) 40°C	(1D) 45°C
1		ND	ND	ND		30,15	28,01	22,69
4	ND	5,94	2,01		ND	5,94	2,01	
5				10,85				55,23
11		61,01				44,92		
15	8,32				50,83			
53				50,12				2,69
81	63,23				27,53			
159		50,60				20,94		

ND – Não detectado

Tabela 13 – Teores de CH₄ e CO₂ nos reatores com lodo pastoso a 30°C, 35°C 40°C e 45°C

Dias	Teor de metano (%mol/mol)				Teor de CO ₂ (%mol/mol)			
	(2A)	(2B)	(2C)	(2D)	(2A)	(2B)	(2C)	(2D)
	30°C	35°C	40°C	45°C	30°C	35°C	40°C	45°C
1		12,90	13,34	18,25		8,10	7,94	8,19
4	19,50	64,89	78,14	79,69	9,47	13,54	15,50	16,62
7	51,75	82,34			10,26	16,54		
11	75,35				12,62			
18		87,21				21,46		
67		58,82				14,47		
159	83,05				13,26			
225	32,23				3,06			

Tabela 14 – Teores de CH₄ e CO₂ nos reatores com lodo líquido a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C

Dias	Teor de CH ₄ (%mol/mol)				Teor de CO ₂ (%mol/mol)			
	(3A)	(3B)	(3C)	(3D)	(3A)	(3B)	(3C)	(3D)
	30°C	35°C	40°C	45°C	30°C	35°C	40°C	45°C
1				9,13				5,33
4				43,54				10,38
11		24,85				10,37		
42		36,41				11,16		

Tabela 15 - Teores de CH₄ e CO₂ nos reatores com mistura dos três lodos a 30°C, 35°C, 40°C e 45°C

Dias	Teor de CH ₄ (%mol/mol)				Teor de CO ₂ (%mol/mol)			
	(4A) 30°C	(4B) 35°C	(4C) 40°C	(4D) 45°C	(4A) 30°C	(4B) 35°C	(4C) 40°C	(4D) 45°C
1		ND	ND	ND		14,93	10,00	11,34
4	6,09	13,16			13,61	59,26		
6				83,76				35,96
8	71,18			66,54	22,72			33,94
11		57,92		71,22		44,45		33,68
13	67,57			55,93	20,62			30,76
19	80,50				15,15			
22	75,68				27,15			
26	68,99				28,45			
35	74,59				24,43			
46				51,67				1,85
60	67,03				18,02			
74	64,09				23,26			
89	63,22				22,25			
110	66,84		22,13		18,27		14,70	
152	68,34				17,18			

ND – Não detectado

Na Figura 25, está a comparação entre os teores de metano em cada reator, nos primeiros dias de fermentação. Nesse gráfico, observou-se que a produção máxima de metano ocorre entre 10 e 20 dias do processo, em condições mesofílicas. Em condições termofílicas, o ápice da produção de metano foi observado antes do 10º dia, porém apenas um reator apresentou formação de biogás.

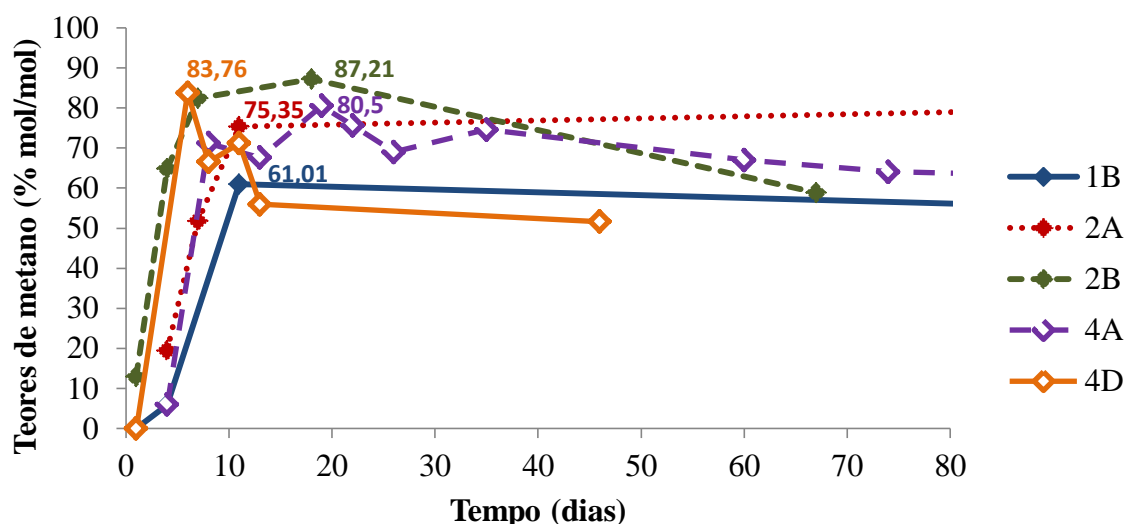


Figura 25 – Teores de metano no biogás produzido nos reatores 1B (lodo seco a 35°C), 2A (lodo pastoso a 30°C), 2B (lodo pastoso a 35°C), 4A (mistura de lodo a 30°C) e 4D (mistura de lodo a 45°C)

Baseado nestes resultados, a temperatura de trabalho para a próxima fase foi escolhida. Em condições termofílicas, apenas um reator produziu biogás suficiente para obtenção de um perfil de concentração de metano apresentando menor tempo de retenção que os reatores incubados em condições mesofílicas. Como os tempos de retenção dos reatores estudados em condições mesofílicas e termofílicas foram próximos (antes do 20º dia de fermentação) e os reatores em condições mesofílicas, principalmente o reator 4A (mistura de lodos a 30°C), apresentaram maior produção de gás, essa foi a temperatura utilizada para produção de biogás em reatores de maior escala.

5.2.2 Produção de Biogás em Reatores em Maior Escala

Para esta fase, os meios foram os lodos da 2ª coleta e os reatores de 1L construídos em garrafas tipo PET, incubados a temperatura ambiente (30°C). Nesta fase os reatores foram feitos em replicata, para comparação dos resultados. E estes, são mostrados no APÊNDICE B2.

Na Figura 26 são mostrados os gráficos com as produções de metano com cada tipo de lodo de esgoto e a mistura dos três. Nesta figura, pode-se observar que a produção máxima de metano se dá antes do 20º dia para os lodos pastoso, líquido e a mistura dos três, diferente do lodo seco que apresenta maior quantidade de metano após 40 dias de biodigestão. Para a

mistura dos lodos, a maior produção de metano se mantém por aproximadamente 50 dias, enquanto o lodo líquido produz o máximo no 8º dia e depois a produção diminui até os últimos dias. Para o lodo seco a produção de metano aumenta até atingir o máximo no 41º dia e depois diminui até o final.

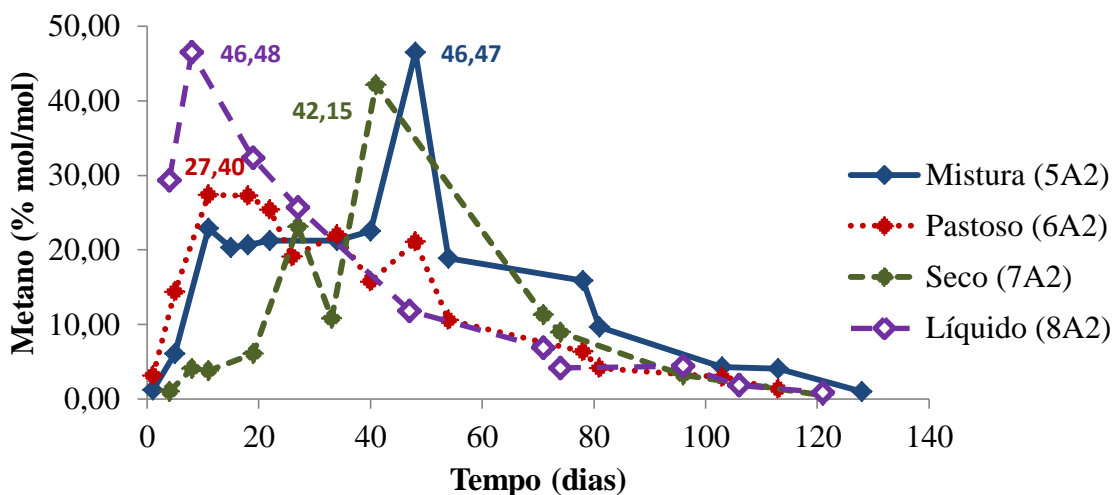


Figura 26 – Resultados dos teores de metano para os três tipos de lodo e a mistura dos três

Nesta fase, tem-se que o lodo líquido foi a matéria-prima que apresentou resultado mais adequada para este tipo de processo, pois atingiu o ápice na produção de metano no 8º dia de fermentação, reduzindo o tempo de retenção e sem gasto energético para tratamento prévio deste substrato.

5.2.3 Avaliação da Produção de Biogás em Diferentes Temperaturas

A produção de biogás em condições mesófilicas (30°C, 35°C e 40°C) e termofílicas (45°C e 50°C) a partir do lodo da 2ª coleta, foi realizada em frascos de penicilina de 100mL e foram feitas com replicatas. Os resultados obtidos estão ilustrados no APÊNDICE B3.

Segundo Athanasoulia, Melidis e Aivasidis (2012), apenas de 30% a 40% da matéria orgânica presente no lodo de esgoto é degradada em reatores operados em temperaturas mesofílicas com tempo de retenção entre 10 e 20 dias. Na faixa de operação termofílica, há um aumento do grau de decomposição da matéria orgânica resultando em um menor tempo de retenção, porém o consumo de energia é alto para manter o digestor aquecido (BALDACIN; PINTO, 2015).

5.2.3.1 Mistura de lodos

Na Figura 27 estão apresentadas as curvas mais representativas da produção de metano ao longo do tempo para mistura de lodos em diferentes temperaturas. Analisando estas curvas, observa-se que nas condições mesofílicas a produção de metano ocorre durante um intervalo de tempo maior, porém as concentrações de metano obtidas são um pouco menores do que em condições termofílica, onde a concentração máxima de metano é alcançada rapidamente. Então, a melhor temperatura encontrada para produção de metano foi a 50°C, pois alcançou o valor de 58,63% nos primeiros 18 dias.

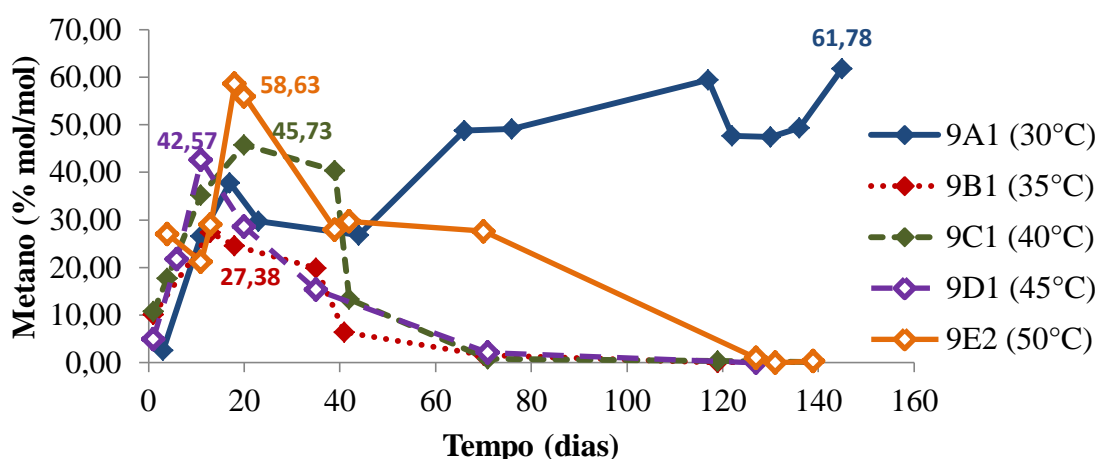


Figura 27 – Comportamento dos perfis de produção de metano a partir da mistura de lodos em reatores de 100mL variando-se a temperatura (reatores 9A1, 9B1, 9C1, 9D1 e 9E2)

5.2.3.2 Lodo Líquido

A seguir (Figura 28) estão ilustrados os comportamentos dos teores de metano na produção de biogás em reatores de 100mL com lodo líquido em temperaturas diferentes. Nesses gráficos, observam-se os teores máximos de metano no biogás produzido a partir do lodo líquido, nos primeiros 20 dias, sendo que o maior entre eles foi obtido na temperatura de 30°C. Na temperatura de 35°C os teores de metanos foram mantidos entre 40% e 60% durante 66 dias de biodigestão anaeróbia, diminuindo apenas após este período. Dessa forma, o reator 10A2 pode ser considerado o reator com melhor rendimento, pois produziu biogás com elevado teor de metano rapidamente.

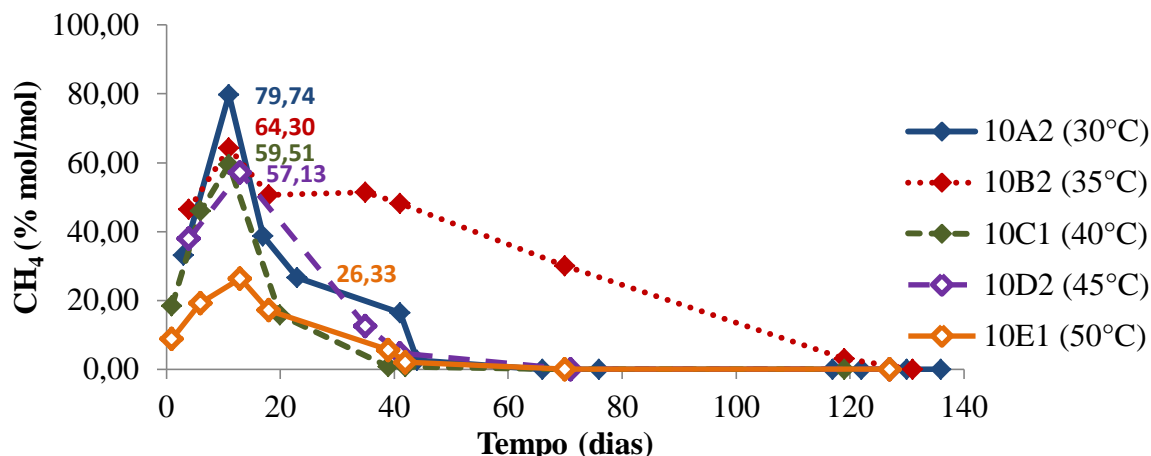


Figura 28 – Produção de CH_4 em reatores de 100mL com lodo líquido em diferentes temperaturas (reatores 10A2, 10B2, 10C1, 10D2 e 10E1)

5.2.3.3 Lodo Seco

A seguir (Figura 29), estão os perfis da concentração de metano ao longo do tempo, durante a produção do biogás a partir do lodo seco, em diferentes temperaturas. Nesses gráficos observa-se que, para a produção de biogás a partir do lodo seco, a melhor temperatura de trabalho entre as estudadas é 50°C, pois produziu uma concentração de 46,97% de metano em 18 dias de fermentação. À 35°C, há uma produção de metano que se mantém com o tempo, atingindo o máximo apenas no 119º dia de fermentação, um tempo de retenção elevado para este processo.

