

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A
PARTIR DA BIOMETANIZAÇÃO DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS DO CÂMPUS PAMPULHA DA
UFMG

Júlia Nunes Costa Gomes

Belo Horizonte

2014

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR
DA BIOMETANIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
DO CÂMPUS PAMPULHA DA UFMG**

Júlia Nunes Costa Gomes

Júlia Nunes Costa Gomes

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR
DA BIOMETANIZAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS
DO CÂMPUS PAMPULHA DA UFMG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Gerenciamento de resíduos sólidos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

G633p

Gomes, Júlia Nunes Costa.

Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do Câmpus Pampulha da UFMG [manuscrito] / Júlia Nunes Costa Gomes. - 2014.

xiv, 94 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 83-94.

Bibliografia: f. 78-82.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Meio ambiente - Teses. 4. Digestão anaeróbia - Teses. 5. Biogás - Teses. 6. Resíduos orgânicos - Teses. I. Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

http://www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG

JÚLIA NUNES COSTA GOMES

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO - Orientador


Prof. RAPHAEL TOBIAS DE VASCONCELOS BARROS


Profa ANA AUGUSTA PASSOS REZENDE

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Juliana Calábria de Araújo
Coordenadora

Prof. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo
Orientador

Belo Horizonte, 27 de maio de 2014.

AGRADECIMENTOS

Esses pouco mais de 24 meses, do fim da minha graduação até este momento da conclusão da pesquisa do mestrado, foram muito mais tortuosos do que eu imaginei no começo. Bem que, eu ouvi dizer que Deus escreve certo por linhas tortas. Para entender este percurso, Deus, quase precisei elaborar algumas hipóteses e fazer uma análise estatística, mas a metodologia da oração foi muito eficiente. Obrigada!

Mãe e Pai, obrigada por me concederem esta oportunidade de prosseguir nos estudos. João Luiz, obrigada por achar fascinante tudo que eu te contava da minha pesquisa. Eu sei que vocês prefeririam que eu estivesse mais presente diariamente, mas saibam que vocês estão tão presentes em mim que não se pode medir a distância. Sei também que confiam em mim, e agradeço, pois isto me fortalece.

Marcela, você é um capítulo a parte dentro da seção de agradecimentos, por que a sua influência no meu mestrado é muito anterior a ele. Seu entusiasmo na época do estágio na EcoSoluções levou o mundo do tratamento anaeróbio da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos para os meus sonhos. De lá pra cá, quantas histórias. Obrigada pela convivência, conselhos, críticas e cafés com canela.

Prof. Carlos, obrigada pela primeira oportunidade, mas muito mais pelas segundas, terceiras e outras tantas. Não sei se eu aprendi tudo que você tentou me ensinar, mas estou certa de que aprendi muito e não só sobre digestão anaeróbia. A maneira como você conduz o seu grupo de pesquisa com profissionalismo, autocrítica, exigência, confiança e reconhecimento refletiu em meu crescimento pessoal de uma maneira imensurável.

Aos colegas do grupo de pesquisa, como foi bom conviver com tantas opiniões e pontos de vista diferentes. Em nome de todos vocês, agradeço à Suzane, que esteve sempre presente no “muro das lamentações” escutando nossos problemas e nos ajudando a resolvê-los mesmo sem saber como ela foi parar neles. Aos colegas de laboratório, técnicos e alunos, que acompanharam com olhares curiosos minhas análises e experimentos tão fora da rotina, agradeço a companhia, perguntas e respostas às minhas dúvidas. Certamente vocês foram a primeira e grande banca de avaliação deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pela oportunidade. Em especial, às funcionárias do DESA, Iara e Dayse.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa.

Aos membros da banca pelo aceite do convite de participar da avaliação deste trabalho.

Esta pesquisa não teria sido possível sem a colaboração dos estudantes de iniciação científica voluntária: Ana Carolina Rocha, Anna Luiza Batista, Bárbara Rodrigues e Wellington Cota. A oportunidade de proporcionar momentos de aprendizagem a vocês foi muito gratificante.

Sem a colaboração de diversos setores da UFMG, tão pouco teria sido possível caminhar com a pesquisa. Ao Túlio Siqueira e Fábio Dornelas, do Departamento de Gestão Ambiental, meus sinceros agradecimentos pelo apoio na coleta e disponibilização de dados do câmpus Pampulha e ajuda de seus estagiários: Hélio Magalhães, Leandro Felisberto, Rodolfo Assis e Guilherme Brugger. Ao Marco Antônio Schaefer, do Restaurante Setorial II, e aos permissionários das demais cantinas do câmpus Pampulha que se dispusera a fornecer e coletar dados sobre seus resíduos. Ao Artur Aguiar, do Departamento de Manutenção e Infra Estrutura – DEMAI, também pela disponibilização de dados e pelas contribuições na discussão final desta pesquisa. Igualmente aos demais funcionários técnicos e professores que abriram portas para que eu pudesse coletar os dados que precisava para esta pesquisa.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial ao João Carlos Mendes Fonseca, futuro bacharel em Direito, à Jerusa Faria, recém doutora em Bioquímica desta casa, e à Camila Corgozinho, doutora em Química e professora desta casa, que apesar de atuarem em áreas tão diferentes da minha, me ajudaram a lapidar o texto desta pesquisa simplesmente por laços de amor.

Por um movimento *Slow Science*

“Pesquisar, refletir, ler, escrever, ensinar requer tempo. Esse tempo, nós não o temos mais ou temos cada vez menos. Nossas instituições e, ainda mais, a pressão social, promovem a cultura do imediato, do urgente, do tempo real, do fluxo intenso, dos projetos que se sucedem a um ritmo cada vez mais rápido. Tudo isso ocorre não somente em detrimento de nossas vidas – todo colega que não estiver sobrecarregado, estressado, ‘atolado em compromissos’ passa hoje por excêntrico, abúlico ou preguiçoso –, mas também em detrimento da ciência. A *Fast Science*, assim como o *Fast Food*, prefere a quantidade à qualidade.”

Joël Candau¹

¹ CANDAU, J. Por um movimento *Slow Science*. **Ciência & Tecnologia**, Distrito Federal, ano XXI, n. 49, p.8-9, jan. 2012.

RESUMO

A busca por novas estratégias integradas para o gerenciamento de resíduos será um dos grandes movimentos no Brasil em observância à Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir da biometanização de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG. Resíduos alimentares, papéis não recicláveis (papel guardanapo e papel toalha) e resíduos de jardinagem (poda de grama e folhas de árvores) foram escolhidos devido à geração significativa no câmpus. Inicialmente, um inventário da geração destes resíduos foi realizado para o período de agosto de 2011 a julho de 2012. Os dados revelam que a geração de resíduos alimentares não apresentou relação com o tipo de comercialização da refeição de almoço: *self-service*, prato-feito e restaurante universitário. Além disso, verificou-se que o consumo de papel guardanapo e papel toalha por pessoa por refeição é elevado e pode ser visto como ponto crítico para campanhas de conscientização de redução de geração na fonte. O equivalente populacional de geração de resíduos orgânicos pelo câmpus é de aproximadamente 2600 habitantes (média anual) e cerca de 4700 habitantes (média do mês crítico). A variação de resíduos orgânicos, em quantidade e tipo, é muito expressiva, portanto, a combinação entre as técnicas de biometanização e de compostagem é uma combinação de técnicas que viabiliza o gerenciamento dos resíduos com aproveitamento energético para fins de uso interno e plataforma de estudo. O potencial de biometanização dos resíduos gerados no câmpus foi avaliado por meio de ensaios de codigestão anaeróbia representando a variação na proporção de geração mensal de resíduos. Os melhores resultados de produção específica de CH_4 ($\text{mLCH}_4.\text{gSTVresíduo}^{-1}$) estão associados às amostras com maior teor de resíduos de restaurante (resíduo alimentar, papel guardanapo e papel toalha), os quais são facilmente degradáveis. Os resultados intermediários estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e elevados teores de poda de grama, ao passo que os piores resultados estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e elevados teores de folhas secas. Extrapolando-se os dados de produção específica de CH_4 para a geração mensal de resíduos no período estudado, o potencial de geração de energia elétrica mensal variou de aproximadamente 7.400 a 29.000 kWh. Este potencial energético se mostra de grande interesse para a UFMG principalmente para atenuar o consumo nos horários cujas tarifas são mais elevadas.

Palavras-chave: biometanização, codigestão, digestão anaeróbia, biogás, resíduos orgânicos.

ABSTRACT

The search for new integrated waste management strategies will be one of the great movements in Brazil in accordance with the National Policy on Solid Waste, instituted by Law n° 12.305/2010. The aim of this study was to evaluate the power generation potential from the biomethanation of organic waste generated at the Pampulha campus. Food scraps, non-recyclable paper (napkins and paper towels) and yard waste (grass clipping and leaves) were chosen because of significant generation on campus. Initially, an inventory of the wastes generation was conducted from August 2011 to July 2012. The data show that the generation of food waste was not related to the way the meal is sold (self-service, dish-made and university cafeteria). Furthermore, it was found that the consumption of paper napkins and paper towel per person per meal was high and it can be seen as a point of awareness campaigns to reduce the generation at the source. The population equivalent of generating organic waste by campus was approximately 2600 inhabitants (annual average) and about 4700 inhabitants (average critical month). The quantitative and type variation of organic waste was very expressive, thus the combination of biomethanation and composting techniques enable the management of waste with energy recovery for purposes of internal use and platform study. The biomethanation potential of campus residues was assessed by anaerobic co-digestion assays representing the variation in the proportion of monthly waste generation. The best results of CH₄ specific production (mLCH₄.gSTVresidues⁻¹) were associated with higher content of restaurant waste (food waste, paper napkins and paper towels) samples, which are easily degradable. Intermediate results were associated with low levels of restaurant residues and high levels of grass pruning, whereas the worst results associated with low levels of restaurant residues and high levels of dry leaves. Extrapolating data from CH₄ specific production to monthly waste generation in the period analysed, the potential for monthly electricity generation was approximately 7400-29000 kWh. This energy potential emerges as the great interest to the UFMG mainly to attenuate the consumption in higher tax periods.

