



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

**ESTUDO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFPB -
*CAMPUS I***

Rômulo Wilker Neri de Andrade

João Pessoa – PB

Setembro de 2015



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ESTUDO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFPB -
*CAMPUS I***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Rômulo Wilker Neri de Andrade

Orientadora: Profa. Dra. Elisangela Maria Rodrigues Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Joácio de Araújo Morais Júnior

João Pessoa – PB

Setembro de 2015

A553e Andrade, Rômulo Wilker Neri de.
Estudo do processo de tratamento de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFPB - Campus I / Rômulo Wilker Neri de Andrade- João Pessoa, 2015.
97f. : il.
Orientadora: Elisangela Maria Rodrigues Rocha
Coorientador: Joácio de Araújo Morais Júnior
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia civil e ambiental. 2. Digestão anaeróbia.
3. Inóculos. 4. Reatores. 5. Produção de biogás.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

RÔMULO WILKER NERI DE ANDRADE

**ESTUDO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFPB - *CAMPUS I***

Dissertação aprovada em ___/___/___, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Elisangela Maria Rodrigues Rocha
(Orientadora)

Prof. Dr. Joácio de Araújo Morais Júnior
(Coorientador)

Profa. Dra. Claudia Coutinho Nobrega
(Membro Interno/PPGECAM)

Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Membro Externo/UFCG)

João Pessoa – PB

Setembro de 2015

DEDICATÓRIA

À memória da minha avó, Maria José Neri de Sousa (*in memoriam*), por ter sido uma mulher forte, batalhadora e corajosa. Que soube apoiar e orientar os seus filhos e netos com seu jeitinho, carinho e dedicação. Vó, a senhora me faz muita falta!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me dar forças em todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais, Isabel Kátia Neri e Arlindo Alves de Andrade, por toda a força, carinho, amor, amizade e aprendizado que recebi ao longo desse mestrado e em todos os momentos vividos que passamos juntos.

À minha irmã, Marta Neri Hofmann, que é a melhor amiga do mundo. Sempre esteve presente em minha vida, nos momentos tristes e, principalmente, felizes. Obrigado pelo incentivo, atenção e por me presentear, junto a Johannes Hofmann, com um sobrinho lindo, o pequeno Johann.

Ao meu avô, João Francisco Filho, por ser mais que um avô/pai, ser um amigo, que com suas palavras e apoio vem conquistando a minha admiração e respeito.

À Profa. Dra. Elisangela Maria Rodrigues Rocha, orientadora/mãe, que me acolheu, apoio, incentivou, orientou e ajudou em todo o desenvolvimento da pesquisa de mestrado. Obrigado por toda a paciência do mundo e por servir de inspiração a mim e muitos colegas.

Ao Prof. Dr. Joácio de Araújo Morais Júnior, co-orientador, pela proposta de pesquisa de mestrado e por me orientar logo quando ingressei ao programa de pós-graduação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal da Paraíba, em especial àqueles da área Saneamento Ambiental, que contribuíram com seus conhecimentos e experiências profissionais.

À Profa. Dra. Carmem Lucia Moreira Gadelha, coordenadora do Laboratório de Saneamento Ambiental (LABSAM), do CT/UFPB, por disponibilizar espaço para a realização da pesquisa de mestrado.

Aos técnicos laboratoristas do Laboratório de Saneamento Ambiental, Romildo dos Anjos Junior, Elson Santos, Fabiana Costa e Jose Dorivaldo Oliveira. Agradeço-lhes pela paciência e suporte dado às atividades de laboratório, além dos conhecimentos adquiridos.

A todos os alunos de iniciação científica que contribuíram de alguma forma com a pesquisa, em especial a Josilene Maria da Silva, Arthur Marinho Cahino, Alex Backer Freire Bento, Gabrielle Cavalcanti Rodrigues e Palloma Damascena Morais. Agradeço-lhes pelo comprometimento e disposição em todas as etapas da pesquisa de mestrado.

Ao Prof. Msc. Antônio Luiz de Albuquerque Gomes, Superintendente dos Restaurantes Universitário da Universidade Federal da Paraíba, por liberar a coleta de resíduos no restaurante universitário do campus I.

À Profa. Dra. Graciele da Silva Campelo Borges, coordenadora do laboratório de processamento de alimentos, do CTDR/UFPB, por autorizar o uso dos equipamentos do laboratório.

A Sérgio Ricardo Honório de Assis, amigo e técnico laboratorista do Laboratório de Pavimentos (LABPAV), do CT/UFPB, pelo auxílio e disponibilidade em me ajudar com algumas análises.

Ao Prof. Dr. Mário César Ugulino de Araújo, coordenador do Laboratório de Automação e Instrumentação em Química Analítica e Quimiometria (LAQA), do CCEN/UFPB, por autorizar o uso do cromatógrafo gasoso.

À Mayara Ferreira Barbosa, aluna de doutorado do LAQA, pela paciência e ajuda junto ao cromatógrafo gasoso.

Aos professores Dr. Cristiano das Neves Almeida e Dr. Gilson Barbosa Athayde Junior, coordenador e vice-coordenador, respectivamente, do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, e as secretárias, Miriam de Moura Costa Rodrigues e Sara de Paiva Pedrosa, por colocarem a coordenação do programa sempre disponível.

Aos meus amigos de mestrado Robson Arruda dos Santos, Samara Cintia Alves Gama, Luana de Moraes e Silva, Mariana Medeiros Batista, Luara Lourenço Ismael, Hozana Raquel de Medeiros Garcia, Jose Jeronimo de Souza Nascimento, Patrícia Rêgo de Oliveira, Felipe Cordeiro de Lima e Rosimery da Silva Ferreira, pelo apoio ao longo do mestrado.

A Maria Laiz de Fátima Cabral Pontes, grande amiga, por todo carinho, atenção e apoio prestados nesse período de estudos do mestrado.

A CAPES e ao CNPq, pelo auxílio financeiro dado por meio de bolsas (mestrado e iniciação científica) que permitiram a concretização desse trabalho.

A todos que não estão aqui citados, entre familiares e amigos (infância, técnico e graduação), mas que contribuíram muito para a minha formação como pessoa e profissional, e para conclusão desse mestrado.

“Você quer? Pare de dizer que fez assim ou assado por causa dos outros, assumo o que você quer mesmo e corra atrás.”

Elisangela Rocha

RESUMO

A digestão anaeróbia é um processo de tratamento biológico da matéria orgânica sob a ação microbiana em biodigestores. A ausência de oxigênio permite a produção de biogás, mistura composta por metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), através de um processo composto por quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O presente trabalho buscou estudar o processo de digestão anaeróbia no tratamento dos resíduos sólidos orgânicos do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – *campus* I, em escala laboratorial. A metodologia seguiu uma linha de estudos que se organizou inicialmente pelo diagnóstico, coleta e caracterização dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) do RU da UFPB – *campus* I; e dos lodos provenientes das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) de Mangabeira, João Pessoa-PB e do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – *campus* Cabedelo, que foram utilizados como inoculos; partida e monitoramento dos reatores experimentais; e tratamento dos dados obtidos. As amostras foram incubadas, seguindo o teste Potencial Bioquímico de Metano (BMP), em frascos de vidro com tampa e septo, hermeticamente fechados. Foram realizados 3 ensaios e todos foram mantidos a 35±5°C, durante 90 dias, em uma incubadora e sem agitação, com monitoramento periódico da temperatura, pressão e umidade. Estudou-se o potencial do inóculo em seu aspecto úmido e desidratado. Além disso, optou-se por adicionar glicose em alguns reatores. Ao atingir 60 e 90 dias, retirou-se os reatores para a caracterização física e química do meio degradado. A Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) apresentou 51,8% de resíduos *in natura*, e pH dentro da faixa da acidez, 3,8 e 5,5. Os inóculos testados mostraram carga de matéria orgânica de 18,1 ± 2,6; pH entre 6,8 e 7,8 e teor de água, entre 92 e 99,8%, resultados que os enquadraram ao processo. Aos 90 dias, alguns reatores apresentaram perdas consideráveis de massa, em destaque aqueles compostos por RSO e lodo anaeróbio fresco da ETE Mangabeira, denominado RSOLF (ensaio I), RSOLG (ensaio II) e o reator com lodo fresco com glicose, RSOLGETE (ensaio III), os quais perderam 2,95g, 3,55g e 1,52g, respectivamente. Observou-se que a glicose na composição dos reatores, mostrou ser útil para a alimentação inicial e desenvolvimento das bactérias. A partir das curvas da produção do biogás dos reatores com glicose nos três ensaios, pode-se observar que os reatores que tinham o lodo fresco, como inóculo em sua composição, produziram mais gases durante o período da pesquisa. As amostras, do ensaio III, RSOLETE e RSOLGETE, apresentaram os melhores valores de produção de metano, com 43,55% e 30,98%, respectivamente, ao 90º dia. Com isso, o teste BMP mostrou-se eficiente no tratamento de resíduos sólidos orgânicos e produção de biogás, sendo possível observar maior produção de biogás nos reatores que tiveram em sua composição lodo da lagoa anaeróbia da ETE de Mangabeira como inóculo.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia, Inóculos, Reatores, Produção de Biogás.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a process of biological treatment of organic matter under microbial action in biodigesters. The absence of oxygen allows the production of biogas, a mixture composed of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), through a process composed of four phases: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. The objective of this work was to study the anaerobic digestion process in the treatment of solid organic wastes of the University Restaurant (UR) of the Federal University of Paraíba (UFPB) - campus I, in laboratory scale. The methodology followed a line of studies that was initially organized by the diagnosis, collection and characterization of the organic solid waste (OSW) of the UFPB - campus I; And anaerobic sludge from effluent treatment plant (ETP) Mangabeira, João Pessoa-PB, and Federal Institute of Paraíba (IFPB) - Cabedelo campus, which were used as inoculants; Starting and monitoring of experimental reactors; And treatment of the data obtained. The samples were incubated, following the Biochemical Methane Potential (BMP) test, in glass bottles with lid and septum, hermetically sealed. Three assays were performed and all were maintained at 35±5°C for 90 days in an incubator without agitation, with periodic monitoring of temperature, pressure and humidity. The potential of the inoculum in its wet and dehydrated aspect was studied. In addition, it was decided to add glucose in some reactors. At 60 and 90 days, the reactors were removed for the physical and chemical characterization of the degraded medium. The Organic Fraction of Urban Solid Waste (OFUSW) presented 51,8% of in-nature residues, and pH within the acidity range, 3.8 and 5.5. The inoculums tested showed organic matter loading of 18,1±2,6; pH between 6,8 and 7,8 and water content, between 92 and 99,8%, results that fit the process. At 90 days, some reactors presented mass losses, those composed by OSW and fresh anaerobic sludge from ETP Mangabeira, RSOLF (test I), RSOLG (test II) and RSOLGETE (test III), lost 2,95g, 55g and 1,52g, respectively. It was observed that glucose in the reactor composition was shown to be useful for the initial feeding and development of the bacteria. From the biogas production curves of the reactors with glucose in the three tests, it can be observed that the reactors that had the fresh sludge, as inoculum in their composition, produced more gases during the period of the research. Samples from trial III, RSOLETE and RSOLGETE, presented the best values of methane production, with 43,55% and 30,98%, respectively, at 90° day. Thus, the BMP test proved to be efficient in the treatment of organic solid waste and biogas production, and it was possible to observe a larger biogas production in the reactors that had sludge from the anaerobic lagoon of the ETP Mangabeira as inoculum.

Keywords: Anaerobic Digestion, Inoculums, Reactors, Biogas Production.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xv
CAPÍTULO 1.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Gerais.....	19
1.1.2 Específicos.....	20
1.2 Estrutura da Dissertação.....	20
CAPÍTULO 2.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 Resíduos Sólidos Orgânicos.....	22
2.2 Digestão Anaeróbia.....	22
2.2.1 Hidrolise.....	23
2.2.2 Acidogênese.....	24
2.2.3 Acetogênese.....	24
2.2.4 Metanogênese.....	25
2.3 Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbia.....	25
2.3.1 Temperatura.....	25
2.3.2. pH.....	26
2.3.3 Composição Microbiana.....	27
2.3.4 Relação Resíduo/Inóculo.....	27
2.3.5 Teor de Água.....	27
2.3.6 Concentração de Sólidos.....	28
2.4 Teste Potencial Bioquímico de Metano (BMP).....	28
2.5 Biogás.....	29
CAPÍTULO 3.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Caracterização Gravimétrica dos RSO do RU da UFPB – <i>campus</i> I.....	32
3.1.1 Restaurante Universitário da UFPB – <i>campus</i> I.....	33
3.1.2 Resíduo Sólido Orgânico.....	34
3.1.3 Inóculo.....	37
3.2 Parte Experimental.....	40
3.2.1 Inoculação.....	40
3.2.2 Reatores Experimentais.....	42

3.2.3 Monitoramento.....	46
3.2.3.1 Pressão Interna.....	46
3.2.3.2 Coleta e Análises do Biogás.....	48
3.2.4 Caracterização Física e Química do Meio de Reação.....	50
3.3 Análises e Tratamento dos Dados.....	51
CAPÍTULO 4.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 Caracterização Gravimétrica dos RSO do RU/UFPB – <i>campus I</i>	53
4.2 Caracterização do Resíduo Sólido Orgânico e do Inóculo.....	54
4.2.1 Resíduo Sólido Orgânico.....	54
4.2.2 Inóculo.....	55
4.3 Degradação do Meio.....	57
4.3.1 Malanço de Massa e pH.....	58
4.3.2 DBO ₅ /DQO.....	61
4.3.3 Alcalinidade.....	63
4.3.4 Concentração de Sólidos.....	64
4.4 Produção do Biogás.....	65
4.4.1 Teores de Metano.....	69
CAPÍTULO 5.....	71
5 CONCLUSÃO.....	72
6 RECOMENDAÇÕES.....	73
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICE A.....	80
APÊNDICE B.....	89
APÊNDICE C.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases da digestão anaeróbia.....	23
Figura 2. Taxa de crescimento relativa de atividade psicrófila, mesófila e termófila.....	26
Figura 3. Evolução histórica dos combustíveis.....	29
Figura 4. Fluxograma da metodologia.....	32
Figura 5. Restaurante Universitário da UFPB – <i>Campus I</i>	33
Figura 6. Etapas de preparação dos RSO.....	36
Figura 7. Lagoa Anaeróbia do Módulo III da ETE de Mangabeira, João Pessoa-PB.....	37
Figura 8. Registro do momento da coleta na ETE de Mangabeira, João Pessoa-PB.....	38
Figura 9. ETE do IFPB – <i>campus Cabedelo</i>	38
Figura 10. Registro do momento da coleta na ETE do IFPB – <i>campus Cabedelo</i>	39
Figura 11. Esquema do teste BMP.....	40
Figura 12. Ilustração do processo de inoculação dos reatores.....	41
Figura 13. Vista da incubadora com os reatores inoculados.....	42
Figura 14. Organização dos reatores do ensaio III na estufa incubadora.....	43
Figura 15. Manômetro utilizado no estudo.....	46
Figura 16. Reator com alta pressão e risco de ruptura do septo.....	47
Figura 17. Mediação da pressão interna dos reatores.....	47
Figura 18. Sistema de coleta do biogás.....	48
Figura 19. Cromatógrafo utilizado.....	49
Figura 20. Injeção do biogás no cromatógrafo gasoso.....	49
Figura 21. Composição gravimétrica da FORSU utilizado nos reatores nos três (3) ensaios..	54
Figura 22. Aspecto visual do reator com RSO.....	57
Figura 23. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio I.....	67
Figura 24. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio II.....	68
Figura 25. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio III.....	68
Apêndice B1. Evolução da produção de biogás dos reatores LS (a), LF (b), RSOLS(c) e RSOLF (d), do ensaio I.....	89
Apêndice B2. Evolução da produção de biogás dos reatores RSOLSG (a), RSOLFG (b) e RSO (c), do ensaio I.....	90
Apêndice B3. Evolução da produção de biogás dos reatores RSO (a), LODO (b), RSOL (c) e RSOLG (d), do ensaio II.....	91
Apêndice B4. Evolução da produção de biogás dos reatores LODO UASB (a), LODO ETE (b), RSOL UASB (c) e RSOL ETE (d), do ensaio III.....	92
Apêndice B5. Evolução da produção de biogás dos reatores RSOLG UASB (a), RSOLG ETE (b) e RSO (c), do ensaio III.....	93
Apêndice C1. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLS e RSOLF, do ensaio I.....	94
Apêndice C2. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLSG e RSOLFG, do ensaio I.....	95
Apêndice C3. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOL UASB e RSOL ETE, do ensaio III.....	96
Apêndice C4. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLG UASB e RSOLG ETE, do ensaio III.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas de pH ótimo acordo com diferentes autores.....	26
Tabela 2. Composição da FORSU utilizada no experimento.....	35
Tabela 3. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos para a caracterização do RSO.....	37
Tabela 4. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos para a caracterização do lodo anaeróbio.....	39
Tabela 5. Composição da solução nutritiva utilizada nos ensaios.....	41
Tabela 6. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio I.....	43
Tabela 7. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio II.....	44
Tabela 8. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio III.....	44
Tabela 9. Condições do processo de inoculação dos reatores nos três (3) ensaios.....	45
Tabela 10. Condições cromatográficas da análise das amostras do ensaio III.....	50
Tabela 11. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos utilizados na caracterização dos meios.....	50
Tabela 12. Quantificação da geração de RSO do RU/ UFPB – <i>campus</i> I.....	53
Tabela 13. Caracterização físico-química das amostras de resíduos orgânicos após secagem nos ensaios.....	55
Tabela 14. Caracterização físico-química do lodo da lagoa anaeróbia da ETE Mangabeira.....	56
Tabela 15. Caracterização físico-química do lodo anaeróbio do reator UASB da ETE do IFPB – <i>campus</i> Cabedelo.....	56
Tabela 16. Balanço de massa e pH dos reatores dos três (3) ensaios.....	59
Tabela 17. Características do comportamento da DBO e DQO total dos meios de reação.....	62
Tabela 18. Alcalinidade total dos meios de reação no início e final do teste no ensaio III.....	63
Tabela 19. Sólidos Suspensos Voláteis dos meios de reação inicial e final.....	64
Tabela 20. Volume Acumulado de Biogás (NmL).....	65
Tabela 21. Teores de metano inicial e final.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	
AME	Atividade Metanogênica Específica
B	
BMP	Potencial Bioquímico de Metano
C	
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
D	
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
DQO	Demanda Química de Oxigênio
E	
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
F	
FID	Detector de Ionização em Chama
FORSU	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
G	
GEE	Gases do Efeito Estufa
H	
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
I	
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
K	
K ₂ HPO ₄	Fosfato de Potássio Dibásico
KH ₂ PO ₄	Fosfato de Potássio Monobásico
L	
LABSAM	Laboratório de Saneamento Ambiental
LF	Lodo Anaeróbico Fresco
LS	Lodo Anaeróbico Seco
N	
N ₂	Nitrogênio

NaHCO₃ Bicarbonato de Sódio

NH₄Cl Cloreto de Amônio

O

ONU Organização das Nações Unidas

P

PCH Pequenas Centrais Hidrelétricas

PET Polietileno Tereftalato

pH Potencial Hidrogeniônico

PNMA Política Nacional do Meio Ambiente

PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PROINFA Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PVC Policloreto de Vinila

R

RL Rejeitos Limpos

RS Rejeitos Sujos

RSO Resíduo Sólido Orgânico

RSOL Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio

RSOLF Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco

RSOLFG Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose

RSOLG Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio e Glicose

RSOLS Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco

RSOLSG Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

RU Restaurante Universitário

S

SIN Sistema Elétrico Interligado Nacional

ST Sólidos Totais

STF Sólidos Totais Fixos

STV Sólidos Totais Voláteis

U

UASB *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UFPB Universidade Federal da Paraíba

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

A grande quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos diariamente no mundo constitui, um dos maiores problemas ambientais. A produção de resíduos e a poluição do meio ambiente estão associadas à evolução histórica do homem, porém nas últimas décadas esse problema tem se agravado devido à industrialização e o crescimento acelerado da população mundial.

Em 02 de agosto de 2010, criou-se um marco regulatório para o setor de resíduos no Brasil, foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, que objetiva melhorar a qualidade no tratamento dos resíduos, estimular a segregação e a correta destinação, além de trazer questões de cunho sustentável ao processo de resíduos e influencia diretamente o desenvolvimento de novas oportunidades para a implantação de projetos de captura de biogás em aterros, com a consequente geração de energia e redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) (ABRELPE, 2013).

Estima-se, hoje, que sejam gerados aproximadamente 1,4 bilhões de toneladas/ano de RSU no mundo e que nos próximos 10 anos esse valor deva alcançar os 2,2 bilhões de toneladas/ano (PNUMA, 2015). Sendo grande parte desses resíduos caracterizados como orgânicos, que estão sujeitos aos processos de degradação biológica.

No Brasil, em 2014, a geração de RSU foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 2,9% de um ano para outro, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9% (ABRELPE, 2015).

Barros (2012), ABRELPE (2013) e outros caracterizam pouco mais de 50% da composição dos RSU, no Brasil, são de Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO), que devido à produção de biogás e chorume, devem receber tratamento e disposição final adequado. Daí surge à necessidade da implantação eficiente de medidas que visem o tratamento e disposição adequados aos resíduos sólidos.

Os RSO podem ser tratados através de processos aeróbios e anaeróbios. A compostagem, processo aeróbio, é a mais conhecida e utilizada no Brasil, porém, nos últimos anos, vê-se uma tendência para tratamento de resíduos sólidos orgânicos, através da digestão anaeróbia, que visa à estabilização da matéria orgânica (DOGAN *et al.*, 2008; BARCELOS, 2009; CABBAI *et al.*, 2013). Todavia, esse último processo produz biogás rico em metano (CH₄), entre 50-75%, e pode ser aproveitado energeticamente.

De acordo com Van Haandel e Lettinga (1994), a digestão anaeróbia é proporcionada pela ação de bactérias e pode ser resumida em três etapas distintas: Primeira fase – ocorre à transformação de substâncias complexas em substâncias mais simples é realizada por bactérias que possuem capacidade enzimática de decompor carboidratos, gorduras e proteínas; Segunda fase – também conhecida como a fase ácida, as substâncias obtidas na primeira fase tornam-se substratos para as bactérias saprófitas, liberando produtos da degradação intermediária, como o dióxido de carbono (CO₂) e água; Terceira fase – chamada gaseificação, os ácidos voláteis produzidos na fase anterior são metabolizadas pelas bactérias metanogênicas.

Fatores relevantes, vantagens e desvantagens, devem ser observados ao se trabalhar com digestão anaeróbia. Costa (2011) e Barcelos (2009) destacam que este método de tratamento não necessita de oxigênio para que possa degradar a matéria orgânica, contudo, é necessário um longo tempo para a estabilização do meio, condições operacionais favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos, pré-tratamento do substrato e adição de inóculo metanogênico.

Pecora (2006) relata que, há duas situações possíveis para o aproveitamento do biogás, uma consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras) e a outra diz respeito à conversão de biogás em eletricidade, isto significa que o biogás permite a produção de energias elétrica e térmica.