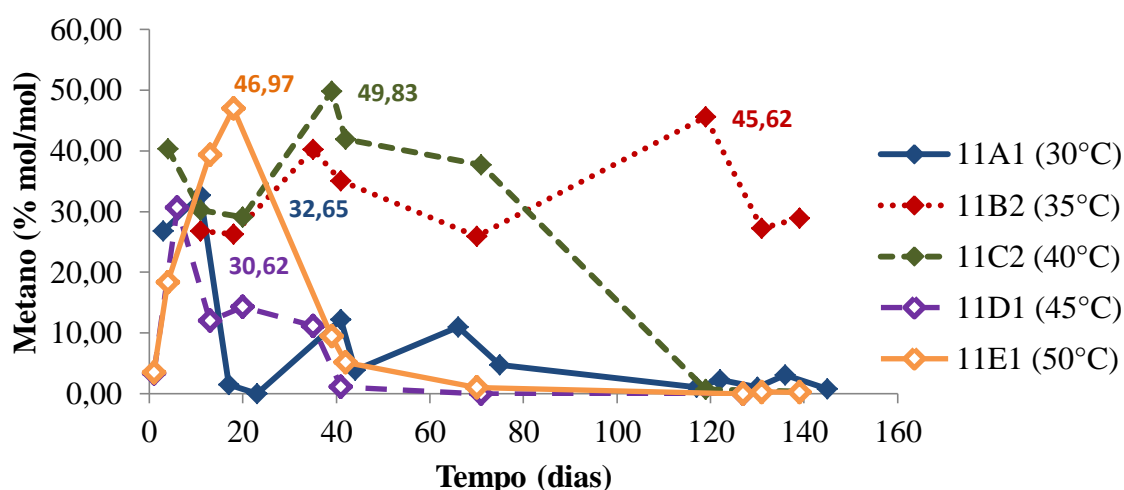


Figura 29 – Produção de metano a partir do lodo seco em reatores de 100mL em diferentes temperaturas (reatores 11A1, 11B2, 11C2, 11D1 e 11E1)

5.2.3.4 Lodo Pastoso

Comparando-se as concentrações de metano obtidas nas temperaturas estudadas, obtém-se a Figura 30, com os melhores resultados entre as replicatas analisadas anteriormente (APÊNDICE B3).

Analisando a produção de metano a partir de lodo pastoso em diferentes temperaturas (Figura 30), observa-se que as concentrações máximas de metano foram obtidas com até 20 dias de fermentação, exceto a 30°C que só é observada no 41º dia. Entre as temperaturas analisadas, a que produziu o maior teor de metano foi a de 45°C (reator 12D1) com 60,44%, observado no 6º dia de biodigestão.

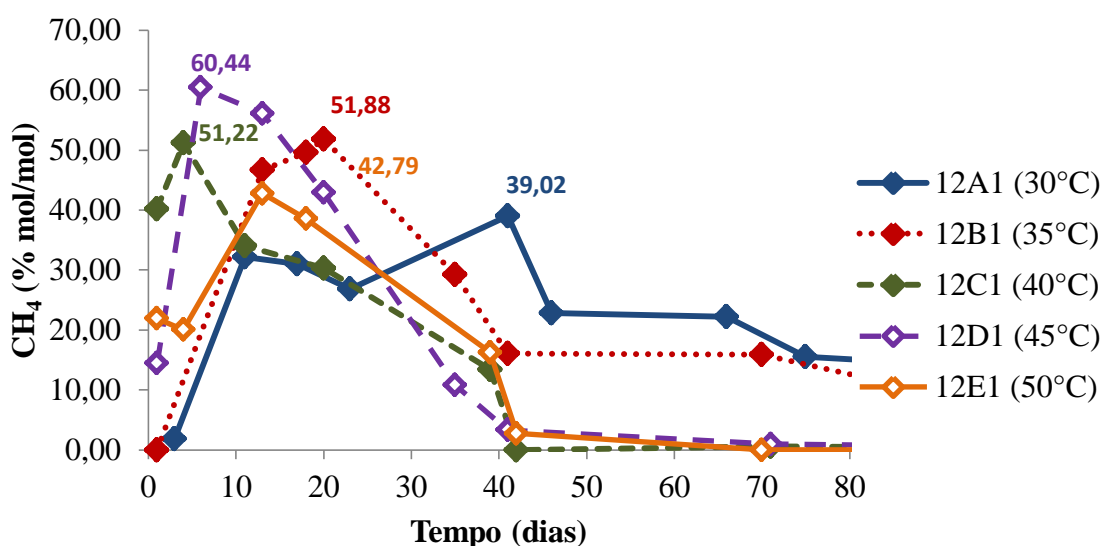


Figura 30 – Produção de metano nos reatores de 100mL com lodo pastoso em diferentes temperaturas (reatores 12A1, 12B1, 12C1, 12D1 e 12E1)

Com esses resultados, observou-se que para o lodo pastoso a melhor temperatura para produção de biogás foi de 45°C, pois produziu a maior quantidade de metano no menor intervalo de tempo.

Comparando-se os melhores resultados obtidos para os diferentes tipos de lodo e a mistura dos lodos (Figura 31), observa-se que cada tipo de lodo estudado apresentou uma temperatura ideal para fermentação e que as condições termofílicas reduziram o tempo de digestão anaeróbia juntamente com os teores de metano no biogás produzido, assim como mostrado por Mohd *et al.* (2015) que obtiveram $66,28 \pm 4,61\%$ a 45°C, $69,16 \pm 5,00\%$ a 35°C e $60,97 \pm 2,42\%$ a 55°C. Sendo assim, o lodo líquido foi considerado a melhor matéria-prima,

entre as estudadas, para produção de biogás com elevado teor de metano, porque não precisa ser neutralizado, apresenta teor de umidade compatível com o processo e não necessita de gasto energético para manutenção da temperatura.

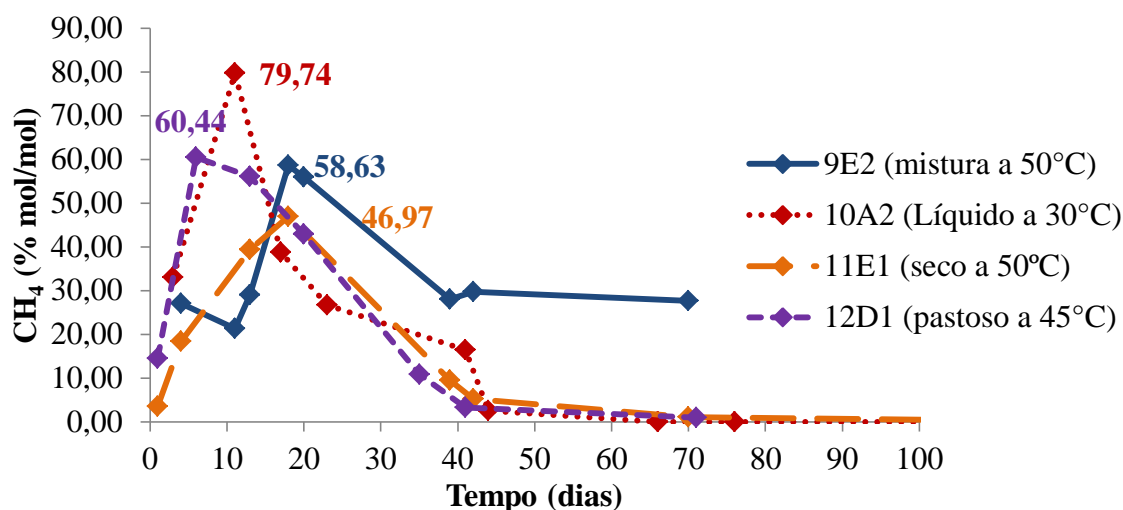


Figura 31 – Melhores condições de temperatura encontradas para cada tipo de meio estudado em garrafas tipo PET

5.2.4 Produção de Biogás em Reatores de 1L em Frascos Tipo Âmbar

Estes reatores foram construídos com a finalidade de evitar os possíveis vazamentos que ocorrem nas garrafas tipo PET. Porém, os resultados encontrados apresentaram baixo teor de metano em todos os reatores. No APÊNDICE B4, encontram-se tais resultados para avaliação do comportamento em relação ao tempo.

Acredita-se que as baixas concentrações de metano encontradas são devido a vazamentos encontrados nos reatores por causa da dificuldade na vedação dos reatores construídos em frascos de vidro com tampas de plástico.

Comparando as concentrações de metano encontradas nestes reatores, foi possível construir os gráficos da Figura 32, mostrado a seguir, onde observou-se que os substratos utilizados já encontravam-se em processo de decomposição, com o lodo líquido e a mistura de lodos já no final do processo e os lodos pastoso e seco com as concentrações de metano, diminuindo após atingir seus valores máximos.

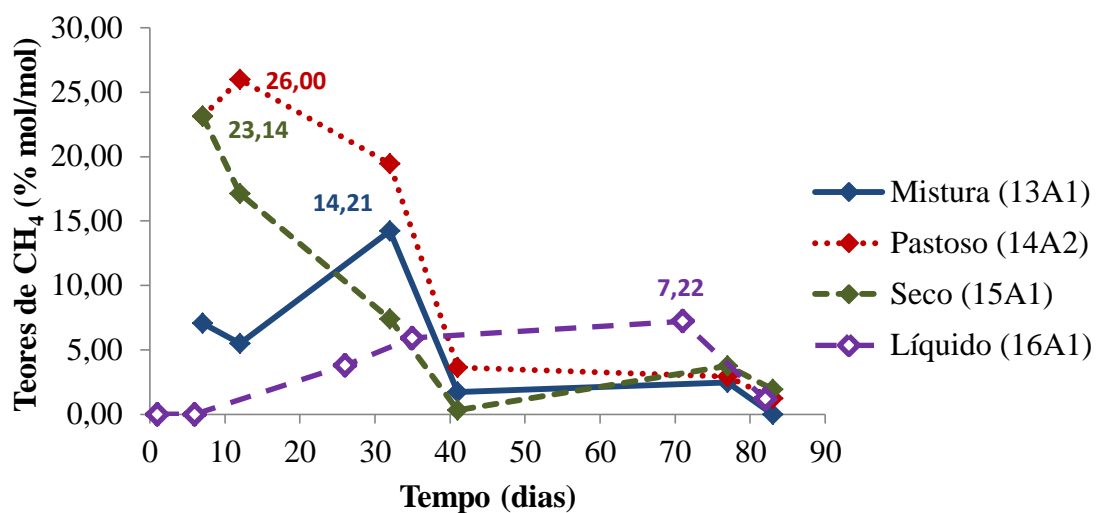


Figura 32 – Produção de CH_4 em reatores de 1L tipo âmbar com os três tipos de lodo e a mistura (reatores 13A1, 14A2, 15A1 e 16A1)

Nos reatores de 1L em frascos de vidro, o lodo pastoso apresentou os melhores resultados com 20% de metano após 12 dias de fermentação. Mas, como o substrato utilizado, já se apresentava em estado de decomposição não foi possível afirmar que ponto realmente foi o mais favorável à produção de metano com melhor qualidade.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

6.1 CONCLUSÕES

Após analisar os resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- Os substratos estudados quanto ao pH do lodo de esgoto com alto teor de umidade, geralmente (lodos pastoso e líquido), apresentaram os resultados na faixa da neutralidade (7,3 e 7,0) enquanto o lodo seco apresenta um pH levemente ácido (5,9).
- Os três tipos de lodo apresentaram elevados teores de sólidos e enxofre, grandes quantidades de cinzas, baixas razões C/N, condições que diminuem o rendimento do processo de biodigestão.

Em relação ao biogás gerado nos reatores estudados:

- Entre os reatores de frascos de penicilina de 100mL, com os lodos da 1ª coleta, observou-se produção de biogás em todos os biodigestores, exceto nos 3A (lodo líquido a 30°C) e 3C (lodo líquido a 40°C). Sendo que, o reator com a mistura de lodos, incubado a 45°C e o lodo pastoso a 35°C apresentaram elevada concentração de metano com o menor tempo de retenção (6 dias), enquanto os outros reatores considerados apresentaram altos teores de metano com uma maior tempo de retenção (mais de 10 dias). Porém, o reator que produziu maior concentração de biogás foi o 4A (mistura de lodos a 30°C), atingindo uma concentração máxima de metano de 80,50% no 19º dia de fermentação. Neste biodigestor, observou-se produção de metano já no 4º dia, atingindo 71,18% no 8º dia de fermentação.
- Para os meios dos reatores construídos em garrafas tipo PET, tem-se que para o lodo seco (biodigestor 7A2) e a mistura dos lodos (biodigestor 5A2), as concentrações máximas de metano no biogás foram obtidas após 40 dias de fermentação com 42,15% e 46,47%, respectivamente e para os lodos líquido (reator 8A2) e pastoso (biodigestor 6A2) os valores máximos de metano são alcançados já no 8º (com 46,48%) e 11º (com 27,40%) dias de digestão anaeróbia, respectivamente. Desta forma, o meio mais adequado para produção de biogás nas condições estudadas, foi o lodo líquido de lodos que produziu o biogás com maior teor de metano no menor período de tempo. Nestes reatores, foram observados teores de metano menores que nos frascos de penicilina devido às perdas através do material utilizado.

- Entre os reatores incubados em diferentes temperaturas, os que estavam em condições termofílicas apresentaram maior degradação orgânica, produzindo as maiores concentrações de metano no biogás em menor tempo que os reatores em condições mesofílicas. Porém, foi o lodo líquido a 30°C que apresentou a maior concentração de metano (79,7%) com um baixo tempo de retenção (11 dias).
- Nos reatores em frascos tipo âmbar os resultados apresentaram baixo teor de metano, devido a vazamentos nas tampas dos reatores, sendo o lodo pastoso o que proporcionou maior teor de metano ao biogás produzido, com 26% no 12º dia de biodigestão anaeróbia.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O assunto abordado nesta dissertação pode ser desenvolvido, através das propostas seguintes:

- Desenvolvimento da pesquisa com outros tipos de matérias-primas como substrato.
- Análise do consumo do substrato como fonte de carbono em temperaturas mais altas e com maior produção de metano.
- Estudo da cinética do processo de digestão anaeróbia.
- Estudo da influência da agitação no processo de produção de biogás a partir do lodo de ETE's.
- Quantificação completa do biogás produzido.
- Estudo do processo de biodigestão anaeróbia, monitorando além da composição do biogás, o pH, a DQO e a DBO do meio fermentativo durante todo o processo.
- Desenvolvimento do processo de biodigestão em maior escala.

REFERÊNCIAS

- ALVES, I. Potential of biogas generation through co-digestion of MSW, sewage sludge and glycerol. In: Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos ECOS de Veneza, 4, 2011, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS. **ASTM D3172-73 a D3175-73:** Standard Methods for Proximate analysis of Coal and Coke, 1984, 1988.
- AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS. **ASTM D5373:** Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Laboratory Samples of Coal, 2008.
- ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira.** Rio de Janeiro: ABES, p. 78, 1997.
- ANDREOLI, C. V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** 1. ed. Petrópolis, RJ. SERMOGRAF Artes Gráficas e Editora Ltda, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929:** Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa, 2003.
- ARTHUR, R.; BREW-HAMMOND, A. Potencial biogas production from sewage sludge: a case study of the sewage treatment plant at Kuame Nkruamah University of Science and Technology (KNUST). **International Journal of Energy and Environment.** Kumasi, p. 1009-1016. dez. 2010.
- ATHANASOULIA, E.; MELIDIS, P.; AIVASIDIS, A. Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. **Renewable Energy.** Elsevier, 47, 147-151, 2012.
- BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. **Revista Eletrônica FACP.** Ano III, nº 7, 2015.
- BAPTISTA, S. G. **Reciclagem mecânica de plásticos mistos.** *Dissertação de Mestrado.* Faculdade de Engenharia da Cidade do Porto. Porto, 2004.
- BASSETTO, R. Z.; SAMULAK, R.; MISUGI, R. T.; BARANA, A. C.; BIANCARDI, C. R. Aproveitamento de farinha de resíduo de beterraba como matéria-prima para fabricação de biscoito tipo “cookies”. **Revista Technoeng.** 3ª ed, 2011.
- BEAM, R. G. **Enhanced biogas production through the optimization of the anaerobic digestion of sewage sludge.** *Dissertação de Mestrado.* Tuscaloosa, AL: The University of Alabama, 2011.
- BEN. **Balanco Energético Nacional.** Brasília: MME, 1982.

BEN 2014. **Balço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

BLEY JR., C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M.; ROLLOF, G. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2. ed. revista. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2009.