Keywords: biomethanation, co-digestion, anaerobic digestion, biogas, organic wastes.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XII
LISTA DE APÊNDICE.....	XIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1 DEMANDA ENERGÉTICA.....	6
3.1.1 <i>A dependência da energia elétrica e a busca por melhores eficiências</i>	6
3.1.2 <i>Fontes alternativas e sustentáveis de energia</i>	8
3.2 A PROBLEMÁTICA DO CRESCIMENTO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	13
3.2.1 <i>Crescimento em quantidade de resíduos no Brasil</i>	13
3.2.2 <i>Discussão a respeito das alternativas de gerenciamento de resíduos</i>	13
3.3 BIOMETANIZAÇÃO.....	15
3.3.1 <i>Princípios da digestão anaeróbia</i>	15
3.3.2 <i>Codigestão</i>	18
3.3.3 <i>Fonte de inóculos</i>	19
4 INVENTÁRIO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CÂMPUS PAMPULHA DA UFMG COM POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA VIA BIOMETANIZAÇÃO.....	20
4.1 INTRODUÇÃO.....	20
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.2.1 <i>Área de estudo e escolha dos resíduos</i>	21
4.2.2 <i>Identificação das fontes geradoras</i>	22
4.2.3 <i>Coleta de dados de geração de resíduos</i>	23
4.2.4 <i>Extrapolação de dados</i>	25
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.3.1 <i>Identificação das fontes geradoras</i>	25
4.3.2 <i>Coleta e extrapolação de dados de geração de resíduos</i>	26
4.3.3 <i>Inventário de resíduos</i>	32
4.4 CONCLUSÃO.....	35
5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES, PAPÉIS NÃO RECICLÁVEIS E RESÍDUOS DE JARDINAGEM.....	36
5.1 INTRODUÇÃO.....	36
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	38
5.2.1 <i>Escolha e obtenção do inóculo e dos resíduos orgânicos</i>	38
5.2.2 <i>Planejamento do teste de biometanização</i>	41
5.2.3 <i>Montagem e monitoramento do teste de biometanização</i>	46
5.2.4 <i>Tratamento dos dados</i>	50
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.3.1 <i>Monitoramento do teste de biometanização</i>	50
5.3.2 <i>Avaliação comparativa da codigestão anaeróbia de resíduos de restaurante, papéis não-recicláveis e resíduos de jardinagem</i>	54
5.4 CONCLUSÃO.....	58
6 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO NA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CÂMPUS PAMPULHA.....	59
6.1 INTRODUÇÃO.....	59
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61

6.2.1	Área de estudo e inventário de resíduos	61
6.2.2	Produção específica de CH ₄ da codigestão de resíduos orgânicos	61
6.2.3	Consumo energético do câmpus Pampulha.....	62
6.2.4	Extrapolação de dados em diferentes cenários de gerenciamento de resíduos do câmpus Pampulha.....	63
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6.3.1	Cenário 1	64
6.3.2	Cenário 2	65
6.3.3	Cenário 3	67
6.3.4	Estimativa da contribuição de energia elétrica nas demandas do câmpus Pampulha da UFMG.....	70
6.4	CONCLUSÃO.....	73
7	CONCLUSÕES FINAIS	75
8	RECOMENDAÇÕES.....	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Materiais utilizados na coleta de dados em campo: a) saco de ráfia adaptado; b) balança tipo pescador.....	24
Figura 4.2 – Material utilizado na coleta de dados do restaurante Setorial II: a) contenedores de 120 L; b) balança mecânica.	24
Figura 4.3 – Número de cantinas por tipo de comercialização de refeições de almoço.	26
Figura 4.4 – Movimentação do Restaurante Setorial II de agosto de 2011 a julho de 2012. (a) refeições realizadas; (b) consumo de papéis não recicláveis.....	30
Figura 4.5 – Massa dos resíduos de áreas verdes de agosto de 2011 a julho de 2012.....	31
Figura 4.6 – Geração ($\text{kg}\cdot\text{mês}^{-1}$) de resíduos orgânicos no campus Pampulha de agosto de 2011 a julho de 2012. a) resíduos alimentares, poda de grama e folhas secas; b) papel guardanapo e papel toalha.	33
Figura 4.7 – Proporção ($\% \text{kgSTV}\cdot\text{mês}^{-1}$) entre os resíduos orgânicos gerados no campus Pampulha de agosto de 2011 a julho de 2012	34
Figura 5.1 – Vista geral da plataforma pMethar, recentemente implantada no Quarteirão 10 do campus Pampulha (ao centro o biodigestor anaeróbio)	39
Figura 5.2 – Contenedores de 120 L. (a) resíduos de preparo; (b) sobra de prato; (c) sobra de produção; (d) contenedor identificado.	40
Figura 5.3 – Procedimentos de montagem do experimento. (a) frasco tipo penicilina, tampa de borracha, lacre de metal rasgável e alicate recravador; (b) fechamento do frasco; (c) abertura da aba do lacre de metal; (d) lavagem da atmosfera com N_2 ; (e) vedação do furo com silicone; (f) incubação dos frascos em estufa sem agitação.	48
Figura 5.4 – Monitoramento da produção de biogás. (a) seringa de vidro esmerilhada, bico de três vias, seringa de plástico e agulha comum; (b) amostra em análise no cromatógrafo a gás;	49
Figura 5.5 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 1 e do branco.	51
Figura 5.6 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 2 e do branco.	52
Figura 5.7 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 3 e do branco.	52
Figura 5.8 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 4 e do branco.	52
Figura 5.9 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 5 e do branco.	53
Figura 5.10 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 6 e do branco.	53
Figura 5.11 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 7 e do branco.	53
Figura 5.12 – Produção volumétrica de CH_4 do ensaio 8 e do branco.	54
Figura 5.13 – Resultados em ordem crescente de: a) %RR; b) produção específica de metano.	57
Figura 6.1 – Consumo de energia elétrica (total e na ponta) do campus Pampulha no período de agosto de 2011 a julho de 2012.....	62
Figura 6.2 – Despesas (R\$) com energia elétrica (total e na ponta) do campus Pampulha no período de agosto de 2011 a julho de 2012.....	62

Figura 6.3 - Estimativa de produção mensal de CH ₄ (Nm ³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 1.....	64
Figura 6.4 - Estimativa de produção mensal de CH ₄ (Nm ³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 2.....	66
Figura 6.5 – Estimativa de produção mensal de CH ₄ (Nm ³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 3.....	70
Figura 6.6 – Comparação entre as estimativas de produção de energia (MWh) dos três cenários.....	73
Figura A1-0.1 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ do branco.....	83
Figura A1-0.2 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A1. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	84
Figura A1-0.3 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A2. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	85
Figura A1-0.4 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A3. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	86
Figura A1-0.5 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A4. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	87
Figura A1-0.6 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A5. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	88
Figura A1-0.7 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A6. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	89
Figura A1-0.8 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A7. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	90
Figura A1-0.9 – Produção volumétrica de biogás e CH ₄ da amostra A8. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Número de refeições diárias de almoço por local em 2013	27
Tabela 4.2 – Geração de resíduo alimentar	28
Tabela 4.3 – Faixas de valores coletados nas cantinas	28
Tabela 4.4 – Extrapolação de dados do número de refeições e da geração de resíduos alimentares para todos os locais.	29
Tabela 4.5 – Relações de $\text{kgSTV.kgresíduo}^{-1}$	34
Tabela 5.1 – Composição média do biogás.	36
Tabela 5.2 - Massa específica dos resíduos (g.mL^{-1}).....	43
Tabela 5.3 – Série de sólidos dos resíduo alimentar e inóculo.....	43
Tabela 5.4 – Proporção (gSTV) entre os resíduos.....	44
Tabela 5.5 – Volumes e massas ($\text{g}_{\text{in natura}}$) de inóculo e resíduos utilizados no teste de biometanização.	45
Tabela 5.6 – Volumes e massas de resíduos utilizados no teste de biometanização.	45
Tabela 5.7 – pH inicial e final dos ensaios de codigestão anaeróbia.....	51
Tabela 5.8 – Resultado final dos ensaios de codigestão	55
Tabela 5.9 – Resultados em ordem crescente de %RR e de produção específica de metano. .	56
Tabela 6.1 – Produção específica de CH_4 das proporções de resíduos mensais.	61
Tabela 6.2 – Produção específica de CH_4 nas Condições Normais de Temperatura e Pressão	63
Tabela 6.3 - Massa de excedentes de poda de grama e folhas secas do cenário 2.	66
Tabela 6.4 – Volume (m^3) mensal dos resíduos orgânicos	67
Tabela 6.5 – Volume (m^3) mensal dos resíduos orgânicos – Cenário 3.	69
Tabela 6.6 – Estimativa de produção de energia elétrica do cenário 3 e consumo energético do câmpus Pampulha, total e na ponta (kWh).....	71
Tabela 6.7 – Despesas (R\$) com o consumo energético do câmpus Pampulha, total e na ponta e estimativa da economia com o uso da energia do C3.	72
Tabela A2-0.1 – Resultados de volume de CH_4 acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 1	92
Tabela A2-0.2 – Resultados de volume de CH_4 acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 2	92
Tabela A2-0.3 – Resultados de volume de CH_4 acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 3	92
Tabela A2-0.4 – Resultados de volume de CH_4 acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 4	93
Tabela A2-0.5 – Resultados de volume de CH_4 acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 5	93

Tabela A2-0.6 – Resultados de volume de CH ₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 6	93
Tabela A2-0.7 – Resultados de volume de CH ₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 7	94
Tabela A2-0.8 – Resultados de volume de CH ₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 8	94

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A1	Ensaio 1
A2	Ensaio 2
A3	Ensaio 3
A4	Ensaio 4
A5	Ensaio 5
A6	Ensaio 6
A7	Ensaio 7
A8	Ensaio 8
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	<i>American Public Health Association</i>
ATP	Adenosina trifosfato
AWWA	American Water Works Association
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2
C3	Cenário 3
CEU	Clube Esportivo Universitário
CH ₄	metano
CO ₂	gás carbônico ou dióxido de carbono
d	dia
DAV	Divisão de Áreas Verdes
DEMAI	Departamento de Manutenção e Infra Estrutura
DGA	Departamento de Gestão Ambiental
DISEC	Divisão de Serviços Comunitários
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FORSU	Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos
H ⁺	Ânion hidrogênio
H ₂	Gás hidrogênio
H ₂ S	gás sulfúrico ou sulfeto de hidrogênio
IEA	<i>International Energy Agency</i>
kg	quilograma
kWh	quilowatt-hora

MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
m ³	metro cúbico
mg	miligrama
MJ	Megajoule
mL	mililitro
NADH	Hidrogeno niacina adenina dinucleotídeo
NBR	Norma Brasileira
NEBUS	Ônibus movido a H ₂
O ₂	Gás oxigênio
pH	Potencial hidrogeniônico, adimensional
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ST	Sólidos totais, g.mL ⁻¹
STV	Sólidos totais voláteis, g.mL ⁻¹
t	Tonelada
UASB	<i>Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
WEF	Water Environment Federation

LISTA DE APÊNDICE

Apêndice 1 – RESULTADOS DO MONITORAMENTO INDIVIDUAL DOS TESTES.....	83
Apêndice 2 – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE, PAPÉIS NÃO-RECICLÁVEIS E RESÍDUOS DE JARDINAGEM	92

1 INTRODUÇÃO

Para atender a sua demanda energética, o homem, ao longo de sua história, já explorou diversas fontes de matéria prima, bem como desenvolveu muitas tecnologias para tal. A biomassa foi a primeira matéria prima a ser utilizada para a produção de energia na forma de calor por meio de uma técnica simples, a queima. E foi assim durante milhares de anos, até a descoberta dos combustíveis fósseis. A era dos combustíveis fósseis se iniciou em meados do século XIX e o petróleo assumiu grande destaque já a partir da década de 1960. Entretanto, já em 1970, com a crise do petróleo, a biomassa voltou a ser foco da atenção de governos e pesquisadores como um recurso energético viável (KLASS, 2004; SMIL, 2002; ZANETTE, 2009).

Em contra partida, o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), dentre eles, papéis, plásticos, resíduos orgânicos, e a incorporação, nestes, de resíduos de difícil degradação e alta toxicidade devido à tecnologia industrial empregada em seus processos de fabricação e industrialização, proporcionou novos hábitos de consumo para a população, constituindo-se como um problema para a sociedade. O homem, em toda sua existência, foi gerador de resíduo, o qual, independentemente de sua natureza de origem, estava preparado para ser degradado e absorvido pelo meio ambiente. A evolução da sociedade e suas atividades alteraram este equilíbrio de forma que o meio em que vivemos é intensamente agredido diariamente. (D'ALMEIDA, VILHENA, 2000; IKAWA, GOMES, SILVA, 2011).

Na complexidade dos centros urbanos, outro item gerador de resíduos são as áreas verdes. São necessárias para a melhoria da qualidade de vida num ambiente tão modificado, mas a manutenção destas áreas gera grandes volumes de resíduos orgânicos que precisam ser recolhidos do local para evitar que causem problemas na rede pluvial e que sirvam de abrigo para animais peçonhentos, por exemplo. De maneira geral, são resíduos de baixa densidade, ocupando grandes volumes nos locais de tratamento e disposição final. Isso resulta em custo elevado de gerenciamento, atrelado à falta de locais disponíveis nos centros urbanos, que se somam aos demais problemas enfrentados atualmente pelos profissionais responsáveis pela manutenção destas áreas (CORTEZ *et al.*, 2008; CORTEZ, 2011).

Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), que traz diretrizes relacionadas à gestão integrada,

ao gerenciamento de resíduos sólidos e às responsabilidades dos geradores, direta e indireta, sejam eles pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado. A primeira diretriz, tratada no Art. 9º, apresenta uma ordem prioritária para o gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Logo em seguida, no Art. 9º, §1º, diz que a recuperação energética pode ser uma tecnologia utilizada para o tratamento dos RSU, desde que se comprove a viabilidade técnica e ambiental com preocupação, principalmente, no tocante à emissão de gases tóxicos. Entretanto, há de se destacar que a recuperação energética está associada ao item “tratamento dos resíduos sólidos”, ou seja, não deve ser prioritária para resíduos os quais possam: não ser gerados, ter geração reduzida, ser reutilizados ou ainda reciclados, observando-se a ordem de prioridade de gerenciamento estabelecida pela PNRS.

A recuperação energética é possível tanto por tratamentos físico-químicos, como incineração, pirólise, gaseificação, quanto por tratamentos biológicos, por meio de sistemas de digestão anaeróbia, a qual é tratada, nesse texto, por biometanização.

Os sistemas de biometanização apresentam-se como alternativa para viabilizar o tratamento de resíduos orgânicos urbanos, tais como resíduos alimentares, papéis não recicláveis (papéis guardanapo e papéis toalha) e resíduos de áreas verdes (poda de grama e folhas de árvores) por biometanização. Usualmente, os resíduos de papel e de áreas verdes não são recebidos nas plantas de metanização devido a sua natureza recalcitrante, mas é possível que a degradação destes possa ser otimizada quando codigeridos com outros resíduos ou utilizando inóculos mistos. Desta forma, se proporcionaria maior equilíbrio entre alimentos e microrganismos dentro do reator e aumentaria a diversidade microbológica, com possíveis ganhos na produção de CH₄, agregando viabilidade para esta nova proposta de tratamento alternativa para papéis não recicláveis e resíduos de áreas verdes.

A biometanização possui subprodutos gasosos, líquidos e sólidos. O efluente, ainda com um remanescente de matéria orgânica e nutrientes e o lodo com umidade reduzida podem, ser utilizados como fertirrigação e composto orgânico, respectivamente (SILVA, 2009).

O biogás, subproduto gasoso, pode ser utilizado energeticamente de várias formas, como uso direto em substituição a outros tipos de combustíveis gasosos, ou indireto, na geração de eletricidade e cogeração de eletricidade e calor. Devido a limitações de eficiência das máquinas térmicas, grande parte da energia potencial é convertida a calor. Logo, uma forma

eficiente de aproveitamento é a cogeração de eletricidade e calor, visto que o potencial energético que não puder ser aproveitado como eletricidade, poderá sê-lo em calor (CHERNICHARO, 2007; LOBATO, 2011; SOUZA, 2010; USEPA, 2003; ZANETTE, 2009).

A utilização de resíduos sólidos urbanos – RSU, como biomassa para aproveitamento energético apresenta diversos benefícios para o setor energético, como a descentralização da geração de energia elétrica, a competitividade de custos, a possibilidade de redução da importação de combustíveis fósseis se for implantada em número e escalas representativas e pode até colaborar para reduzir o desmatamento de florestas nativas para fins energéticos (CORTEZ, 2011).

O que se defende nesta pesquisa é que os resíduos orgânicos não sejam enviados para os aterros sanitários, mas sim para sistemas anaeróbios que permitam um tratamento com aproveitamento energético, sem descumprir as diretrizes da PNRS e cuja disposição final priorize o retorno de nutrientes ao solo, criando um ciclo que sustente a exploração do solo sem seu desgaste irreversível.

Dentre os resíduos orgânicos gerados na Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, os que serão alvo de estudo deste trabalho são (i) os resíduos alimentares do Restaurante Setorial e das lanchonetes e restaurantes particulares atualmente em funcionamento no câmpus Pampulha; (ii) os papéis não recicláveis gerados nos mesmos locais do item i; (iii) os resíduos de podas de grama e folhas secas oriundo das áreas verdes do câmpus Pampulha. Destaca-se, portanto, a grande presença de materiais lignocelulósicos, cada qual com características distintas de degradabilidade, fontes de geração, geração contínua e intermitente ao longo do ano, dentre outras, mas todos propícios ao tratamento via biometanização. Para alguns destes resíduos é possível propor a redução na fonte, como é o caso de papéis guardanapo, toalha e resíduos alimentares. Entretanto, não é possível propor alternativas de redução na fonte de resíduos de poda e folhas de árvores, pois são resíduos gerados em função das estações climáticas.

Para a UFMG, as vantagens e desvantagens do tratamento anaeróbio de seus resíduos estão listadas a seguir:

Vantagens

- Menor quantidade de resíduos enviada para o aterro;
- Aproveitamento da energia elétrica ou térmica para demandas do câmpus;
- Marketing ambiental, principalmente pela questão da recuperação energética;
- Aplicação de pesquisa realizada dentro da própria instituição, promovendo visibilidade da mesma, enquanto instituição de pesquisa.

Desvantagens

- Necessidade de funcionários fixos e capacitados para gerenciar e operar o sistema;
- Possibilidade de eventos de mau odor dentro do câmpus;
- Necessidade de implantação de um sistema de segregação na fonte geradora e/ou centro de triagem de resíduos.

Neste sentido, se os resíduos orgânicos da UFMG, que atualmente são destinados ao aterramento sanitário, alimentação animal e compostagem, forem tratados pela codigestão anaeróbia, vão possuir um potencial de geração de energia elétrica e térmica, o qual se pretende estimar neste trabalho. Além disso, levando em consideração a variação destes resíduos ao longo do ano e a complexidade de degradação dos resíduos lignocelulósicos, espera-se obter dados da codigestão que permitam operar o sistema visando a produção constante de biogás. Para que a UFMG tenha segurança de alterar seus contratos com o atual fornecedor de eletricidade é preciso que o sistema tenha geração de energia constante, ou com poucas variação, uma vez que o uso de energia além da demanda contratada gera multas. Ao confrontar os dados obtidos nesta pesquisa com o consumo energético de determinado período da UFMG, espera-se obter resultados favoráveis que subsidiem o investimento no sistema de biometanização dos resíduos orgânicos em detrimento da compra de energia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar o potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

2.2 Objetivos específicos

1. Realizar inventário dos resíduos orgânicos do campus Pampulha da UFMG com potencial de geração de energia via biometanização;
2. Avaliar, comparativamente, a codigestão anaeróbia de resíduos alimentares, papéis não recicláveis e resíduos de jardinagem em diferentes proporções;
3. Estimar a produção de metano a partir das diferentes composições de resíduos do campus Pampulha da UFMG e da sua variabilidade ao longo do ano;
4. Estimar a contribuição da geração de energia elétrica a partir do metano nas demandas do campus Pampulha da UFMG.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo de revisão de literatura está baseado em dois cenários principais: a demanda energética e gerenciamento de resíduos sólidos. Entretanto, é na interseção destes dois cenários que esta pesquisa se insere, ou seja, no aproveitamento energético da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos via biometanização.

3.1 Demanda energética

3.1.1 A dependência da energia elétrica e a busca por melhores eficiências

A trajetória da sociedade humana, considerando-se aspectos de melhoria da qualidade de vida, desenvolvimento científico, industrial, econômico e ambiental, está recorrentemente atrelada a diferentes formas de energia.

Nos últimos séculos, de maneira geral, a cada descoberta de uma nova fonte de energia, seguiu-se um período de prosperidade econômica principalmente no desenvolvimento e comercialização de produtos e serviços que utilizam determinada forma de energia. Existem períodos de inovação, que vão da descoberta da nova energia até o desenvolvimento ou adaptação de produtos que utilizam a nova forma de energia. Seguido de momentos de ampla difusão destes produtos, modificando os ambientes industriais e domésticos e aquecendo a economia. E, quando se descobre outra nova fonte de energia, há os períodos de transição, onde se esgota o dinamismo da energia antiga e se desenvolvem novos produtos (TIGRE, 1993).

O primeiro grande ciclo de crescimento econômico, na segunda metade do século XVIII, esteve associado à difusão do carvão mineral na produção de ferro e inovações nas máquinas têxteis. Entretanto, seu progresso foi barrado também por uma questão energética, mas no campo dos transportes, que impôs uma limitação na escala de produção e escoamento dos produtos que ainda dependia da energia animal, eólica e hidráulica. Nesta época, houve um período de transição entre estas energias e o desenvolvimento de máquinas a vapor mais eficientes que revolucionou o campo dos transportes ferroviários e marítimos. Apesar de ter sido inventada em 1712, somente no início do século XIX é que a difusão da máquina a vapor se acelerou. O segundo ciclo esteve, portanto, associado às máquinas a vapor. O terceiro e longo ciclo econômico tem, como principal inovação, a eletricidade. Entretanto, apesar de ser considerada uma revolução tecnológica, a eletricidade demorou décadas para resultar em

impacto econômico, pois foi necessário desenvolver uma infraestrutura totalmente inovadora para sua utilização. No ciclo de prosperidade seguinte, anterior à Segunda Guerra Mundial, baseado no uso intenso de energia e matéria prima, foi marcante a presença do petróleo. A partir daí, os períodos de crescimento no pós-guerra já não estão mais associados a fatores energéticos, mas sim, a fatores organizacionais e de recursos humanos (TIGRE, 1993).

O uso da eletricidade e de combustíveis fósseis vigoram até os dias de hoje, entretanto, o primeiro tem inúmeras fontes renováveis, enquanto o segundo, não. Ambos já passaram por crises, mas ainda persistem. O petróleo, por exemplo, assumiu grande destaque a partir da década de 1960, entretanto, houveram duas crises, em 1973 e 1979, que refletiram em todo o mundo (SMIL, 2002; KLASS, 2004; ZANETTE, 2009). As crises de energia elétrica possuem um caráter mais localizado, como foi o caso do Brasil em pleno início do século XXI (MATTOS, 2005).

Nesta crise energética brasileira, foi necessária a implantação de um programa de racionamento do consumo de energia elétrica entre os meses de junho de 2001 a fevereiro de 2002. Esta crise foi desencadeada por falta de investimentos na expansão dos segmentos de geração e transmissão de energia, que passaria despercebido por mais algum tempo, não fosse a ocorrência de um dos piores regimes pluviométricos daquela época. Mattos (2005) fez uma análise da demanda de energia elétrica e variação de preços no período de 1974-2002, e encontrou uma relação inelástica entre estes fatores. Neste caso, pode-se dizer que o preço da energia não interfere na demanda e, provavelmente, o sucesso do programa de racionamento esteve mais associado à ameaça de corte, do que a própria cobrança de tarifas mais altas e multa.

Nota-se, portanto, que é difícil conceber uma sociedade que, uma vez tendo iniciado investimentos para este recurso energético, não dependa mais da energia elétrica. A eletricidade permanecerá em intenso uso, seja doméstico ou industrial, num horizonte incalculável, entretanto, as formas de obtenção desta energia está passando por uma reformulação (TIGRE, 1993; MATTOS, 2005).

Tigre (1993, p. 29) descreveu que este “novo paradigma que se avizinha é intensivo em conhecimento e poupador de matérias-primas e energia”. Esta descrição é o que se tem hoje, cerca de duas décadas depois: (i) intensa pesquisa em novas fontes de energia elétrica alternativas à energia oriunda de hidrelétricas (MATTOS, 2005; TOLMASQUIM,

GUERREIRO, GORINI, 2007); (ii) intensa pesquisa e desenvolvimento de produtos com uso mais eficiente de energia e o próprio processo produtivo com uso energético mais eficiente que pode ser mensurado pelo conteúdo energético do PIB (MATTOS, 2005; TOLMASQUIM, GUERREIRO, GORINI, 2007); (iii) crescente contestação socioambiental ao investimento em novas hidrelétricas, principalmente na região amazônica (MATTOS, 2005; ABRAMOVAY, 2010); (iv) uso de resíduos agrícolas, industriais e urbanos como fonte de biomassa, à exemplo da cana-de-açúcar, cujo aproveitamento energético está se fortalecendo (JAGUARIBE, LOBO, SOUZA, 2004; TOLMASQUIM, GUERREIRO, GORINI, 2007).