Para Duerr *et al.*(2007), o biogás tem como aplicação mais comum a queima em processos de cocção, no entanto cada vez mais têm surgido aplicações para o aproveitamento do biogás como a geração de energia elétrica por intermédio de motores à explosão. Acredita-se que, em um futuro próximo, os gases, CH₄ e hidrogênio (H₂), serão os principais combustíveis, substituindo os recursos fósseis. O aproveitamento do biogás gerado pela digestão anaeróbia dos RSU representa um avanço para a sociedade como um todo (ZGLOBISZ *et al.*, 2010).

A hipótese do trabalho consistiu em verificar o potencial do processo digestivo anaeróbio dos resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFPB – *Campus I*, para um futuro aproveitamento energético (térmico e/ou elétrico).

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Estudar o processo de digestão anaeróbia no tratamento dos resíduos sólidos orgânicos do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – *campus I*, a partir de testes de diferentes inóculos e composições em reatores anaeróbios em escala laboratorial.

1.1.2 Específicos

- Conhecer a composição qualitativa e quantitativa dos resíduos sólidos orgânicos do RU/ UFPB – *campus I*.
- Analisar os parâmetros físicos e químicos dos inóculos testados.
- Comparar o processo de digestão de diferentes inóculos.
- Monitorar o processo de degradação anaeróbia e o potencial de geração do biogás de cada inóculo testado.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho de dissertação está organizado em cinco capítulos.

- O Capítulo 1 compreende a introdução, na qual expressa o assunto abordado, dos resíduos sólidos urbanos ao biogás, que visa abordar à importância da pesquisa, e os objetivos gerais e específicos.
- O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, que consiste em uma síntese das informações mais relevantes e importantes, entre conceitos e pesquisas, embasadas no tema principal do trabalho.
- O Capítulo 3 contempla os materiais e métodos adotados no desenvolvimento do trabalho. São descritas as etapas da pesquisa, detalhando a coleta, caracterização, tratamento, incubação dos biorreatores laboratoriais e monitoramento.
- O Capítulo 4 analisa os resultados obtidos, por meio de tabelas e gráficos, discutindo-os individualmente, através das similaridades e discrepâncias entre os resultados e as referências.
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões mais relevantes acerca da pesquisa e recomendações para o direcionamento de futuros estudos relacionado ao tema.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos Orgânicos

No Brasil, atualmente, grande parte da fração orgânica gerada é disposta em aterros sanitários, sem nenhuma espécie de triagem. Porém, a compostagem é o tratamento que vem sendo mais utilizada para o tratamento da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU), resíduos orgânicos rejeitados como sobras de alimentos, que se trata de um processo de digestão aeróbia convencional, pois ela não é destinada aos aterros sanitários. Entretanto, nas últimas décadas, o processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos vem se destacando por apresentar um balanço energético mais favorável que os processos aeróbios convencionais (BARCELOS, 2009; REICHERT, 2005).

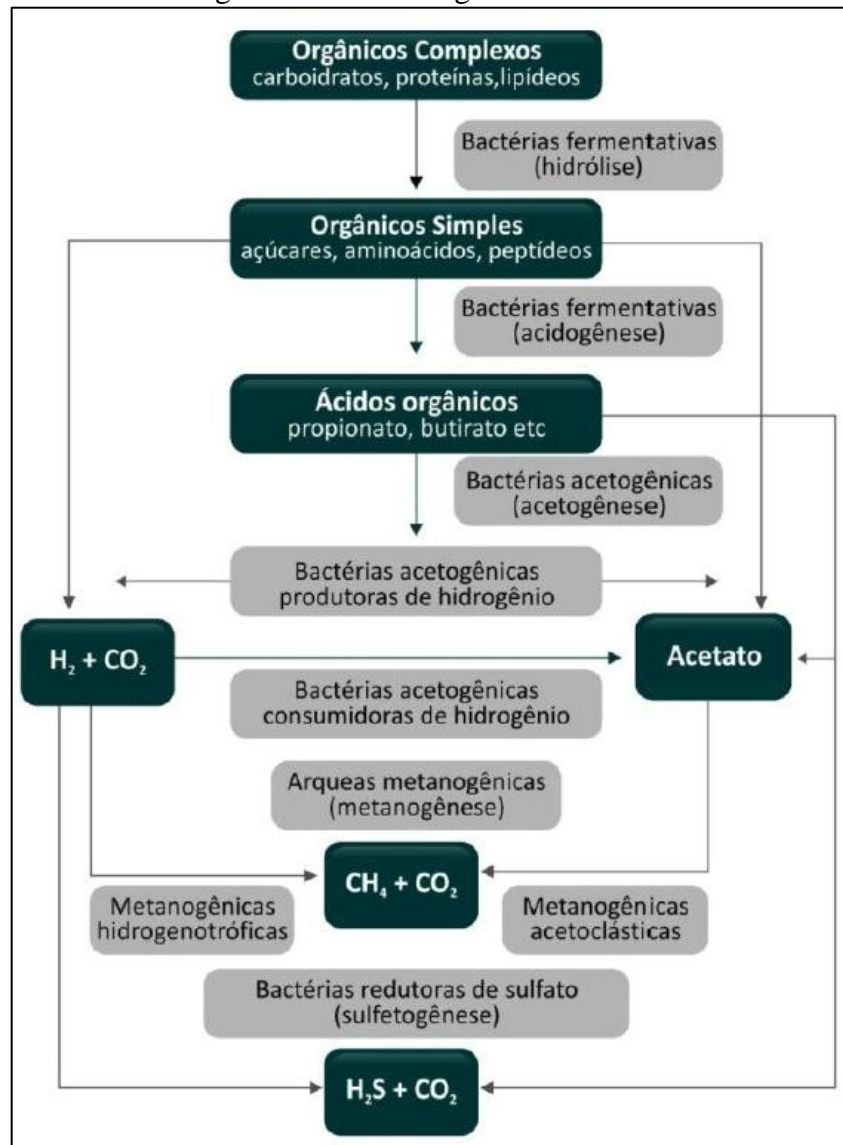
O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) revelou que, aproximadamente, 51% dos resíduos sólidos gerados no Brasil, por dia, são compostos de material orgânico. Estatísticas apontam que o percentual de umidade média de uma matéria orgânica é de 50%, com pH médio de 5,0, ou seja, com caráter ligeiramente ácido.

Os principais resíduos orgânicos, sólidos e semissólidos, são caracterizados como dejetos de criações de animais, resíduos de processos industriais principalmente oriundos do ramo alimentício, lodos de tratamento de efluentes e resíduos orgânicos domésticos (AL SEADI *et al.* 2008).

2.2 Digestão Anaeróbia

No processo de degradação da matéria orgânica em condições de ausência do oxigênio, o CO_2 é utilizado como um receptor dos elétrons na formação do gás CH_4 , entretanto, quando há presença de receptores inorgânicos como o nitrato e sulfato, ocorre à redução dos mesmos e, conseqüentemente, a produção de metano é inibida. Assim, a fração orgânica com grande quantidade de material inorgânico inserido, torna-o ineficiente para processo de digestão anaeróbia. Pode ser dividida em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1).

Figura 1. Fases da digestão anaeróbia.



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

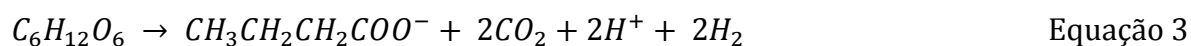
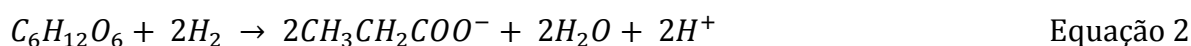
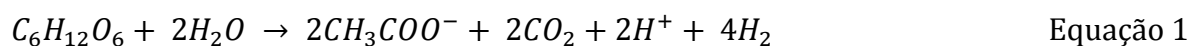
2.2.1 Hidrólise

Na primeira fase da digestão os compostos orgânicos complexos são convertidos em monômeros, deste modo passando pela membrana celular das bactérias, fermentativas. Durante o processo, as proteínas convertem-se em aminoácidos, carboidratos transformam-se em açúcares solúveis e lipídios em ácidos graxos de longa cadeia de glicerina (APPELS *et al.*, 2008). A velocidade da hidrólise pode variar de acordo com a temperatura interna do reator, pelo pH, período de permanência do substrato no reator, como também ao tipo de substrato,

sendo a de carboidrato ocorrendo em algumas horas e a de proteínas e lipídios ocorre em alguns dias (CHAMPAGNE e LI, 2009; RAINES e BINDER, 2010).

2.2.2 Acidogênese

Nesta etapa as bactérias fermentativas metabolizam as substâncias resultantes da hidrólise, transformando-as em ácidos propanóico, ácido butanóico, ácido láctico, hidrogênio, álcoois e dióxido de carbônico (Equações 1, 2 e 3). No entanto, esta fase pode se tornar limitante, se o material a ser degradado não for facilmente hidrolisado.

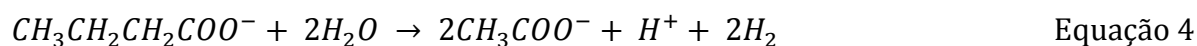


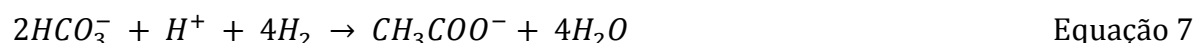
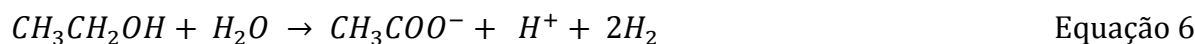
2.2.3 Acetogênese

Na acetogênese ocorre a conversão dos produtos gerados na acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano, isto é, acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (MORAIS JUNIOR, 2006).

O acetato pode ser produzido pela fermentação de compostos orgânicos, mas também pela acetogênese. Segundo Khanal (2008), é nesta etapa que ocorre a simbiose entre as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio e bactérias metanogênicas consumidoras de hidrogênio. Bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio metabolizam etanol, compostos aromáticos, propianato, butirato, etc, em acetato (Equações 4, 5, 6 e 7) .

Durante este processo as bactérias metanogênicas consomem o hidrogênio, evitando assim que o pH no meio diminua e anule a atividade metabólica de outros microrganismos. Com a eliminação do hidrogênio, a pressão parcial de hidrogênio é mantida baixa. Gerando um ambiente favorável para que as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio degradem os derivados da acidogênese em acetato, H₂ e CO₂ (KHANAL, 2008).





2.2.4 Metanogênese

É a etapa final no processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos. Esta fase ocorre quando as bactérias metanogênicas formam metano a partir do hidrogênio, ácido acético, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metanol, ácido fórmico e metilaminas. Essas bactérias estão divididas em dois grupos: as bactérias metanogênicas hidrogenotróficas, que utilizam o H_2 e CO_2 para produzir o CH_4 (Equação 8) e, as bactérias metanogênicas acetoclásticas que produzem o metano a partir do ácido acético ou metanol (Equação 9). Do total de metano produzido, 70% são resultantes da oxidação do ácido acético (CHERNICHARO, 1997).



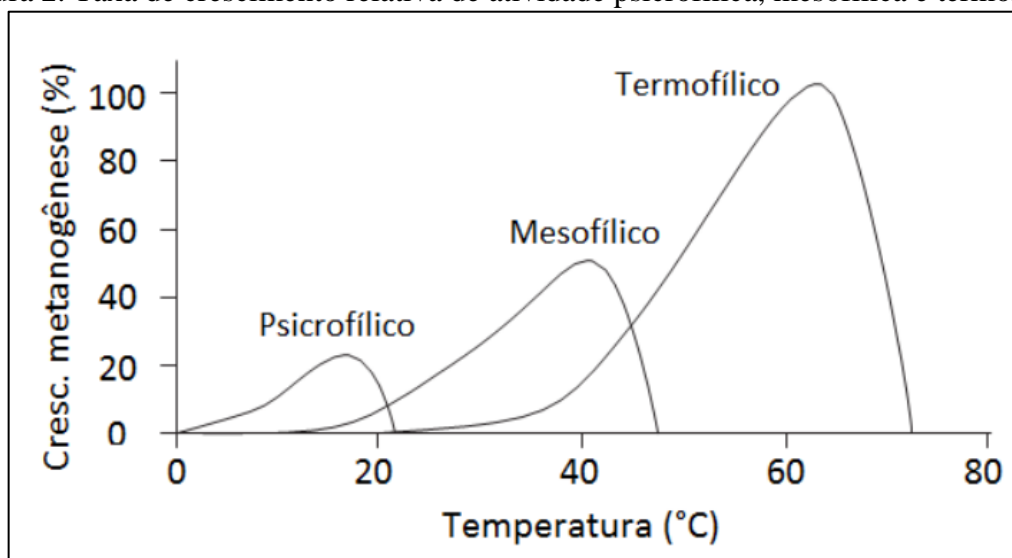
2.3 Fatores que influenciam a Digestão Anaeróbia

2.3.1 Temperatura

A atividade enzimática das bactérias depende estreitamente da temperatura, quanto maior a temperatura, dentro da faixa de atividade da espécie, maior a atividade bacteriana (BARROS, 2012). É conhecido que alterações bruscas de temperaturas causam desequilíbrio das culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano (PROSAB, 2003).

Os estudos da evolução dos RSU demonstram que a temperatura ideal para a produção gasosa é na faixa de 20° C a 45° C para bactérias mesofílica, porém se pode trabalhar com produção do biogás na faixa de 45° C a 70° C, neste caso apenas com bactérias termofílica, mas a temperatura deve permanecer constante (BARROS, 2012) (Figura 2).

Figura 2. Taxa de crescimento relativa de atividade psicrófila, mesófila e termófila.



Fonte: adaptado de Khanal (2008)

2.3.2 pH

A concentração de íons OH^- no meio exterior tem grande influência sobre o crescimento de microrganismos. Na digestão anaeróbia, observam-se duas fases sucessivas: a primeira se caracteriza por diminuição do pH e a segunda, pela estabilização em valores próximos da neutralidade (PROSAB, 2003).

A redução do pH se deve à ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam rapidamente ácidos graxos voláteis. As bactérias metanogênicas (que têm taxas de crescimento mais fracas que as primeiras) se instalam progressivamente e induzem à elevação do pH por intermédio da catálise do ácido acético (PROSAB, 2003). Para a acidogênese o valor de pH ótimo está em torno de 6, enquanto que para a acetogênese e a metanogênese o valor ótimo está em torno de 7, variando de acordo com a literatura (Tabela 1).

Tabela 1. Faixas de pH ótimo acordo com diferentes autores.

Faixa de Operação	Faixa Ótima	Fonte
6,5 a 8,5	6,6 a 7,8	Mata-Alvarez, 2000
6,8 a 7,4	7,0	Khanal, 2008
6,5 a 7,5	6,5 a 7,5	Flor, 2006
6,5 a 8,2	6,5 a 8,2	Speece 1996

Fonte: Marchi, Bressiani e Barbosa (2013)

2.3.3 Composição Microbiana

O princípio da digestão anaeróbia é a conversão de macromoléculas orgânicas em compostos de baixo peso molecular, sendo os microrganismos indispensáveis para esse processo. De acordo com Bitton (2005), apesar de serem encontrados alguns fungos e protozoários nos digestores anaeróbios, as bactérias são os principais microrganismos responsáveis pela realização do processo de digestão.

Para uma comunidade microbiológica anaeróbia estabelecer-se e multiplicar-se é necessário tempo, condições físicas e químicas favoráveis. Para acelerar esse processo é importante encontrar um inóculo apropriado que contenha os microrganismos necessários para a otimização do processo de degradação, assim como a adequada relação substrato: inóculo (LOPES *et al.*, 2004; CARNEIRO, 2005).

Parâmetros como pH, alcalinidade total, ácidos graxos voláteis, DQO, concentração de nitrogênio amoniacal e o valor de produção de biogás sofrem influência do inóculo utilizado (MAYER, 2013). Uma ampla comunidade microbiológica está relacionada à digestão anaeróbia. Três grandes grupos principais: as bactérias fermentativas, as bactérias acetogênicas e as bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997).

2.3.4 Relação Resíduo/Inóculo

Um ambiente anaeróbio não é desenvolvido imediatamente após a partida do processo, uma vez que este demanda um quantitativo de tempo. Por este motivo, faz-se necessária à inoculação para reduzir o tempo de bioestabilização do reator (CHERNICHARO, 1997).

A inoculação, consiste em inserir certa quantidade de determinada comunidade microbiana com atividade metanogênica conhecida em um reator, a fim de acelerar o processo de digestão anaeróbia. O inóculo também tem a função de manter o equilíbrio do pH, acelerar a digestão e aumentar a produção de biogás (CHERNICHARRO, 1997). A proporção adequada de inóculo em relação ao substrato pode determinar o volume de biogás produzido, a remoção de DQO, o nitrogênio e a degradação final do substrato (AMORIM, 2012; SANTOS, 2014).

2.3.5 Teor de Água

A umidade de um resíduo é medida pela quantidade de água nele contido, sendo um fator importante para o processo, pois exerce influência na escolha do sistema de tratamento a ser estudado (LIMA, 2004).

Quando o nível de umidade está elevado, o processo de digestão anaeróbia poderá ter seu processo facilitado em decorrência da maior taxa de produtividade de microrganismos (HERNANDEZ-BERRIEL *et al.* 2008). De acordo com Khalid (2011), as maiores taxas de produção de metano se dão entre 60% e 80% de umidade.

2.3.6 Concentração de Sólidos

A concentração de sólidos introduzida nos reatores anaeróbios é um importante parâmetro nos processos de digestão, se a concentração for muito baixa, o metabolismo dos microrganismos será reduzido e, conseqüentemente, haverá menor produção de biogás, e se for muito elevada, poderá ocorrer sobrecarga orgânica e o azedamento do reator (RAPOSO *et al.*, 2012).

Com base no conteúdo de sólidos totais dos resíduos, três principais tipos de tecnologias são apresentados para a digestão anaeróbia: processos úmidos (teor sólidos totais próximas a 10%), semi-secos (teor de sólidos totais variando entre 10 a 20%) e secos (teor de sólidos totais superior a 20%) (MAYER, 2013).

2.4 Teste Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

O BMP é um teste clássico, originalmente, desenvolvido para avaliar a biodegradabilidade compostos orgânicos solúveis, mas também aplicado a compostos moído e insolúvel finamente sólido (MORAIS JUNIOR, 2006). Para Silva (2014), o teste permite verificar a possibilidade de inibição para diferentes condições, avaliar taxas de substrato e inóculo, verificar o tempo necessário para a estabilização do meio e mensurar o valor energético de um reator anaeróbio a partir do biogás produzido.

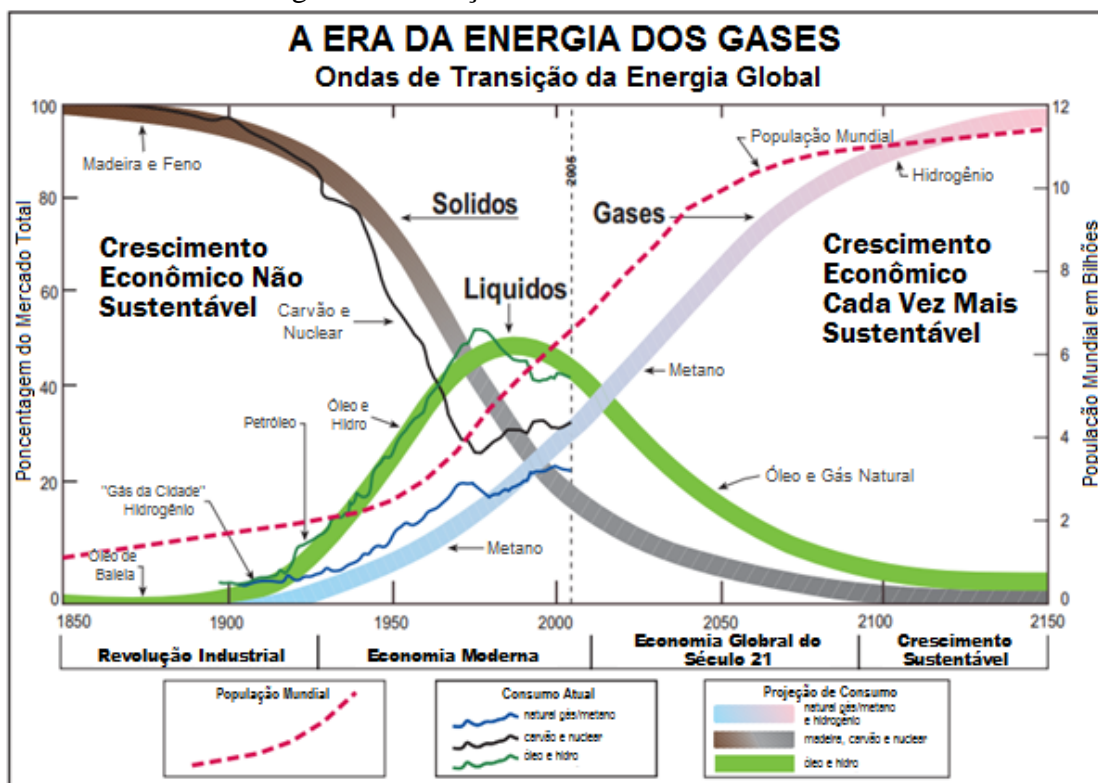
O teste BMP pode ser desenvolvido em batelada ou continua, em condições anaeróbias, compreendendo a incubação do substrato selecionado, resíduos, em frascos ou tubos vedados, a uma temperatura específica, normalmente mesofílica ou termofílica, e certa quantidade de inóculo metanogênico (SILVA, 2014).

2.5 Biogás

Com o intuito de se promover a diversificação e amplitude da Matriz Energética Brasileira a partir de novas alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, criou-se a Lei nº10.438, de 26 de abril de 2002, que institui o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que tem o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólicas, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

Em seu livro “A Era dos Gases”, Robert Hefner III (2006), estima que em poucas décadas a população mundial devam estar utilizando também o biogás como fonte real de geração de energia térmica e elétrica (Figura 3).

Figura 3. Evolução histórica dos combustíveis.



Fonte: Traduzido de Hefner III (2007)

O biogás é um gás produzido através do processo de digestão anaeróbia, sendo incolor, insolúvel, leve e de fraca densidade, constituído basicamente de 50-75% de metano (CH_4), 25-40% de dióxido de carbono (CO_2), 1-3% de hidrogênio (H_2), 0,1-0,5% de gás

sulfídrico (H_2S), 0,5-2,5% de nitrogênio (N_2), entre outros (CASSINI, 2003). Geralmente, à saída do digestor, o biogás apresenta-se saturado em vapor de água. A composição do biogás depende da natureza do resíduo digerido e das condições em que a digestão anaeróbia se processa (MONTE, 2010).

No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. O biogás apresenta um poder calorífico que pode variar entre 5000 e 700 kcal/m³, dependendo da composição dos gases. Uma vez purificado, esse valor chega a dobrar (PARCHEN, 1980). Deste modo, a utilização na geração de energia elétrica, mecânica e térmica, possibilita uma redução nos custos de produção.