BLEY JR., C. **Curso de atualização em energias do biogás. Módulo I – Introdução: objetivo e contexto**. Assessoria de Energias Renováveis. ITAIPU Binacional, 2010a.

BLEY JR., C. Reflexões sobre a economia do biogás. **Assessoria de Energias Renováveis**. ITAIPU Binacional, 2010b.

BUENO, R. F.; FIORE, F. A.; VICTORETTI, M.; INÁCIO, A. R.; CAPELLARI, B.; CHAGAS, R. K. Implantação de *wetlands* construídas em escala real para o tratamento de esgoto sanitário em residências da Barra do Ribeira no município de Iguape – São Paulo. **InterfacEHS**. Vol 8, n. 2, 2013.

CALDEIRA, M. V. W.; BLUM, H.; BALBINOT, R.; LOMBARDI K. C. Uso do resíduo de algodão no substrato para produção de mudas florestais. **Revista de Ciências Ambientais**. Curitiba, v. 6, n. 2, p. 191-202, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios**, v. 5, 2ª edição, Belo Horizonte: Ed. UFMG, 380 p., 2007.

CHO, S.; IM, W.; KIM, D.; KIM, M.; SHIN, H.; OH, S. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. **Bioresource Technology**. Elsevier, 131, 210-217, 2013.

COELHO, D. C. L.; BATISTA, R. O.; OLIVEIRA, A. F. M.; SILVA, K. B. Alterações químicas de agrissolo irrigado com percolado de aterro sanitário e água de abastecimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Agriambi. v.19, n.6, p.598–604. Campina Grande, 2015.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. PROGRAMA DE USO RACIONAL DE ENERGIA E FONTES ALTERNATIVAS (PUREFA). Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2006.

COLDEBELLA, A.; SOUZA S. N. M.; FERRI, P.; KOLLONG, E.M. **Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura**. INFORME GEPEC. Vol. 12, nº2, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2008.

CURRY, N.; PILLAY, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. **Renewable Energy**. Elsevier, 41, 200-209, 2012.

DIAS, P. Método de contagem de placas, 2013. Disponível em:
<<http://cadernodefarmacia.blogspot.com.br/2013/11/metodo-de-contagem-de-placas.html>>
Acessado em 23/01/2015 as 11:24h.

EMBRAPA. Sistemas de tratamento de dejetos suínos, 2009. Disponível em:
<<http://www.cnpsa.embrapa.br/invtec/09.html>> Acessado em: 16/12/2013 as 14:25h.

FDEZ-GUELFO, L. A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C.; SALES D.; ROMERO GARCÍA, L. I. Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: Methane production modeling. **Waste Management**. Elsevier, 32, 382-388, 2012.

FERNANDES, C. Reatores “UASB”, 2006. Disponível em:
<<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/UASB01.html>> Acessado em: 10/12/2013 as 11:36h.

FERNANDO, A. L.; DUARTE, M. P.; VATSANIDOU, A.; ALEXOPOULOU, E. Environmental aspects of fiber crops cultivation and use. **Industrial Crops and Products**. Elsevier, 68, 105-115, 2015.

FNR/GIZ. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e V. (Agência de Recursos Renováveis/GIZ). Guia prático do Biogás: geração e utilização. Alemanha, 2013. Disponível em:
<<http://mediathek.fnr.de/broschuren>>. Acessado em: 13/08/2015 as 14:27.

FONTS, I.; GEA, G.; AZUARA, M.; ÁBREGO, J.; ARAUZO J. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier, 16, 2781-2805, 2012.

GANESH, R.; TORRIJOS, M.; SOUSBIE, P.; STEYER, J. P.; LUGARDON, A.; DELGENES, J. P. Anaerobic co-digestion of solid waste: Effect of increasing organic loading rates and characterization of the solubilised organic matter. **Bioresource Technology**. Elsevier, 130, 559-569, 2013.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, vol. 32, nº 3, 582-587, 2009.

GORDILHO, M. P. G.; ESPINHEIRA, M. F. T.; FIÚZA, J. M. S.; QUADROS, V. L. S.; MEDEIROS, J. S.; FERREIRA, E. M. **Manual de operação de aterros sanitários**. Governo do Estado da Bahia. Bahia, 2012.

HIDAKA, T.; ARAI, S.; OKAMOTO, S.; UCHIDA, T. Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces. **Bioresource Technology**. Elsevier, 130, 667-672, 2013.

HOERZ, T.; KRAMER P.; KLINGLER, B.; KELLNER, C.; WITTUR, T.; KLOPOTEK F. V.; KRIEG, A.; EULER, H. **Biogas digest**. Information and Advisory Service on Appropriate Technology. ISAT. Vol 1. Frankfurt, 2010.

HUANG, W.; WANG, Z.; ZHOU, Y.; NG, W. J. The role of hydrogenotrophic methanogens in an acidogenic reactor. **Chemosphere**. Elsevier 140, 40-46, 2015

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Pesquisa da Pecuária Municipal.** 2012-2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias – GCEA/IBGE, DPE, COAGRO** – Levantamento sistemático da produção agrícola. Novembro, 2014.

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

IEA. **Tracking clean energy progress 2014: Energy technology perspectives 2014 excerpt IEA input to the clean energy ministerial.** IEA Publications. França, 2014.

IGONI, A. H.; AYOTAMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Desings of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Science Direct.** Elsevier, 2007.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas.** *Relatório de Pesquisa.* Brasília, 2012.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**, 3ª Edição, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 677 p. 47 – 67, 1995.

KASTNER, V.; SOMITSCH, W.; SCHNITZHOFFER, W. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. **Journal of Cleaner Production.** Elsevier, 34, 82-90, 2012.

KUNZ, A.; PAULILLO, G. **Curso de atualização em energias do biogás.** Módulo II – Linhas de base para a produção e conversão de energia do biogás. ASSESSORIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. ITAIPU Binacional, 2010.

KWS SAAT AG. Bioenergy: Biogas in Practice. Reino Unido, 2014. Disponível em: <http://www.kws-uk.com/aw/KWS/united_kingdom/Company/Submenu-1-Topic-1/Energy-Crop-Archive/~elir/Energy-Crops-from-KWS/>. Acessado em 12/08/2015 as 17:23h.

LEONETI, A. B.; PRADO, E. L.; OLIVEIRA, S. V. W. B. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **RAP – Revista de Administração Pública.** 45(2):331-48. Rio de Janeiro, 2011.

LIEW, L. N.; SHI, J.; LI, Y. Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Biomass & Bioenergy.** Elsevier, 46, 125-132, 2012.

MACHADO, C. F. **Incinerção: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP.** Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2015.

MANUAL DE BIODIGESTÃO. Winrock International Brasil, 2010.

MAPA. **Instituição Normativa 62 para análise microbiana em alimentos.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003.

MARKOWSKI, M.; BIALOBRZELSKI, I.; ZIELINSKI, M.; DEBOWSKI, M. Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. **Renewable Energy**. Elsevier, 69, 219-225, 2014.

MENDES, L. Tratamento de água e tratamento de esgoto, 2010. Disponível em: <<http://www.klimanaturali.org/2010/04/tratamento-de-agua-e-tratamento-de.html>> Acessado em: 28/01/2015 as 22:34h.

MIRANDA, G. P.; BARELLA, L. A. Contabilidade social: gerenciamento de resíduos sólidos frente à lei 12.305/10. **OREFAF**, v 4, n 2, 2014.

MOHD, N. S.; LI, B.; HAMEED A.; AHMED, S.; RIFFAT R. Anaerobic Digestion at 45°C for Sludge Treatment: A Trade-off between Performances and Capability in Producing Class a Biosolids. **International Journal of Environmental Science and Development**. Vol. 7, No. 6, 2015.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. G. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL – IBAM. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República – SEDU/PR. Rio de Janeiro, 2001.

NKEMKA, V. N.; MURTO, N. Two-stage anaerobic dry digestion of blue mussel and reed. **Renewable Energy**. Elsevier, 50, 359-364, 2013.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte e reuso agrícola**. 2ª edição revisada, Blucher. São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, R. L.; RIBEIRO, V. M.; PASSOS, F. B. Potenciais tecnologias de produção de hidrogênio a partir da biomassa. **Perspectivas online: exatas e engenharia**. 10 (4), 12-25. Campos dos Goytacazes, 2014.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. **Manual de treinamento em biodigestão**. Winrock International Brasil, 2008.

PAULINO, R. C.; CASTRO, E. A.; THOMAZ-SOCCOL, V. **Tratamento anaeróbico de esgoto e sua eficiência a redução da viabilidade de ovos de helmintos**. REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MEDICINA TROPICAL, 2001.

PAVAN, M. C. O. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil**. *Tese de doutorado*. Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PLANSAB. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília, 2013.

PNSB. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro, 2010.

PROSAB, Programa de pesquisas e saneamento básico. **Água – Um olhar integrado**. Disponível em: < http://www.c2o.pro.br/vis_int_agua/x908.html > Acessado em: 12/05/2014 as 17:54:09 h.

QIAO, W.; YAN, X.; YE, J.; SUN, Y.; WANG, W.; ZHANG, Z. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. **Renewable Energy**. Elsevier, 36, 3313-3318, 2011a.

QIAO, W.; PENG, C.; WANG, W.; ZHANG, Z. Biogas production from supernatant of hydrothermally treated municipal sludge by upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Bioresource Technology**. Elsevier, 102, 9904-9911, 2011b.

QUADROS, D. G.; OLIVER, A. P. M.; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F. **Produção de biogás e caracterização de biofertilizante utilizando dejetos de caprinos e ovinos em biodigestor de PVC flexível**. CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. Curitiba, 2009.

RAO, P. V.; BARAL, S. S. Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. **Chemical Engineering Journal**. 172 977– 986. Elsevier, 2011.

ROHSTOFFE, F. N.; PATERSON, M.; KUHN, W. Guia prático do biogás. 5ª edição, Gülzow, 2010.

SACHS, J. V.; MEYER, U.; RYS, P.; FEITKENHAUER, H. New approach to control the methanogenic reactor of a two-phase anaerobic digestion system. **Water Research**. 973-982. Elsevier, 2003.

SANTOS, E. L. B.; NARDI JR. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Tekhne e Logos**. Botucatu, SP, v.4, n.2, Agosto, 2013.

SINGH, R.P., AGRAWAL, M. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants. **Chemosphere**. Elsevier, v.67, 2229-240, 2007.

SILVA, A. M. R. B.; KATO, M. T.; FLORENCIO L.; LIMA E. S. **Avaliação das características físico-químicas de biossólidos provenientes de estações de tratamento de esgoto doméstico aeróbio e anaeróbio em Pernambuco**. 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001.

SILVA, C. L.; FUGII, G. M.; MARINI, M. J. Gestão da cadeia de reciclagem em rede: um estudo do projeto Ecocidadão no município de Curitiba. **Desenvolvimento Regional em Debate**. v 5, n 1. Universidade do Contestado, 2015.

SILVA, J. P.; BERWIG, K. H.; DETTMER, A. **Obtenção de biogás a partir de combinações de resíduos de arroz e esterco suíno**. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014.

SILVA, M. A.; MARTINS, E. S.; AMARAL, W. K.; SILVA, H. S.; MARTINES, E. A. L. Compostagem: experimentação problematizadora e recurso interdisciplinar no ensino de química. **Química Nova**. v 37, n 1, p. 71-81. São Paulo, 2014.

SMWW. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Método 2540 B, 2012a.

SMWW. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Método 4500 B, 2012b.

SMWW. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Método 5210 B, 2012c.

SMWW. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Método 5220 B, 2012d.

TYAGI, V. K.; LO, S. L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Elsevier, 25, 708-728, 2013.

VILLANI JR, W.; MARTINS, G. R.; TAKAHASHI, R.; MARQUES, M. H. D.; BORGHI, G. B.; MICELI, R. N. **Cogeração de energia a partir de biogás e do lodo proveniente de reatores anaeróbios da ETE Rio Preto**. Estudo Técnico de Viabilidade. São José do Rio Preto. São Paulo, 2011.

WAN, S.; SUN, L.; DOUIEB, Y.; SUN, J.; LUO, W. Anaerobic digestion of municipal solid waste composed of food waste, wastepaper, and plastic in a single-stage system: Performance and microbial community structure characterization. **Bioresource Technology**. Elsevier, 146, 619-627, 2013.

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimisation of single-phase dry-thermophilic anaerobic digestion under high organic loading rates of industrial municipal solid waste: Population dynamics. **Bioresource Technology**. Elsevier, 146, 109-117, 2013a.

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimisation of the two-phase dry-thermophilic anaerobic digestion process of sulphate-containing municipal solid waste: Population dynamics. **Bioresource Technology**. Elsevier, 148, 443-452, 2013b.

ZANETTI, A.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. **Estudo da composição ótima de diferentes resíduos orgânicos para a produção de biogás**. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2014.

ZESHAN, KARTHIKEYAN, O. P.; VISVANATHAN, C. Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. **Bioresource Technology**. Elsevier, 113, 294-302, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Calibração do Cromatógrafo a Gás

O cromatógrafo pode ser usado tanto para identificar os componentes de uma amostra gasosa com base no tempo de retenção (análise qualitativa) quanto para a análise quantitativa, baseada na área do pico fornecido pelo cromatograma. No entanto, as análises qualitativa e quantitativa só podem ser realizadas com confiabilidade se os dados reais do cromatógrafo forem comparados com uma curva de calibração feita com gases de composição conhecida (padrões). Os padrões foram injetados no cromatógrafo em concentrações conhecidas e as respostas foram determinadas, em termos de área sob o pico, de tal modo que a resposta pudesse ser estabelecida para cada um dos componentes do gás.

A calibração descrita neste apêndice considerou apenas os gases encontrados nos processos de biodigestão: metano e dióxido de carbono.

A composição centesimal da amostra é, então, calculada pelo método de normalização de área (Equação A1).

$$C_i = \frac{A_i F_i}{\sum A_i F_i} \quad \text{com} \quad F_i = \frac{C_p}{A_p} \quad (\text{A1})$$

Sendo, C_i : concentração de um componente qualquer

A_i : área de um componente qualquer

F_i : fator de resposta para o padrão

C_p : concentração do padrão

A_p : área do pico do componente presente no padrão

Na calibração do cromatógrafo, foi injetado um volume conhecido, tanto do padrão como da amostra, e a área dos picos foram relacionadas com a quantidade de cada componente do gás injetado. Deste modo, foi feita uma curva de calibração para cada um dos gases analisados nos experimentos.

Para a calibração foram utilizados o dióxido de carbono comercial com 99,5% de pureza e uma mistura padrão de gases com a composição dada na Tabela A1.

Tabela A1 – Composição do padrão utilizado para calibração do cromatógrafo a gás para CH₄

Gases	Concentração (% mol/mol)
Dióxido de carbono	1,25
Oxigênio	0,279
Nitrogênio	2
Etano	9,51
Propano	3,26
I-butano	0,850
n-butano	1,20
Metano*	81,651

* Por diferença

Curva de calibração do metano

A Figura A1 ilustra a curva de calibração para o CH₄. Os dados para a calibração são mostrados na Tabela A2. O valor do coeficiente de correlação encontrado foi de 0,996.