Se por um lado, houve um momento em que o modelo de crescimento estava baseado no uso intensivo de energia e matérias-primas representando enorme impacto ambiental, no momento atual, a sociedade não aceita mais esta característica predatória do meio ambiente (JAGUARIBE, LOBO, SOUZA, 2004; MATTOS, 2005; TOLMASQUIM, GUERREIRO, GORINI, 2007).

3.1.2 Fontes alternativas e sustentáveis de energia

A sociedade despertou para as questões ambientais e sociais dos produtos e serviços que consome e cada vez mais demonstra preocupação em relação aos impactos socioambientais dos investimentos públicos e privados. Neste sentido, o termo “fonte alternativa” não significa mais apenas energia alternativa àquela principalmente utilizada, mas sim, segundo Santos e Mothé (2008), “uma energia limpa, pura, não poluente, a princípio inesgotável” além de poder ser encontrada em qualquer lugar com o menor impacto ambiental possível.

Explorar fontes alternativas e sustentáveis de energia, neste contexto não predatório da natureza, é um desafio para cientistas, órgãos governamentais e para todo o ramo empresarial. A seguir, encontram-se alguns exemplos de fontes alternativas de energia com uma breve explicação do processo para a obtenção de calor ou eletricidade, vantagens e desvantagens.

Energia solar

A energia oriunda dos raios solares chega até a superfície terrestre produzindo calor e luz naturalmente e pode ser aproveitada de forma ativa ou passiva. A forma ativa não exige nenhuma transformação ou armazenamento desta energia, basta adaptar o local para receber o calor ou a luminosidade desejada. Esta forma de aproveitamento tem sido intensamente utilizada na arquitetura de edifícios visando, ao longo do dia, melhor aproveitamento da luz e

calor naturais e menor consumo de energia elétrica do fornecedor local. Entretanto, além de se aproveitar a luminosidade e o calor no período claro do dia, é possível armazenar esta energia, processo denominado energia solar passiva para uso noturno ou diurno em horários de pico de consumo. Este processo, depende, por exemplo, de um sistema adaptado para aquecimento e armazenamento da água aquecida, bem como instalação de painéis fotovoltaicos que produzirão eletricidade (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010).

Além de poder ser aproveitada de diversas formas, outra vantagem da energia solar é que ela é considerada uma fonte inesgotável de energia, seu uso não interfere nos ciclos biogeoquímicos e nem produz poluição. É preciso destacar, que, a forma passiva de aproveitamento da energia solar tem algum impacto ambiental, advindo do processo de produção dos equipamentos e instalação dos sistemas de captação e armazenamento da energia, que, contudo, diante de um bom planejamento, pode ter seus impactos mitigados.

A desvantagem da energia solar está no fato de só poder ser produzida parcialmente ao longo do dia, além do fato de que a radiação solar não atinge o planeta de maneira homogênea. Logo, em alguns pontos, mais próximos à linha do equador, o uso desta fonte de energia é mais vantajoso que para os pontos mais afastados. Outros fatores ambientais também influenciam na eficiência do sistema de captação desta energia, como por exemplo, as estações do ano, a nebulosidade e umidade relativa do ar, que impedem, ou atrapalham o contato dos raios solares com os sistemas que absorvem a sua energia (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010; SANTOS, MOTHÉ, 2008).

Na maioria dos países, a participação da energia solar na matriz energética é pífia, mas há países que se destacam, a exemplo da Alemanha, que detém, instalada em seu território, 49% da potência mundial de energia solar (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010).

Energia eólica

A força da movimentação das massas de ar já é aproveitada há bastante tempo pelo ser humano na conversão direta em energia mecânica nos moinhos de vento. Depois da descoberta da eletricidade, a energia mecânica aciona turbinas de produção de energia elétrica.

Da mesma forma que a energia solar, o aproveitamento da energia eólica depende de condições favoráveis que estão relacionadas com a natureza. É necessário realizar estudo do potencial eólico do local que precisa ter velocidade e regime de ventos adequados. Nos locais onde a instalação de usinas eólicas é viável, a vantagem está na disponibilidade gratuita e não poluente de energia e isenção de se adicionar outros recursos para se obtê-la. O impacto ambiental, assim como na energia solar, está na produção de equipamentos e instalação das usinas que podem ser mitigados desde o projeto (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010; SANTOS, MOTHÉ, 2008).

A capacidade instalada de energia eólica no mundo vem aumentando consideravelmente, e segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, no atlas de Energia Elétrica do Brasil, o país tem grande potencial de geração de energia eólica, principalmente no litoral nordestino. Em Minas Gerais, a melhor localização seria no Vale do Jequitinhonha (BRASIL, 2008). O principal fator que de restrição da disseminação desta forma de aproveitamento energético é o alto custo da energia em comparação com outras fontes (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010; SANTOS, MOTHÉ, 2008).

Energia hídrica

A água é um recurso energético atualmente muito questionado. Mesmo sendo um recurso em abundância em alguns locais, sua ampla utilização a torna objeto de discussão de prioridade de uso. De acordo com levantamentos da Agência Internacional de Energia – IEA, apenas a China e o Brasil, que são países que já respondem por grande produção de energia nesta modalidade, ampliaram o fornecimento de energia hidroelétrica, ou seja, nos demais países, os investimentos estão focados em outras fontes de energia (BRASIL, 2010).

A obtenção de hidroeletricidade e seu impacto ambiental também depende muito de fatores ambientais, como regime pluviométrico, relevo da região, biodiversidade e belezas naturais da área a ser inundada; e sociais, como o deslocamento de pequenas populações de áreas que se pretende inundar e superpopulação de vilarejos próximos que servem de apoio durante a construção da usina. A inundação de áreas é um elemento de projeto intrínseco à modalidade, uma vez que somente a formação de reservatórios garante produção de energia no período de estiagem. Além do prejuízo ambiental desta modalidade, há também um prejuízo econômico associado a inundação de áreas que poderiam ser exploradas pela agricultura e pecuária. Em

contraponto estaria à aquicultura e turismo, que podem ser estimulados na região a depender de cada projeto (MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010).

A vantagem da energia produzida em usinas hidroelétricas estava na gratuidade e abundância da água. Esta última já é questionável hoje em dia diante das mudanças climáticas e desregulação do regime pluviométrico (TIGRE, 1993; MACHADO Jr., SOUZA, FURLANETO, 2010), que pode provocar crises no fornecimento (MATTOS, 2005).

Energia do hidrogênio

Na verdade, quando se fala em energia de hidrogênio, está se fazendo referência ao uso do gás hidrogênio e oxigênio numa reação eletroquímica em ambiente controlado (um tipo de bateria), no qual, eletrodos especiais compostos por platina ou ligas platinadas são catalisadores responsáveis pela oxidação do H_2 em H^+ , que reage com O_2 formando água. Os elétrons liberados são conduzidos para um sistema externo, gerando, assim, uma corrente elétrica. Há também liberação de calor nesta reação química, que pode ser aproveitada para aquecimento de água e acionamento, para geração de energia elétrica, de turbinas a vapor. Seria portanto, uma dupla capacidade de gerar eletricidade.

As principais vantagens estão associadas a geração de água como subproduto da reação química, que, obviamente, não polui o ambiente, além do fato da energia poder ser gerada de forma constante e ilimitada. A principal desvantagem está associada a necessidade de utilização de metais nobres, como a platina, e elevado custo da energia produzida em relação as demais fontes de eletricidade. Esta última é devido à produção em baixa escala.

Esta forma de obtenção de eletricidade pode ser aplicada em residências, termoelétricas e automóveis, por exemplo. Na Alemanha, o NEBUS é um ônibus elétrico movido à energia de células a combustível, que representa alívio na poluição do ar nos centros urbanos (SANTOS E MOTHÉ, 2008).

Energia da biomassa

A biomassa é a fração orgânica, biodegradável (não inerte), de origem animal ou vegetal, oriunda de florestas, resíduos industriais ou urbanos com potencial para aproveitamento

energético por variadas formas de aplicação tecnológica, e, por isso, a mais promissora dentre as citadas anteriormente (SANTOS, MOTHÉ, 2008; FERREIRA, MINEIRO, VEIGA, 2010).

Santos e Mothé (2008) agruparam a biomassa em três classes de acordo com a forma de aproveitamento energético: biomassa sólida, biomassa líquida e biomassa gasosa.

A biomassa sólida seria composta por resíduos florestais, agrícolas e urbanos com potencial para aproveitamento energético a partir da queima (incineração, pirólise e gaseificação), na qual se pode aproveitar o calor para geração de vapor (termoelétricas) e seus subprodutos combustíveis (alcatrão pirolítico e carvão vegetal, da pirólise e gás metano, da gaseificação) (SANTOS, MOTHÉ, 2008).

O biodiesel e o etanol, foram classificados como biomassa líquida, que podem ser obtidas com processamento das chamadas “culturas energéticas”, a exemplo da mamona, girassol, soja, cana-de-açúcar, entre outras. Deve se atentar para o fato de que o resíduo do processamento para obter a biomassa líquida é um representante da biomassa sólida, ao passo que o alcatrão pirolítico (bio-óleo, “petróleo vegetal”), também pode ser considerada uma biomassa líquida.

A biomassa gasosa é o biogás, proveniente da decomposição anaeróbia de matéria orgânica, e pode ser obtida a partir de efluentes orgânicos industriais, esgoto doméstico e também de resíduos sólidos. O biogás contém metano, que é um gás combustível, e, a partir de sua queima, pode se obter energia térmica, mecânica e eletricidade.

Um fator importante que destaca a energia da biomassa em relação às demais é que ela pode ser obtida a partir de resíduos de outros segmentos industriais e urbanos, e que não necessariamente são dependentes das condições climáticas, como as energias solar, eólica e hidroelétrica, apresentadas anteriormente. Resíduos orgânicos são gerados a todo momento em ambientes urbanos, por exemplo, e são vistos até como problema ambiental e desafio para os gestores públicos. A pirólise e gaseificação são baseadas em processos físico-químicos em ambientes altamente controlados. Já o processo de degradação anaeróbia é totalmente comandado por micro-organismos vivos, donde se percebe a fragilidade da tecnologia. Entretanto, reatores biológicos com controle de temperatura e outros fatores são a garantia de boa produção de metano.

3.2 A problemática do crescimento da geração de resíduos sólidos

3.2.1 Crescimento em quantidade de resíduos no Brasil

Notavelmente o aumento do volume de resíduos gerados constitui-se um problema para a sociedade, mas o problema não está resumido ao volume. A tecnologia industrial trouxe produtos de difícil degradação e alta toxicidade, tanto ao homem, quanto aos demais seres vivos (VILHENA, 2010). Com essa preocupação, enfatiza-se a importância de um bom gerenciamento de resíduos para que haja manutenção da qualidade de vida das populações sobre pelo menos a ótica dos resíduos sólidos.