O biogás pode ser recuperado para diversos fins, como: Combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição aos outros tipos de combustíveis; Cogeração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia; Cogeração de eletricidade e calor; Combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular (LOBATO, 2011).

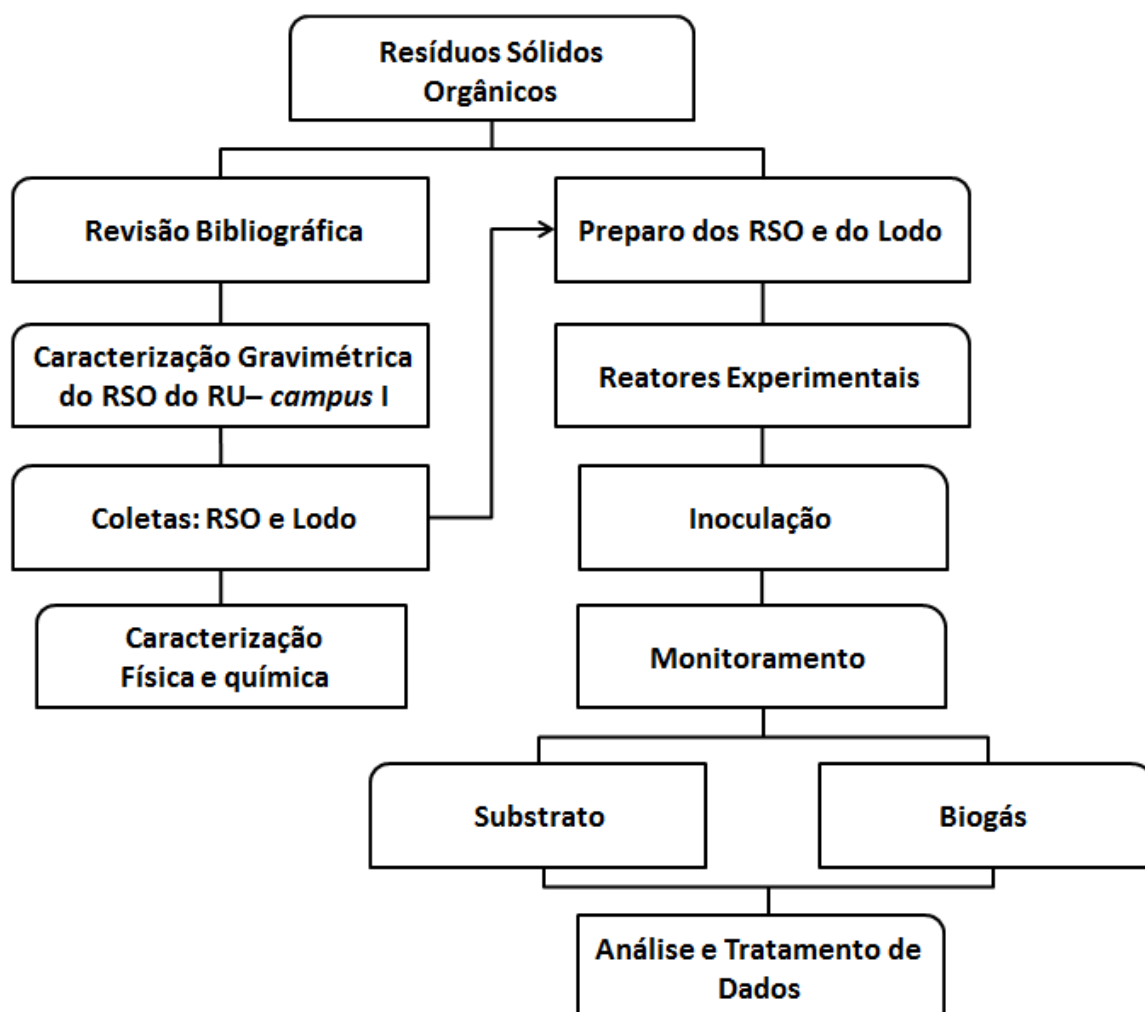
Na UFPB, o biogás gerado no processo de degradação anaeróbia dos RSO gerados pelo RU poderá ser utilizado, num primeiro momento, como energia termica na propria cozinha. Porém, através da purificação do biogás, pode-se ser usado também como energia elétrica.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia seguiu uma linha de estudos que se organizou inicialmente pelo diagnóstico dos RSO do RU da UFPB – *campus* I. Na etapa seguinte, realizou-se a coleta e caracterização dos resíduos e inóculos. Finalizando-se com a partida e monitoramento dos reatores experimentais, inoculação, e tratamento dos dados obtidos (Figura 4).

Figura 4. Fluxograma da metodologia.



Fonte: Próprio autor, 2015.

3.1 Caracterização Gravimétrica dos RSO do RU da UFPB – *campus* I

Por se tratar de um restaurante universitário, os resíduos sólidos enquadram-se na categoria orgânicos e foram subdivididos em resíduos provenientes do preparo das refeições e

rejeitos do consumo. Para a gravimetria, utilizaram-se dois baldes de 18L que foram previamente aferidos em balança digital, duas pás, balança e Equipamentos de Proteção Individual (EPI): máscaras, luvas e botas.

3.1.1 Restaurante Universitário da UFPB – *Campus I*

O principal gerador da fração orgânica de RSU no *campus I* da UFPB é o restaurante universitário. Basicamente suas sobras são compostas por Rejeitos Limpos (RL), resíduos descartados no preparado das refeições, como cascas e folhas, e Rejeitos Sujos (RS), resíduos deixados nos pratos pelos usuários.

O restaurante universitário da Universidade Federal da Paraíba – *campus I* (Figura 5), do município de João Pessoa, é uma unidade destinada a oferecer duas refeições diárias (almoço e jantar) com público alvo de aproximadamente 2000 estudantes de graduação.

Figura 5. Restaurante Universitário da UFPB – *Campus I*.



Fonte: Próprio autor, 2014.

Estimou-se diariamente, o fornecimento de cerca de 1200 refeições no horário do almoço e 800 refeições no jantar. Constatou-se que aproximadamente 60 funcionários que trabalhavam em áreas distintas, tais como: administrativa, cozinha e serviços gerais. O restaurante supracitado, só funciona de segunda à sexta-feira, das 11:00 às 13:00 horas, almoço, e das 17:00 às 18:00 horas, jantar.

Durante a caracterização, o RU estava passando por uma reforma de ampliação, que aumentou sua capacidade de atendimento para cerca de 2700 estudantes cadastrados, por este motivo foram reduzido os números de refeições no período da caracterização gravimétrica, sendo aproximadamente 700 refeições no almoço e 400 no jantar.

Por uma semana, de 17 a 21 de março de 2014, período em que o RU ainda não estava passando por reformas, realizou-se a pesagem dos resíduos gerados no preparo das refeições, compostas por rejeitos limpos (RL), e os resíduos descartados pelos usuários após as refeições, rejeitos sujos (RS), do almoço e jantar.

3.1.2 Resíduo Sólido Orgânico (RSO)

Aproximadamente 2,5kg de rejeitos, limpos e sujos, foram coletados separadamente, acondicionados, transportados até o Laboratório de Saneamento Ambiental (LABSAM), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECA) – UFPB, e mantidos sob refrigeração a $5\pm 2^{\circ}\text{C}$, até o momento de ser usado.

As coletas foram realizadas em 30 de maio de 2014 (primeira coleta), 11 de agosto de 2014 (segunda coleta) e 27 de abril de 2015 (terceira coleta).

As frações orgânicas coletadas tiveram suas amostragens com base na composição FORSU (Tabela 2), proposto por Pinto (2000), a fim de obter amostras de resíduos sólidos urbanos com composição e granulometria definidas, que possam ser reproduzidos e repetidos em quantidades e momentos diferentes (BARCELOS, 2009).

Tabela 2. Composição da FORSU utilizada no experimento.

Categoria	Elemento	Composição (%)	Peso (g)
Frutas	Pedaços de manga	2	48,54
	Casca de abacaxi	4,01	97,22
	Pedaços de tomate	1,86	45,18
	Casca/bagaço de laranja	9,26	224,66
Legumes Crus	Casca de batata doce	11,66	282,86
	Casca de chuchu	3,75	90,98
	Pedaços de cebola	2,18	52,91
	Pedaços de cenoura	3,52	85,48
	Casca de abobora	8,36	202,81
Legumes Cozidos	Pedaços de batata	6,75	163,65
	Pedaços de abobora	2,3	55,87
	Pedaços de beterraba	1,77	42,9
Hortaliças	Pedaços de alface	1,08	26,14
	Casca de repolho	4,34	105,10
Pão/Bolo	Pão	2,92	70,8
Carne	Pele/Pedaços de frango cru	5,59	135,57
	Pele/Pedaços de carne	5,38	130,56
Queijo	Queijo	1,24	30,03
Arroz	Arroz	4,25	103,05
Feijão	Feijão	10,91	264,54
Macarrão	Macarrão	6,87	166,72
Total		100	2425,57

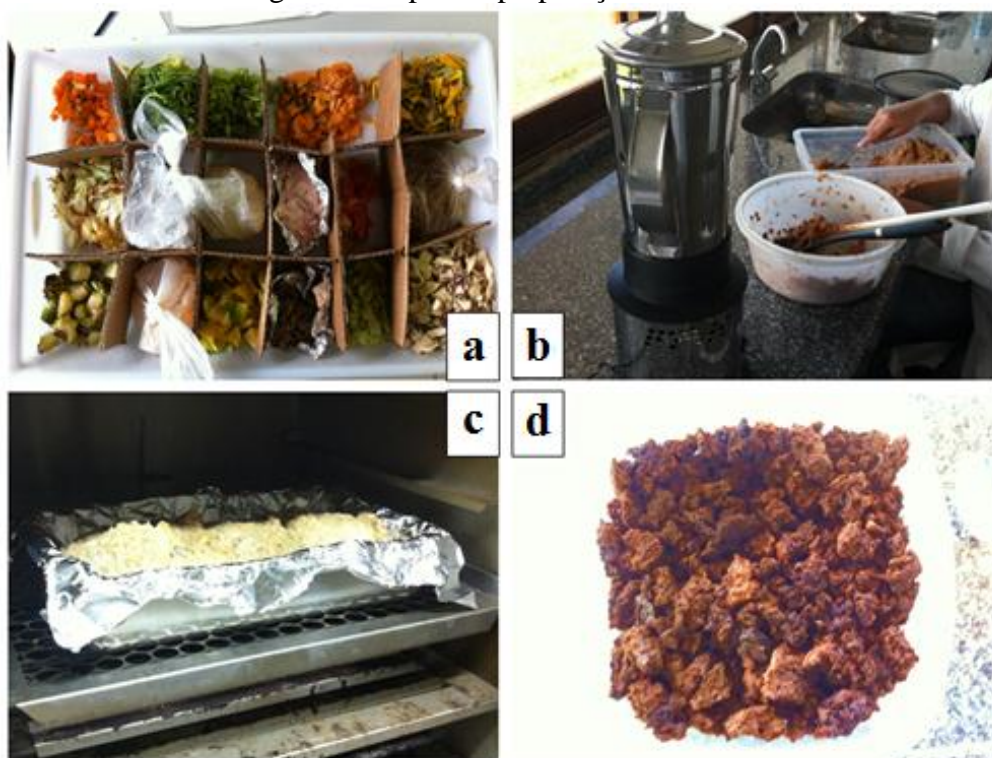
Fonte: Próprio autor, 2014.

Conforme a composição mostrada na Tabela 2, à preparação da fração orgânica para os reatores experimentais seguiu a metodologia de SILVA (2012) com seguinte procedimento:

- a) Os resíduos foram separados em um recipiente plástico e recortados, manualmente, em pedaços de aproximadamente 2,5cm, com o auxílio de tesoura e faca (Figura 6a).
- b) Em seguida, foram pesados separadamente conforme as categorias da Tabela 3.
- c) Após pesagem, a amostra foi toda misturada e triturada em liquidificador industrial, com intuito de promover a redução do tamanho dos resíduos e a homogeneização da amostra (Figura 6b).
- d) Posteriormente, a amostra foi colocada em uma sacola plástica, mantendo-a em repouso por, aproximadamente, dois dias, em temperatura ambiente, a fim simular o tempo de espera.

- e) Após aproximadamente dois dias, foi retirada cerca de 1kg para a caracterização física e química da amostra e o restante foi colocado na estufa a $100\pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 36 horas, para a obtenção do material desidratado (seco) (Figura 6c).
- f) Ao ser retirada da estufa, a amostra foi mantida em dessecador até atingir a temperatura ambiente, e, novamente triturada, sendo em seguida, mantida sob refrigeração a $5\pm 2^{\circ}\text{C}$, até ser utilizada na inoculação dos reatores experimentais (Figura 6d).

Figura 6. Etapas de preparação dos RSO.



Fonte: Próprio autor, 2014.

A fração orgânica foi caracterizada, através de parâmetros físicos e químicos (Tabela 3), como índice de acidez e identificar os compostos orgânicos e inorgânicos, por meio do potencial hidrogeniônico (pH) e da serie de sólidos totais, com a finalidade de buscar similaridades entre os ensaios. As análises seguiram metodologias e adaptações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Tabela 3. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos para a caracterização do RSO.

Parâmetro	Método
Massa Específica	Determinação da densidade de materiais betuminosos
Granulometria	Peneiramento
Potencial Hidrogeniônico (pH)	pHmetro de bancada – Eletrodo
Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF)	Determinação de sólidos em amostras semissólidas (análise de amostras)

Fonte: Próprio autor, 2014.

3.1.3 Inóculo

Os inóculos utilizados foram coletados em dois locais distintos: 1) Lagoa anaeróbia que compõe o módulo III da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Mangabeira, no município de João Pessoa; e 2) Reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) da ETE do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *campus* Cabedelo, no município Cabedelo. Em todas as coletas, as amostras foram transportadas para o LABSAM e armazenadas sob refrigeração a $5\pm 2^{\circ}\text{C}$, até o momento das análises.

A lagoa anaeróbia da ETE Mangabeira mede 73x73m, profundidade de 3m e volume útil de 12.150m^3 (Figura 7). Coletou-se aproximadamente 9L de lodo em 24 de abril de 2014 (primeira coleta), 13 de agosto de 2014 (segunda coleta) e 04 de maio de 2015 (terceira coleta), a temperatura ambiente média de 30°C , com duração aproximada de uma hora nas três coletas.

Figura 7. Lagoa Anaeróbia do Módulo III da ETE de Mangabeira, João Pessoa-PB.



Fonte: Próprio autor, 2014.

Para a coleta utilizou-se: duas garrafas em polietileno tereftalato (PET) de 5 litros, um coletor tubular em policloreto de vinila (PVC), um funil e EPI (jalecos, mascarar, luvas e chapéu/boné), como mostra a Figura 8.

Figura 8. Registro do momento da coleta na ETE de Mangabeira, João Pessoa-PB.



Fonte: Próprio autor, 2014.

O reator UASB mede 2,20m de largura, 2,50m de altura e volume útil de $9,69\text{m}^3$ (Figura 9). Coletou-se aproximadamente 8L de lodo em 27 de abril de 2015, a temperatura ambiente média de 29°C , com duração aproximada de duas horas.

Figura 9. ETE do IFPB – *campus* Cabedelo.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Para a coleta utilizou-se: duas garrafas PET com volume de 5 litros, um coletor tubular em PVC, um funil e EPI (jalecos, mascarar, luvas e chapéu/boné), como mostra a Figura 10.

Figura 10. Registro do momento da coleta na ETE do IFPB – *campus* Cabedelo.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Adotou-se o lodo anaeróbico como inóculo devido à facilidade de disponibilidade e o por possuir uma comunidade microbiana composta por microrganismos fermentadores que auxiliam o processo de digestão anaeróbia.

A caracterização do lodo foi realizada a partir de cinco parâmetros (Tabela 4), de acordo com a metodologia proposta pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Vale ressaltar que todos os parâmetros foram realizados em triplicata.

Tabela 4. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos para a caracterização do lodo anaeróbico.

Parâmetro	Método
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Digestão de pequenas amostras
pH	pHmetro de bancada – Eletrodo
Sólidos Sedimentáveis	Cone Imhoff
ST, STV e STF	Determinação de sólidos em amostras semissólidas
Umidade	Determinação do teor de umidade de amostras fluidas do lodo

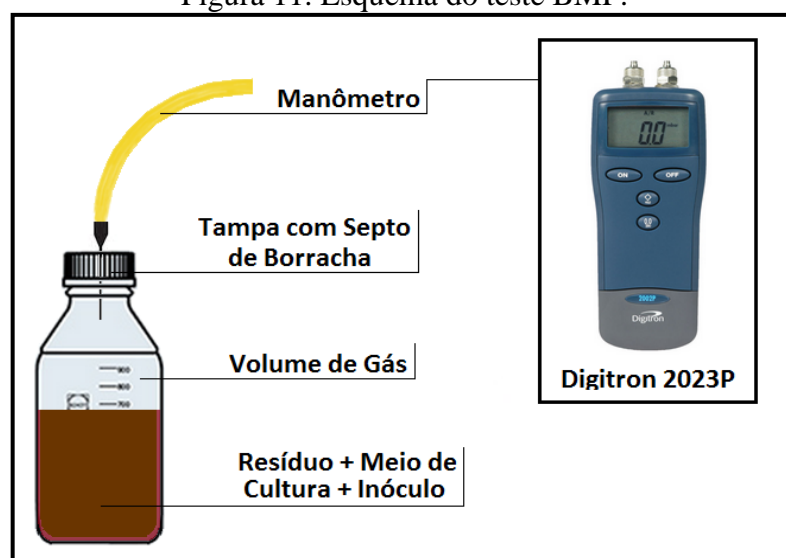
Potencial Hidrogeniônico (pH), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF).Fonte: Próprio autor, 2014.

3.2 Parte Experimental

3.2.1 Incubação

As amostras foram incubadas em frascos de vidro Schott de 250 mL com tampa e septo, hermeticamente fechados para garantir uma vedação perfeita do gás (Figura 11). Os reatores foram preenchidos até 160 mL nos ensaios I e II e até 150 mL no ensaio III, sendo mantidos em condição interna anaeróbia sob a presença de uma mistura gasosa (CO_2/N_2).

Figura 11. Esquema do teste BMP.



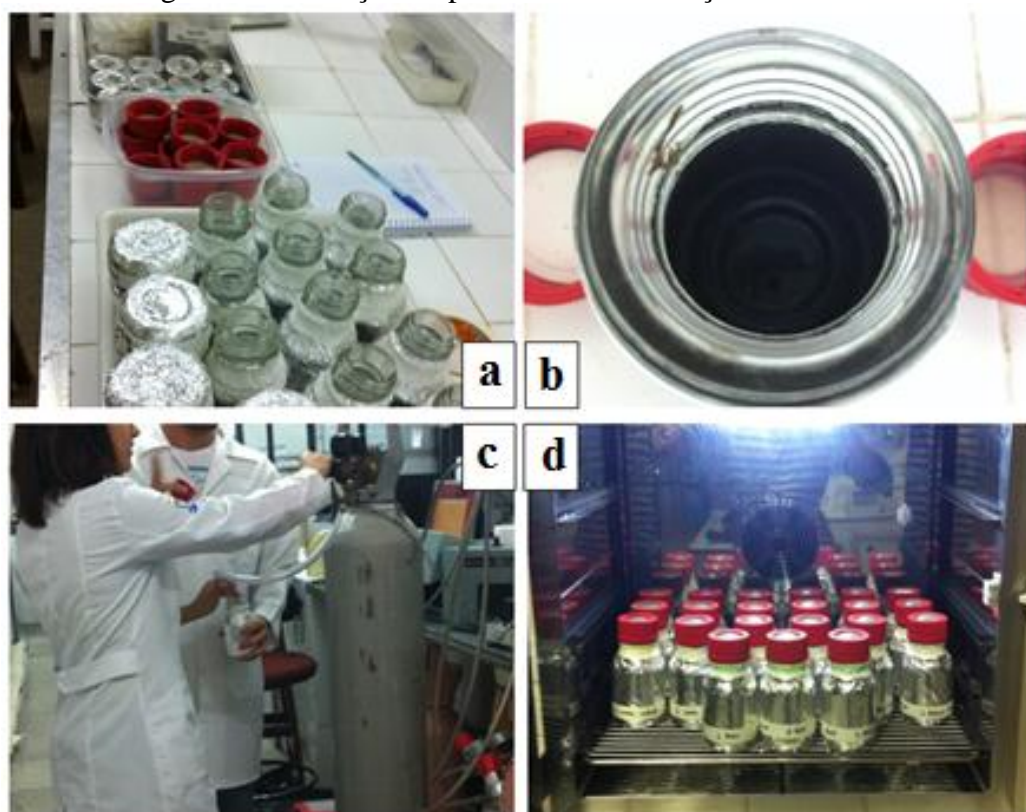
Fonte: Próprio autor, 2013.

Procedimento para o teste BMP seguiu as determinadas etapas:

- Prepararam-se os frascos Schott com papel alumínio e etiquetas de identificação, de acordo com cada composição (Figura 12a).
- Pesaram-se todos os frascos com tampas e septos.
- Adicionaram-se aos frascos amostra sólida do substrato (resíduos sólidos orgânicos).
- Adicionaram-se a solução nutritiva e o inóculo desejado sob lenta agitação (Figura 12b).
- Foram realizadas medições de pH.
- Borbulhou-se o N_2 em cada frasco por aproximadamente 1 minuto (Figura 12c).
- Fecharam-se os frascos com um septo e tampa, cada, deixando-os em repouso por uma

- hora.
- h) Pesaram-se os frascos fechados.
 - i) Armazenaram-se os reatores em estufa a temperatura controlada de 35°C (Figura 12d).
 - j) Registraram-se a pressão como pressão inicial, após, aproximadamente, 30 minutos.

Figura 12. Ilustração do processo de inoculação dos reatores.



Fonte: Próprio autor, 2014.

A solução nutritiva adicionada nos reatores seguiu a composição (Tabela 5) de Silva (2012), que utilizava nos processos de atividade metanogênica específica (AME). A preparação das soluções nutritivas ocorriam, aproximadamente, 30 minutos antes da incubação e apresentaram pH variando entre $7 \pm 0,2$.