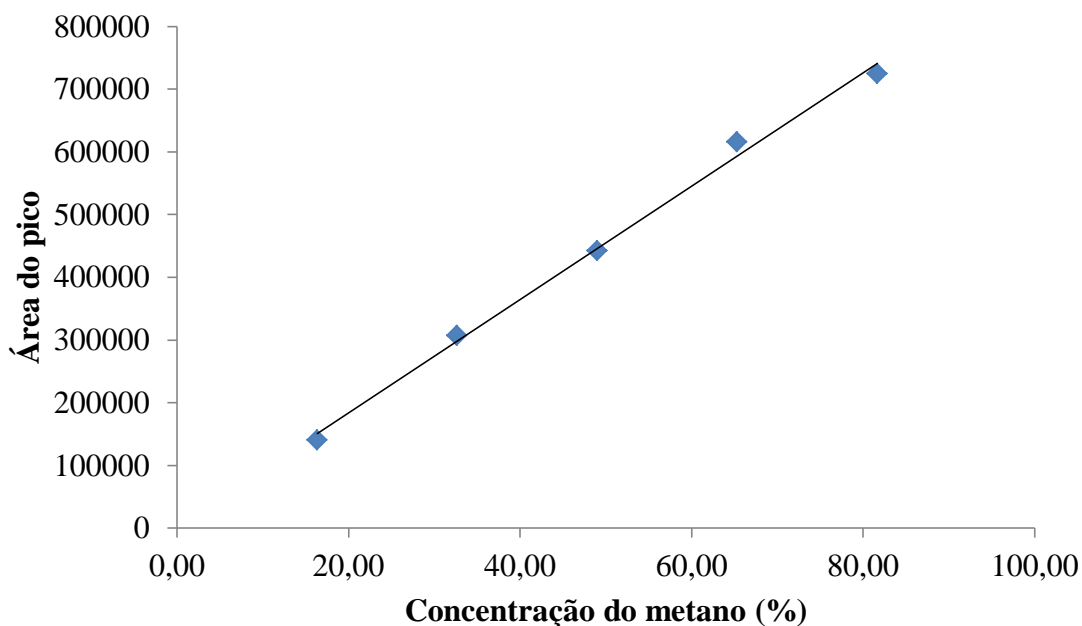


Figura A1 – Curva de calibração do metano

Tabela A2 - Dados para curva de calibração do metano

Concentração do metano (% mol/mol)	Área do pico
16,33	140801
32,66	307686
48,99	442577
65,32	615730
81,65	724645
R^2	0,996

Curva de calibração do dióxido de carbono

A Figura A2 ilustra a curva de calibração para o CO₂. Os dados para a calibração são mostrados na Tabela A3. O valor do coeficiente de correlação encontrado foi de 0,996.

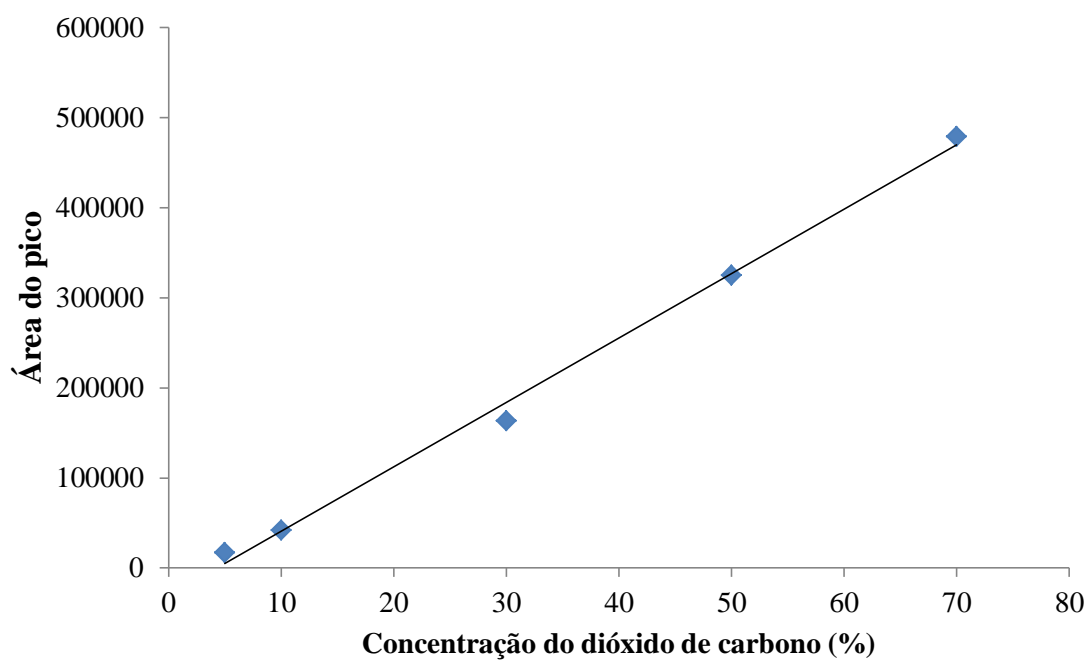


Figura A2 – Curva de calibração do dióxido de carbono

Tabela A3 – Dados para curva de calibração do CO₂

Concentração do CO ₂ (% mol/mol)	Área
5	17130
10	41956
30	162809
50	324955
70	478860
R^2	0,996

APÊNDICE B – Gráficos com os Teores de CH₄ e CO₂ para os Reatores Estudados

APÊNDICE B1 – Gráficos para os reatores com o primeiro lodo coletado

Os resultados destacados na Tabela 12 estão no gráfico da Figura B1 onde é possível observar que a maior concentração de metano se dá no 11º dia, com 61,01% de metano.

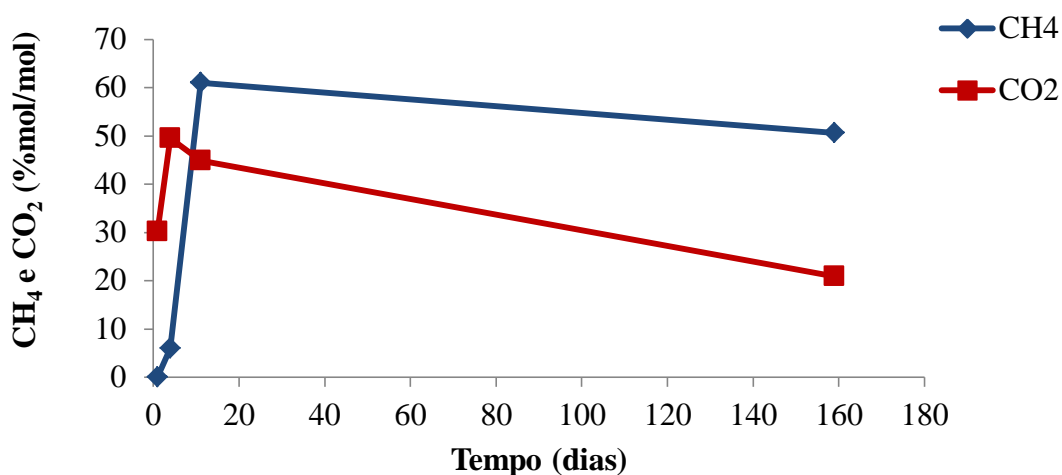


Figura B1 – Variação dos teores de CH₄ e CO₂ no biogás produzido no reator 1B (lodo seco a 35°C)

Os resultados destacados na Tabela 13 estão mostrados nos gráficos da Figura B2 e Figura B3.

Na Figura B2, com os resultados do reator com lodo pastoso a 30°C (2A), o pico de produção de metano foi com 159 dias de fermentação com 83,05%. Porém, o início da biodigestão foi observado no 4º dia.

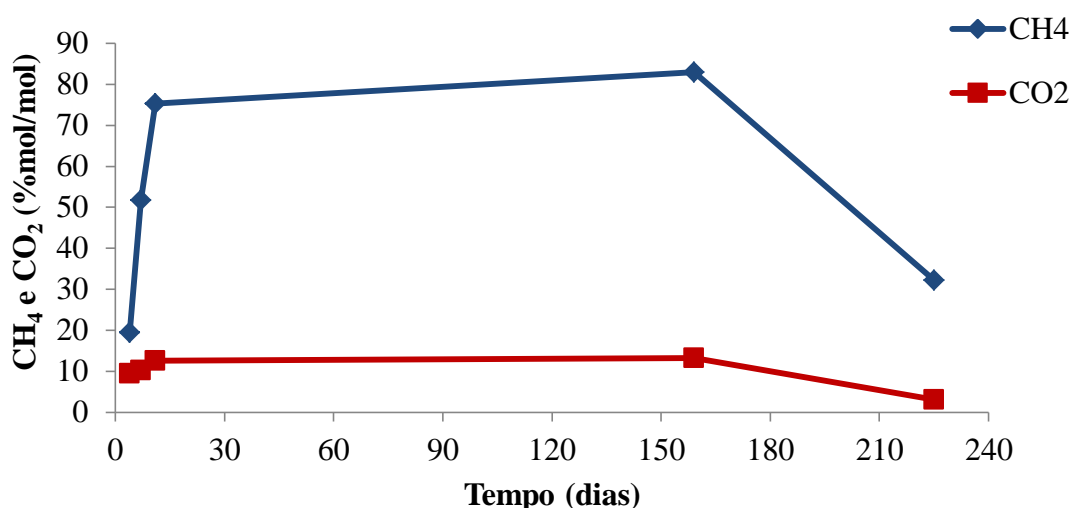


Figura B2 – Variação dos teores de CH₄ e CO₂ no biogás produzido no reator 2A (lodo pastoso a 30°C)

Na Figura B3, para o reator com lodo pastoso a 35°C, o percentual de metano máximo foi 87,21% e ocorreu após 18 dias de fermentação e o início da produção de metano foi observado a partir do primeiro dia de digestão anaeróbia.

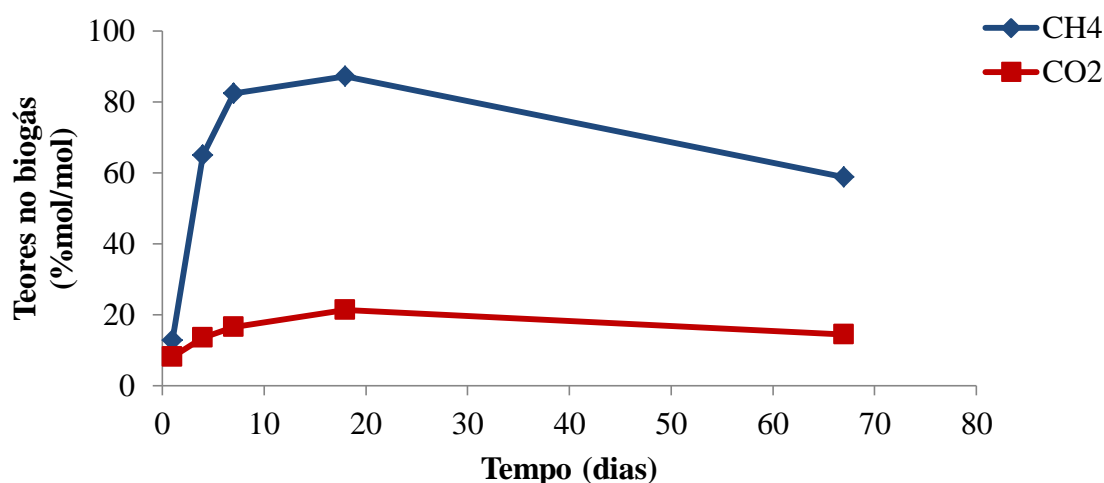


Figura B3 – Variação dos teores de CH₄ e CO₂ no biogás produzido no reator 2B (lodo pastoso a 35°C)

A produção de biogás no reator 4A pôde ser acompanhada durante 152 dias (Tabela 16), observando-se na Figura B4, que o pico de metano foi de 80,50% obtido no 19º dia e que, a produção de metano manteve-se por volta de 65% durante os outros dias. A partir do quarto dia da fermentação, foi possível observar presença de metano no biogás produzido.

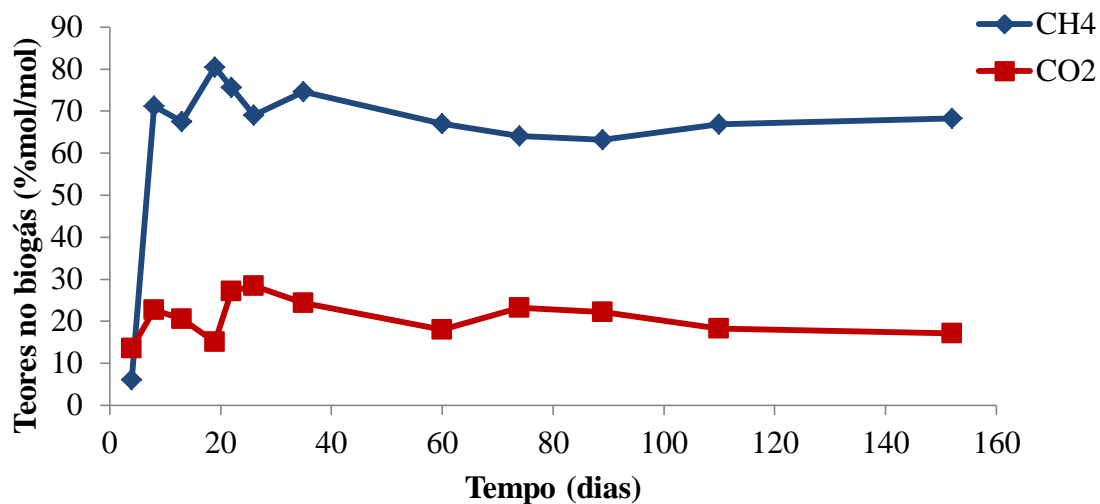


Figura B4 – Variação dos teores de CH₄ e CO₂ no biogás produzido no reator 4A (mistura dos lodos a 30°C)

Na Figura B5, o maior percentual de metano foi obtido no 6º dia, com 83,76% produzido. E, na maior parte do tempo, mantiveram-se por volta de 60% até os 46 dias analisados.

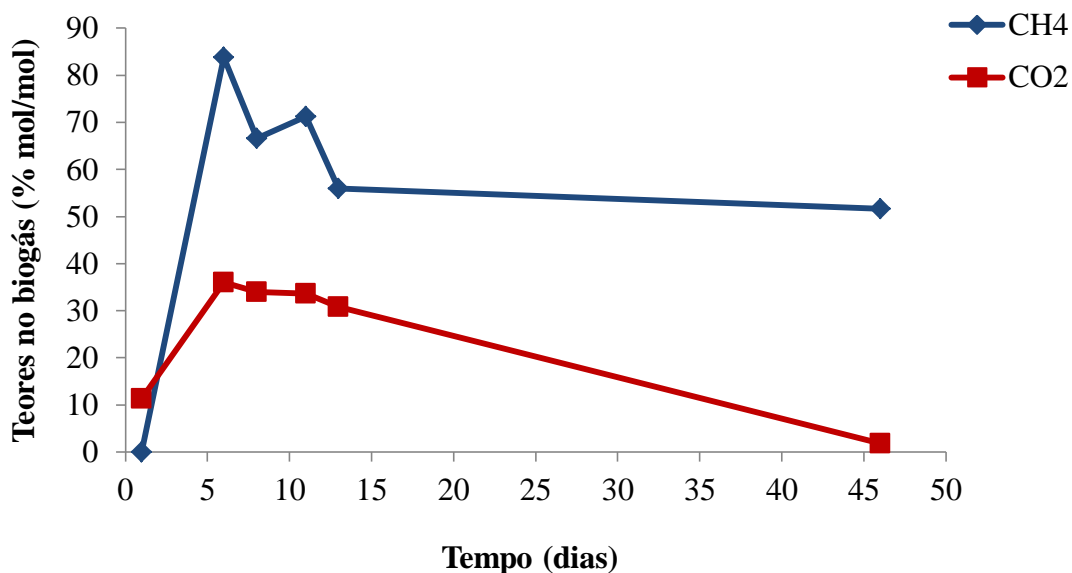


Figura B5 – Variação dos teores de CH₄ e CO₂ no biogás produzido no reator 4D (mistura dos lodos a 45°C)

APÊNDICE B2 – Gráficos com os resultados para os reatores de 1L tipo PET

Observando a Figura B6, tem-se que a produção de metano apresenta um comportamento parecido com aumento e redução de produção nos mesmos intervalos de tempo, com o máximo de produção no 15º dia com 16,44% para o reator 5A1 e no 48º com 46,47%.