Em nível de Brasil, segundo pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o volume de RSU gerado no país aumentou em 6,8 % de 2009 para 2010, representando aproximadamente 61 milhões de toneladas de lixo em 2010, número este seis vezes maior que o índice de crescimento populacional urbano apurado nesta mesma época. Em 2011, a mesma instituição publicou o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil para o período de 2010 a 2011. Segundo este documento, houve um acréscimo de 1,8% na quantidade total gerada de resíduos, contra 0,9% de crescimento populacional, resultando num aumento de 0,8% no índice de geração *per capita* de RSU ($\text{kg.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$) (ABRELPE, 2010, 2011). Percebe-se, portanto, que a geração de resíduos aumentou, embora a taxas menores, pois em 2011 o crescimento populacional seguiu em 0,9% e o acréscimo na geração de resíduo foi 1,3% (ABRELPE, 2013). É um bom sinal a queda das taxas de produção de resíduo, embora o ideal seja não aumentar a taxa nenhuma, ou, reduzir em grandes taxas mesmo que a população continue crescendo.

3.2.2 Discussão a respeito das alternativas de gerenciamento de resíduos

Em se tratando de poluição, podemos entender que, quando o homem polui, ele está retirando elementos de um ecossistema em equilíbrio, transformando-os e descartando-os, de forma que tanto o ambiente explorado, quanto o ambiente que recebe este elemento sofrem modificações até que seja atingido um novo equilíbrio químico, físico e biológico. Entretanto, isto não significa que as formas de vida não serão prejudicadas ou favorecidas. Este equilíbrio pode tanto extinguir/reduzir uma comunidade, como favorecê-la. Além disso, não é somente a fração viva destes locais que sofrerá modificações: rochas, solo, água e ar são, por assim dizer, elementos químicos, que participam deste grande processo que chamamos de poluição.

Os resíduos sólidos urbanos receberam recentemente atenção do governo brasileiro (PNRS) justamente por se perceber que a falta de gerenciamento destes resíduos afetavam a saúde da população e a qualidade ambiental. O lixo urbano é composto por materiais orgânicos, materiais recicláveis e rejeitos e cada uma destas frações gera um tipo de problema que poderia ser mitigado com gerenciamento e tratamento de cada uma delas (VILHENA, 2010).

No Brasil, as principais formas corretas de tratamento e destinação dos RSU são aterramento sanitário, compostagem e reciclagem. O gerenciamento de RSU ainda não tem tantas opções como se vê em outras áreas do saneamento, como tratamento de água para consumo humano e tratamento de esgotos domésticos (VILHENA, 2010).

O acúmulo de matéria orgânica atrai pequenos animais e insetos que podem ser vetores de doenças para outros animais e também para o homem e se eles forem acumulados próximos às zonas residenciais podem prejudicar a saúde da população. Além disso, como os resíduos orgânicos são de fácil degradação, as comunidades de seres decompositores aumenta muito e quando se trata de decomposição anaeróbia as excretas (gases e soluções ácidas) são tóxicas a animais e plantas e contaminam solo, ar e água. Portanto é um problema em curto prazo e antes da sua disposição no meio ambiente é necessária sua estabilização biológica em ambiente controlado, manipulando organismos decompositores, seja na compostagem aeróbia ou anaeróbia ou incineração (VILHENA, 2010).

A fração não orgânica é geralmente de mais difícil degradação que a fração orgânica, logo, os materiais recicláveis ficam por mais tempo no ecossistema que a fração orgânica. Isto gera um problema em longo prazo, pois, diante do elevado consumo, estes materiais estão se acumulando. Quando chegam aos lagos, rios e oceanos acabam provocando a morte de alguns animais por sufocamento ou, quando ingeridos, podem provocar prejuízos físicos ao organismo ou intoxicação. Se forem aterrados, exigem grande disponibilidade de área. Por fim, quando estão no solo misturados a matéria orgânica, os ácidos gerados na decomposição desta acaba por corroer estes materiais liberando para o solo, ar e água compostos contaminantes. Desta forma, o gerenciamento destes resíduos e a incorporação destes à cadeia da logística reversa é tem o objetivo de não acúmulo destes materiais e também a redução da extração de matéria prima do meio ambiente colaborando para que as gerações futuras ainda encontrem o meio ambiente com capacidade de fornecer seus insumos. Para estes resíduos, a

intervenção necessária é química e física (CASTRO, 1996; SANTOS, 2006; VILHENA, 2010).

O rejeito é a fração dos resíduos sólidos urbanos que ainda não possuem retorno à logística reversa com viabilidade técnica e não são de fácil degradação, entretanto causam impacto em curto e longo prazo, pelo acúmulo e pela lixiviação de compostos contaminantes. Eles podem ser incinerados ou aterrados sem causar grandes prejuízos se estes processos forem bem controlados (CASTRO, 1996; SANTOS, 2006; VILHENA, 2010).

Diante da enorme quantidade de resíduos geradas no país, há que se desenvolver novos e eficientes sistemas de tratamento destes resíduos, pois somente diversificando as tecnologias é que se conseguirá a ampliação do tratamento e destinação correta dos resíduos. É preciso diversas tecnologias para as diversas realidades de cada município.

3.3 Biometanização

3.3.1 Princípios da digestão anaeróbia

Alessandro Volta, físico Italiano, teria sido o autor dos primeiros relatos da digestão anaeróbia. Em 1776, Volta mostrou que um “ar combustível” era formado nos sedimentos de lagos, lagoas e córregos e que seria um subproduto da degradação da matéria vegetal aderida aos sedimentos (MC CARTY, 2001).

A digestão anaeróbia é um processo de estabilização biológica da matéria orgânica por ação de um consórcio de diferentes tipos de microrganismos que na ausência de oxigênio molecular, promovem a transformação de compostos orgânicos complexos em produtos mais simples, como metano e gás carbônico. As quatro etapas principais de conversão desta matéria orgânica são a hidrólise, acidogênese e acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA; SASAKI, 2012).

A hidrólise é uma etapa importante para o aumento da disponibilidade do resíduo ao metabolismo dos demais grupos de micro-organismos. As bactérias hidrolíticas degradam polímeros mais complexos a compostos de menor complexidade, dimensões e pesos moleculares, pela ação de exoenzimas. As proteínas são degradadas a polipeptídeos pela ação de proteases excretadas por bactérias dos gêneros *Bacteroides*, *Butyvirbio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Peptococcus* e *Bacillus*. Do mesmo modo, os

carboidratos são degradados a moléculas mais simples de açúcares pelas amilases excretadas por *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivibrio* e *Eubacterium*. Por fim, os lipídeos são degradados pelas lipases excretadas, comumente, pelas bactérias dos gêneros *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus* (LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA, SASAKI, 2011).

As bactérias fermentativas acidogênicas são responsáveis pela degradação dos compostos gerados na fase de hidrólise, constituindo a fase da acidogênese. Nesta etapa, os principais gêneros de bactérias são as *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia*. Os subprodutos são excretados na forma de ácidos graxos voláteis de cadeia curta, álcoois, ácido láctico e compostos inorgânicos, tais como CO₂, H₂, NH₃ e H₂S. Algumas destas bactérias são capazes de oxidar a matéria orgânica também por via oxidativa, utilizando o O₂ comoceptor final de elétrons. Desta forma, a anaerobiose do ambiente é controlada, eliminando possibilidades de toxicidade aos micro-organismos estritamente anaeróbios (LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA, SASAKI, 2011).

A terceira etapa da biometanização é a acetogênese. Nesta etapa, as bactérias acetogênicas produtoras de H₂, representadas pelos gêneros *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter* e algumas bactérias redutoras de sulfato, são responsáveis pelo consumo dos subprodutos das bactérias fermentativas, excretando acetato, CO₂ e H₂. Entretanto, há também, as bactérias acetogênicas consumidoras de H₂, *Acetobacterium*, *Acetoanabacterium*, *Acetogenium*, *Butyribacterium*, *Clostridium* e *Pelobacter*, que excretam acetato formado a partir de CO₂ e H₂. Com o consumo de H₂, o equilíbrio do meio é deslocado para o consumo de ácidos pelo outro grupo de acetogênicas (LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA, SASAKI, 2011).

O CH₄, gás de maior interesse desta pesquisa, é formado na última etapa, a metanogênese. O grupo de micro-organismos responsáveis por esta etapa são denominados arqueias metanogênicas e possuem duas vias metabólicas principais. As arqueias hidrogenotróficas produzem CH₄ e H₂O, reduzindo CO₂ a metano e utilizando H₂ como doador de elétrons. Por outro lado, as arqueias acetoclásticas produzem CH₄ e CO₂ a partir da degradação do acetato

(LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA, SASAKI, 2011).

Na presença de bactérias redutoras de sulfato, haverá uma competição, com as arqueias metanogênicas, por substrato, etapa denominada sulfetogênese, cujos subprodutos são H₂S e CO₂. O H₂S é um subproduto gasoso e com características corrosivas e compõe o biogás, principalmente, com o CH₄ e CO₂ (LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007; KHALID, 2011; MORITA, SASAKI, 2011).

Estas etapas devem ocorrer em equilíbrio a fim de garantir a taxa máxima metanogênica. Sendo a manutenção deste equilíbrio dependente da concentração de hidrogênio, que deve ser constantemente removido do meio para assegurar a produção de ácido acético (CARDOSO *et al.*, 2003; LETTINGA, HULSHOF POL, ZEEMAN, 1996; CHERNICHARO, 2007).

Todos os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia são especializados e cada grupo atua em reações específicas. A formação de metano (principal componente do biogás) é altamente desejável, porém, os micro-organismos metanogênicos são mais sensíveis que os hidrolíticos ou acidogênicos às condições desfavoráveis do meio. As condições do meio, devem, portanto, favorecer especialmente o crescimento destes organismos que são anaeróbios estritos, de crescimento lento e bastante sensíveis a condições adversas (CARDOSO *et al.*, 2003).

A formação e oxidação do metano são essenciais para o ciclo global do carbono, no qual o metano é a forma mais reduzida do carbono (valência -4) e o CO₂ a forma mais oxidada (valência +4). A decomposição da matéria orgânica na ausência de acceptor de elétron inorgânico resulta na formação de metano e CO₂ (CARDOSO *et al.*, 2003).

As arqueias metanogênicas são organismos obrigatoriamente anaeróbios e liberam gás metano como subproduto metabólico. São encontrados em ambientes com ausência de oxigênio e abundância de matéria orgânica, como pântanos, açudes, lagos, sedimentos marinhos e rúmen de bovinos. Elas retiram o hidrogênio e gás carbônico desses ambientes e os utilizam em seu metabolismo. Vivem como simbioses de uma grande variedade de protozoários também anaeróbicos, convertendo produtos finais de fermentação em gás metano. São de grande importância ao ambiente em que vivem pela alta eficiência de sua enzima hidrogenase que, mantendo uma baixa pressão parcial de H₂ para que a metanogênese ocorra, permitem que os

demais organismos fermentadores façam reoxidação do NADH, o que corresponde a um maior rendimento de ATP e um aumento da biomassa (CARDOSO *et al.*, 2003).

3.3.2 Codigestão

A codigestão é um processo no qual dois ou mais resíduos são misturados e tratados ao mesmo tempo. O objetivo principal é acelerar o processo de degradação de ambos os resíduos, ou de algum que especificamente seja mais resistente.

Este objetivo pode ser alcançado de várias formas. A mistura de diferentes resíduos pode, por exemplo, contribuir para um balanço mais favorável de macronutrientes e micronutrientes permitindo que a microbiota envolvida no processo de degradação se desenvolva a taxas mais elevadas se comparadas às taxas da digestão de cada resíduo em separado. Muitos estudos têm revelado bons resultados na codigestão de resíduos agrícolas, municipais e industriais (KHALID, 2011).