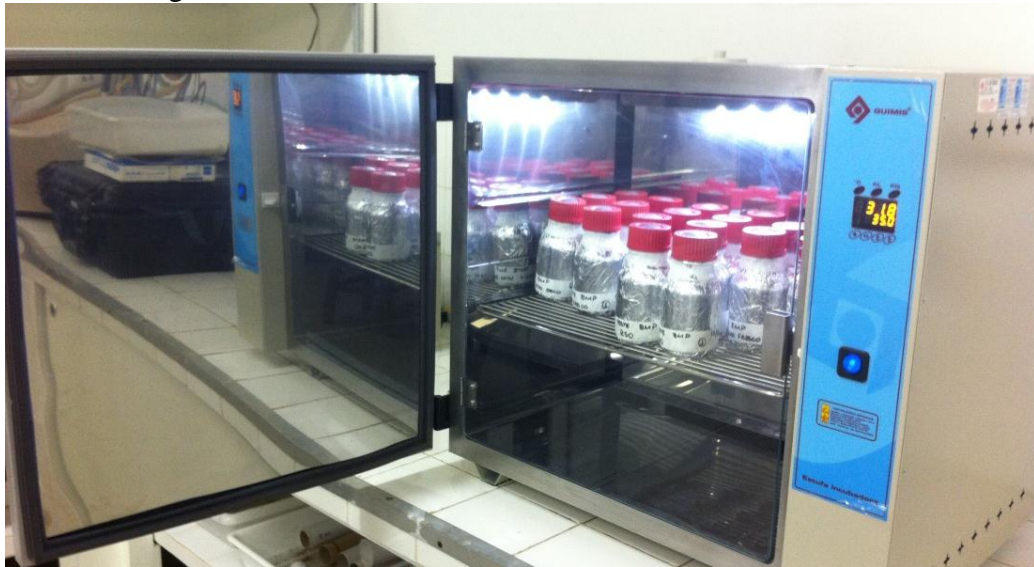
Tabela 5. Composição da solução nutritiva utilizada nos ensaios.

Reagente	Fórmula Química	Peso (g/L)
Fosfato de Potássio Monobásico	KH_2PO_4	3,0
Fosfato de Potássio Dibásico	K_2HPO_4	2,0
Cloreto de Amônio	NH_4Cl	0,5
Bicarbonato de Sódio	NaHCO_3	5,0

Fonte: Silva (2012)

Todos os ensaios foram mantidos, durante 90 dias, em uma incubadora (estufa micro processada de cultura e bacteriologia modelo Q316M2, dimensões internas 36x40x36), sem agitação, a $35\pm 5^{\circ}\text{C}$ (Figura 13), com monitoramento periódico da temperatura, pressão e umidade. A opção por não utilizar agitação nos reatores decorreu do trabalho de Silva (2012) e Souto (2007), que não encontram diferenças significativas ao avaliar a atividade metanogênica com e sem agitação.

Figura 13. Vista da incubadora com os reatores inoculados.



Fonte: Próprio autor, 2014.

3.2.2 Reatores Experimentais

Para a realização deste trabalho, buscou-se realizar testes de adaptação ao BMP, através de três (3) ensaios (Figura 14), que tiveram o objetivo de avaliar qual a composição que melhor viabiliza o processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UFPB – *campus I*.

Os ensaios I e II foram quantificados, adaptados e seguem a metodologia de Silva (2012) adaptado de Moraes Junior (2006), já o ensaio III seguiu a metodologia de Silva (2014).

Figura 14. Organização dos reatores do ensaio III na estufa incubadora.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Ensaio I: Estudou-se o potencial do inóculo em seu aspecto natural (fresco) e desidratado (seco). Com base na literatura, optou-se por adicionar glicose em 4 reatores, no intuito de garantir de alimento para os microrganismos durante a adaptação dos mesmos ao meio de degradação . Para isso, foram inoculados quatorze (14) reatores experimentais de 250 mL. As composições dos reatores estão quantificadas na Tabela 6.

Tabela 6. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio I.

Quantidade	Sigla	Solução Nutritiva	Resíduo Orgânico	Lodo Anaeróbio (fresco)	Lodo Anaeróbio (seco)	Glicose
2	RSO	155mL	5g	-	-	-
2	LS	150mL	-	-	5g	-
2	LF	138mL	-	22mL	-	-
2	RSOLS	145mL	5g	-	5g	-
2	RSOLF	133mL	5g	22mL	-	-
2	RSOLSG	125mL	5g	-	5g	20mL
2	RSOLFG	113mL	5g	22mL	-	20mL

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio Seco (LS), Lodo Anaeróbio Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLFG).

Fonte: adaptado de Silva (2012)

Ensaio II: Buscou-se validar as composições que tiveram melhores resultados no primeiro ensaio. Os reatores foram inoculados conforme composições descritas na Tabela 7.

Tabela 7. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio II.

Quantidade	Sigla	Solução Nutritiva	Resíduo Orgânico	Lodo Anaeróbio	Glicose
2	RSO	155mL	5g	-	-
2	LODO	138mL	-	22mL	-
2	RSOL	133mL	5g	22mL	-
2	RSOLG	113mL	5g	22mL	20mL

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLG).

Fonte: adaptado de Silva (2012)

Ensaio III: Avaliou-se o processo de digestão ao utilizar inóculos diferentes, o lodo da lagoa anaeróbia da ETE Mangabeira, utilizado nos ensaios I e II, e o lodo do reator UASB. Todavia, usaram-se proporções diferentes as que foram usadas nos ensaios anteriores com base nos resultados já obtidos. Para tal, quatorze (14) reatores foram inoculados, sendo 4 deles com adição de glicose, conforme as composições dos reatores descritas na Tabela 8.

Tabela 8. Composição dos Reatores Experimentais do Ensaio III.

Quant.	Sigla	Solução Nutritiva	Resíduo Orgânico	Lodo Anaeróbio (Lagoa ETE)	Lodo Anaeróbio (UASB)	Glicose
2	RSO	142mL	8g	-	-	-
2	LODO UASB	40mL	-	-	110mL	-
2	LODO ETE	40mL	-	110mL	-	-
2	RSOL UASB	32mL	8g	-	110mL	-
2	RSOL ETE	32mL	8g	110mL	-	-
2	RSOLG UASB	12mL	8g	-	110mL	20mL
2	RSOLG ETE	12mL	8g	110mL	-	20mL

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo Anaeróbio da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: adaptado de Silva (2014)

A Tabela 9 apresenta as condições iniciais dos reatores no processo de incubação dos três (3) ensaios, a fim de garantir os dados primários que foram comparados com os obtidos em 60 e 90 dias.

Tabela 9. Condições iniciais do processo de incubação nos três (3) ensaios.

Ensaio	Reator (sigla)	Peso do Frasco (g)	Peso do Frasco + Meio (g)	Volume de Gás no Frasco* (mL)	Temperat. de incubação (°C)	
I	RSO 1	251,82	408,88	155	35±5	
	RSO 2	252,32	409,36	155	35±5	
	LS 1	251,96	405,84	155	35±5	
	LS 2	251,84	406,73	155	35±5	
	LF 1	252,47	411,57	155	35±5	
	LF 2	252,68	408,36	155	35±5	
	RSOLS 1	251,23	403,31	155	35±5	
	RSOLS 2	252,30	405,09	155	35±5	
	RSOLF 1	253,48	411,55	155	35±5	
	RSOLF 2	251,34	406,57	155	35±5	
	RSOLSG 1	251,51	404,18	155	35±5	
	RSOLSG 2	252,08	405,29	155	35±5	
	RSOLFG 1	251,48	410,37	155	35±5	
	RSOLFG 2	252,72	409,61	155	35±5	
II	RSO 1	252,66	413,16	155	35±5	
	RSO 2	252,07	413,28	155	35±5	
	LODO 1	251,79	412,37	155	35±5	
	LODO 2	252,01	412,65	155	35±5	
	RSOL 1	252,30	413,73	155	35±5	
	RSOL 2	251,17	414,19	155	35±5	
	RSOLG 1	253,14	411,17	155	35±5	
	RSOLG 2	252,02	410,29	155	35±5	
	III	RSO 1	250,16	398,96	165	35±5
		RSO 2	251,28	398,77	165	35±5
LODO UASB 1		249,79	398,33	165	35±5	
LODO UASB 2		250,24	400,59	165	35±5	
LODO ETE 1		249,94	400,92	165	35±5	
LODO ETE 2		250,15	401,18	165	35±5	
RSOL UASB 1		249,44	402,93	165	35±5	
RSOL UASB 2		249,33	397,82	165	35±5	
RSOL ETE 1		250,15	402,85	165	35±5	
RSOL ETE 2		250,7	402,82	165	35±5	
RSOLG UASB 1		250,75	401,91	165	35±5	
RSOLG UASB 2		250,87	400,04	165	35±5	
RSOLG ETE 1		250,75	401,37	165	35±5	
RSOLG ETE 2		250,67	401,19	165	35±5	

* Volume disponível no reator para a produção do biogás. Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio Seco (LS), Lodo Anaeróbio Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLFG), Lodo Anaeróbio Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLG), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo Anaeróbio da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo

Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

3.2.3 Monitoramento

Durante o período de incubação, realizou-se o controle da temperatura interna da estufa ($35\pm 5^{\circ}\text{C}$) para garantir um ambiente favorável a degradação, medição da pressão interna e coleta ou retirada do biogás produzido periodicamente, em intervalos de 2 e 3 dias. Além disso, retiraram-se reatores em todos os ensaios para a caracterização física e química do meio degradado, nos períodos de 60 e 90 dias.

O monitoramento da produção de biogás efetuou-se através das análises da pressão interna dos reatores, de acordo com o volume acumulado de biogás e balanço de massa.

3.2.3.1 Pressão Interna

A medição da pressão interna foi realizada através de um manômetro digital de precisão Digetron 2023P, acoplado a uma mangueira de látex, com 3cm, e uma agulha (Figura 15). Este aparelho efetua a medição da diferença de pressão interna e externa, possui precisão de cerca de 2mbar e uma pressão máxima de 2000 mbar.

Figura 15. Manômetro utilizado no estudo.



Fonte: Próprio autor, 2014.

É necessário que se tenha o monitoramento da pressão interna dos reatores, pois há o risco de ruptura do septo (Figura 16), perda da amostra e pequenas explosões que venham a ocorrer devido o vazamento do biogás.

A medição da pressão consistia em após ligar o aparelho, era inserida a agulha no septo dos reatores e se aguardava até a estabilização do resultado (Figura 17).

Figura 16. Reator com alta pressão e risco de ruptura do septo.



Fonte: Próprio autor, 2014.

Figura 17. Mediação da pressão interna dos reatores.



Fonte: Próprio autor, 2014.

3.2.3.2 Coleta e Análise quantitativa do Biogás

Durante o período de incubação, fez-se a aferição do volume interno dos reatores, nos três ensaios. Porém, apenas no ensaio III foi possível realizar a caracterização do biogás quanto à composição do metano. Nos ensaios I e II, ocorrem problemas na logística da coleta e transporte do biogás que impossibilitaram a sua caracterização.

A coleta do biogás, no ensaio III, foi realizada no momento em que a pressão interna do reator se encontrava elevada, para isso, utilizou-se seringas de plástico de 20mL, adaptadas a válvulas de três vias (torneira) e agulha para a coleta do biogás, devidamente identificadas (Figura 18).

Figura 18. Sistema de coleta do biogás.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Após coleta, as amostras foram transportadas até o Laboratório de Automação e Instrumentação em Química Analítica (LAQA) do Centro de Ciências Exatas da Natureza (CCEN), da UFPB, onde se procedeu à caracterização do biogás quanto ao teor de metano no cromatógrafo gasoso.

O cromatógrafo gasoso Shimadzu, modelo CG, série 2014, com detectores de ionização em chama (FID), estava conectado a um computador com programa adequado para o processamento e visualização e armazenamento dos dados (Figura 19).

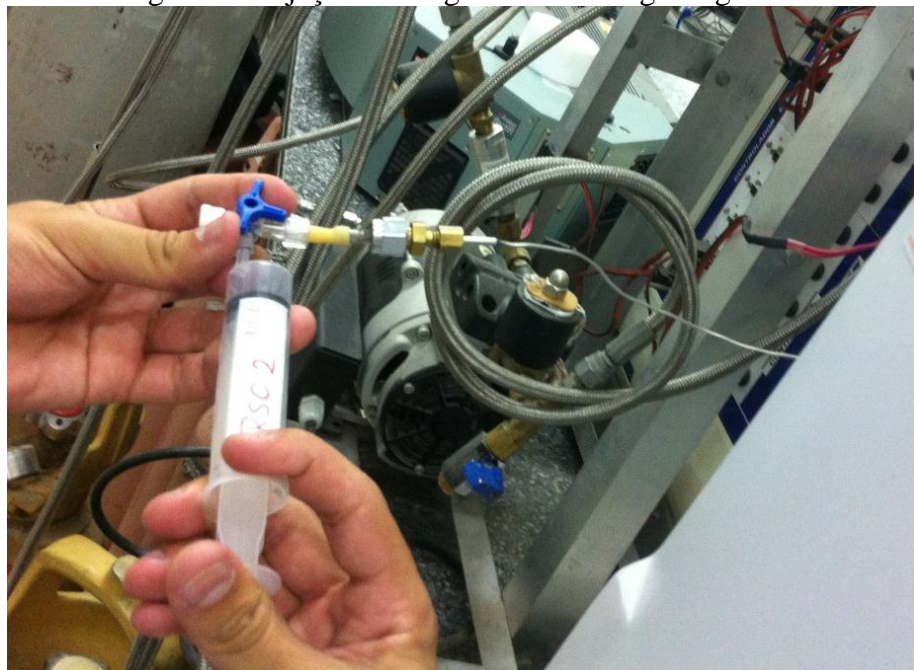
Utilizando a seringa com a amostra injetou-se biogás no cromatografo gasoso (Figura 20). Apenas 50 μL do biogás foram conduzidos por um gás inerte, hélio, pela coluna cromatográfica que tinha a função de separar o metano dos demais gases. As características do procedimento da analise estão na Tabela 10.

Figura 19. Cromatógrafo utilizado.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Figura 20. Injeção do biogás no cromatógrafo gasoso.



Fonte: Próprio autor, 2015.

Tabela 10. Condições cromatográficas da análise das amostras do Ensaio III.

CARACTERÍSTICAS	GASPRO
Temperatura de Injeção (°C)	240
Temperatura da Coluna (°C)	90
Temperatura do Detector (°C)	250
Fluxo da Coluna (mL/min)	1,40
Tempo de Retenção (min)	3
Partição	SPLITLESS

Fonte: Próprio autor, 2015.

A porcentagem de metano presente no biogás gerados nos reatores foi determinada comparando a área do pico de cada amostra com a área do pico do gás puro (padrão), através da Equação 10.

$$\%CH_4_{AMOSTRA} = \frac{\text{Área do pico do } CH_4 \text{ na amostra}}{\text{Área do pico do } CH_4 \text{ puro}} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

3.2.4 Caracterização Física e Química do Meio de Reação

A caracterização física e química foi realizada no início e no final de cada etapa por meio de seis (6) parâmetros (Tabela 11). Porém, a análise de alcalinidade foi aplicada apenas ao ensaio III e só a partir do ensaio II que se verificou a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Esses parâmetros foram sendo inseridos aos já realizados devido à necessidade de compreender um pouco mais o processo de decomposição do meio.

Tabela 11. Descrição dos parâmetros e seus respectivos métodos utilizados na caracterização dos meios.

Parâmetro	Método
Alcalinidade	Determinação por titulação potenciométrica
DBO₅	Manométrico através de sensores e isento de mercúrio
DQO	Digestão de pequenas amostras
pH	Phmetro de bancada – Eletrodo
SS, SSV e SSF	Determinação dos sólidos suspensos e não filtráveis

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Potencial Hidrogeniônico (pH), Sólidos Suspensos (SS), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) e Sólidos Suspensos Fixos (SSF).

Fonte: Próprio autor, 2014.

3.3 Análises dos dados

Os resultados foram apresentados em forma de tabelas e gráficos, a fim de facilitar a compreensão e comparação entre as amostras.

Os valores do volume acumulado de biogás foram apresentados em forma de gráficos de série temporal. Para isso, os dados coletados foram tratados em planilhas do Microsoft Excel 2010 (Apêndice A), utilizando as Equações 11 e 12, que transformam os resultados obtidos para as condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Considerando 1 atm, a pressão atmosférica do LABSAM, e 308 K, corresponde a temperatura de 35°C.

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1 \text{ CNTP}} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2 \text{ LAB}} \quad \text{Equação 11}$$

$$\frac{1 \text{ atm} \times V_1}{273 \text{ K CNTP}} = \frac{1 \text{ atm} \times V_2}{308 \text{ K LAB}} \quad \therefore V_1 = 0,886 \times V_2 \quad \text{Equação 12}$$

A fim de determinar a taxa de geração do biogás, em NmL/dia, utilizou-se a Equação 13, que associa o volume acumulado aos dias corridos.

$$\text{Taxa de Geração de Biogás} = \frac{\text{Volume Acumulado}}{\text{Número de Dias Corridos}} \quad \text{Equação 13}$$

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os dados obtidos na caracterização gravimétrica da FORSU do RU/UFPB – *campus* I, na caracterização da FORSU e dos inóculos utilizados, nas análises do meio degradado e da produção de biogás como análise do comportamento do processo de digestão anaeróbia.

4.1 Caracterização Gravimétrica dos RSO do RU/UFPB – *campus* I

Para calcular a amostra real, fez-se um cálculo de estimativa de geração de resíduo em dias de funcionamento normais, estimou-se que, o RU/UFPB do *campus* I chegue a gerar aproximadamente 422,16 kg de resíduos no almoço e 535,02 kg de resíduos no jantar (Tabela 12).

Tabela 12. Quantificação da geração de RSO do RU/ UFPB – *campus* I.

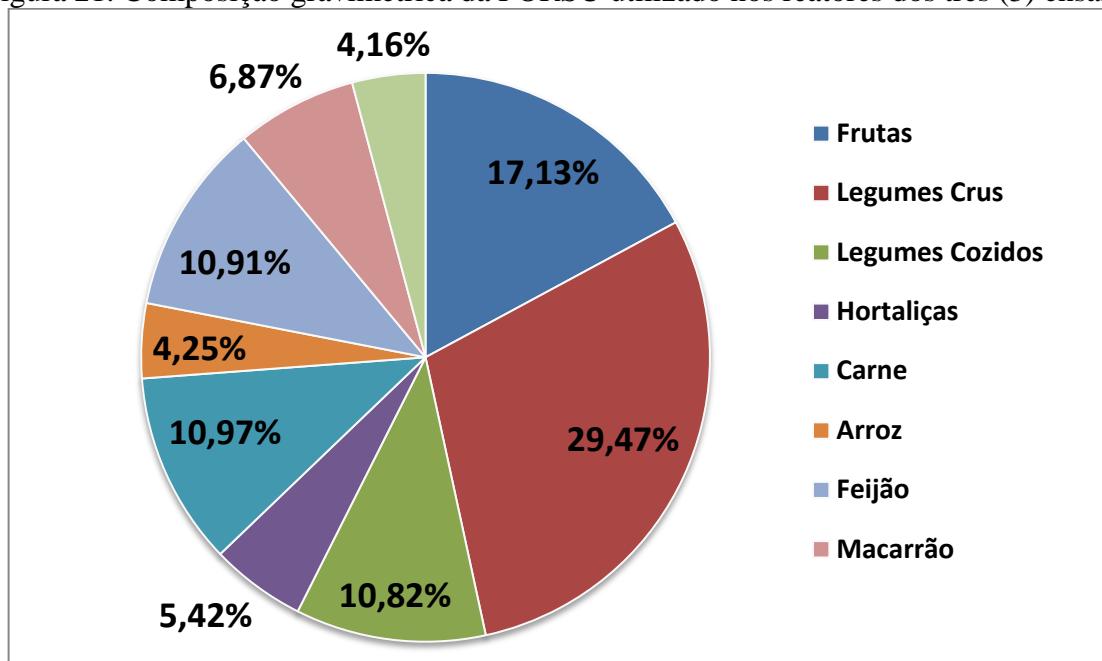
Dia	Almoço			Jantar		
	RL (%)	RS (%)	Peso (Kg)	RL (%)	RS (%)	Peso (Kg)
17/03	29,77	70,23	218,3	43,42	56,58	139,8
18/03	31,44	68,56	186,7	14,70	85,30	123,15
19/03	41,87	58,13	194,4	39,22	60,73	304,05
20/03	71,75	28,25	387,8	30,92	69,08	416,45
21/03	6,84	93,16	244,1	15,91	84,09	354,1
		TOTAL	1231,3		TOTAL	1337,55
		MÉDIA	246,26		MÉDIA	267,51

Resíduo Limpo (RL), Resíduo Sujo (RS).

Fonte: Próprio autor, 2014.

A geração dos resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário está diretamente interligada ao cardápio do dia, variando o descarte dos rejeitos limpos e sujos e, conseqüentemente, a composição dos resíduos gerados pelo restaurante. Para os três ensaios, usou-se uma composição gravimétrica da FORSU padrão (Figura 21), a fim de manter as mesmas características do substrato nos reatores.

Figura 21. Composição gravimétrica da FORSU utilizado nos reatores dos três (3) ensaios.



Fonte: Próprio autor, 2014.

O FORSU utilizado apresentou 51,8% de resíduos *in natura*, aqueles que não passaram por processos de cozimento ou adição de algum condimento, encontrando-se entre valores utilizados por Silva (2012), 48,2%, e Pinto (2000), 59%, e, visto que, em ambos os casos, o processo de degradação ocorreu sem muitos problemas, adotou-se, praticamente, as mesmas características.

4.2 Caracterização do Resíduo Sólido Orgânico e do Inóculo

4.2.1 Resíduo Sólido Orgânico

A digestão anaeróbia pode ser afetada pelo tipo da FORSU, que, devido a sua origem, pode influenciar na produção de biogás e, conseqüentemente, de metano (POVINELLI, 2000).

A Tabela 13 mostra os resultados da caracterização física e química da FORSU dos três (3) ensaios.

Tabela 13. Caracterização físico-química das amostras de resíduos orgânicos após secagem nos ensaios I, II e III.

Parâmetros	Fração Orgânica		
	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III
pH	3,8	3,8	5,48
Densidade (g/cm³)	1,39	1,42	1,36
ST (%)	28	66	58
STV (%)	96	97	70
STF (%)	4	3	30
Granulometria (%)			
D*≤0,42	24,27	27,50	32
D=0,59	45,73	29,28	48,08
D=1,18	16,13	22,09	13,12
D=2,00	10,03	18,68	4,78
D=4,00	3,57	2,42	0,67

Diâmetro (D), Potencial Hidrogeniônico (pH), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF).

Fonte: Próprio autor, 2015.

A granulometria dos alimentos é de grande importância no processo de digestão. Quanto menor a partícula, maior é a superfície que pode ser atacada e digerida pelos microrganismos. Assim, acreditou-se que, devido a maior parte da amostra de fração orgânica apresentar diâmetro $\leq 0,59$ mm, o processo de degradação anaeróbia ocorreria mais rápido, pelo fato da homogeneização acontecer em um período de tempo menor. Porém, Catelli (1996) diz que, a redução da granulometria poderá aumentar a taxa de hidrólise, resultando em grande acumulação de ácido orgânico, baixando o pH, o que inibiria a metanogênese.

Observou-se que os valores de pH da fração orgânica encontram-se dentro da faixa da acidez apresentado por Elbeshbishy, Nakhla e Hafez (2012), Silva (2012) e Barcelos (2009). Esta condição merece destaque, devido não favorecer a atividade metanogênica, fato que pode ter comprometido o processo nos ensaios.

4.2.2 Inóculo

Na Tabela 14 apresenta-se os resultados dos parâmetros analisados do lodo anaeróbio nos três ensaios. Os valores são exibidos em média (VM), pois todas as análises foram realizadas em triplicatas.