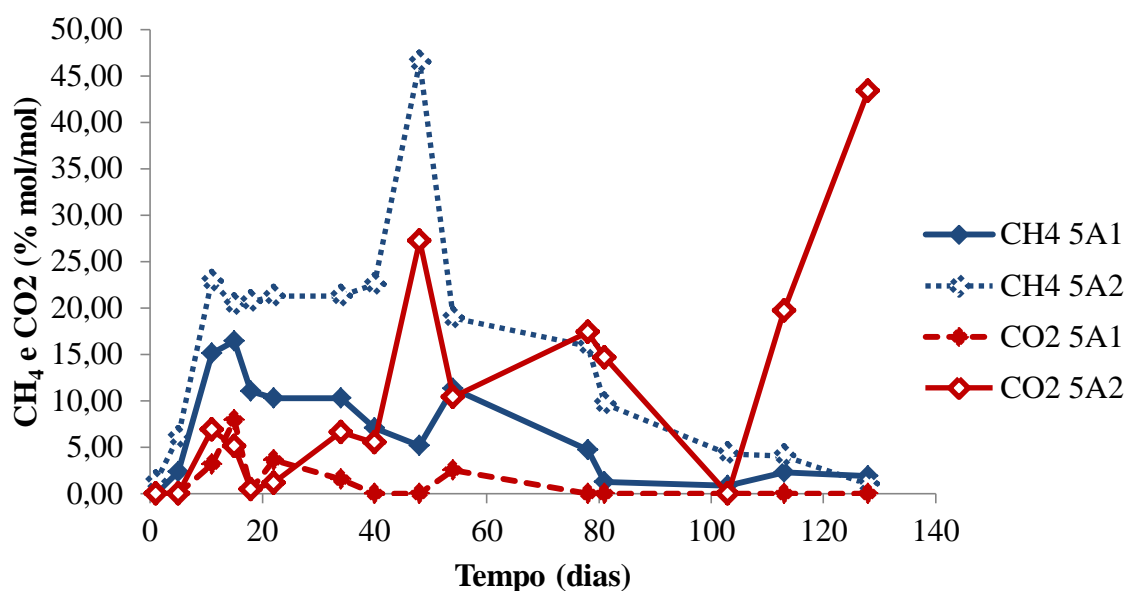


Figura B6 – Resultados dos teores de CH₄ e CO₂ para os reatores de garrafas tipo PET de 1L com mistura dos lodos (reatores 5A)

Na Figura B7, observa-se o mesmo comportamento na produção de metano nos dois reatores onde os valores máximos de metano são 29,48% e 27,28% obtidos no 18º dia.

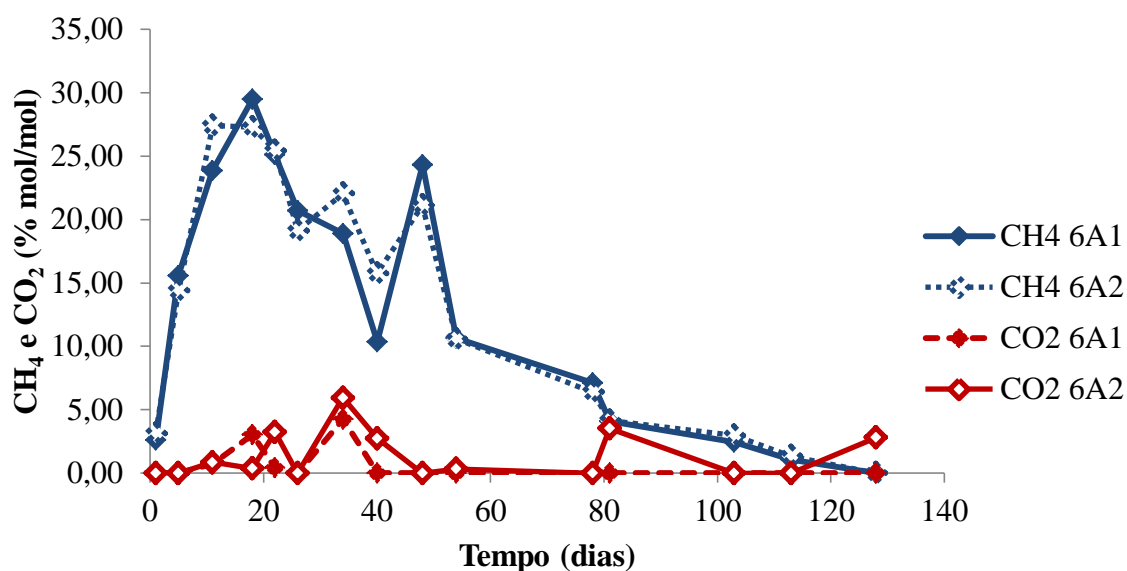


Figura B7 – Resultados dos teores de CH₄ e CO₂ para reatores de garrafa tipo PET de 1L com lodo pastoso (reatores 6A)

Na Figura B8, a máxima produção de metano é de 37,20% e 42,15% que ocorrem no 41º dia.

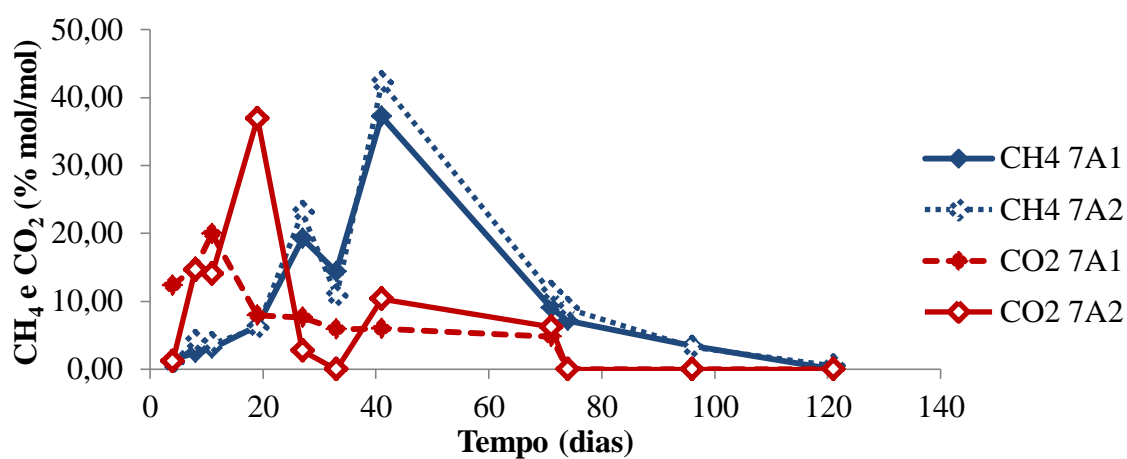


Figura B8– Resultados dos teores de CH₄ e CO₂ para reatores de garrafa tipo PET de 1L com lodo seco (reatores 7A)

Na Figura B9, a maior produção de metano é observada no 8º dia de fermentação com os valores de 36,75% e 46,48%.

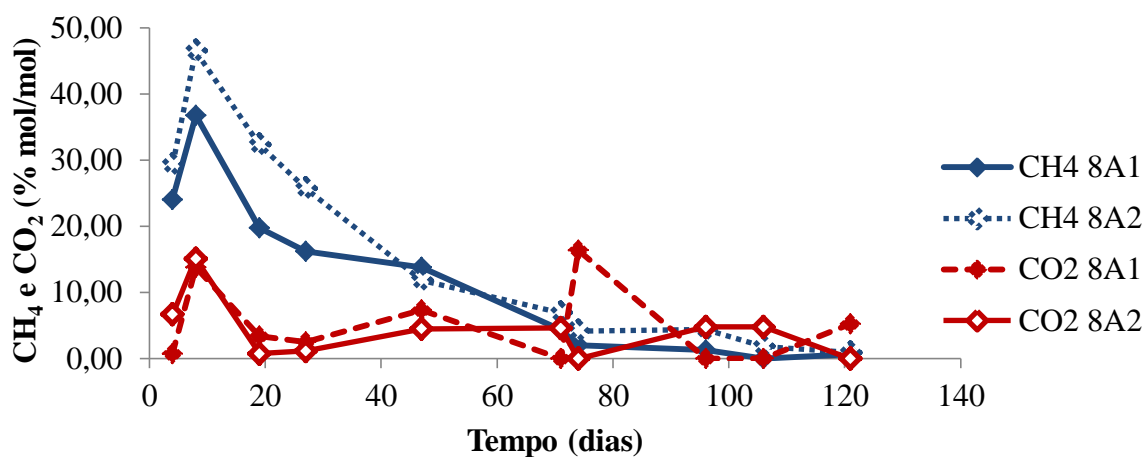


Figura B9 – Resultados dos teores de CH₄ e CO₂ para reatores de garrafas tipo PET de 1L com lodo líquido (reatores 8A)

APÊNDICE B3 – Gráficos dos resultados para os reatores com lodo da 2ª coleta incubados em diferentes temperaturas

Mistura de Lodos

Os perfis de produção de biogás ao longo do tempo para a mistura de lodos em diferentes temperaturas são mostrados nas Figuras de B10 a B14.

Observando os gráficos da Figura B10, tem-se que nos dois reatores há um pico de produção de metano antes do 20º dia de fermentação. Após os 44 dias há uma divergência entre os reatores. No reator 9A1 o teor de metano aumenta com o tempo e, no 9A2, diminui.

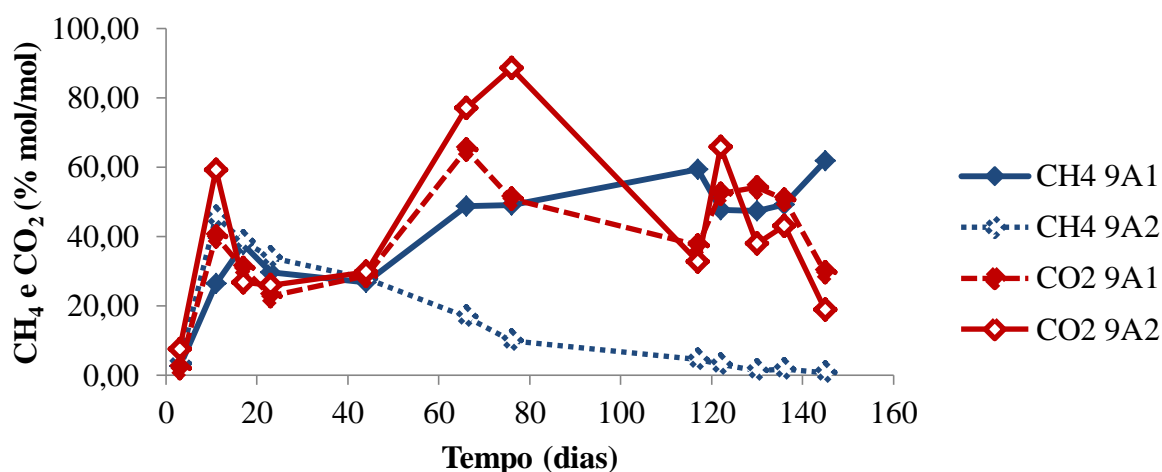


Figura B10 – Resultados da produção de CH₄ e CO₂ para reatores em frasco de 100mL com a mistura dos lodos a 30°C (reatores 9A)

A Figura B11 mostra que a produção de metano no biogás atinge os valores máximos de 27,38% e 40,25% no 18º dia da digestão anaeróbia e logo após o teor de metano é reduzido a aproximadamente zero.

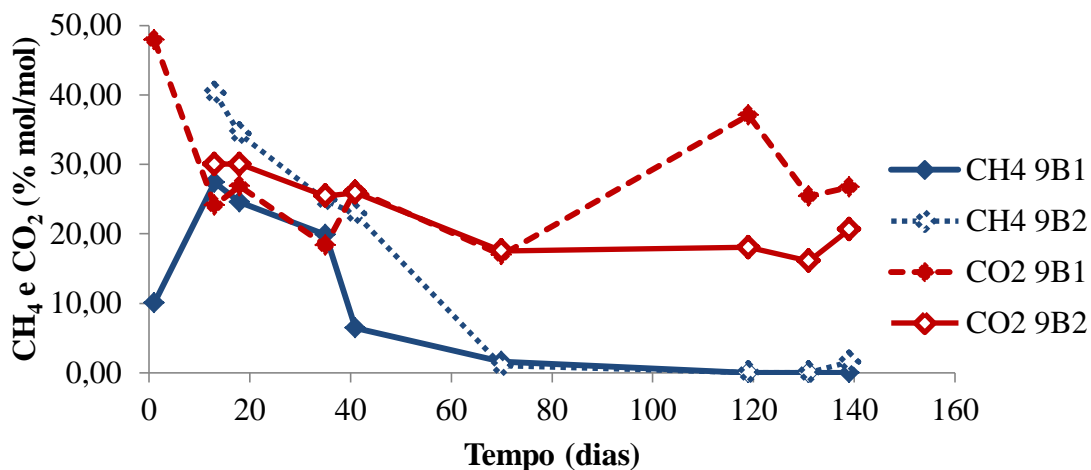


Figura B11 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com mistura de lodos a 35°C (reatores 9B)

Para a temperatura de 40°C, a mistura de lodos nos reatores 9C1 e 9C2 (Figura B12) apresentou um teor significativo de metano no biogás produzido e os valores máximos encontrados foram 45,73% no 20º dia e 42,03% no 11º dia de fermentação.

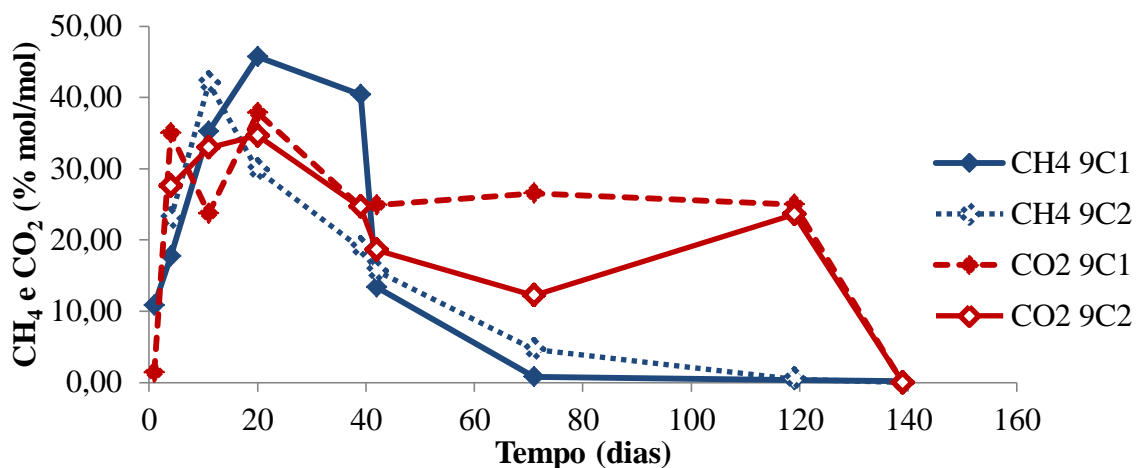


Figura B12 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com mistura de lodos a 40°C (reatores 9C)

A Figura B13 mostra que a maior concentração de metano no biogás produzido no reator 9D1 foi de 42,57% no 11º dia e no reator 9D2 foi de 40,69% no 20º dia de biodigestão anaeróbia.