Por outro lado, mesmo que a contribuição em macro e micronutrientes não seja tão significativa para determinadas combinações de resíduos, eventualmente, um resíduo que seja também fonte de inóculo, pode acelerar o processo justamente por contribuir com um maior contingente de micro-organismos ou com a diversidade deles. A codigestão de lodo de esgoto e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos – FORSU apresenta bons resultados. Ambos resíduos são gerados em grande quantidade em diversas municipalidades e por isso esta combinação foi intensamente estudada (MATA-ALVAREZ, CECCHI, 1990). Eventualmente outras combinações também produzem o mesmo efeito. Na Dinamarca, já em 1980, diversas plantas de codigestão de estrume bovino e resíduo orgânico industrial tiveram sucessivos resultados positivos (MATA-ALVAREZ, 2000). O aumento da diversidade de micro-organismos pôde ser retratado por um estudo de *start-up* de reatores realizado com lodo de esgoto e dejetos bovinos para tratar uma combinação de resíduos simulando FORSU, cujo sucesso foi descrito por Griffin *et al.* (1998).

Outro efeito que se pode obter com a codigestão é a diluição de compostos tóxicos, a exemplo da amônia. A fim de melhorar as condições de degradação anaeróbia de um efluente rico em amônia, pode-se codigeri-lo com um efluente com baixa ou nenhuma concentração deste composto (CASTILLO, VERGARA, MORENO *et al.*, 2007).

Em termos de umidade, a codigestão entre resíduos de baixa umidade e efluentes também resultam vantagens operacionais e podem resultar em incrementos de produção de biogás, ao passo que torna-se desnecessário o uso de água limpa para atingir a umidade necessária para o sistema projetado. Além disso, o fato de ter um único sistema capaz de tratar mais de um resíduo já é uma vantagem econômica, entretanto, se o arranjo de resíduos a serem codigeridos de fato proporcionar incrementos na produção de CH₄, que é o gás de interesse, esta vantagem econômica pode ser ampliada.

3.3.3 Fonte de inóculos

Quando se pretende realizar a digestão anaeróbia em ambiente controlado para fins de obtenção de metano, existem diversas estratégias para tornar o sistema mais eficiente, uma delas, seria a inoculação do reator com um material, que pode conter matéria orgânica residual, mas que seja rico em micro-organismos responsáveis pelas diversas rotas metabólicas da digestão anaeróbia. Alguns resíduos já contêm grande diversidade de micro-organismos, como é o caso de efluentes domésticos, dejetos suínos e bovinos, entretanto, outros resíduos são muito “limpos”. É o caso dos resíduos da indústria alimentícia e resíduos alimentares de restaurante, no qual o processo produtivo inclui a higienização do alimento. Logo, para que este resíduo estabeleça uma comunidade microbiana anaeróbia capaz de produzir metano em boas taxas, o tempo do *start-up* de um reator seria muito superior (e pode nunca acontecer devido a excesso de acidez) em relação ao de resíduos com grande comunidade microbiana anaeróbia (FOSTER-CARNEIRO *et al.*, 2007a; FOSTER-CARNEIRO, PÉREZ, ROMERO, 2007b).

No ecossistema do rúmen bovino, por exemplo, sabe-se que ocorrem interações de fungos anaeróbicos, organismos metanogênicos, não metanogênicos e protozoários. Bauchop e Mountfort (1981) demonstraram que culturas de *Neocallismastix frontalis* degradavam papel de filtro mais extensivamente na presença de metanogênicas do que em sua ausência. Por outro lado, os fungos anaeróbios no rúmen tem o papel principal de colonizar materiais de origem vegetal, incluindo, dentre outros, farelo de trigo, palha de arroz, milho, gramas e materiais altamente recalcitrantes como a madeira (XIMENES, 2003). Portanto, se há pretensão de degradar este tipo de resíduo, uma boa fonte de inóculo seria rúmen bovino.

4 INVENTÁRIO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CÂMPUS PAMPULHA DA UFMG COM POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA VIA BIOMETANIZAÇÃO

4.1 Introdução

Lixo são restos das atividades humanas considerados pelo seu gerador como inútil ou descartável e é considerado indesejável pela poluição visual e maus odores que podem causar. Lixo e resíduo sólido urbano (RSU) têm o mesmo significado e o termo RSU será adotado preferencialmente neste trabalho.

A produção de resíduos é inevitável em qualquer ambiente com aglomeração de pessoas e a quantidade e composição destes resíduos variam de acordo com a condição financeira, hábitos sociais, dentre outros. De maneira geral, tem se observado um aumento na geração de resíduos sólidos urbanos que vem se tornando uma preocupação da sociedade e governos (VILHENA, 2010).

No Brasil, após 20 anos tramitando no Congresso Nacional, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Trata-se de um marco brasileiro para orientar avanços no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, por meio de diretrizes integradas que, dentre outras consequências, ampliam as possibilidades de uso de resíduos como matéria-prima para outros processos produtivos antes do descarte final.

A concepção de um modelo de gerenciamento de resíduos de determinada localidade deve levar em conta as especificidades da população ali presente e das atividades realizada por ela, seja social, científica ou industrial. Logo, para gerenciar os resíduos da maneira mais eficiente é preciso conhecê-los bem: quem gera? Como gera? Onde gera? Quanto gera? Por quê gera? Pode ser evitado? Pode ser reciclado? Como pode ser tratado? E assim por diante. Dessa forma, o primeiro passo para um projeto de gerenciamento de resíduos é um inventário de resíduos. Por meio de um inventário é possível identificar pontos críticos para diferentes intervenções, seja redução da geração na fonte, segregação dos resíduos ou, ainda, tipo de tratamento dado à determinado material.

Vilhena (2010) destaca que o objetivo da caracterização do resíduo é um fator norteador do processo, pois “para cada necessidade, variam as análises a realizar e, conseqüentemente, a

metodologia de amostragem”. Dentre os diferentes tipos de resíduos que compõe os resíduos sólidos urbanos e as diferentes possibilidades de tratamento ou beneficiamento, a fração orgânica destes resíduos tem basicamente duas opções: aterramento sanitário e compostagem, cada qual com seus prós e contras. O tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos recebeu pouco investimento tecnológico no Brasil. Este resíduo pode ser muito mais explorado e trazer benefícios para contrabalancear com seus fatores complicadores no meio urbano. Neste sentido, diante das novas diretrizes da PNRS e da oportunidade de aproveitamento energético do biogás, que é um subproduto do tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos, a tendência é que as possibilidades tecnológicas para tratamento dos resíduos orgânicos se ampliem.

Na UFMG, a realidade do gerenciamento de resíduos sólidos confronta-se com as pesquisas produzidas. Segundo Barros (2012), “as questões ambientais, incluindo resíduos sólidos, só recentemente começaram a ser objeto de ações de gestão administrativa (...), apesar dos conhecimentos (...) expressos (...) na capacitação de seus quadros (e) na produção científica”. O Departamento de Gestão Ambiental – DGA da UFMG, foi criado no reitorado de 2010-2013 e anterior a isso as atividades relacionadas ao gerenciamento de resíduos eram realizadas de forma desarticulada por diversos setores e iniciativas individuais. Logo se vê, pela criação deste departamento, que apesar de longa, a caminhada da UFMG em relação às preocupações ambientais está numa boa direção (BARROS, 2012).

O objetivo deste estudo foi realizar um inventário anual de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG com potencial para geração de energia via biometanização.

4.2 *Material e Métodos*

4.2.1 *Área de estudo e escolha dos resíduos*

A área de estudo delimitada para a realização desta pesquisa foi o câmpus Pampulha da UFMG, localizado no município de Belo Horizonte, Minas Gerais. Esta área foi assim delimitada para embasar outras pesquisas relacionadas com o Quarteirão 10, espaço localizado dentro do referido câmpus que abrigará pesquisas em geração descentralizada de eletricidade, baixo consumo de energia e de baixa emissão de carbono, por meio da implementação de inovações nas edificações e laboratórios a serem construídos no local.

Dentre os diversos tipos de resíduos sólidos gerados neste câmpus, os de interesse para esta pesquisa são os orgânicos, por possuírem potencial de degradação por via anaeróbia com formação de subproduto gasoso com potencial energético, o biogás. Foram escolhidos resíduos de geração significativa em todas as épocas do ano.

Os resíduos orgânicos de maior geração pelos usuários e pela manutenção das áreas verdes deste câmpus são resíduos alimentares, papéis não recicláveis (guardanapos de papel e papéis toalha), poda de grama e folhas de árvores, sendo estes cinco resíduos os escolhidos para a realização do inventário. Exemplos de outros resíduos orgânicos de menor geração seriam fezes de animais das instalações do curso de Medicina Veterinária e resíduos de manutenção do biotério, os quais não foram alvo desta pesquisa por sofrerem variações anuais de difícil controle para a realização deste inventário. A geração de cada um dos cinco resíduos escolhidos sofre variações ao longo do ano a depender da densidade de usuários em período letivo e não-letivo, bem como das estações climáticas, sendo que a primeira vai influenciar na geração de resíduos alimentares e papéis não recicláveis e, a segunda, na geração de resíduos de áreas verdes.

Em relação aos papéis recicláveis, que possuem potencial tanto para a biometanização quanto para a reciclagem, preferiu-se não incluí-los nesta pesquisa. Apesar do uso de tintas não ter interferido em resultados de taxas de produção de metano em trabalho de Owens e Chynoweth (1993) de lá pra cá novos produtos são empregados nos diversos tipos de papel a fim de garantir durabilidade, brilho, resistência à umidade etc, que poderiam conferir diferentes níveis de toxicidade ao grupo de micro-organismos que promovem a biometanização; e em virtude das diretrizes da Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) que instituiu a PNRS e elenca ordem prioritária no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Neste caso, a reciclagem tem prioridade em relação ao tratamento dos resíduos.

4.2.2 Identificação das fontes geradoras

- Resíduos alimentares: Foram identificadas fontes geradoras de resíduo alimentar que comercializam refeições. Os resíduos alimentares gerados em copas dos departamentos e aqueles trazidos de casa pelos usuários do câmpus não foram considerados.

- Papéis não recicláveis: foram consideradas as mesmas fontes dos resíduos alimentares, visto que o consumo em outros locais da universidade possuem geração esporádica.
- Resíduos de jardinagem: correspondem aos coletados nas áreas verdes que recebem manutenção regular da Divisão de Áreas Verdes (DAV) do Departamento de Gestão Ambiental (DGA) da UFMG. Neste caso, não foram considerados resíduos de folhas de árvores das matas fechadas, bem como os de área de capineira pertencente à Escola de Veterinária da UFMG.

4.2.3 Coleta de dados de geração de resíduos

Nesta pesquisa foram utilizados dados primários e dados secundários.

Na maioria dos locais pesquisados a coleta e pesagem dos resíduos orgânicos foi realizada pela primeira vez para a realização desta pesquisa, mas há locais que realizam diariamente este controle. Para esta etapa foram montados kits de coleta de dados composto por planilha padronizada para anotação dos dados (massa de resíduo gerada diariamente, número de refeições diárias e consumo de papel guardanapo e papel toalha), saco de rafia com alças adaptadas (Figura 4.1a) e balança tipo pescador com capacidade para 50 kg (Figura 4.1b). Esta balança foi escolhida por ser portátil e ter capacidade superior à massa dos sacos de resíduos (máximo de 30 kg). Ao longo de 30 dias corridos, todos os resíduos orgânicos, acondicionados em sacos plásticos, foram colocados nos sacos de rafia com alças para aferição da massa por meio da balança tipo pescador. Devido ao elevado número de restaurantes particulares dentro do câmpus (Tabela 4.1), foram montadas 6 equipes de pesagem, incluindo estagiários e funcionários do DGA, estudantes de iniciação científica voluntária e funcionários dos restaurantes.

Figura 4.1 – Materiais utilizados na coleta de dados em campo: a) saco de ráfia adaptado; b) balança tipo pescador.



No restaurante Setorial II, diferentemente das demais cantinas, os resíduos são acondicionados em contenedores de 120 L (Figura 4.2a) e a aferição de massa foi em balança mecânica (Figura 4.2b).

Figura 4.2 – Material utilizado na coleta de dados do restaurante Setorial II: a) contenedores de 120 L; b) balança mecânica.