Tabela 14. Caracterização físico-química do lodo da lagoa anaeróbia da ETE Mangabeira.

Parâmetro	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III	Média e Desvio Padrão
	VM	VM	VM	
pH	6,75	6,65	7,21	6,87±0,244
DQO (gO ₂ .L ⁻¹)	36,28	50,61	57,63	48,17±8,885
ST (g.L ⁻¹)	56,18	89,8	151,48	99,15±39,464
STV (g.L ⁻¹)	32,22	61,0	89,14	60,79±23,238
STF (g.L ⁻¹)	23,96	28,8	62,33	38,36±17,062
Sólidos Sedimentáveis (g.L ⁻¹)	0,9	0,97	0,75	0,87±0,092
Umidade (%)	99	95	92	95,3±2,867

Potencial Hidrogeniônico (pH), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Sólidos Totais Fixos (STF), Valor Médio (VM).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Partindo dos valores obtidos nos ensaios I e II ao usar o lodo da lagoa anaeróbia da ETE de Mangabeira, buscou-se comparar dois inóculos no ensaio III, sendo, o lodo já usado nos primeiros ensaios e o lodo do reator UASB da ETE do IFPB – *campus* Cabedelo (Tabela 15).

Tabela 15. Caracterização físico-química do lodo anaeróbio do reator UASB da ETE/IFPB – *campus* Cabedelo.

Parâmetro	Ensaio III
	Valor Médio
pH	7,36
DQO (gO ₂ .L ⁻¹)	17,53
ST (g.L ⁻¹)	2,97 ou 0,3%
STV (g.L ⁻¹)	1,83 ou 61,64%
STF (g.L ⁻¹)	1,14 ou 38,36%
Sólidos Sedimentáveis (g.L ⁻¹)	0,1
Umidade (%)	99,8

Potencial Hidrogeniônico (pH), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Sólidos Totais Fixos (STF).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Ao analisar os resultados das Tabelas 14 e 15, constatou-se que os inóculos utilizados, apresentaram uma grande variação de concentrações de Sólidos Totais (ST) de 56,18; 89,8 e 151,48 g.L⁻¹ para o lodo da lagoa anaeróbia, enquanto que, o lodo do reator UASB apresentou apenas 2,97 g.L⁻¹. Este parâmetro é o mais utilizado para a avaliação dos teores de matéria orgânica no lodo, pois é possível verificar o que estará disponível para bactérias e o quanto foi consumido do meio durante os ensaios.

O lodo da lagoa anaeróbia da ETE mostrou altos valores de DQO_{total} , evidenciando uma elevada carga de matéria orgânica de difícil degradação. Enquanto que, o lodo anaeróbio UASB, encontrou-se dentro da faixa indicada nos estudos de Elbeshbishy, Nakhla e Hafez (2012), entre $18,1 \pm 2,6$.

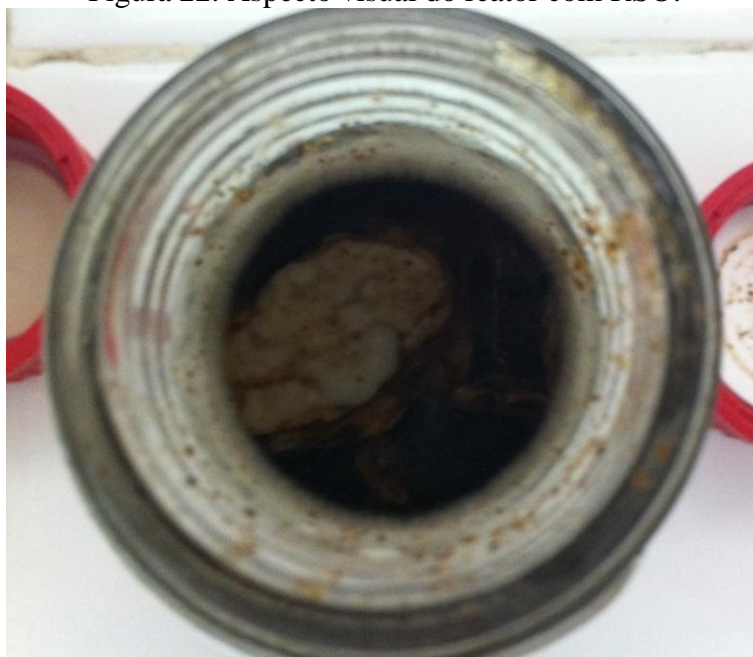
Os valores de pH dos inóculos estiveram dentro do limite recomendado por diversos autores (RAMOS, 2008; SILVA, 2014; ELBESHISHY, NAKHLA e HAFEZ, 2012), com valores entre 6,8 e 7,8.

Os valores obtidos para o teor de água, entre 92 – 99,8%, se assemelham aos valores de Silva (2012) e Gadelha (2005). Este parâmetro pode influenciar positivamente o processo de crescimento dos microrganismos dentro do reator, pois ambientes com valores elevados de teor de água são habitats ideais para a proliferação microbiana.

4.3 Degradação do meio

Ao abrir os reatores, observou-se uma coloração marrom escura, odor característico ao processo de degradação de matéria orgânica, em estado avançado, principalmente nos reatores que tinham a glicose em sua composição, e a presença de bolores de microrganismos nos reatores RSO de todos os ensaios (Figura 22).

Figura 22. Aspecto visual do reator com RSO.



Fonte: Próprio autor, 2014.

4.3.1 Balanço de massa e pH

Na análise do balanço de massa, observou-se que os reatores do ensaio II obtiveram melhores resultados de balanço de massa dos reatores indicando melhor degradação do meio para o período de 90 dias. Já os reatores do ensaio III tiveram menores valores para o meio degradado (Tabela 16).

Os reatores compostos apenas pelo resíduo orgânico e solução nutritiva (RSO), mostraram valores significativos de degradação do meio nos ensaios I e II. O mesmo não aconteceu no ensaio III, provavelmente devido à diminuição da proporção de resíduo orgânico adicionado aos reatores e ao nível de acidez ao qual o meio se encontrava, entre 5,5 e 6,3. Porém, acredita-se que seria necessário um maior tempo de reação para que o meio atingisse a fase metanogênica ou correção do pH, diminuindo assim a inibição do processo (SILVA, 2012).

No ensaio I, buscou-se avaliar o comportamento da degradação do meio ao adicionar o inóculo úmido e seco, com e sem glicose. Observou-se que os reatores com lodo seco não tiveram boa eficiência no processo de digestão anaeróbia, fato explicado por Lopes *et al.* (2004), em que a queda da umidade não contribuiu para o metabolismo dos microrganismos, o que pode ter sido o que interferiu neste ensaio.

O reator que perdeu maior quantidade de massa no ensaio I foi RSOLF, no ensaio II RSOLG e no ensaio III RSOLG ETE, sendo 3,12g, 3,55g e 1,52g, respectivamente. Nestes, a glicose mostrou-se ser útil para a alimentação inicial e desenvolvimento das bactérias até o período em que o inóculo começa a consumir a matéria orgânica, ou seja, quando começa a adaptação do meio.

Tabela 16. Balanço de massa e pH dos reatores nos três (3) ensaios.

Ensaio	Reator	Meio de Reação – Inicial (g)	Meio de Reação – Final (g)		Meio Degradado (g)	pH - Inicial	pH - Final	
			60 dias	90 dias				
I	RSO 1	126,06	124,56	-	1,5	6,94	5,28	
	RSO 2	126,04	-	121,91	4,13	6,94	6,40	
	LS 1	122,88	122,31	-	0,57	7,17	7,98	
	LS 2	123,89	-	122,42	1,47	7,13	8,29	
	LF 1	128,1	127,3	-	0,8	7,23	8,22	
	LF 2	124,68	-	123,34	1,34	7,24	8,36	
	RSOLS 1	121,08	-	118,8	2,28	6,92	5,49	
	RSOLS 2	121,79	119,76	-	2,03	6,92	5,22	
	RSOLF 1	127,07	124,66	-	2,41	6,94	6,17	
	RSOLF 2	124,23	-	121,28	2,95	6,92	6,22	
	RSOLSG 1	121,67	-	119,13	2,54	6,87	5,26	
	RSOLSG 2	122,21	120,19	-	2,02	6,87	5,05	
	RSOLFG 1	127,89	-	125,77	2,12	6,87	6,09	
	RSOLFG 2	125,89	123,18	-	2,71	6,91	6,00	
	II	RSO 1	129,58	-	127,44	2,14	6,79	4,95
		RSO 2	129,64	128,06	-	1,58	6,80	6,15
LODO 1		129,5	128,6	-	0,9	7,10	8,23	
LODO 2		130,21	-	128,49	1,72	7,11	8,06	
RSOL 1		130,43	-	126,89	3,54	6,69	5,37	
RSOL 2		132,02	129,33	-	2,69	6,70	4,91	
III	RSOLG 1	127,03	124,45	-	2,58	6,79	4,66	
	RSOLG 2	127,32	-	123,77	3,55	6,77	4,66	
III	RSO 1	148,8	147,88	-	0,92	8,01	4,12	

RSO 2	147,49	-	145,87	1,62	8,05	4,79
LODO UASB 1	148,54	-	147	1,54	6,32	6,84
LODO UASB 2	150,35	149,58	-	0,77	6,39	8,26
LODO ETE 1	150,98	-	149,46	1,52	7,22	6,53
LODO ETE 2	151,03	150,3	-	0,73	7,18	8,43
RSOL UASB 1	153,49	-	152,09	1,4	5,59	5
RSOL UASB 2	148,49	147,35	-	1,14	5,62	4,99
RSOL ETE 1	152,7	151,8	-	0,9	6,23	4,46
RSOL ETE 2	152,12	-	150,65	1,47	6,3	4,74
RSOLG UASB 1	151,16	-	150,16	1	5,49	3,50
RSOLG UASB 2	149,17	148,27	-	0,9	5,51	3,34
RSOLG ETE 1	150,62	-	149,1	1,52	5,91	4,92
RSOLG ETE 2	150,52	149,22	-	1,3	5,95	4,64

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio Seco (LS), Lodo Anaeróbio Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLFG), Lodo Anaeróbio Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLG), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo Anaeróbio da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Estudos realizados por Zhu *et al.* (2009), sobre a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, sem adição de inóculo, caso dos reatores RSO, e a uma temperatura de 35°C, mostraram que os valores de pH podem diminuir até 5,5 e voltam a aumentar, finalizando a valores próximos a 7.

As soluções tamponadas utilizadas nos três ensaios tiveram pH próximos ao neutro. Este fato indica que embora tenha ocorrido a degradação, com provável formação de ácidos, o tampão mostrou-se eficiente para manter o pH dos meios de reação acima de 4,5 (SILVA, 2012).

4.3.2 DBO₅/DQO

Os resultados mostram uma tendência de redução da DBO₅ e da DQO após 90 dias na maioria dos reatores (Tabela 17), certamente por ter ocorrido diminuição da concentração de compostos orgânicos solúveis.

No processo de degradação, a razão DBO₅/DQO torna-se uma informação importante. Elevada razão DBO₅/DQO > 0,5 pode corresponder à fase inicial de degradação dos resíduos sólidos. Entretanto, quando há uma razão DBO₅/DQO ≤ 0,3 pode ser indicativo da sucessão entre as fases acetogênica e metanogênica ou da presença de substâncias recalcitrantes com propriedades refratárias ou de toxicidade, que podem inibir a atividade metabólica dos microrganismos (CHUN e WANG, 1999).

Verificou-se que a razão DBO₅/DQO média dos reatores do ensaio II foi de 1,12 e do ensaio III de 0,03. Sendo que esse valor médio da razão do ensaio II ocorreu devido à razão DBO₅/DQO 4,31 do reator LODO, composto apenas pelo inóculo.

Os reatores do ensaio III apresentam em sua composição mais de 70% de inóculo, este fato pode ter inibido o processo de degradação, isso porque, o lodo é um subproduto do tratamento de esgotos, certamente características recalcitrantes dos efluentes são transferidas ao subproduto. Essa colocação também é confirmada por Marques e Hogland (2002), ao afirmarem que algumas substâncias presentes inicialmente no efluente bruto concentram-se no lodo formado nas ETE. Além disso, a baixa relação DBO₅/DQO também pode estar relacionada ao fato de que a carga orgânica destes lodos já foi digerida durante o tratamento restando apenas compostos de difícil degradação (SCHNEIDERS *et al.*, 2013).

Tabela 17. Características do comportamento da DBO₅ e DQO total dos meios de reação.

Ensaio	Reator	DBO		DQO		Degradação (%)		Razão DBO/DQO	Tempo (dias)
		Inicial (gO ₂ .L ⁻¹)	Final (gO ₂ .L ⁻¹)	Inicial (gO ₂ .L ⁻¹)	Final (gO ₂ .L ⁻¹)	DBO	DQO		
I	RSO 2	-	-	14,45	1,83	-	87,3	-	91
	LS 2	-	-	4,16	0,52	-	87,5	-	91
	LF 2	-	-	5,80	1,41	-	75,7	-	91
	RSOLS 1	-	-	2,74	2,67	-	2,5	-	91
	RSOLF 2	-	-	15,33	3,57	-	76,7	-	91
	RSOLSG 1	-	-	19,98	1,26	-	93,7	-	91
	RSOLFG 1	-	-	15,80	1,30	-	91,8	-	91
II	RSO 1	0,63	0,32	32,01	1,97	50,8	93,8	0,16	96
	LODO 2	0,86	0,56	1,20	0,13	65,1	89,2	4,31	96
	RSOL 2	0,64	0,51	39,06	2,28	79,7	94,7	0,22	96
	RSOLG 2	0,25	0,20	15,23	1,72	80	88,7	0,12	96
III	RSO 2	0,60	0,51	32,01	22,24	85	30,5	0,02	90
	LODO UASB 1	0,21	0,13	1,20	2,06	61,9	-	0,06	90
	LODO ETE 1	0,11	0,22	2,38	4,06	-	-	0,05	90
	RSOL UASB 1	0,52	0,27	39,06	30,73	51,9	21,3	0,01	90
	RSOL ETE 2	0,29	0,35	33,31	15,95	-	52,1	0,02	90
	RSOLG UASB 1	0,22	0,13	17,57	25,87	59,1	-	0,01	90
	RSOLG ETE 1	0,75	0,28	15,23	14,09	37,3	7,5	0,02	90

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio Seco (LS), Lodo Anaeróbio Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLFG), Lodo Anaeróbio Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLG), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo Anaeróbio da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE). Fonte: Próprio autor, 2015.

Observando o percentual de remoção da DQO, é possível destacar a ótima eficiência dos reatores do ensaio II, além disso, a glicose adicionada aos reatores RSOLSG e RSOLFG do ensaio I auxiliou o processo de partida digestão anaeróbia do teste BMP, ou seja, as bactérias fermentativas metabolizam a glicose em acetato, favorecendo o processo anaeróbio.

4.3.3 Alcalinidade

A alcalinidade total é expressa em cima da concentração de bicarbonato e pelos ácidos voláteis, que são produzidos em maior quantidade no início do processo de digestão anaeróbia. À medida que o processo de degradação ocorre, a alcalinidade se torna mais representativa (LOPES *et al.*, 2004), porém os resultados obtidos mostraram que a alcalinidade do meio da reação, aos 90 dias, do ensaio III, ainda não mostrava-se representativa (Tabela 18).

Tabela 18. Alcalinidade total dos meios de reação no início e final do ensaio III.

	Inicial (g.L ⁻¹)	Final (g.L ⁻¹)	Tempo (dias)
RSO 2	2,72	0,34	90
LODO UASB 1	1,45	1,35	90
LODO ETE 1	1,67	1,04	90
RSOL UASB 1	0,45	1,26	90
RSOL ETE 2	0,89	0,62	90
RSOLG UASB 1	0,45	0	90
RSOLG ETE 1	0,83	1,14	90

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo Anaeróbio da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Fernández Rodríguez *et al.* (2012) avaliando o processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, a 35°C, perceberam que a alcalinidade total de seus reatores estava em declínio ao longo do experimento, o mesmo comportamento foi visto na maioria dos reatores do ensaio III, em especial o RSOLG UASB 1 que atingiu 0 g.L⁻¹.

Os reatores RSOL UASB 1 e RSOLG ETE 1 apresentaram valores finais acima dos iniciais, porém, para Raposo *et al.* (2012), esses valores estão abaixo das concentrações que

fornecem uma maior capacidade de tamponamento, entre 2,5 – 5 g.L⁻¹. Provavelmente, deve ser por este motivo que o pH dos meios de reação desses reatores encontravam-se baixos.

4.3.4 Concentração de Sólidos

Os sólidos foram analisados em todos os ensaios. Observou-se que os resultados de degradação dos sólidos suspensos voláteis variaram muito entre os ensaios, tendo o ensaio II com melhores resultados. Já a relação de SSV inicial e final no ensaio III mostrou-se atípica, com valores finais maiores que os iniciais. Para Kelly (2002), o meio de reação só pode ser considerado estabilizado quando os terrores de SSV estiveram baixando e atingirem valores abaixo de 20%. Provavelmente seria necessário manter os reatores por um período maior de incubação, com finalidade de obter-se estabilização do meio conforme dados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Sólidos Suspensos Voláteis dos meios de reação inicial e final.

Ensaio	Reator	Inicial (%)	Final (%)	Tempo (dias)	Degradado (%)
I	RSO 2	53,45	61,39	91	-
	LS 2	56,25	11,39	91	79,7
	LF 2	23,07	0,23	91	99
	RSOLS 1	97,87	97,29	91	0,6
	RSOLF 2	78,13	73,76	91	5,6
	RSOLSG 1	93,94	47,69	91	49,2
	RSOLFG 1	79,67	73,66	91	7,5
II	RSO 1	98,73	55,37	96	43,9
	LODO 2	77,14	50	96	35,2
	RSOL 2	82	22,92	96	72,0
	RSOLG 2	85,60	74,39	96	13,1
III	RSO 2	55,37	90,94	90	-
	LODO UASB 1	50	48,57	90	2,86
	LODO ETE 1	22,92	48,57	90	-
	RSOL UASB 1	74,39	74,12	90	0,4
	RSOL ETE 2	98,62	85,98	90	12,8
	RSOLG UASB 1	34,85	84,13	90	-
	RSOLG ETE 1	72,47	71,38	90	1,5

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Seco (LS), Lodo Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLFG), Lodo Anaeróbio Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio Fresco e Glicose (RSOLG), Lodo Anaeróbio UASB (LODO UASB), Lodo da Lagoa Anaeróbia da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbio UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbio UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

4.4 Produção do Biogás

A produção de biogás está diretamente associada ao volume de produção, sendo obtida através das medições periódicas de diferença de pressão e temperatura dos reatores. O mecanismo de estudo da produção de biogás considerou o volume final acumulado do biogás, no instante “t”, em relação aos volumes de biogás acumulados nos 91, 96 e 90 dias de incubação (Tabela 20), dos ensaios I, II e III, respectivamente.

Tabela 20. Volume Acumulado de Biogás (NmL).

Ensaio	Reator	±30 dias	±60 dias	±90 dias
I	RSO 2	151,63	154,07	161,66
	LS 2	12,75	14,65	14,92
	LF 2	14,38	17,50	18,58
	RSOLS 1	138,74	148,24	155,15
	RSOLF 2	192,99	197,20	198,01
	RSOLSG 1	143,35	151,22	155,15
	RSOLFG 1	131,28	156,51	156,51
II	RSO 1	131,15	131,83	131,83
	LODO 2	20,34	22,38	23,06
	RSOL 2	186,89	191,50	191,91
	RSOLG 2	187,84	201,54	202,35
III	RSO 2	104,38	117,52	117,52
	LODO UASB 1	1,59	1,88	2,02
	LODO ETE 1	5,05	6,06	22,38
	RSOL UASB 1	20,79	23,82	28,44
	RSOL ETE 2	108,42	136,87	137,30
	RSOLG UASB 1	87,78	97,31	98,75
	RSOLG ETE 1	159,10	175,27	185,66

Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Seco (LS), Lodo Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico Fresco e Glicose (RSOLFG), Lodo Anaeróbico Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico Fresco e Glicose (RSOLG), Lodo Anaeróbico UASB (LODO UASB), Lodo da Lagoa Anaeróbica da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo da lagoa anaeróbica da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo da lagoa anaeróbica da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

A produção de biogás dos reatores monitorados está apresentada no Apendice B, que mostra, em figuras, as curvas de produção acumulada de biogás nos reatores dos três ensaios. As figuras do Apendice C, exibem o comparativo de produção de biogás dos reatores de um mesmo ensaio, buscando-se destacar diferenças no comportamento dos reatores de mesma composição em diferentes graus de estabilidade do meio. Ressalta-se que a produção de um dos reatores foi interrompida em, aproximadamente, 60 dias para caracterização do mesmo.

O comportamento de produção dos reatores se distingue, basicamente, pela composição do meio de reação, pois todos os reatores passaram pelo mesmo método de incubação e permaneceram incubados nas mesmas condições.

Os brancos do ensaio I, em 90 dias, obtiveram produção aproximada de 15 mL e 18 mL para os reatores com lodo seco (LS) e com lodo fresco (LF), respectivamente. A ideia de utilizar o lodo seco na composição dos reatores partiu de uma proposta de dinamizar o processo estabilização interna do inóculo com as amostras, pois estava ausente de umidade, mas os resultados não foram satisfatórios. O branco do ensaio II confirmou o resultado obtido para o lodo fresco do ensaio I, visto que em ambos os ensaios utilizaram-se a mesma composição nos reatores. Valores que se enquadram no limite mostrado por Shahriari *et al.* (2012), que observaram em seus experimentos que reatores com apenas inóculos obtiveram valores de produção de biogás variando de 0,50 mL a 500 mL, em condições normais, ao longo de 30 dias.

Nos reatores do ensaio III adicionou-se uma quantidade superior a 70% de inóculo, pois, de acordo com Silva (2014), quanto maior a quantidade de inóculo, mais rápida será a conversão do substrato e menores serão os efeitos inibitórios do substrato na produção de metano. Porém, não foi observado esse comportamento. Os brancos estudados nesse ensaio foram compostos por lodo anaeróbico do reator UASB e lodo anaeróbico da lagoa anaeróbia, acreditava-se que os resultados dos reatores com LODO UASB seriam melhores que os reatores LODO ETE. Este fato pode ter ocorrido devido a ETE do IFPB – *campus* Cabedelo, está em operação a pouco mais de dois anos e só receber efluentes da cantina, dos laboratórios e dos banheiros, que muitas vezes não apresenta quantidades de sólidos significativos.