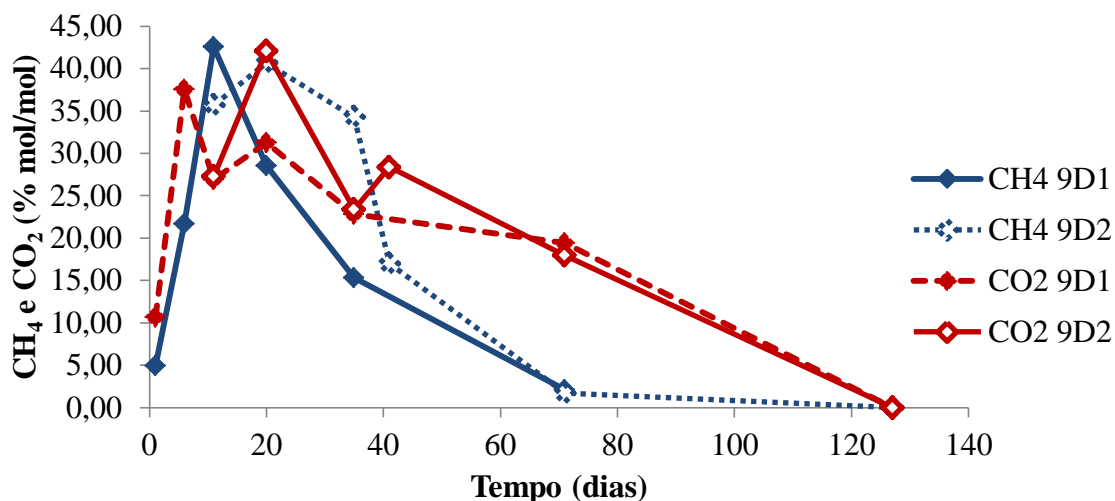


Figura B13 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com mistura de lodos a 45°C (reatores 9D)

Para mistura dos lodos a 50°C, o máximo de CH₄ obtido, como mostrado na Figura B14, foi 30,79% no reator 9E1 e de 58,63% no reator 9E2, ambos ocorreram com 18 dias de fermentação.

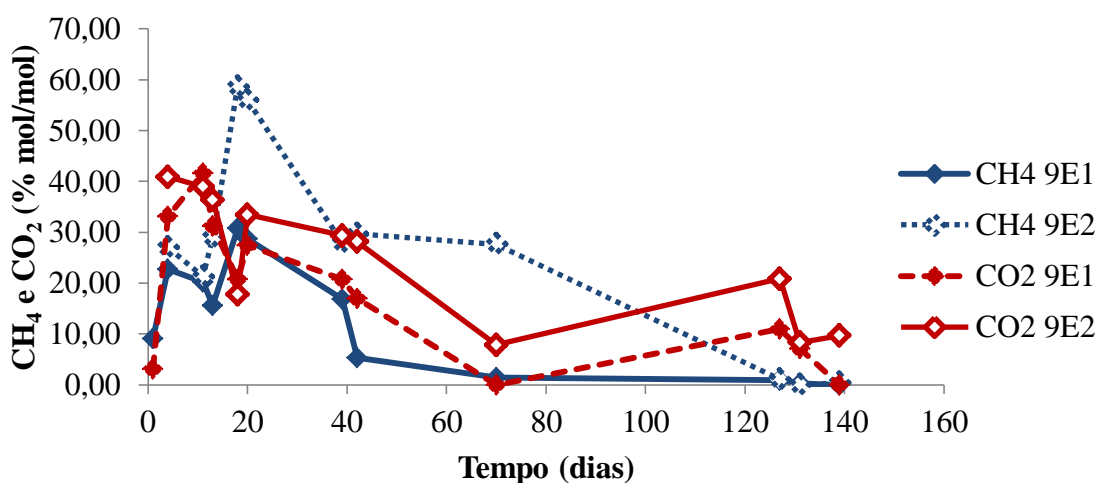


Figura B14 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com mistura de lodos a 50°C (reatores 9E)

Lodo Líquido

Nas Figuras de B15 a B19 estão ilustrados os gráficos da produção de metano e dióxido de carbono para o lodo líquido em diferentes temperaturas.

Para o lodo líquido a 30°C, no reator 10A1 (Figura B15) o biogás produzido apresentou teores de metano muito reduzidos, atingindo um valor máximo de 11,97% no 17°

dia, enquanto no reator 10A2 a concentração de metano atingiu 79,74% no 11º dia de fermentação, atingindo um valor muito baixo no 44º dia.

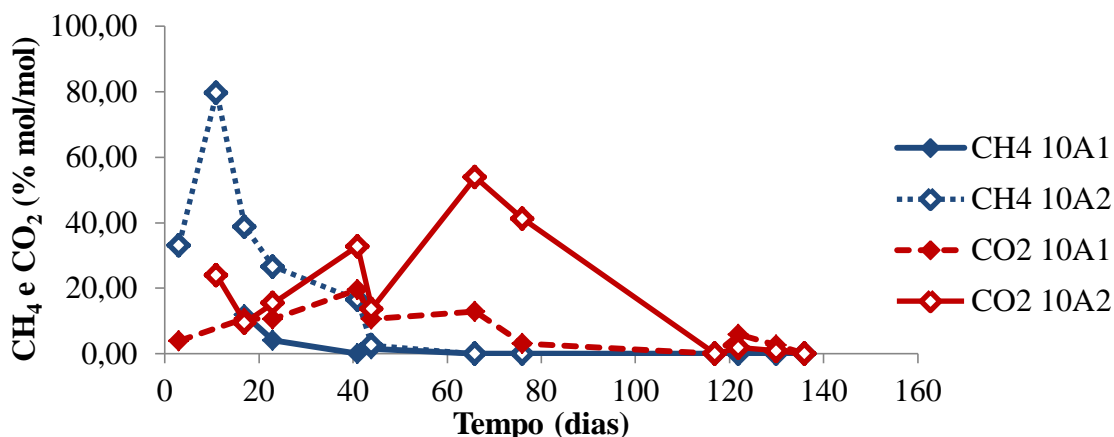


Figura B15 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo líquido a 30°C (reatores 10A)

Para a temperatura de 35°C, a concentração de metano no biogás produzido a partir do lodo de esgoto líquido manteve-se em, aproximadamente, 50% nos primeiros 70 dias de fermentação, como mostrado na Figura B16, alcançando os valores máximos de 55,53% no 18º dia para o reator 10B1 e de 64,30% no 11º dia para o reator 10B2.

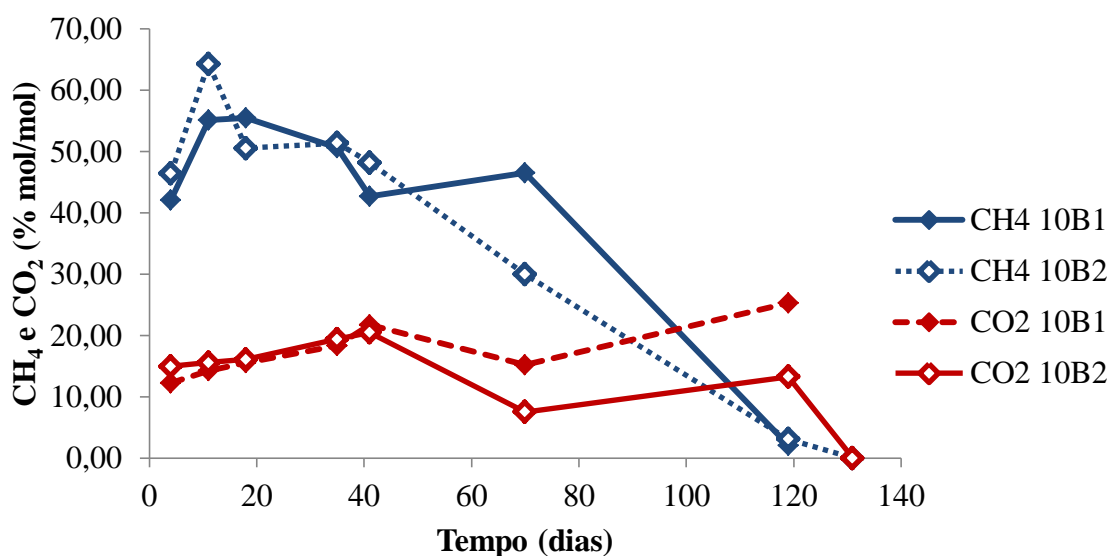


Figura B16 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo líquido a 35°C (reatores 10B)

Na Figura B17, observam-se os maiores teores de metano no biogás nos primeiros dias, sendo de 59,51% no 11º dia para o reator 10C1 e 58,06% no 6º dia para o reator 10C2.

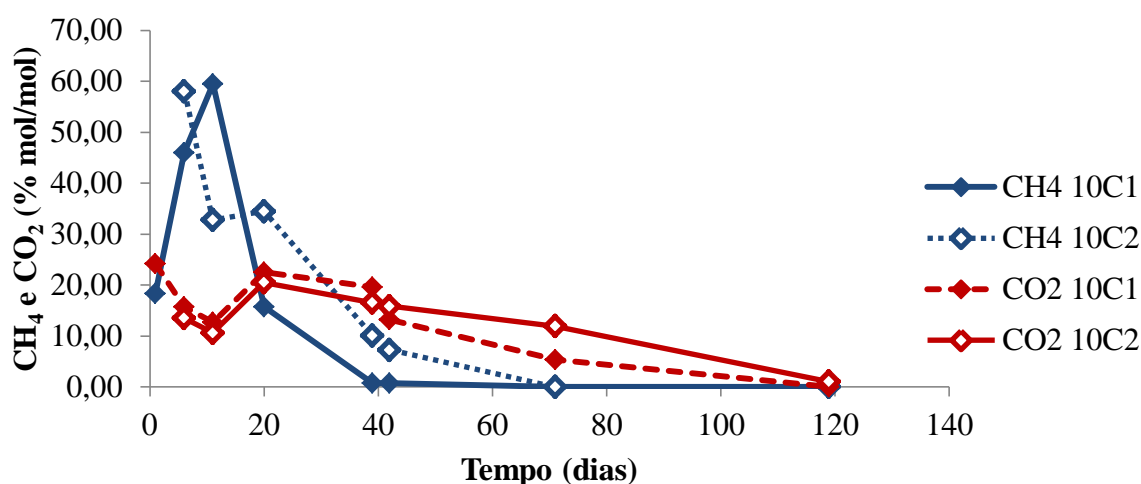


Figura B17 – Produção de CH_4 e CO_2 em reator de 100mL com lodo líquido a 40°C (reatores 10C)

Para os reatores com lodo líquido a 45°C (Figura B18) as maiores concentrações de metano no biogás produzido foram de 39,93%, obtido no 4º dia da biodigestão no reator 10D1 e de 57,13% no 13º dia no reator 10D2.

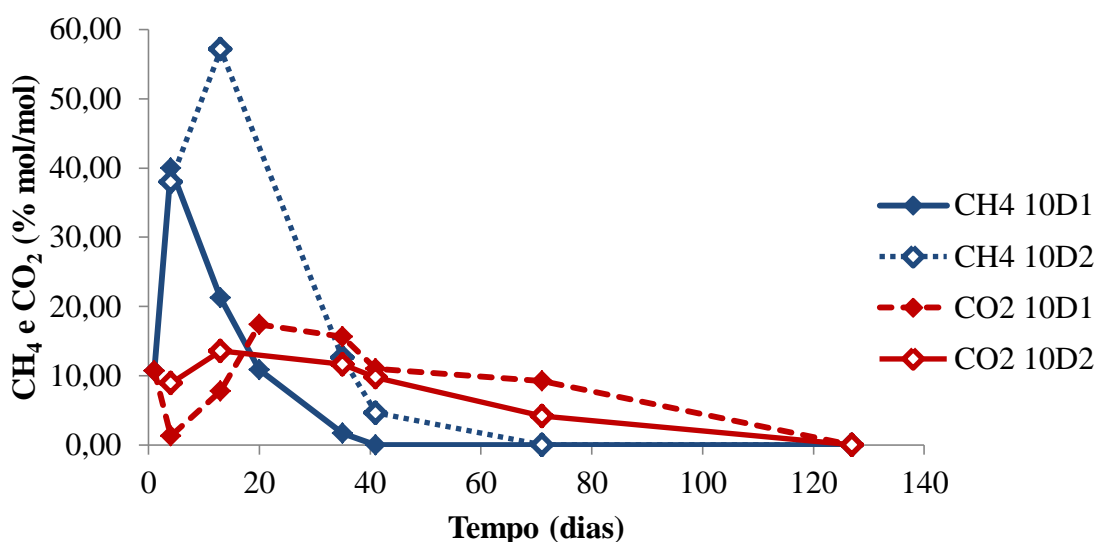


Figura B18 – Produção de CH_4 e CO_2 em reator de 100mL com lodo líquido a 45°C (reatores 10D)

Na Figura B19, nos reatores de 100mL com lodo de esgoto líquido a 50°C foram obtidos as concentrações de metano no biogás produzido com máximos valores de 26,33% para o reator 10E1 e 13,18% no reator 10E2, ambos valores encontrados no 13º dia.

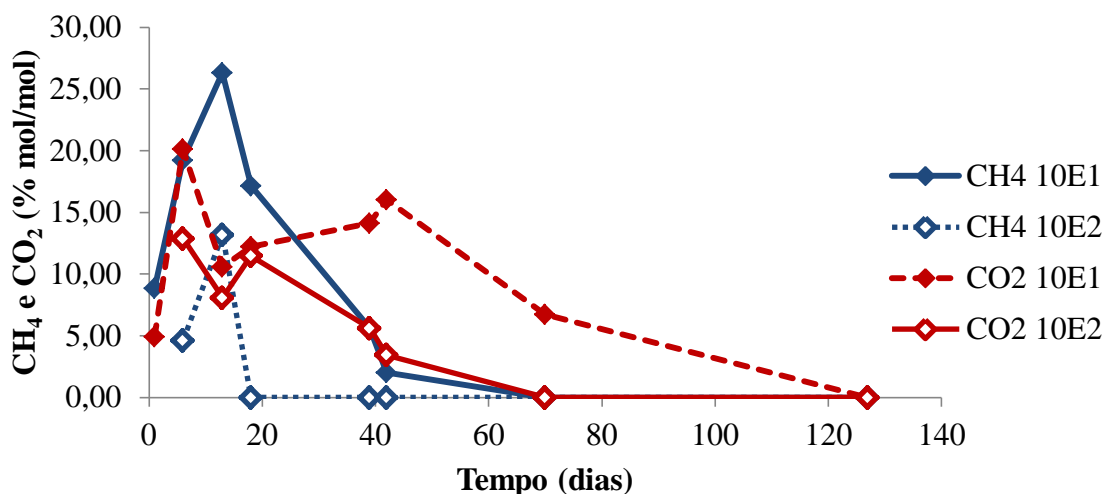


Figura B19 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo líquido a 50°C (reatores 10E)

Lodo Seco

Nas Figuras de B20 a B24 estão ilustrados os gráficos da produção de metano e dióxido de carbono para o lodo seco em diferentes temperaturas em reatores de 100mL (frascos de penicilina).

Nos reatores 11A (Figura B20) os teores de metano no biogás obtido foram baixos, apresentando o máximo de 32,65% no 11º dia para o reator 11A1 e de 22,72% no reator 11A2.

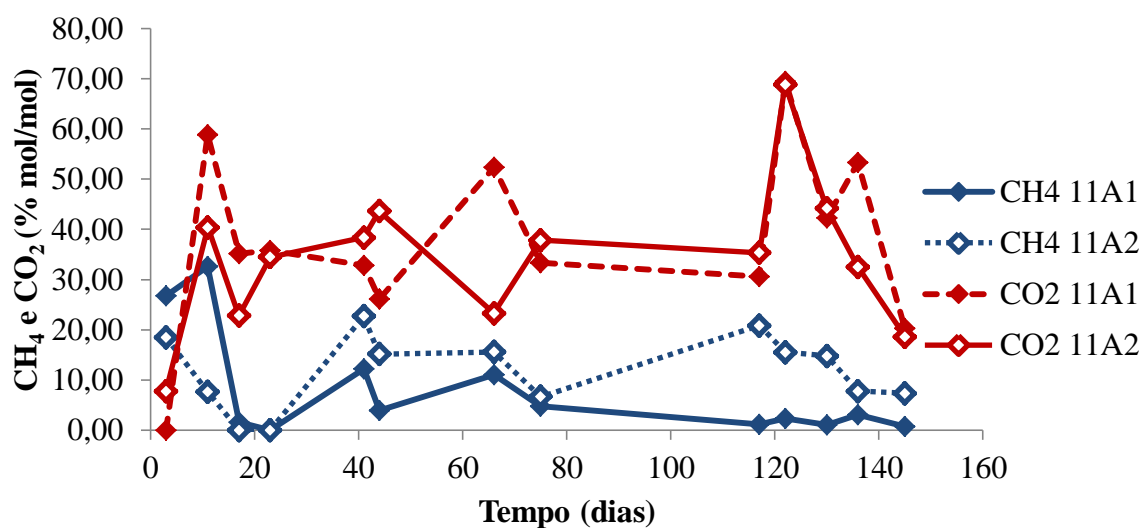


Figura B20 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo seco a 30°C (reatores 11A)

Na Figura B21, observa-se a produção de biogás logo nos primeiros dias. Para o reator 11B2 a concentração de metano no biogás manteve-se entre 25% e 46% durante todo tempo de análise atingindo um máximo de 45,62% no 119º dia, enquanto o reator 11B1 produziu um baixo percentual de metano durante todo o tempo de fermentação atingindo o valor máximo de 21,31% no 35º dia e, logo após, caindo até valores não detectáveis pelo cromatógrafo utilizado.