Das 22 cantinas do câmpus, 17 comercializam refeições de almoço. Destas 17, foi possível realizar a aferição de massa de resíduo orgânico descartada e número de refeições, ambos dados diários, em apenas 8, cerca de 49% das refeições realizadas diariamente, incluindo 2 dos 3 restaurantes de maior atendimento estão representados.

Dentre as 9 cantinas restantes, em relação ao nº de refeições diárias, 2 forneceram dados próprios, 5 forneceram dados médios verbalmente e 2 não forneceram dados. Para estes últimos foram adotados dados do objeto de licitação vencida fornecidos pela Divisão de Serviços Comunitários – DISEC, da UFMG.

Em relação aos resíduos de jardinagem, foram utilizados dados secundários coletados pelo DGA, que já faz o monitoramento volumétrico dos resíduos de jardinagem coletados no câmpus. Foram realizadas algumas campanhas para aferição da densidade destes resíduos (resíduo não compactado tal qual o volume é costumeiramente aferido), pois foi necessário converter todos os resíduos para uma mesma unidade: quilograma. Nestas campanhas, foram utilizados um balde com alça de volume conhecido e balança tipo pescador.

4.2.4 Extrapolação de dados

Em virtude da impossibilidade de se coletar dados dos resíduos ao longo de 12 meses, optou-se por basear-se no comportamento anual dos dados secundários para a extrapolação dos dados primários e, desta forma, construir um perfil de geração de resíduos para o inventário.

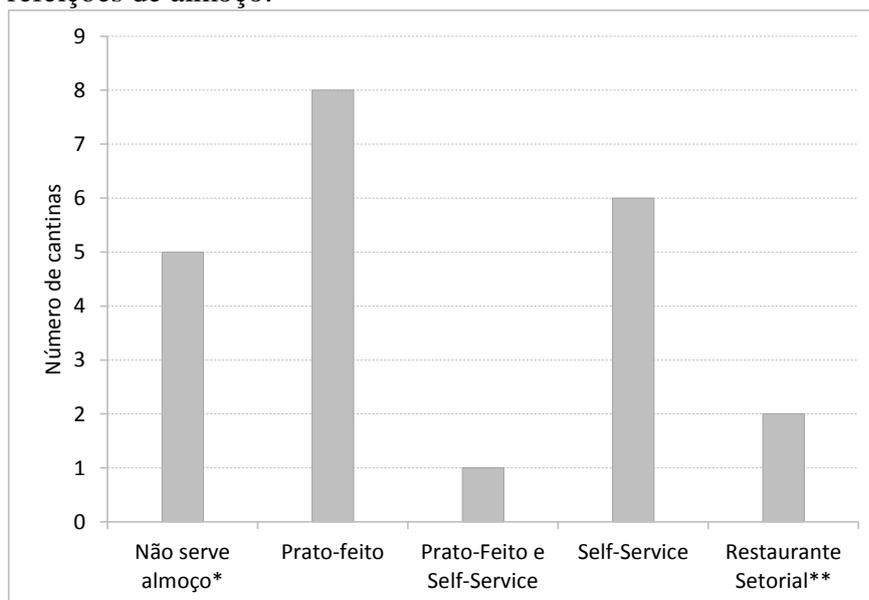
Para a delimitação de um período de um ano no qual se pretendia realizar um inventário de geração de resíduos, procurou-se por um período de 12 meses ininterruptos, sem ocorrência de greves e outro eventos atípicos, como o “pula catraca” – manifestação que ocorreu em 2013 contra o aumento do preço das refeições no restaurante Setorial II.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Identificação das fontes geradoras

O inventário dos resíduos alimentares e de papéis não recicláveis partiu da identificação e caracterização dos locais geradores. As 22 cantinas do câmpus foram agrupadas por tipo de comercialização de refeições de almoço (Figura 4.3), apenas 17 estavam comercializando refeições de almoço e foram consideradas para os resultados aqui descritos.

Figura 4.3 – Número de cantinas por tipo de comercialização de refeições de almoço.



Notas:*1 restaurante funciona apenas no final de semana e 1 serve apenas refeições congeladas; **Parte dos alimentos é servida de forma controlada e outra parte é livre.

Os resíduos de jardinagem são oriundos de 56,4 ha de gramados e 3 ha de jardins correspondentes ao câmpus Pampulha e Centro Esportivo Universitário – CEU.

4.3.2 Coleta e extrapolação de dados de geração de resíduos

O número de refeições de almoços servidos nas 22 cantinas do câmpus Pampulha da UFMG estão descritos na Tabela 4.1. Os restaurantes tem capacidade de fornecimento de refeições muito diferente. A maioria deles era inicialmente apenas lanchonete que passou a comercializar refeições de almoço por demanda dos usuários. Como nem todos os permissionários das cantinas se dispuseram a colaborar com a coleta de dados ao longo de 30 dias corridos pela equipe do projeto (mês de referência da Tabela 4.1), optou-se por mais de um tipo de coleta de dados de número de refeição, que foi o valor médio informado durante as conversas e, em último caso, o valor informado pela DISEC que consta no objeto de licitação do qual as empresas participaram.

Tabela 4.1 – Número de refeições diárias de almoço por local em 2013

Tipo de comercialização	Local	Média do contabilizado	Verbalizado	Objeto de licitação	Média mensal	Mês de referência
Prato Feito	E. Farmácia	-	100*	149	2000	Setembro
	COLTEC	-	265*	35	5300	Setembro
	E. Música	-	220*	46	4400	Setembro
	FAFICH	-	100*	180	2000	Setembro
	ADM III	-	-	53*	1060	Setembro
	E. Belas Artes	149	-	106	3282**	Setembro
	ICEX	180	-	295	3954**	Agosto
	Química	283	-	264	6499**	Setembro
Self Service	Engenharia bloco III	-	415*	300	8300	Setembro
	E. Veterinária	-	-	180*	3600	Setembro
	Praça de Serviços	-	-	815*	16300	Outubro
	EEFFTO	193	-	225	4439**	Agosto
	FAE	185	-	150	3890**	Setembro
	Engenharia bloco I	476	-	177	10936**	Setembro
Restaurante universitário***	ICB	600	-	750	13200**	Outubro
	Setorial I	2579	-	-	56748**	Setembro
	Setorial II	2429	-	-	53427**	Setembro

Notas: *foram utilizados para realizar a média mensal considerando os dias úteis do mês de referência; **dados reais coletados ao longo do mês de referência; ***Parte da refeição é servida de forma livre e parte controlada; os números em negritos são os que foram utilizados nos cálculos subsequentes.

Em alguns locais de comercialização de alimentos foi possível a aferição da massa de resíduos alimentares gerados ao longo do mês de referência, conforme descrito na Tabela 4.2. Com base nos dados de número de refeições da Tabela 4.1 foi possível calcular a massa média de resíduo alimentar gerada por cada refeição realizada (Taxa de geração de resíduo –Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Geração de resíduo alimentar

Tipo de comercialização	Local	Média mensal (kg)	Taxa de geração de resíduo (kgresíduo.refeição ⁻¹ .dia ⁻¹)	Mês de referência
Prato Feito	E. Belas Artes	943	0,287	Setembro
	Química	454	0,070	Setembro
Self Service	Praça de Serviços	2346	0,144	Outubro
	EEFFTO	556	0,125	Agosto
	FAE	378	0,097	Setembro
	Engenharia bloco I	2836	0,259	Setembro
	ICB	1635	0,124	Outubro
Restaurante universitário*	Setorial II	8752	0,164	Setembro

Notas: *Parte da refeição é servida de forma livre e parte controlada; os números em negritos são os que foram utilizados nos cálculos subsequentes.

Percebe-se que a geração de resíduos não tem relação com o tipo de comercialização da refeição de almoço e as faixas de valores se sobrepõem. Logo, para os locais nos quais não foi possível a aferição de massa de resíduos gerada, foi adotado o valor da taxa de geração de resíduos do restaurante Setorial II, que possui valor intermediário como pode ser visto na Tabela 4.3. Os valores médios mensais extrapolados para todos locais estudados se encontram na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Faixas de valores coletados nas cantinas

Categoria	Nº de refeições.d ⁻¹	kgresíduo.refeição ⁻¹ .d ⁻¹
Prato-feito	53 - 283	0,070 - 0,287
Self-service	180 - 850	0,097 - 0,249
Restaurante Setorial*	2429	0,164

Nota: *apenas uma unidade foi amostrada, então não há uma faixa de valores.

Tabela 4.4 – Extrapolação de dados do número de refeições e da geração de resíduos alimentares para todos os locais.

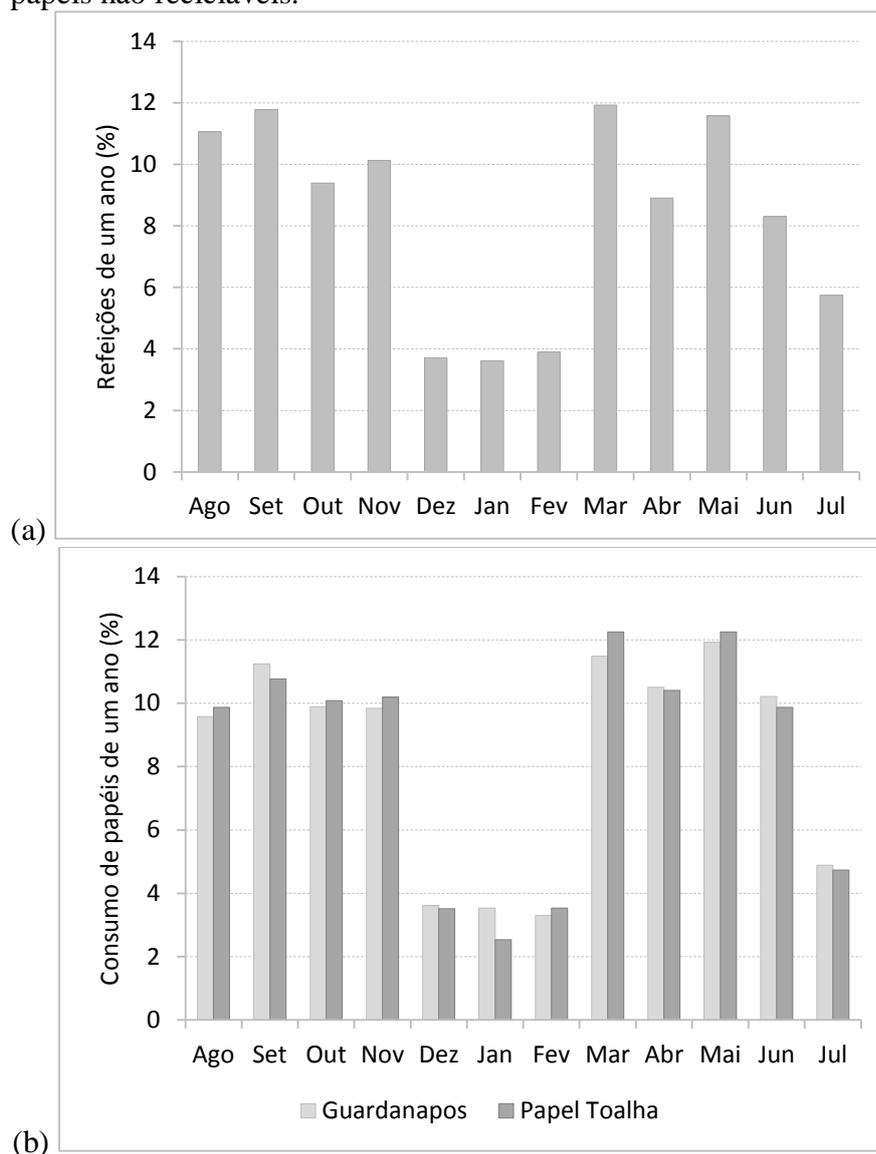
Tipo de comercialização	Local	Média mensal (kg)	Taxa de geração de resíduo (kgresíduo.refeição ⁻¹ .dia ⁻¹)	Mês de referência
Prato Feito	E. Farmácia	328	0,164	Setembro
	COLTEC	868	0,164	Setembro
	E. Música	721	0,164	Setembro
	FAFICH	328	0,164	Setembro
	ADM III	174	0,164	Setembro
	E. Belas Artes	943	0,287	Setembro
	ICEX	648	0,164	Agosto
	Química	454	0,070	Setembro
Self Service	Engenharia bloco III	1360	0,164	Setembro
	E. Veterinária	590	0,164	Setembro
	Praça de Serviços	2346	0,144	Outubro
	EEFFTO	556	0,125	Agosto
	FAE	378	0,097	Setembro
	Engenharia bloco I	2836	0,259	Setembro
	ICB	1635	0,124	Outubro
Restaurante universitário*	Setorial I	9296	0,164	Setembro
	Setorial II	8752	0,164	Setembro

Notas: *Parte da refeição é servida de forma livre e parte controlada; os números em negritos são os que foram utilizados nos cálculos subsequentes.