Os reatores compostos por RSO e inóculo, apresentaram valores de produção satisfatórios ao se utilizar o lodo da lagoa anaeróbia como inóculo. Resultados de 198,01 mL do RSOLF2, 191,91 mL do RSOL e 137,30 mL do RSOL ETE, dos ensaios I, II e III, respectivamente foram significativos e encontraram-se dentro da faixa observada por Derbal *et al.* (2012), entre 100 e 500 mL, e Gomez *et al.* (2006), entre 120 e 280 mL, que estudaram

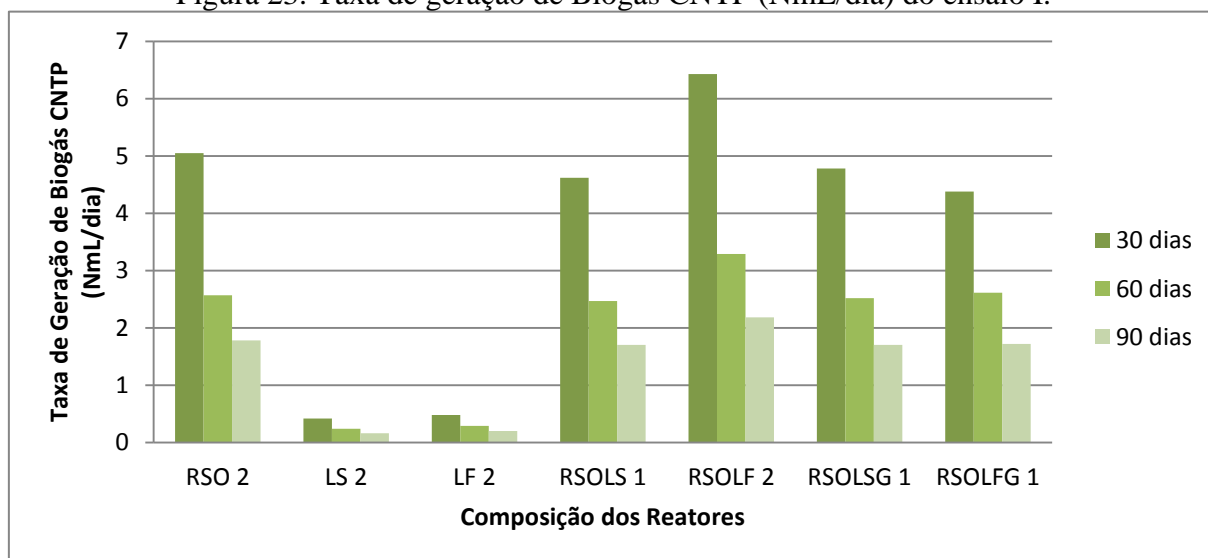
o processo de degradação de resíduos orgânicos ao utilizar o lodo anaeróbio mesofílico em suas composições, em condições normais.

Ao analisar as curvas da produção do biogás dos reatores com glicose nos três ensaios, pode-se observar que os reatores que tinham o lodo fresco, como inóculo em sua composição, produziram mais gases durante o período estudado do teste BMP. O reator RSOLG2 do ensaio II foi o que mais se destacou graficamente, sendo a melhor composição para produção do biogás.

A acidificação do meio de reação pode ter sido um fator de inibição das bactérias metanogênicas nos reatores que obtiveram menores produções de biogás, principalmente os do ensaio III. Fatores como: composição dos resíduos dispostos, umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, idade dos resíduos, podem ter influenciados nesses resultados (SILVA, 2012).

Partindo dos valores obtidos com a produção de biogás, pode-se obter a taxa de geração de biogás (Figuras 23, 24 e 25), que apresentaram considerável geração de biogás nos reatores compostos por resíduos sólidos orgânicos, inóculo e solução nutritiva, com siglas RSOLF, RSOL e RSOLETE, com valores de 2,18; 2,13 e 1,53 NmL/dia, respectivamente. Vale destacar que foram os mesmos reatores que apresentaram uma perda considerável de massa. De acordo com Qian *et al.* (2002), quanto maior a porcentagem de degradação do meio, maior será a taxa de geração de biogás.

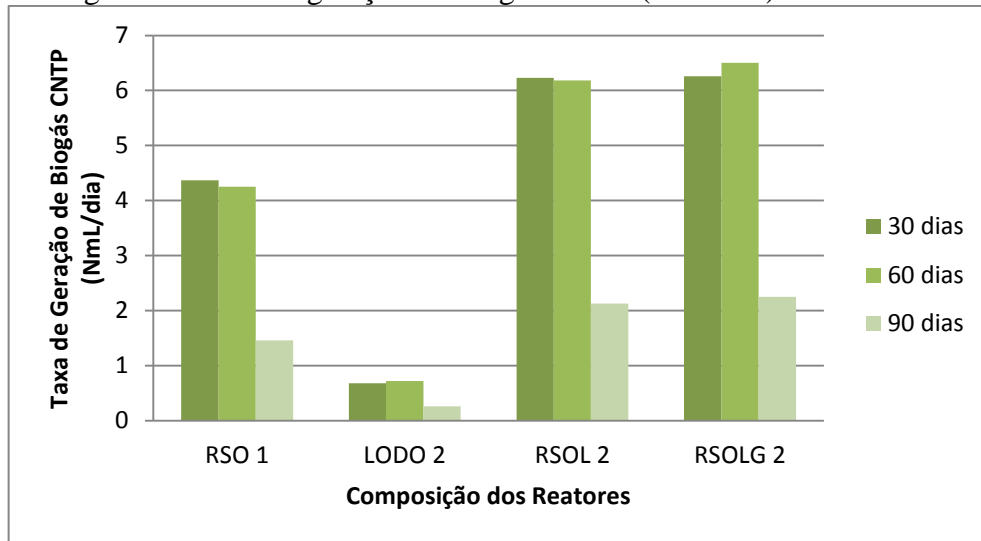
Figura 23. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio I.



Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Seco (LS), Lodo Fresco (LF), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Seco (RSOLS), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Fresco (RSOLF), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Seco e Glicose (RSOLSG) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Fresco e Glicose (RSOLFG).

Fonte: Próprio autor, 2015.

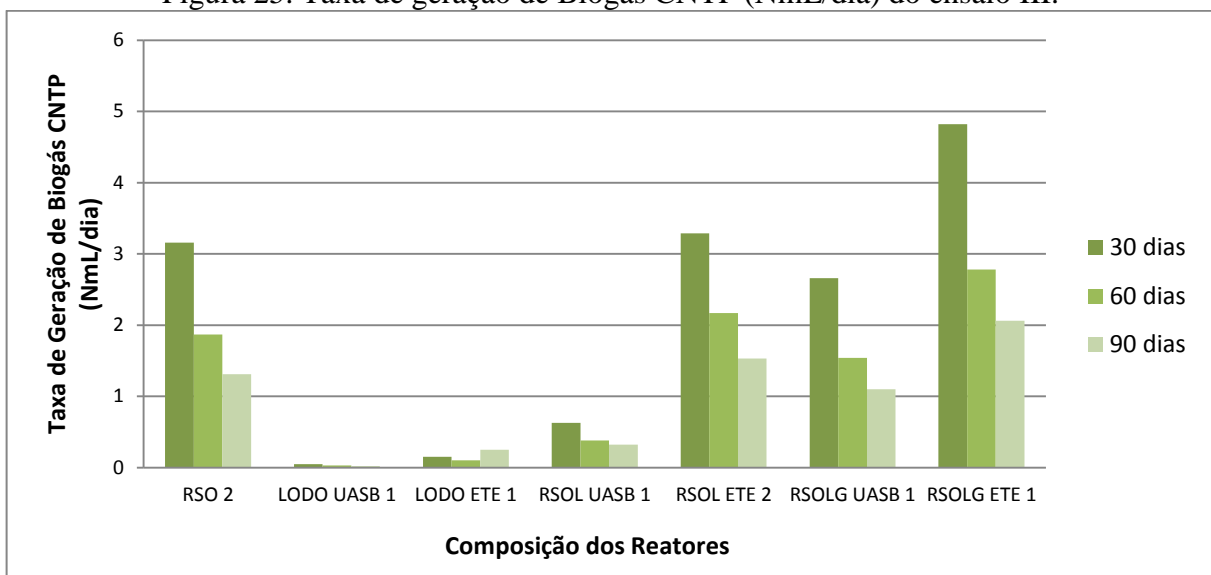
Figura 24. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio II.



Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbico Fresco (LODO), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico Fresco (RSOL) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico Fresco e Glicose (RSOLG).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Figura 25. Taxa de geração de Biogás CNTP (NmL/dia) do ensaio III.



Resíduo Sólido Orgânico (RSO), Lodo Anaeróbico UASB (LODO UASB), Lodo da Lagoa Anaeróbica da ETE (LODO ETE), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo Anaeróbico UASB (RSOL UASB), Resíduo Sólido Orgânico e Lodo da lagoa anaeróbica da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo Anaeróbico UASB e Glicose (RSOLG UASB) e Resíduo Sólido Orgânico, Lodo da lagoa anaeróbica da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Ao confrontar os resultados obtidos com Silva (2012) e Moraes Junior (2006), evidencia-se que os fatores podem ter influenciado na produção de biogás que podem estar

relacionados à temperatura, a que foram submetidos os reatores, e as características do substrato e inóculo utilizados conforme também observado por Mayer (2013).

4.5 Teores de Metano

As análises no cromatógrafo foram realizadas apenas para as amostras do ensaio III, para isso, utilizou-se a Equação 13.

Os resultados dos teores de metano no biogás foram apenas em porcentagem, pois isolados não foram suficientes para inferir algo sobre a relação resíduo/inóculo. Mas a análise desse parâmetro é importante para se avaliar o comportamento da porcentagem de metano nos reatores (SILVA, 2014).

As amostras contendo resíduo e lodo anaeróbio 2 proveniente do reator UASB (RSOLETE2) e resíduo, lodo anaeróbio e glicose 1 do mesmo reator supracitado (RSOLGETE1), apresentaram os melhores valores de produção do biogás, com isso, ao relacionar essa produção ao teor de metano, observou-se teores de 15,76% e 17,12%, respectivamente, ao 63º dia, e 43,55% e 30,98, respectivamente, ao 90º dia. Porém, ao (Tabela 21). Barcelos (2009) citado por Silva (2012), afirma que o metano produzido a partir da FORSU pode compreender 55% da composição do biogás, em condições normais.

Tabela 21. Teores de metano inicial e final.

Reator	1º dia - Inicial (%)	63º dia (%)	90º dia - Final (%)
RSOL ETE 2	0,13	15,76	43,55
RSOLG ETE 1	0,26	17,12	30,98

Resíduo Sólido Orgânico e Lodo da lagoa anaeróbia da ETE (RSOLETE), Resíduo Sólido Orgânico, Lodo da lagoa anaeróbia da ETE e Glicose (RSOLG ETE).

Fonte: Próprio autor, 2015.

Acredita-se que a composição resíduo/inóculo dos reatores no ensaio III foi um dos fatores que não favoreceu para a produção compatível de biogás e, conseqüentemente, de metano. Marcel (2003) comenta que a composição afeta quantitativamente e qualitativamente a produção dos gases no processo de degradação anaeróbia.

Apenas obtiveram-se os resultados da produção de metano para essas duas espécies devido os reatores compostos pelo lodo anaeróbio do reator UASB não atingirem porcentagens de teor de metano significativo durante o mesmo período de incubação, embora

muitos estudos afirmem que o lodo UASB seja eficiente no processo de digestão anaeróbia. Para Lim e Fox (2013), seria necessário um período de aclimatação a fim de corrigir características do inóculo.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÃO

- A caracterização gravimétrica do restaurante universitário da UFPB – campus I proporcionou confiabilidade ao processo experimental.
- A avaliação de diferentes inóculos e de teores de umidades para um mesmo inóculo, mostrou-se importante para compreender as condições favoráveis para o processo de estabilização da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos.
- A granulometria e umidade, para o tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos, são parâmetros que devem ser considerados, pois a homogeneização parcial do substrato favorece a digestão anaeróbia.
- A eficiência de obtenção de dados permitida pelo teste BMP, o enquadra como ótima ferramenta experimental para determinação do potencial de geração de biogás de resíduos sólidos orgânicos.
- A adição de glicose ao meio de reação auxiliou o momento da partida dos reatores, permitindo a estabilização mais rápida do resíduo/inóculo e, conseqüentemente, da produção de biogás.
- A maior produção de biogás observada foi para os reatores que tiveram em sua composição lodo anaeróbio da lagoa anaeróbia (úmido), resíduo sólido orgânico e glicose, utilizando a metodologia adotada nos ensaios I e II, provavelmente, devido a relação resíduo/inóculo ser mais próxima.

6 RECOMENDAÇÕES

- Realizar testes com e sem agitação mecânica utilizando a mesma composição de substrato/inóculo dos ensaios I e II, para avaliar o efeito da agitação no processo de degradação anaeróbia.
- Verificar a eficiência do lodo anaeróbio do reator UASB de uma estação de tratamento de efluentes industriais, utilizando-o como inóculo em partida de reatores anaeróbios com resíduos orgânicos do RU/UFPB, a fim de compará-lo os demais inóculos já estudados.
- Adaptar o teste a reatores de maior escala, entre 1-5 litros, para que possa investigar e discutir o comportamento destes aos reatores de menor escala.
- Realizar análises de Nitrogênio Total Kjeldahl (NPK), nitrogênio amoniacal, fósforo, sulfeto, ácidos graxos voláteis e alcalinidade no inóculo e nos meios estudados.
- Determinar o teor de metano, a partir da cromatografia, em um ensaio utilizando as mesmas composições dos ensaios II.
- Observar se o laboratório está devidamente apropriado à realização do teste BMP, visto que, para tal, é necessário que se tenha todos os equipamentos para as análises, espaço físico e acesso livre, pois o teste necessita de pouca interferência e monitoramento periódico.

REFERÊNCIAS

AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Biogas for Eastern Europe project, University of Southern Denmark, Esbjerg, 2008.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. Tese. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

AMORIM, V. P. P. **Comissionamento e produção de biogás a partir de vários resíduos**. 2012. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J. e DEWIL, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 34; p.755–781. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2015. 120p. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2013. 115p. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. Dissertação (mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

BARROS, R. T. V. **Elementos de gestão de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012. 424p.

BERTHE, C. **Etude de la Matière Organique contenue dans des lixívias issus de différents filières de traitement des déchets ménagers et assimilés**. 2006. Tese. Université de Limoges. Ecole doctorale Science – Technique. Santé, 2006.

BITTON, G.; **Wastewater Microbiology**, 3rd ed., Canada, Wiley, 2005.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal.

BRASIL. Decreto Federal nº 5.940, 25 de outubro de 2006. Institui a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis, e dá outras providências.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

_____. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, outras providências.

CABBAI, V.; BALLICO, M.; ANEGGI, E.; GOI, D. **BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge.** Waste Management, v. 33, p. 1626-1632, 2013.

CARNEIRO, P.H. **Efeito da adição de lodo ao inóculo de reator anaeróbio híbrido sólido-líquido tratando fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** 2005. Dissertação: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

CASADO, A. P. B.; BRASILEIRO, G. M. A.; LIMA, A. P. S.; SOARES, F. J. F.; ALMEIDA, L. C.; MENEZES, M. L. J. **Diagnóstico da Gestão e Análise Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Pirambu/SE.** In: 3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos, 2º Seminário da Região Nordeste Sobre Resíduos Sólidos. João Pessoa - PB, 2010.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Rio de Janeiro. ABES, 2003.

CHAMPAGNE, P.; LI, C. **Enzymatic hydrolysis of cellulosic municipal wastewater treatment process residuals as feedstocks for the recovery of simple sugars.** Bioresource Technology. n.100, p. 5700–5706, 2009.

CERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** v.5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

CERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios.** 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. 380p.

COSTA, E. S. G. M. **Tratamento de resíduos sólidos em reator anaeróbio de duplo estágio visando a obtenção de bioenergia e créditos de carbono: estudo de caso ceasaminas.** 2011. 122 p. Dissertação. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

DERBAL, K.; BENCHEIKH-LEHOCINE, M.; MENIAI, A. H.; **Study of biodegradability of organic fraction of municipal solids waste.** Energy Procedia, v. 19, p. 239-248, 2012.

DOGAN, E.; DUNAEV, T.; ERGUDER, T. H.; DEMIRER, G. N.; **Performance of leaching bed reactor converting the organic fraction of municipal solid waste to organic acids and alcohols.** *Chemosphere*, v. 74, p. 797–803, 2008.

DUERR, M.; GAIR, S.; CRUDEN, A.; MCDONALD, J.. **Hydrogen and electrical energy from organic waste treatment.** *Hydrogen Energy*. 32, pp 705-709, 2007.

ELBESHISHY, E.; NAKHLA, G.; HAFEZ, H. **Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge: Influence of inoculum pre-incubation and inoculum source.** *Bioresource Technology*, v. 110, p. 18, 2012.

GADELHA, E. P. **Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. 2005.** Dissertação. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2005.

GÓMEZ, X.; MORÁN, A.; CUETOS, M. J.; SÁNCHEZ, M. E.; **The production of hydrogen by dark fermentation of municipal solid wastes and slaughterhouse waste: A two-phase process.** *Journal of Power Sources*, v. 157, p. 727–732, 2006.

HEFNER III, R. A. **THE AGE OF ENERGY GASES: China's Opportunity for Global Energy Leadership.** Oklahoma City – Oklahoma USA: The GHK Company, 2007.

HERNANDEZ-BERRIEL, M. C.; BENAVIDES, L. M.; PEREZ, D. J. G.; DELGADO, O. B.; **The effect of moisture regimes on the anaerobic degradation of municipal solid waste from Metepec (Mexico).** *Waste Management & Research*, v. 28, p. 14–20, 2008.

KELLY, J.R. **Solid waste biodegradation enhancements and the evaluation of analytical methods used to predict waste stability.** 2002. 65p. Thesis. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. Blackburg-Virginia. 2002.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON. L.; **The anaerobic digestion of solid organic waste.** *Waste Management*, v. 31, p. 1737–1744, 2011.

KHANAL, S. K.; **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications,** Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, USA, 2008.

LIM, S. J.; FOX, P. **Biochemical methane potential (BMP) test for thickened sludge using anaerobic granular sludge at different inoculum/substrate ratios.** *Biotechnology And Bioprocess Engineering*. v. 18, p. 306-312, 2013.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: Tratamento e Biorremediação.** Ed. Hermus, Sao Paulo-SP, 2004.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. 2011.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

LOPES, W. S.; LEITE, V. D.; PRASAD, S. **Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste.** Bioresour. Technol., v. 94, n. 3, p. 261-266, 2004.

MACIEL, F. J. e JUCÀ, J. F. T. **Landfill Gases Emission from a Brazilian MSW Landfill.** In: IX Simpósio Internacional de Gerenciamento de Lixo e Aterros Sanitários. Sardenha, Itália. 2003.

MARCHI, M. E. V.; BRESSIANI, P. A.; BARBOSA, P. M. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos para cozinha industrial dos restaurantes latife.** 2013. 114p. Monografia. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

MARQUES, M.; HOGLAND, W. **Balço de massas para metais pesados em uma planta de tratamento de águas residuais municipais.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 27 oct. - 1 nov., Cancún, México. Proceedings... [S.l.]: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: desarrollo y salud, 2002.

MAYER, M. C. **Estudo da influência de diferentes inóculos no tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos.** 2013. 34p. Dissertação. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2013.

MENEZES, J. M. C. **Influência da concentração de sólidos totais e temperatura na bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.** 2012. 99p. Dissertação. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2012.

MONTE, M. M. **Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais.** 2010. 178 p. Dissertação. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.

MORAIS JUNIOR, J. A. **Influence des pré-traitements mécaniques et biologiques des ordures ménagères Résiduelles (OMR) sur leur comportement bio-physicochimique em Installation de Stockage de Déchets (ISD).** 2006. Tese. Institut national des Sciences Appliquées de Lyon, 2006, 219 p.

PARCHEN, C. A. **Manual de Biogas.** Curitiba, EMATER-Parana, 1979.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PINTO, D. M. C. L. **Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado.** 2000. 192 p. Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

POVINELLI, J.; PINTO, D. M. C. L.; BALDOCHI, V. M. Z. **Procedimento para elaboração de resíduo sólido urbano doméstico padrão**. Revista Sanitária e Ambiental. v. 5. n° 1. p. 25-30, 2000.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA), 2015. Disponível em: <<http://www.pnuma.org.br/>>. Acesso em 15 de julho de 2015.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO (PROSAB). **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Sérgio Túlio Cassini (Coord.). Rio de Janeiro - RJ: Editora ABES, 2003. 204 p.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. New Jersey: Prentice Hall, 717p, 2002.

RAINES, R.T. e BINDER, J.B. **Fermentable sugars by chemical hydrolysis of biomass**. Proceedings of the National Academy of Sciences. n.10, v.107 March 9, p.4516-4521, 2010.

RAMOS, R. A.; **Avaliação da Influência da Operação de Descarte de Lodo no Desempenho dos Reatores UASB em Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal**. 2008. 133p. Dissertação. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M. A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. **Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 861-877, 2012.

REICHERT, G. A. **Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão**. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, 23., 2005, Campo Grande. ABES, 2005. p. 18 - 23.

SANTOS, F.S.F. **Influência de inóculo na remoção de DQO e nitrogênio amoniacal de resíduos sólidos orgânicos tratados em reatores anaeróbios de batelada**. 2014. Monografia. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2014.

SCHNEIDERS, D.; SILVA, J. D.; TILL, A.; LAPA, K. R.; PINHEIRO, A. **Atividade metanogênica específica (AME) de lodos industriais provenientes do tratamento biológico aeróbio e anaeróbio**. Ambi-Agua, Taubaté, v 8, n. 2, p. 135-145, 2013.

SHAHRIARI, H.; WARITH, M.; HAMODA, M.; KENNEDY, K. J.; **Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide**. Waste Management, v. 32, p. 41–52, 2012.

SILVA, G. A. **Estimativa da geração de biogás do ASMJP através do Teste BMP**. 2012. 128p. Dissertação de mestrado: Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012.

SILVA, M. C. P. **Avaliação de lodo anaeróbio e dejetos bovinos como potencial inóculo para partida de digestores anaeróbios de resíduos alimentares.** 2014. 98p. Dissertação. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

SILVA, S. A., OLIVEIRA, R.. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias.** Campina Grande, 2001. Consultado nas várias edições do STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.

SOUTO, T. F. S. **Influência das Condições de Incubação no Teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) de Lodos Anaeróbios.** 2007. 194 f. Dissertação. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

TEIXEIRA, V. H. **Biogás.** Textos Acadêmicos. UFLA/FAEPE. Lavras, MG. 2003.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente.** Epgraf: Campina Grande, 1994.

ZGLOBISZ, N.; CASTILLO-CASTILLO, A.; GRIMES, S.; JONES, P. **Influence of UK energy policy on the deployment of anaerobic digestion.** Energy Policy, v. 38, n. 10, p. 5988–5999, 2010.

ZHU, M.; LÜ, F.; HAO, L. P.; HE, P. J.; SHAO, L. M.; **Regulating the hydrolysis of organic wastes by micro-aeration and effluent recirculation.** Waste Management, v. 29, p. 2042–2050, 2009.

APÊNDICE A

Apêndice A1. Produção de biogás (mL)/dia, a 35°C, para o ensaio I.