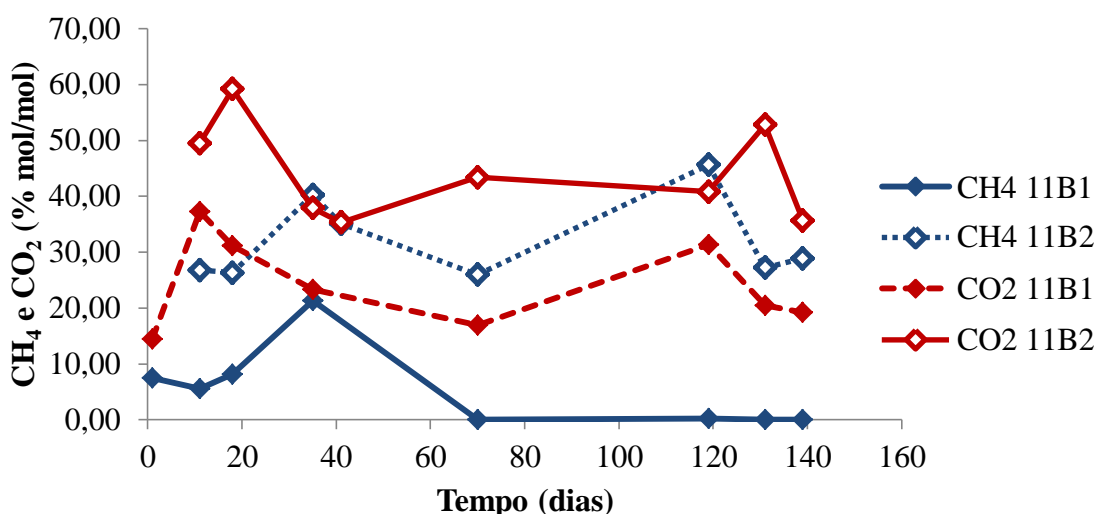


Figura B21 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo seco a 35°C (reatores 11B)

Para a Figura B22, tem-se uma maior concentração de metano no biogás produzido no reator 11C2, onde o valor máximo foi de 49,83% atingido no 39º dia de fermentação e no reator 11C1, o valor máximo obtido foi 30,44% no 4º dia e após 42 dias reduziu-se a valores menores que o limite de detecção do cromatógrafo.

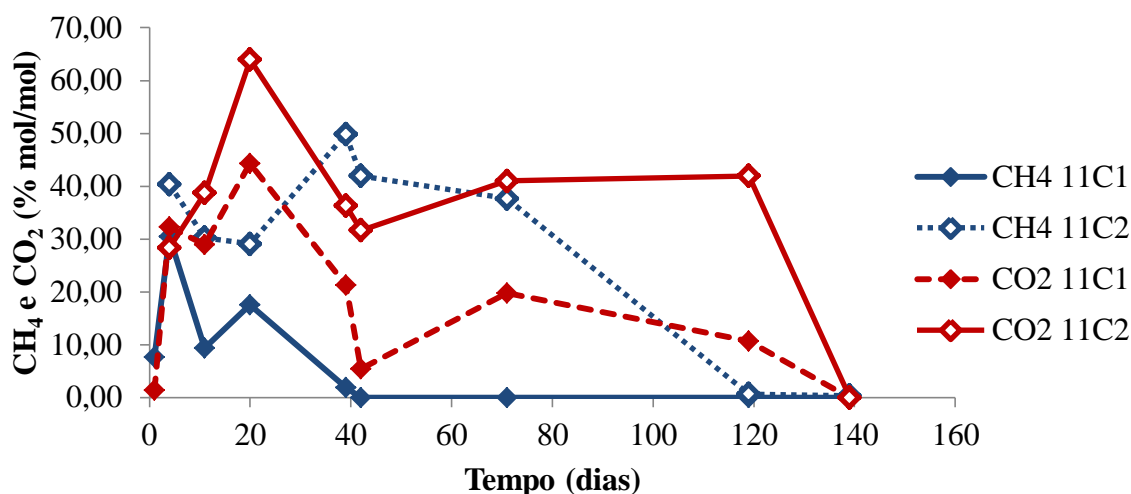


Figura B22 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo seco a 40°C (reatores 11C)

Na Figura B23, os perfis da concentração de metano apresentaram comportamentos parecidos, onde os valores máximos de metano foram de 30,62% para o reator 11D1 e de 31,76% para o reator 11D2, ambos obtidos no 6º dia da fermentação.

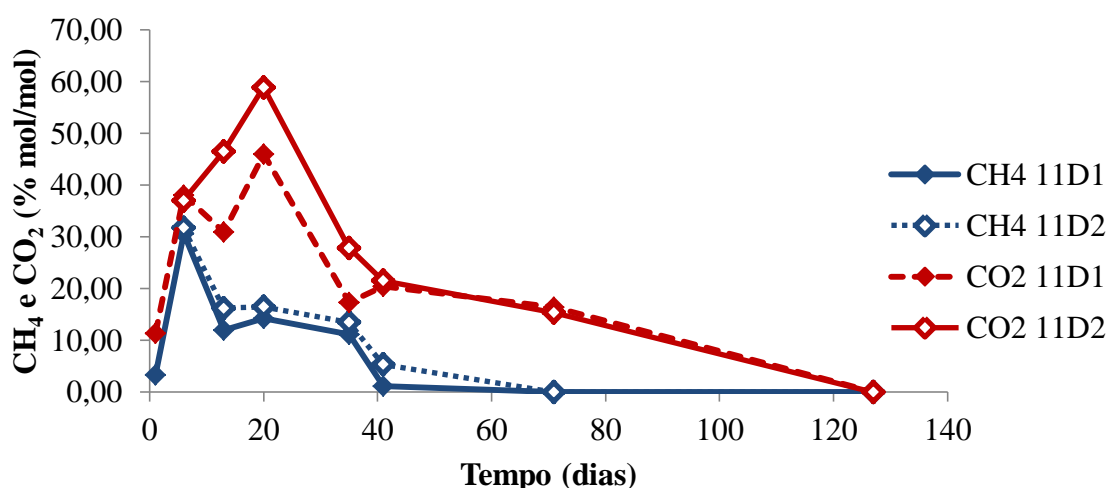


Figura B23 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo seco a 45°C (reatores 11D)

Para o lodo seco a 50°C, as maiores concentrações de metano no biogás produzido, como mostra a Figura B24, foram 46,97% no 18º dia e 29,62% no 13º dia de fermentação.

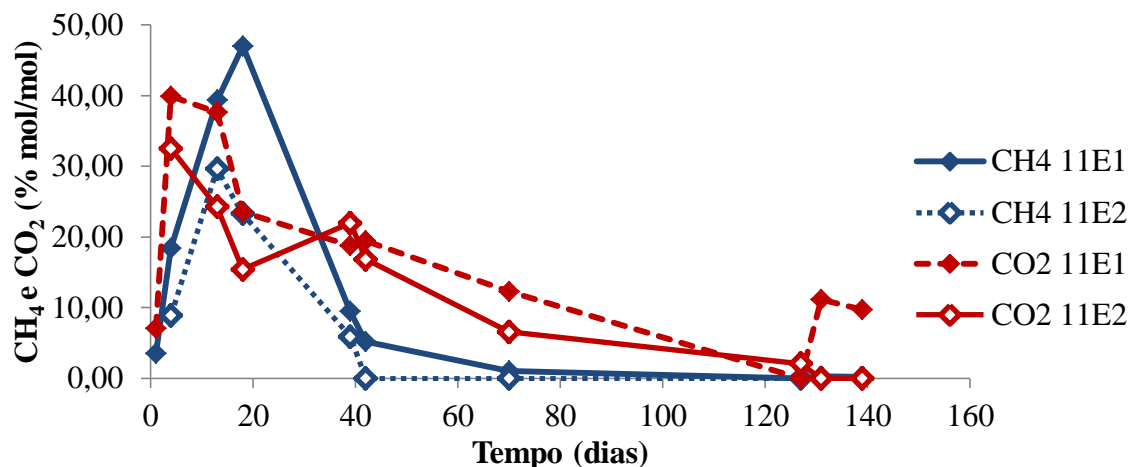


Figura B24 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo seco a 50°C (reatores 11E)

Lodo pastoso

Nas Figuras de B25 a B29 estão ilustrados os gráficos da produção de metano e dióxido de carbono para o lodo pastoso em diferentes temperaturas.

Na Figura B25, estão os teores de metano e dióxido de carbono, obtidos nos reatores de 100mL com lodo pastoso. Nestes reatores os máximos valores observados foram de 39,02% no 41º dia de fermentação para o reator 12A1 e de 33,47% no 17º dia. Para o reator 12A2, a partir do 41º dia apresentou valores muito pequenos.

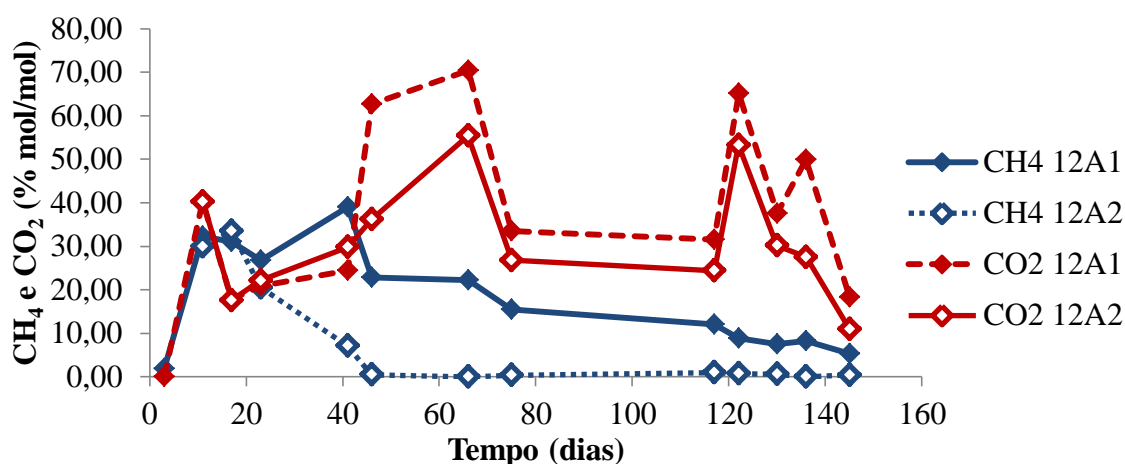


Figura B25 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 100mL com lodo pastoso a 30°C (reatores 12 A)

Nos gráficos da Figura B26, as máximas concentrações de metano no biogás produzido nos reatores com lodo pastoso, foram obtidas com 20 (51,88%) e 13 (40,41%) dias de digestão anaeróbia para os reatores 12B1 e 12B2, respectivamente.

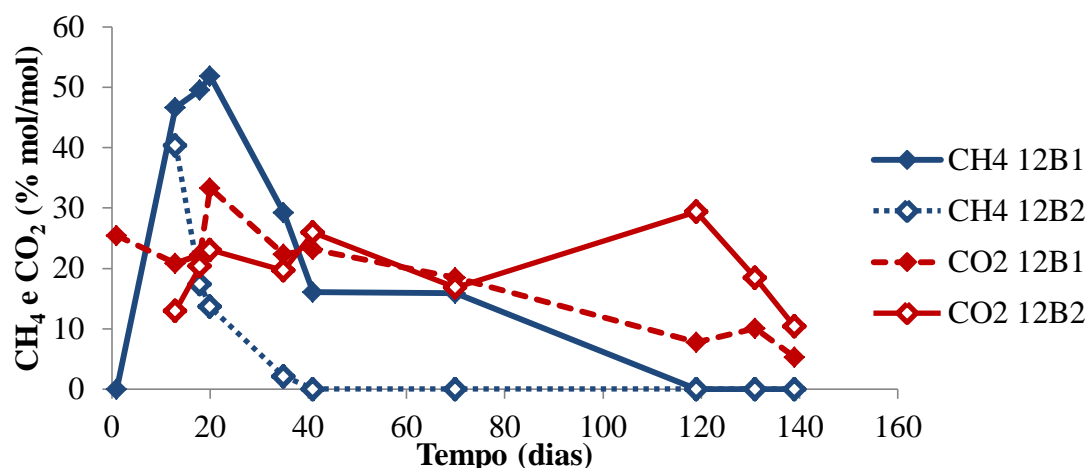


Figura B26 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo pastoso a 35°C (reatores 12B)

Para a Figura B27, os teores máximos de metano observados no biogás produzido a partir do lodo pastoso a 40°C foram de 51,22% no reator 12C1 e 51,54% no reator 12C2, ambos encontrados no 4º dia de fermentação.

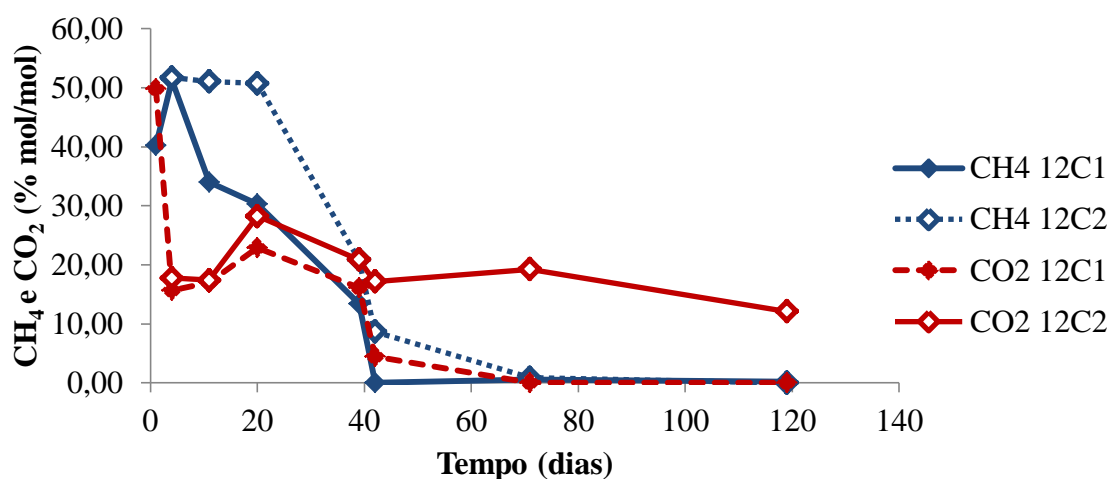


Figura B27 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo pastoso a 40°C (reatores 12C)

Para Figura B28, que mostra as concentrações de metano e dióxido de carbono, encontrados nos reatores com lodo pastoso a 45°C, os valores máximos observados foram 60,44% para o reator 12D1 e 58,81% par o reator 12D2, ambos encontrados no 6º dia de fermentação.