Dias	17/jun	19/jun	20/jun	21/jun	23/jun	25/jun	26/jun	27/jun	28/jun	30/jun	01/jul	02/jul	03/jul	04/jul
Número de dias	1	3	4	5	7	9	10	11	12	14	15	16	17	18
Composição														
RSO1	0,00	29,23	60,29	48,66	36,57	11,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00
RSO2	0,00	47,89	52,79	29,99	18,51	15,76	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00
LS1	0,00	0,61	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
LS2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,45
LF1	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	0,92	0,61	0,00	0,00	0,00
LF2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLS1	0,00	93,03	37,33	9,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,68	1,07	8,11	0,00
RSOLS2	0,00	120,42	41,01	14,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLF1	0,00	143,52	44,83	4,74	0,00	0,00	0,00	0,00	17,29	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLF2	0,00	125,62	29,84	0,00	0,00	0,00	0,00	14,84	7,80	5,36	3,83	1,84	8,72	1,22
RSOLSG1	0,00	71,00	31,21	8,87	4,44	5,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLSG2	0,00	76,81	32,13	6,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLFG1	0,00	96,09	75,59	0,00	0,00	0,00	17,75	0,92	0,00	0,92	1,68	0,00	1,07	1,38
RSOLFG2	0,00	76,51	45,90	0,00	0,00	5,66	5,05	2,75	0,31	1,99	1,07	0,00	0,92	1,68

Dias	05/jul	07/jul	08/jul	09/jul	10/jul	11/jul	14/jul	15/jul	16/jul	17/jul	18/jul	21/jul	22/jul	23/jul
Número de dias	19	21	22	23	24	25	28	29	30	31	32	35	36	37
Composição														
RSO1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	8,42	1,84	1,07	0,00	0,00	0,92	0,15
RSO2	0,00	0,77	0,31	0,00	0,77	0,00	0,77	0,31	0,15	0,00	0,31	0,00	0,15	0,00
LS1	2,91	0,31	0,31	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LS2	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	7,50	3,52	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00
LF1	0,00	3,52	0,00	0,00	0,46	0,00	0,15	0,00	0,00	0,77	0,00	1,07	0,00	0,00
LF2	0,00	8,26	0,00	0,00	4,74	0,92	1,38	0,00	0,00	0,77	0,00	0,00	0,61	0,00
RSOLS1	0,00	2,45	0,00	3,06	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00
RSOLS2	0,00	8,26	0,00	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,92
RSOLF1	0,15	1,07	2,30	5,81	4,90	4,74	34,89	19,74	25,86	14,23	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLF2	0,77	7,19	4,59	6,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	1,22	0,31	0,00
RSOLSG1	0,00	0,00	0,00	3,37	0,00	0,00	36,57	1,07	0,00	0,00	0,92	1,84	0,31	0,00
RSOLSG2	0,00	0,00	0,00	1,38	0,00	0,00	0,00	0,92	0,31	0,31	0,61	1,07	1,07	0,61
RSOLFG1	1,53	0,61	1,22	2,91	0,00	1,99	4,59	7,50	4,90	7,65	9,03	0,00	0,00	0,00
RSOLFG2	0,00	0,77	1,07	1,99	0,77	0,46	12,39	9,03	7,50	1,07	0,00	0,00	0,00	0,31

Dias	24/jul	25/jul	28/jul	30/jul	31/jul	01/ago	06/ago	07/ago	08/ago	11/ago	12/ago	13/ago	14/ago	15/ago
Número de dias	38	39	42	44	45	46	51	52	53	56	57	58	59	60
Composição														
RSO1	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	1,22	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSO2	0,00	0,00	1,07	0,00	0,61	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
LS1	0,00	0,00	0,00	1,22	0,00	0,15	0,00	0,46	0,61	0,00	0,61	0,00	0,61	0,00
LS2	0,00	0,00	0,15	0,31	0,77	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
LF1	0,15	0,00	0,31	0,77	0,00	0,46	0,61	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00
LF2	0,00	0,00	0,92	0,15	0,00	0,61	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00
RSOLS1	0,31	0,31	0,15	2,14	0,15	1,38	2,91	1,38	0,61	0,00	0,00	0,15	0,61	0,00
RSOLS2	0,77	0,31	1,07	2,30	0,46	1,38	2,45	1,38	1,07	1,38	0,77	0,92	0,92	0,00
RSOLF1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,84	0,92	0,00	0,31	0,31	0,46	0,00
RSOLF2	0,15	0,77	0,15	0,15	0,00	0,15	0,31	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00
RSOLSG1	0,00	1,53	0,00	1,38	0,00	0,31	0,00	1,53	0,15	0,00	0,31	0,00	0,61	0,00
RSOLSG2	1,53	0,77	2,45	2,14	0,31	1,53	3,37	1,99	0,61	1,68	0,31	0,77	0,92	0,00
RSOLFG1	0,00	0,00	0,00	0,61	0,31	0,77	1,53	2,60	0,61	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00
RSOLFG2	0,00	1,07	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	1,68	0,00	0,00	0,15	0,46	0,15	0,00

Dias	18/ago	21/ago	22/ago	26/ago	29/ago	01/set	04/set	08/set	11/set	15/set
Número de dias	63	66	67	71	74	77	80	84	87	91
Composição										
RSO1	0,00									
RSO2	0,00	0,15	0,00	0,00	5,66	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00
LS1	0,92									
LS2	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LF1	0,00									
LF2	0,00	0,31	0,00	0,61	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
RSOLS1	0,00	0,77	1,38	0,61	1,07	0,61	1,53	0,15	1,07	0,61
RSOLS2	0,77									
RSOLF1	0,00									
RSOLF2	0,00	0,31	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLSG1	0,00	0,00	0,92	0,00	0,46	0,00	0,77	0,00	2,30	0,00
RSOLSG2	1,53									
RSOLFG1	0,00	0,00	1,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,00
RSOLFG2	0,00									

Apêndice A2. Produção de biogás (mL)/dia, a 35°C, para o ensaio II.

Dias	15/out	16/out	17/out	21/out	24/out	27/out	29/out	30/out	31/out	03/nov	05/nov	07/nov	10/nov	11/nov	12/nov
Número de dias	1	2	3	6	9	12	15	16	17	20	22	24	27	28	29
Composição															
RSO1	0,00	23,87	100,22	15,30	0,00	0,00	1,38	0,61	0,15	1,38	0,00	0,31	0,46	0,15	2,91
RSO2	0,00	21,12	0,00	6,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,75	1,84	1,07	0,00	0,00	0,00
LODO1	0,00	18,82	0,00	0,00	0,00	1,22	0,15	0,46	0,00	1,38	0,00	0,00	0,77	0,00	0,00
LODO2	0,00	18,36	0,00	0,00	0,00	1,22	0,31	0,61	0,00	1,07	0,00	0,15	0,77	0,46	0,00
RSOL1	0,00	129,91	0,00	20,35	0,00	0,00	2,14	1,68	5,51	0,46	0,15	1,68	2,60	2,45	43,91
RSOL2	0,00	87,68	0,00	22,80	0,00	0,00	0,00	4,28	0,92	2,45	1,68	1,07	2,75	3,52	1,99
RSOLG1	0,00	105,42	0,00	0,00	0,00	46,52	0,00	60,90	0,00	0,00	23,87	0,00	0,00	2,30	1,53
RSOLG2	0,00	44,68	0,00	0,00	2,91	55,39	36,88	0,00	0,00	0,00	21,12	0,00	0,00	1,22	49,73

Dias	13/nov	17/nov	18/nov	20/nov	21/nov	24/nov	26/nov	28/nov	01/dez	03/dez	05/dez	09/dez	10/dez	12/dez	15/dez
Número de dias	30	34	35	37	38	41	43	45	48	50	52	56	57	59	61
Composição															
RSO1	1,22	0,00	0,31	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSO2	0,00	0,00	1,53	0,00	0,15	0,00	0,61	0,61	0,15	0,00	0,00	0,46	0,31	0,00	0,00
LODO1	0,00	0,15	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00
LODO2	0,00	0,31	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,46	0,00	0,31	0,00
RSOL1	0,00	2,75	0,46	0,00	0,15	0,15	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	0,31
RSOL2	1,68	3,83	1,68	7,34	0,61	7,50	0,00	1,07	1,07	0,31	0,31	1,22	0,00	0,61	0,00
RSOLG1	0,00	0,00	1,07	0,00	10,71	1,22	0,77	1,22	1,84	1,53	0,00	1,38	1,99	1,07	0,92
RSOLG2	0,00	0,00	3,06	0,15	1,38	2,30	7,65	0,00	0,00	0,31	0,00	0,46	0,00	0,00	0,15

Dias	16/dez	19/dez	22/dez	26/dez	29/dez	05/jan	10/jan	13/jan	15/jan	19/jan
Número de dias	62	65	68	72	75	82	87	90	92	96
Composição										
RSO1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSO2										
LODO1										
LODO2	0,00	0,15	0,00	0,31	0,00	0,00	0,15	0,15	0,00	0,00
RSOL1	0,00	0,15	0,15	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOL2										
RSOLG1										
RSOLG2	0,00	0,31	0,00	0,15	0,15	0,00	0,00	0,15	0,15	0,00

Apêndice A3. Produção de biogás (mL)/dia, a 35°C, para o ensaio III.

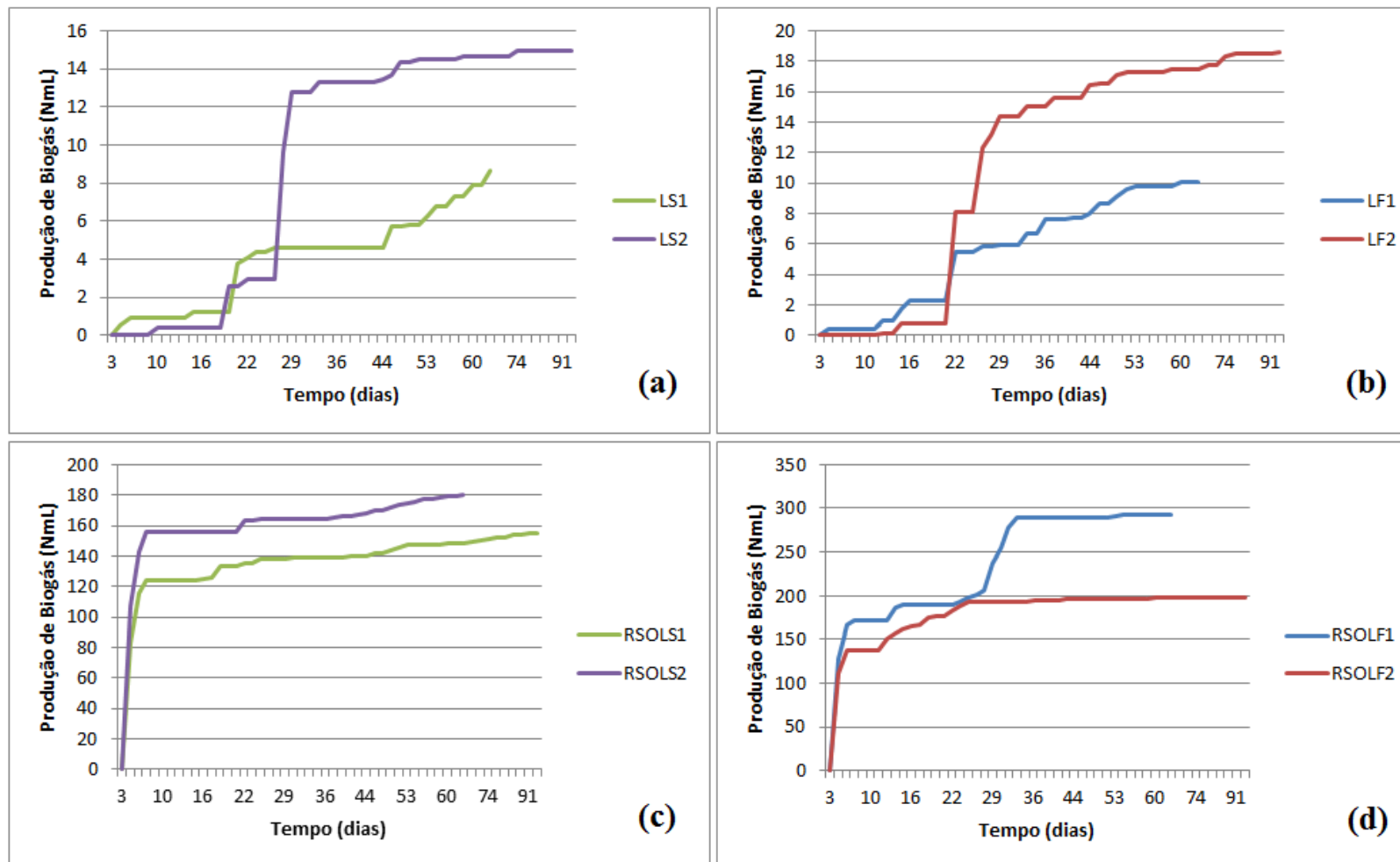
Dias	26/mai	27/mai	01/jun	02/jun	03/jun	05/jun	08/jun	09/jun	10/jun	11/jun	12/jun	13/jun	15/jun	16/jun	19/jun
Número de dias	1	2	7	8	9	11	14	15	16	17	18	19	21	22	25
Composição															
RSO1	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00
RSO2	0,00	0,98	1,47	0,00	14,01	64,83	14,82	5,70	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO UASB1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO UASB2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16
LODO ETE1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO ETE2	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,16	0,00	0,00	0,16
RSOL UASB1	0,00	9,28	1,63	0,00	0,00	0,00	2,44	0,65	4,23	1,79	0,81	0,16	1,14	0,00	0,00
RSOL UASB2	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	2,61	0,00	0,00	0,16	0,00	0,16	0,16	0,65	0,00	0,00
RSOL ETE1	0,00	0,65	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,33	0,00	0,16	0,00	0,16
RSOL ETE2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,44	2,93	13,03
RSOLG UASB1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,00	2,12	1,63	0,49	1,95	1,30	2,12	2,61	1,79
RSOLG UASB2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	1,30	0,16	0,98	0,00	1,95	1,63	0,33
RSOLG ETE1	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	31,44	44,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLG ETE2	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,33	0,00	0,00	0,33

Dias	22/jun	27/jun	02/jul	04/jul	07/jul	09/jul	13/jul	14/jul	15/jul	16/jul	17/jul	20/jul	21/jul	23/jul	27/jul
Número de dias	28	33	38	40	43	45	49	50	51	52	53	56	57	59	63
Composição															
RSO1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,16	0,00	0,00	0,16	0,00	3,75	0,33	16,29
RSO2	1,79	3,09	0,00	0,00	0,49	0,49	0,00	0,65	1,63	0,00	11,40	0,16	0,00	0,00	0,00
LODO UASB1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO UASB2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO ETE1	0,49	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,49	0,00	0,33	0,00	0,00
LODO ETE2	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOL UASB1	0,65	0,65	0,33	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	1,30	0,00	1,14	0,16	0,00	0,33	0,00
RSOL UASB2	0,16	0,81	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,98	0,49	0,00	0,00	1,63
RSOL ETE1	0,49	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	1,30	0,00	4,56
RSOL ETE2	1,63	6,68	2,12	2,28	1,47	1,63	1,30	0,00	1,30	0,00	2,28	0,49	2,12	7,33	9,77
RSOLG UASB1	4,40	2,77	0,00	1,79	1,14	3,42	0,49	0,49	0,65	0,00	2,12	0,00	0,65	0,00	0,00
RSOLG UASB2	1,95	1,63	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	2,28	0,00	0,00	0,00	6,35
RSOLG ETE1	3,91	3,91	0,49	2,28	1,30	2,44	0,33	0,16	0,00	0,00	4,23	0,33	2,28	3,26	1,14
RSOLG ETE2	0,33	0,00	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,33	0,00	0,16

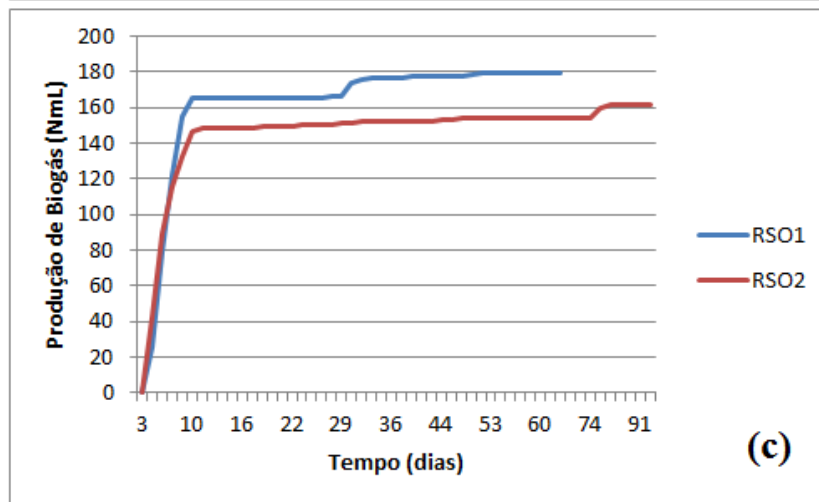
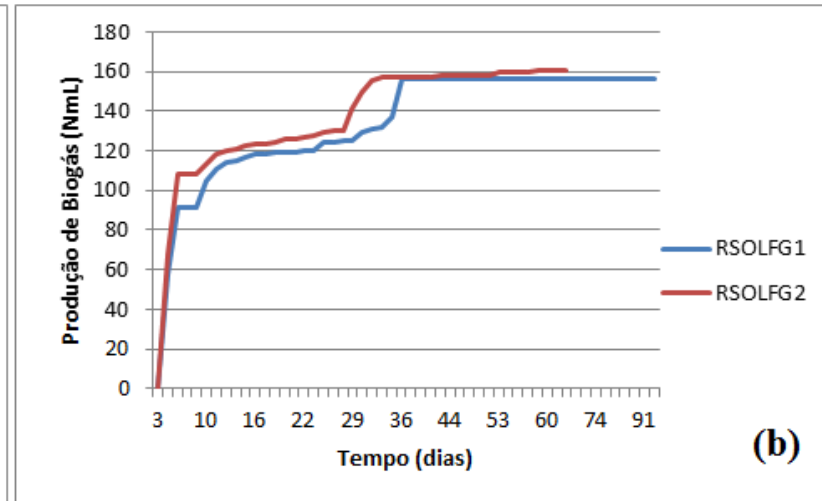
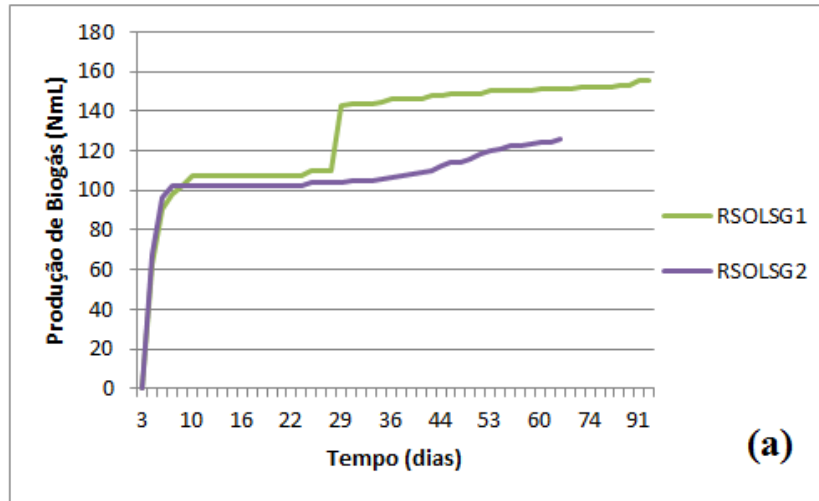
Dias	31/jul	03/ago	05/ago	10/ago	11/ago	12/ago	14/ago	17/ago	20/ago	21/ago	25/ago
Número de dias	67	70	72	75	76	77	79	82	85	86	90
Composição											
RSO1											
RSO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO UASB1	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LODO UASB2											
LODO ETE1	0,00	0,00	8,14	0,00	0,33	8,14	0,00	0,33	0,33	1,14	0,00
LODO ETE2											
RSOL UASB1	0,16	0,00	2,28	0,00	0,33	2,28	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00
RSOL UASB2											
RSOL ETE1											
RSOL ETE2	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00
RSOLG UASB1	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSOLG UASB2											
RSOLG ETE1	2,44	1,14	2,77	0,00	0,00	2,77	0,65	0,81	0,98	0,16	0,00
RSOLG ETE2											

APÊNDICE B

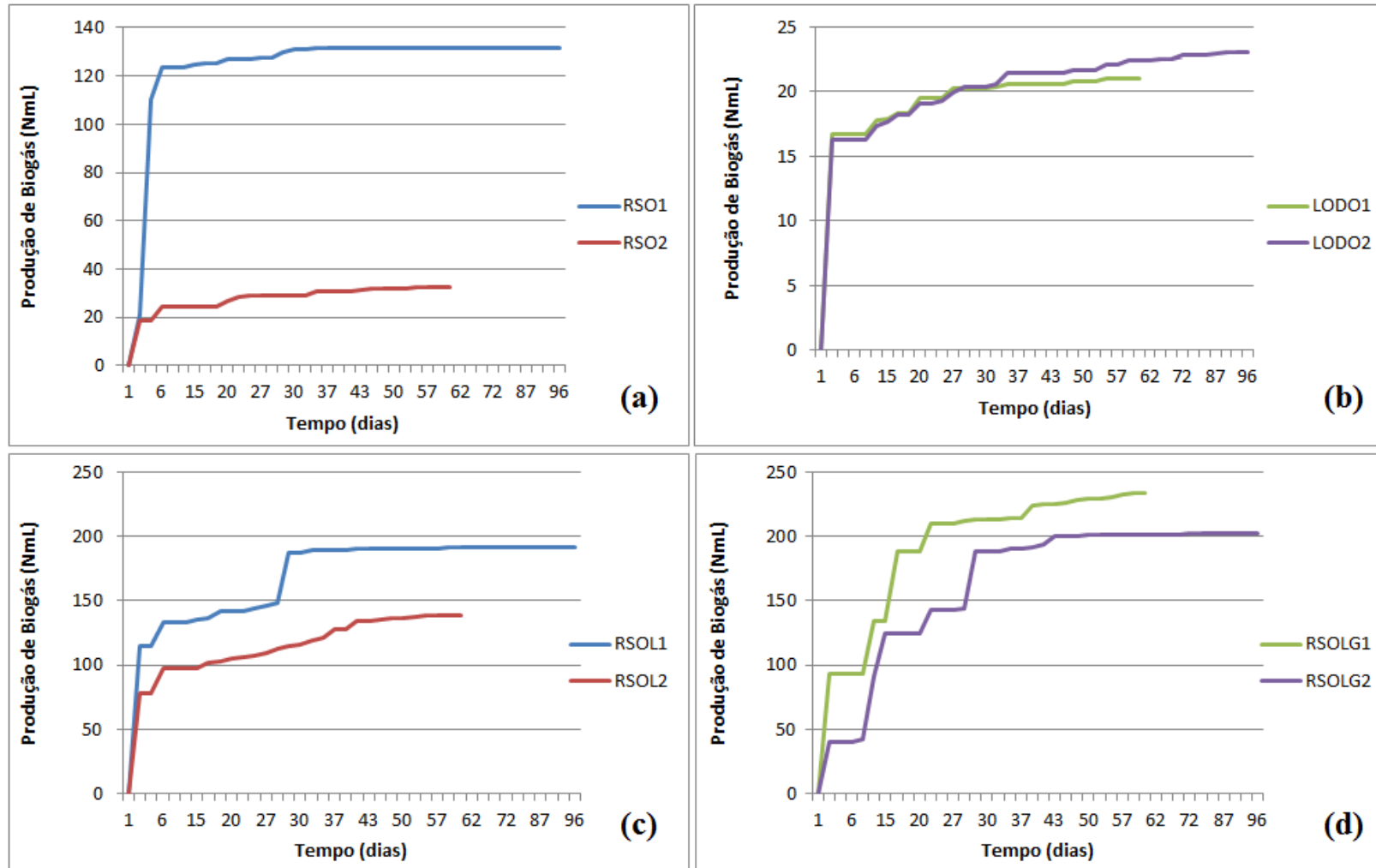
Apêndice B1. Evolução da produção de biogás dos reatores LS (a), LF (b), RSOLS (c) e RSOLF (d), do ensaio I.



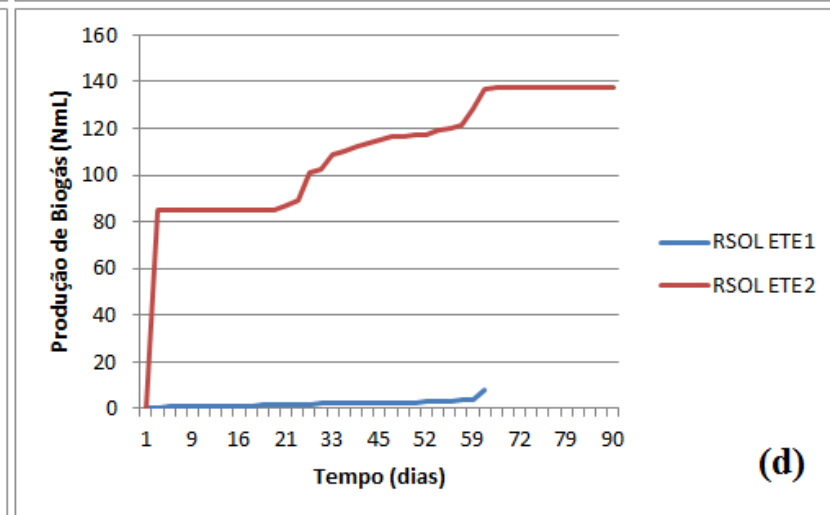
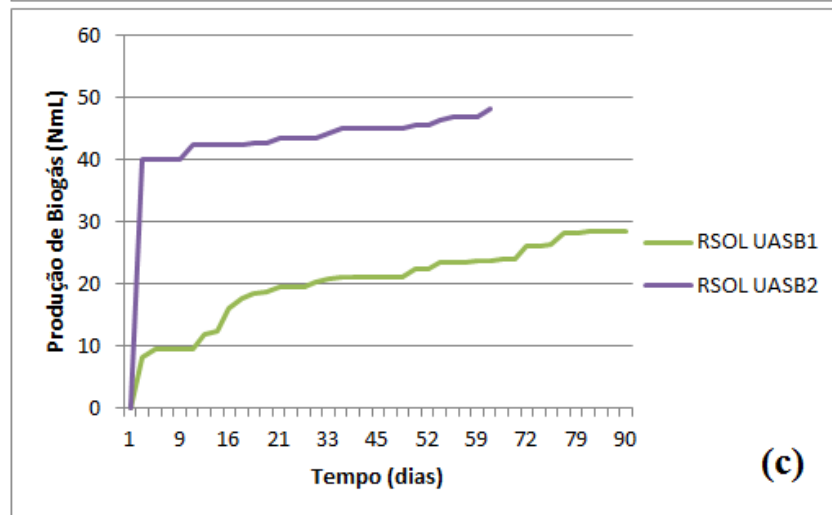
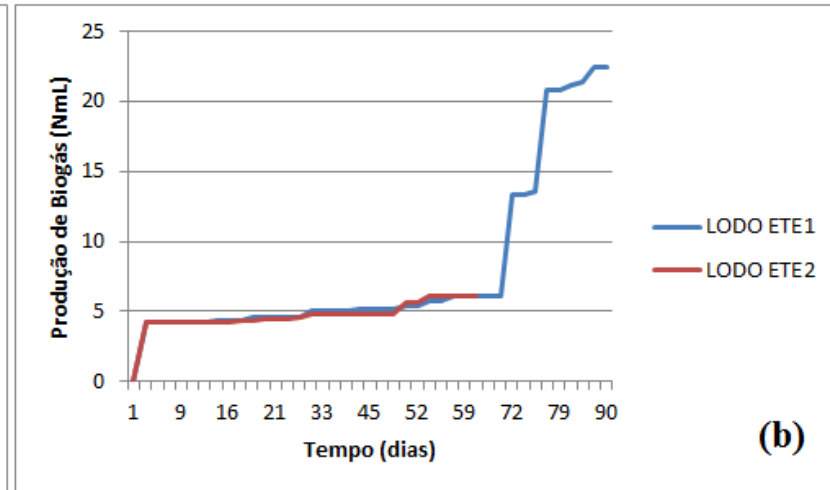
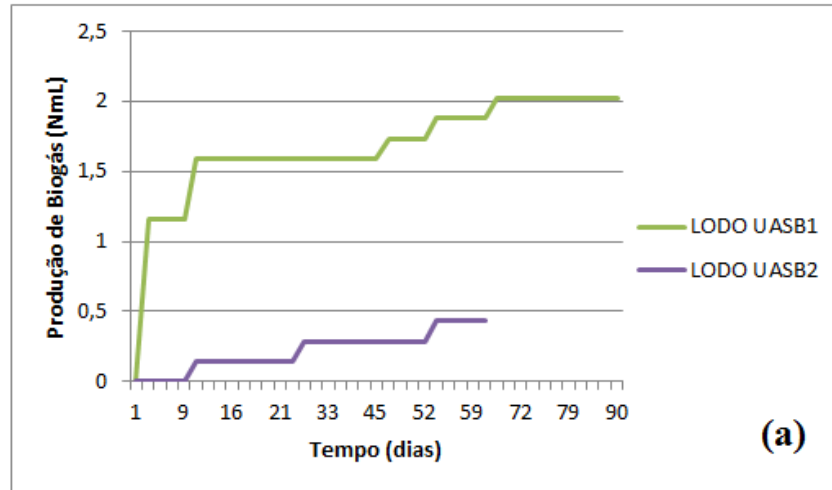
Apêndice B2. Evolução da produção de biogás dos reatores RSOLSG (a), RSOLFG (b) e RSO (c), do ensaio I.



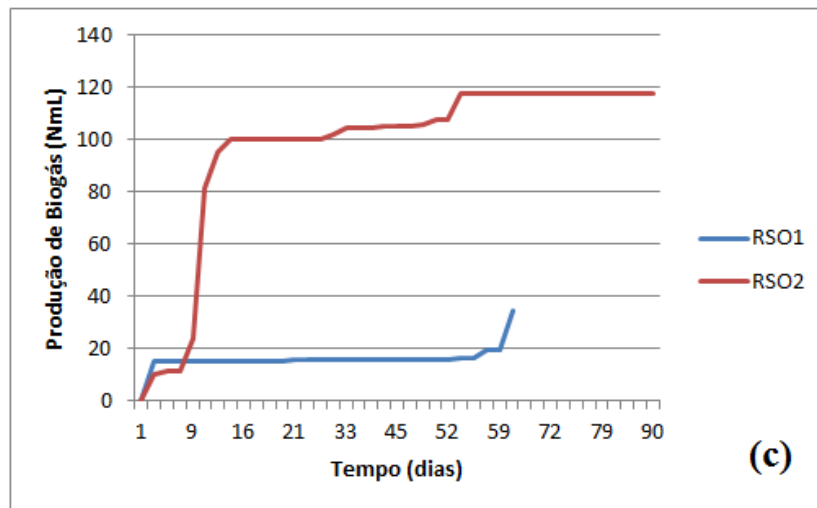
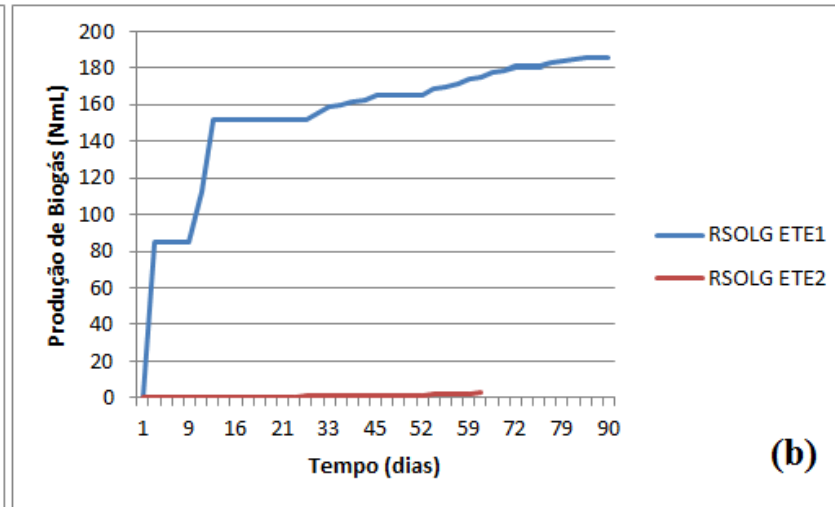
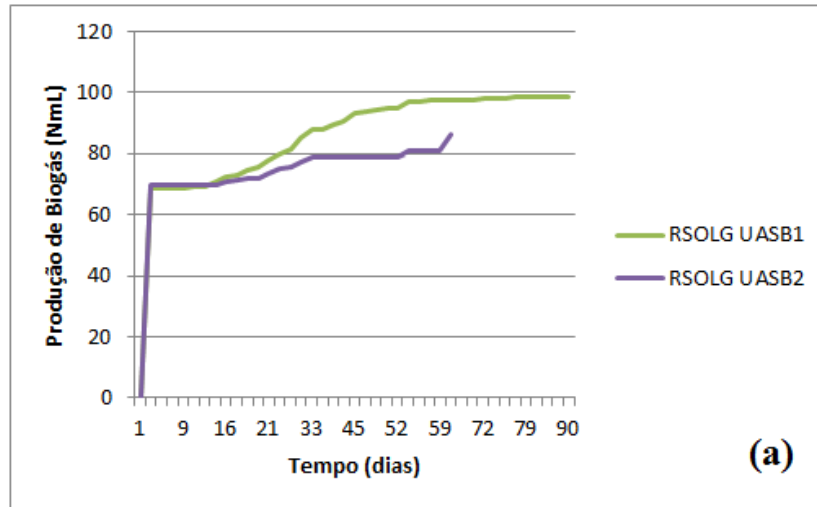
Apêndice B3. Evolução da produção de biogás dos reatores RSO (a), LODO (b), RSOL (c) e RSOLG (d), do ensaio II.



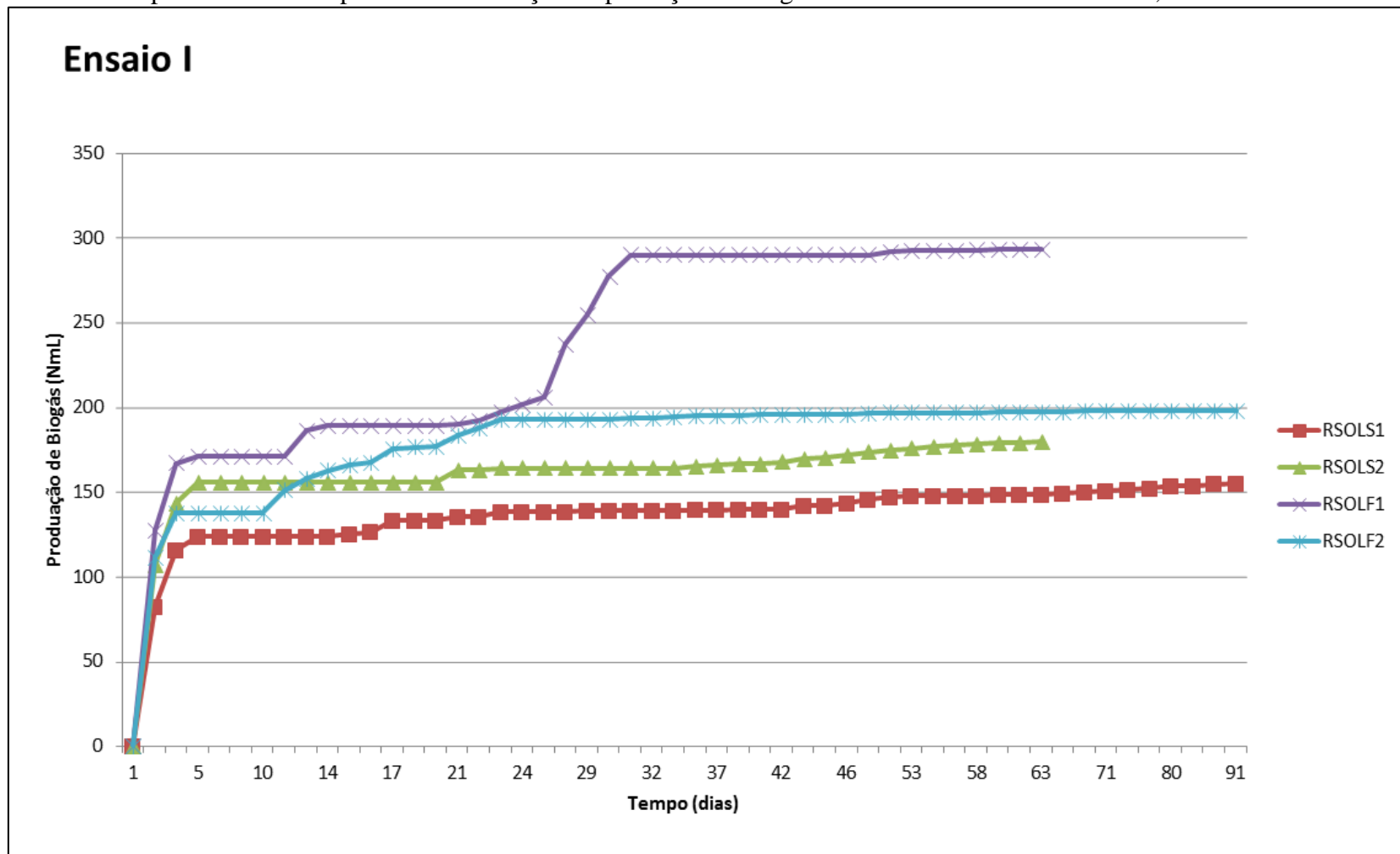
Apêndice B4. Evolução da produção de biogás dos reatores LODO UASB (a), LODO ETE (b), RSOL UASB (c) e RSOL ETE (d), do ensaio III.



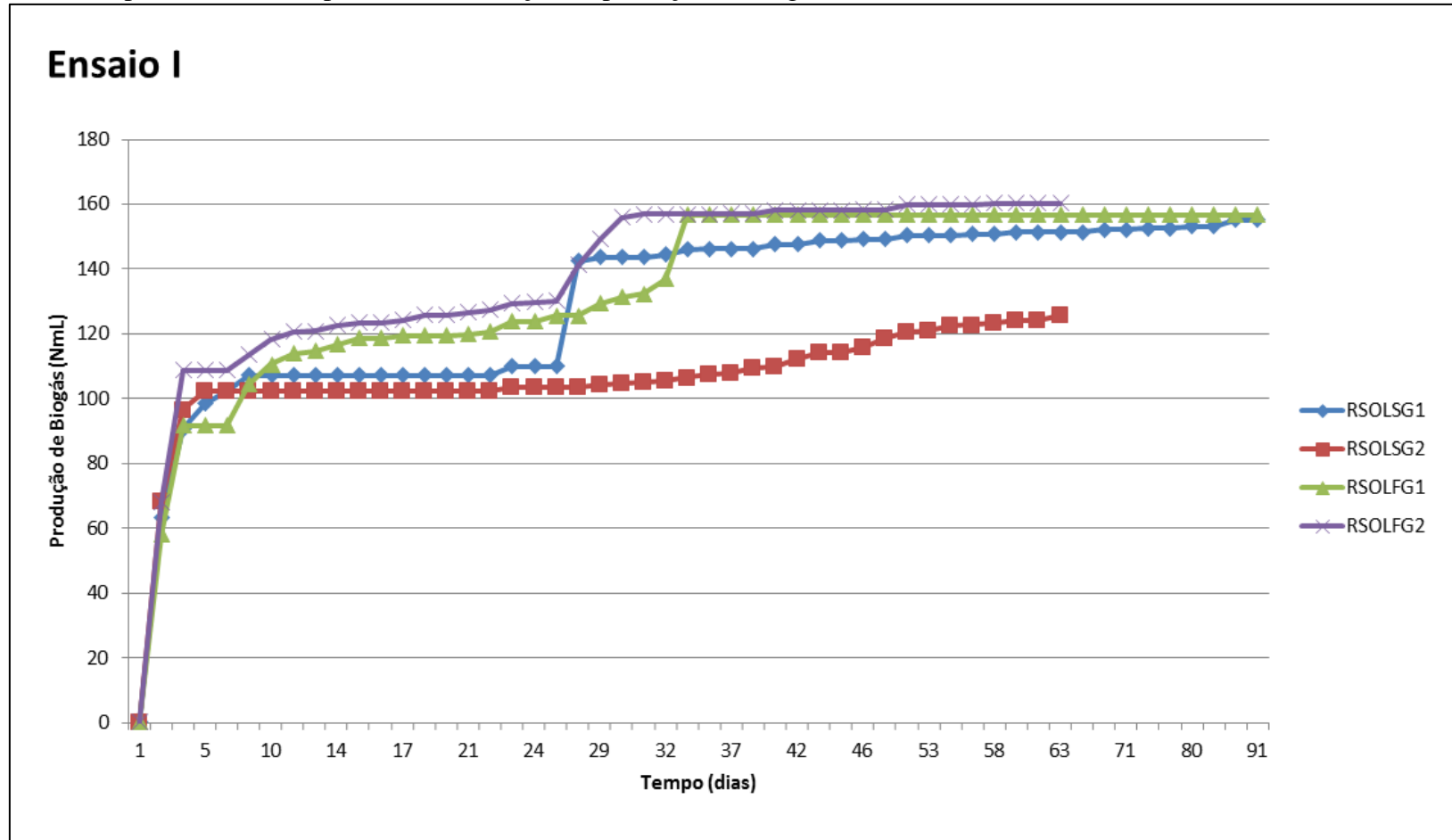
Apêndice B5. Evolução da produção de biogás dos reatores RSOLG UASB (a), RSOLG ETE (b) e RSO (c), do ensaio III.



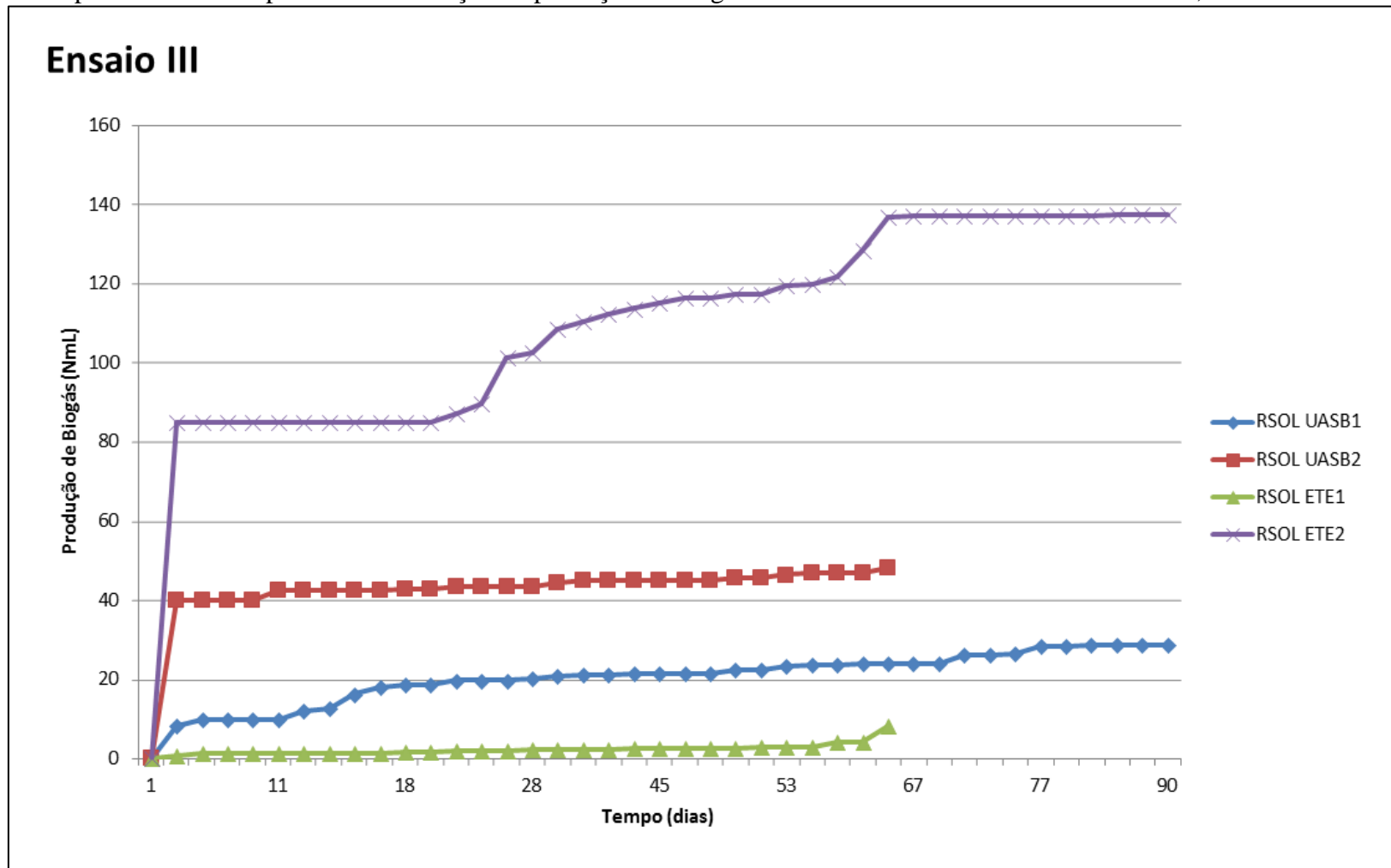
Apêndice C1. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLS e RSOLF, do ensaio I.



Apêndice C2. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLSG e RSOLFG, do ensaio I.



Apêndice C3. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOL UASB e RSOL ETE, do ensaio III.



Apêndice C4. Comparativo da evolução da produção de biogás dos reatores RSOLG UASB e RSOLG ETE, do ensaio III.