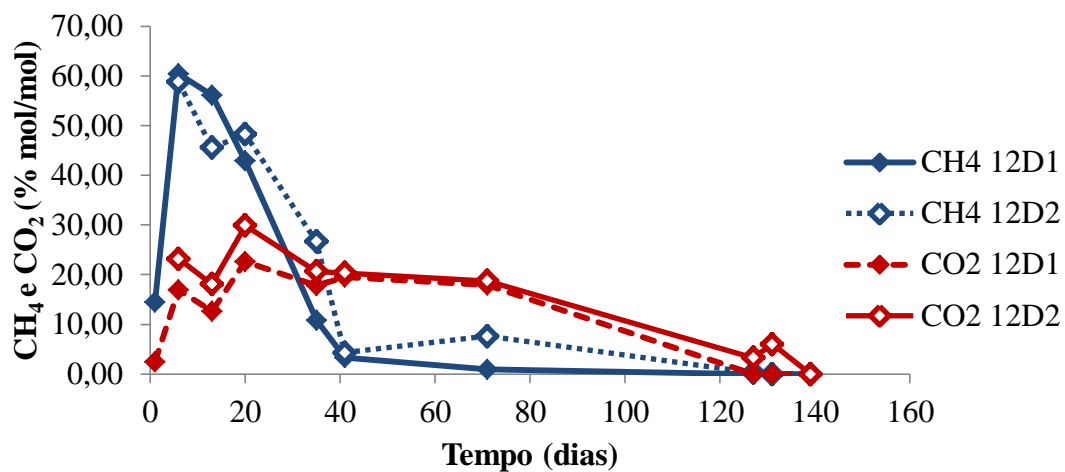


Figura B28 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo pastoso a 45°C (reatores 12D)

Na Figura B29, as concentrações máximas de metano encontradas foram de 42,79% no 13º dia para o reator 12E1 e de 42,52% no 18º dia para o reator 12E2.

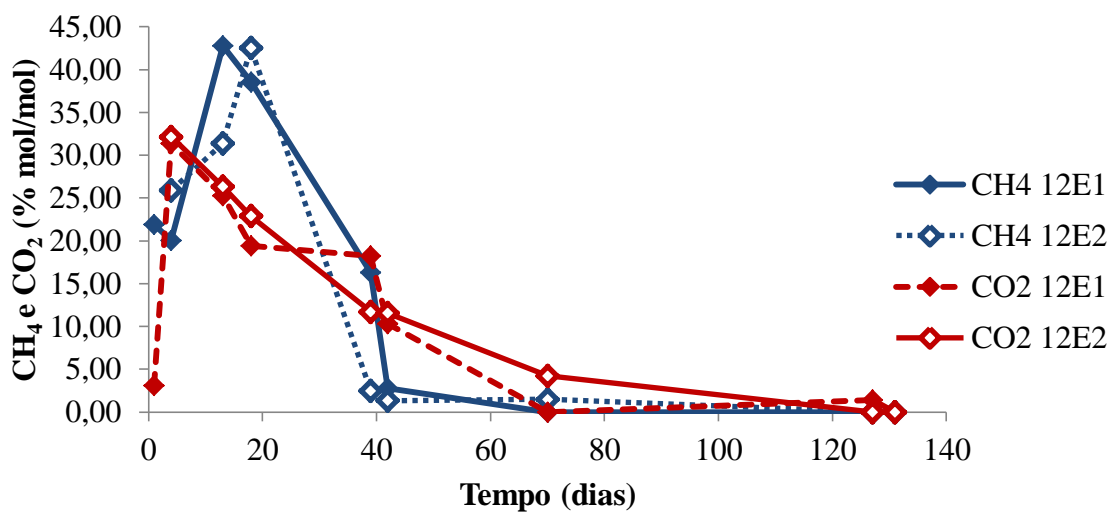


Figura B29 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 100mL com lodo pastoso a 50°C (reatores 12E)

APÊNDICE B4 – Gráficos dos reatores de 1L em frascos de vidro

A Figura B30 apresenta baixos teores de metano e altos teores de CO_2 . Os valores máximos de metano encontrados foram de 14,21% no 32º dia de fermentação para o reator 12A1 e de apenas 7,71% no 77º dia.

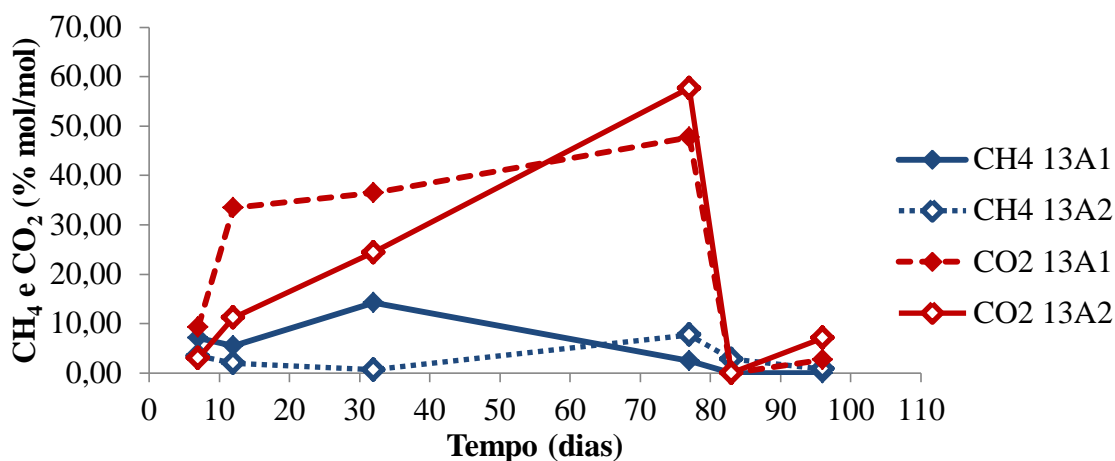


Figura B30 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores tipo âmbar de 1L com mistura dos lodos (reatores 13A)

Na Figura B31, estão os resultados da produção de biogás nos reatores tipo âmbar com lodo pastoso, onde os valores máximos de metano obtidos foram de 25,83% para o reator 14A1 no 7º dia e de 26% para o reator 14A2 no 12º dia de digestão anaeróbia.

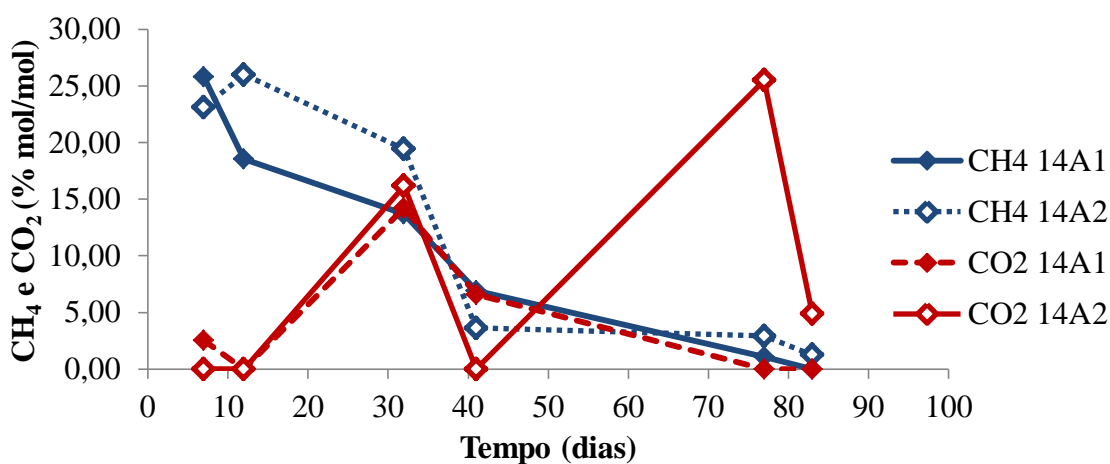


Figura B31 – Produção de CH_4 e CO_2 em reatores de 1L tipo âmbar com lodo pastoso (reatores 14A)

A Figura B32 mostra os resultados do biogás produzido a partir do lodo seco com teores máximos de metano observados de 23,14% para o reator 15A1 e 5,22% para o reator 15A2, ambos encontrados no 7º dia de biodigestão.

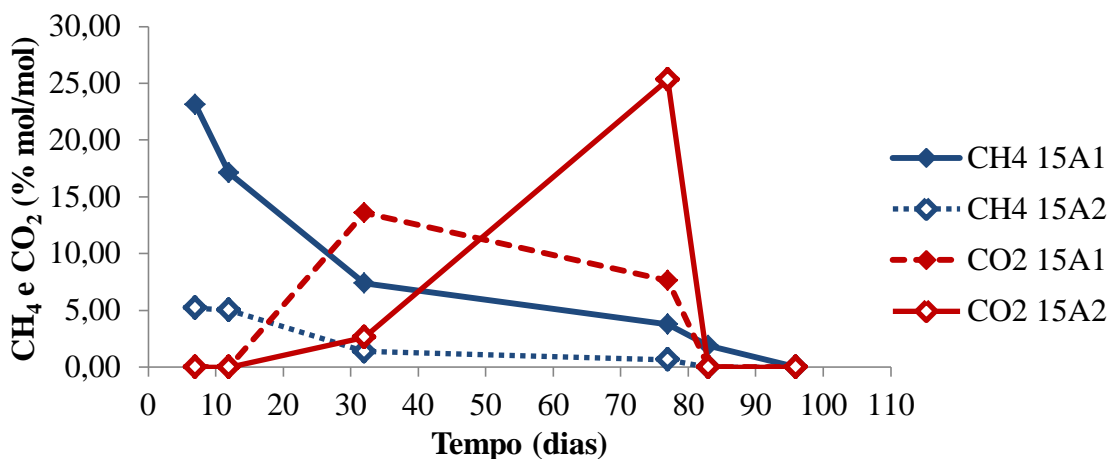


Figura B32 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 1L tipo âmbar com lodo seco (reatores 15A)

Nos gráficos mostrados na Figura B33, observam-se baixos teores de metano, sendo que os valores máximos encontrados foram de 7,22% no 71º dia para o reator 16A1 e de 3,48% no 26º dia de fermentação para o biodigestor 16A2.

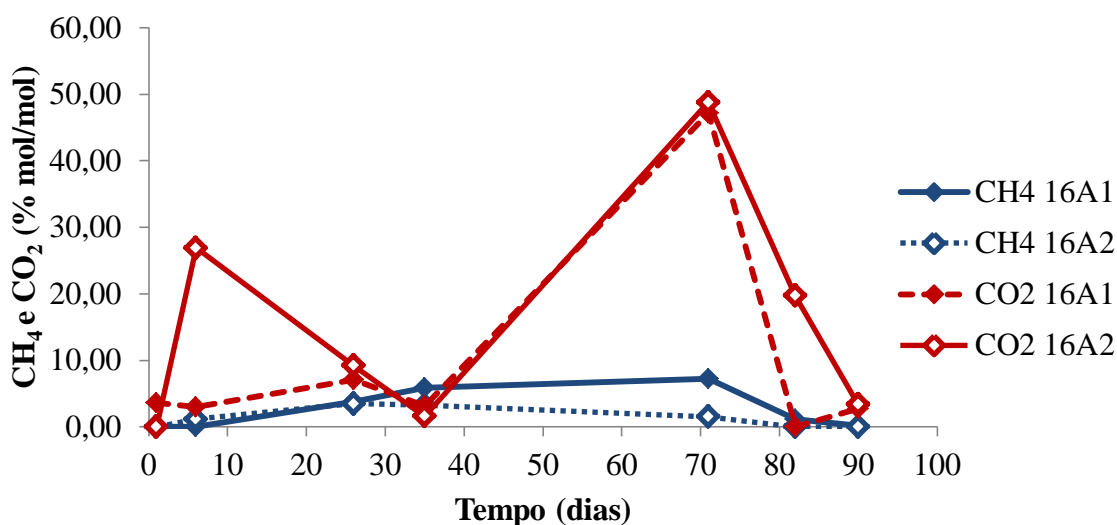


Figura B33 – Produção de CH₄ e CO₂ em reatores de 1L tipo âmbar com lodo líquido (reatores 16A)

ANEXOS

ANEXO A – Exemplo de Fluxograma macro do tratamento de esgoto da ETE Rio Preto

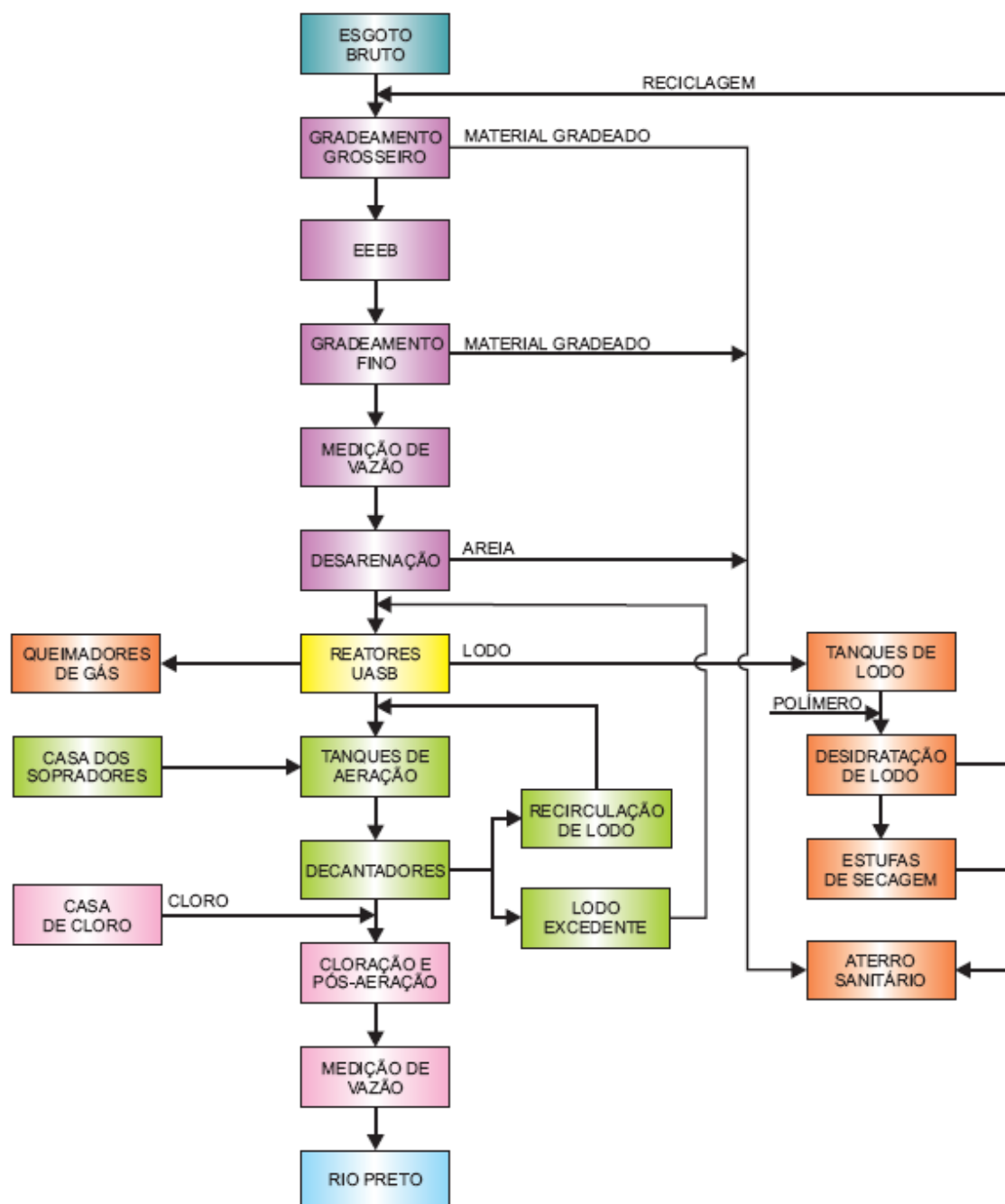


Figura AN1 – Fluxograma macro do tratamento de esgoto da ETE Rio Preto

Fonte: Villani Jr. (2011).