Em relação à coleta de dados de consumo de papel guardanapo e papel toalha, esta não foi satisfatória, e portanto, decidiu adotar o consumo do restaurante Setorial II para todos os locais estudados.

O restaurante Setorial II forneceu dados de número de refeições realizadas e consumo de papéis não recicláveis de um ano completo do período de agosto de 2011 a julho de 2012, últimos 12 meses completos anteriores à greve. Com esta série de dados foi possível verificar a oscilação do número de refeições (Figura 4.4a), consumo de guardanapos e papéis toalha (Figura 4.4b) ao longo de um ano, bem como estabelecer relações de consumo de papel guardanapo, que variou de 2,35 – 3,41 un.refeição⁻¹.d⁻¹ e papel toalha, que variou de 2,69 – 4,56 un.refeição⁻¹.d⁻¹.

Figura 4.4 – Movimentação do Restaurante Setorial II de agosto de 2011 a julho de 2012. (a) refeições realizadas; (b) consumo de papéis não recicláveis.



O consumo de papel guardanapo é elevado (o indicado é uma unidade por refeição) e o desperdício destes materiais foi alvo de reclamações, por parte dos gerentes e proprietários, em todas as cantinas visitadas. Logo, este é um ponto ideal para ser trabalhado em campanhas de uso consciente para os usuários das cantinas.

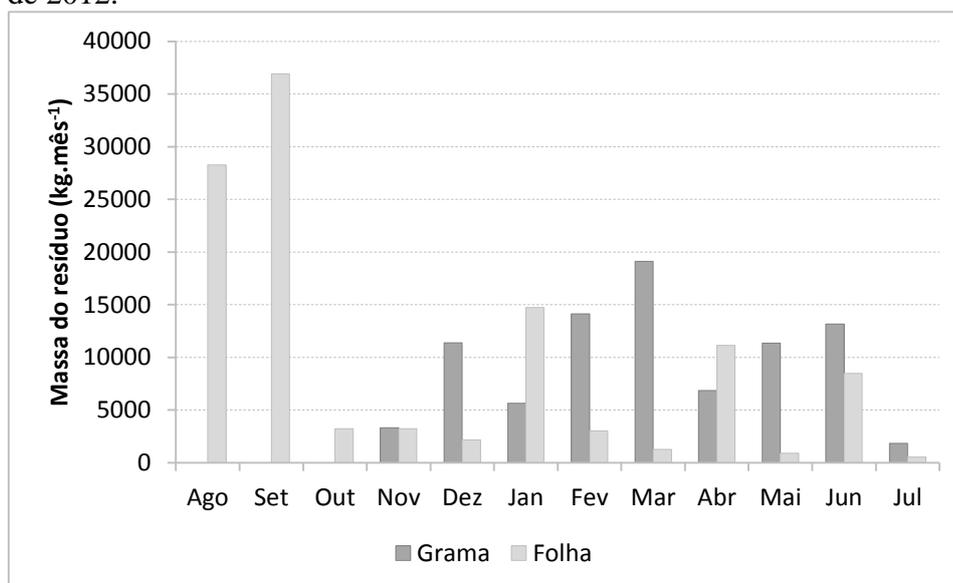
O papel toalha é usado tanto pelos clientes das cantinas quanto pelos funcionários que preparam os alimentos e precisam higienizar as mãos a todo momento. Não foi possível quantificar quanto de papel cada um destes grupos utiliza, entretanto, o desperdício deste material (mais de duas folhas utilizadas por lavagem e folhas em condições de uso caídas no chão ou umedecidas na água parada dos lavabos e pias) também foi alvo de reclamações dos

gerentes e proprietários das cantinas e restaurantes estudados e, portanto, também podem ser alvos de campanhas de uso consciente.

Resíduos de jardinagem

O Departamento de Gestão Ambiental forneceu dados em volume dos resíduos de podas gerados nos anos de 2011 e 2012. Para fazer a conversão para massa, foram realizadas pesagens sucessivas de amostras em vários dias, tendo sido encontrados os valores de 30 kg.m^{-3} de folhas secas e de 29 kg.m^{-3} de podas de grama, ambas secas ao sol. Na Figura 4.5 é possível perceber a variação anual de poda de grama e folhas de árvores. Um fator interessante é que não há geração de grama nos meses de agosto, setembro e outubro, que são os últimos meses do período de estiagem.

Figura 4.5 – Massa dos resíduos de áreas verdes de agosto de 2011 a julho de 2012.



As áreas verdes são de extrema importância para a convivência dentro do câmpus, tendo influência na harmonia paisagística, bem-estar dos usuários e drenagem de água pluvial. No tocante à drenagem pluvial, estas áreas são importantes pelo aspecto positivo do ponto de vista que contribuem para a infiltração e aumento do tempo de concentração da água em determinado ponto. Todavia, existe o aspecto negativo, que se os resíduos não forem retirados do local, a depender da intensidade da chuva, podem ser carreados e comprometer o sistema de drenagem, formando barreiras nas sarjetas e reduzindo a passagem da água nas tubulações (CORTEZ *et al.*, 2008; CORTEZ, 2011).

4.3.3 Inventário de resíduos

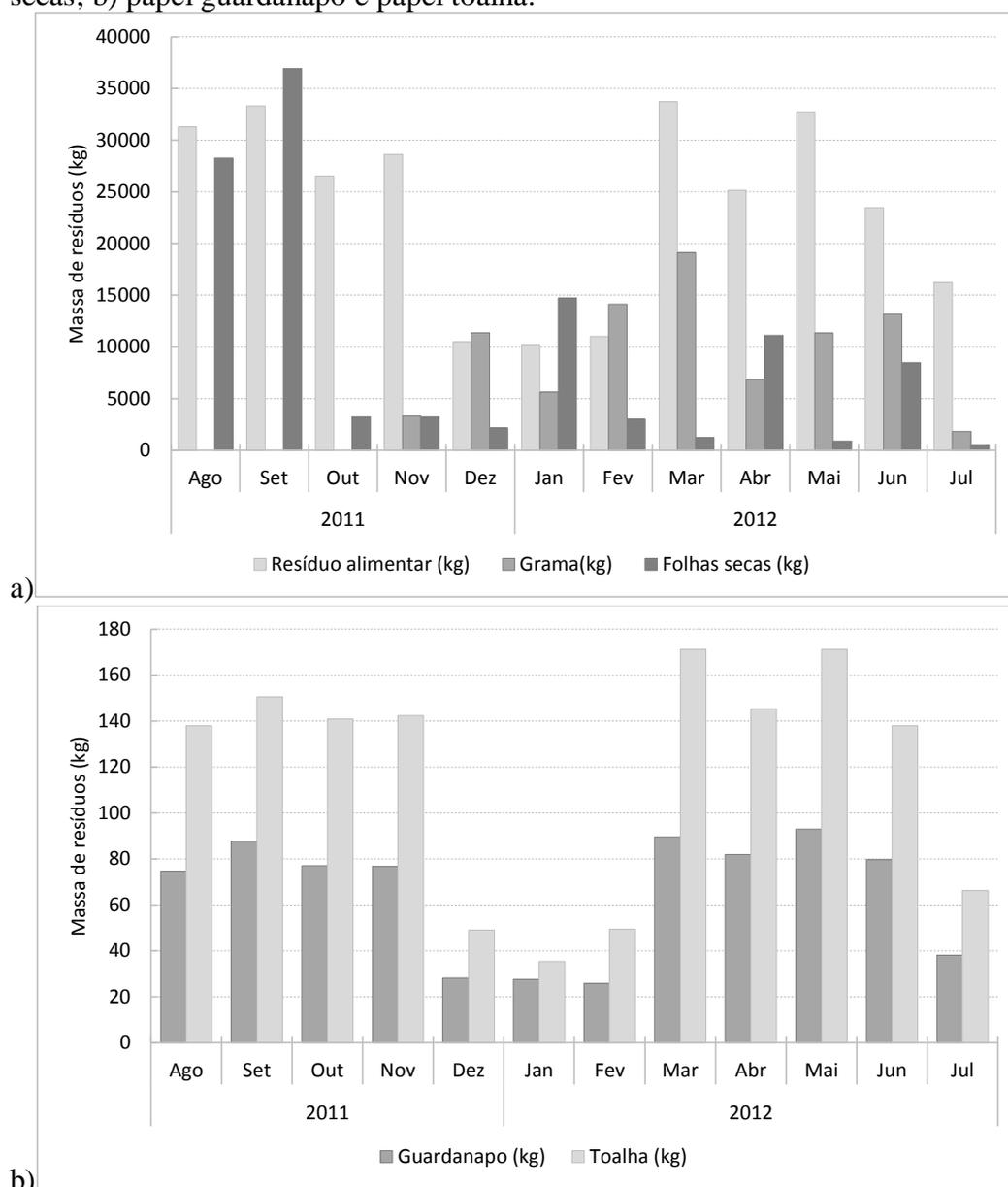
Massa total de resíduos gerados no câmpus Pampulha da UFMG

Reunindo os dados de geração mensal (Figura 4.6a e Figura 4.6b), ao longo de um ano, dos resíduos orgânicos mais significativos do câmpus, é possível perceber a importância de uma universidade como fonte geradora de resíduo sólidos urbanos, neste caso em especial de resíduos orgânicos.

Um câmpus universitário do porte do câmpus Pampulha da UFMG, inserido numa área de 340 ha, possui um equivalente populacional médio, em termos de geração de resíduos, de aproximadamente 2600 habitantes, considerando uma contribuição *per capita* de referência igual 0,5 kg de resíduo orgânico por habitante por dia. Este equivalente populacional é amortecido na média anual pelos períodos de férias, entretanto, ao se analisar um mês crítico de maior geração de resíduo do período estudado nesta pesquisa, este equivalente populacional atinge, aproximadamente, 4700 habitantes. Ressalta-se que este valor está subestimado, visto que não foram coletados dados de todos os tipos resíduos orgânicos do câmpus, como: papéis higiênicos e papéis toalha de banheiros, resíduos orgânicos de experimentos, resíduos orgânicos gerados nas copas e cozinhas de cada departamento, dentre outros.

Diante desta variação (Figura 4.6a, Figura 4.6b , Figura 4.7), percebe-se o desafio enfrentado pela administração da UFMG no tocante ao gerenciamento de resíduos, destacando-se que neste inventário foram considerados apenas cinco tipo de resíduos orgânicos comuns.

Figura 4.6 – Geração ($\text{kg}\cdot\text{mês}^{-1}$) de resíduos orgânicos no câmpus Pampulha de agosto de 2011 a julho de 2012. a) resíduos alimentares, poda de grama e folhas secas; b) papel guardanapo e papel toalha.



Proporcionalidade dos resíduos gerados em termos de sólidos totais voláteis

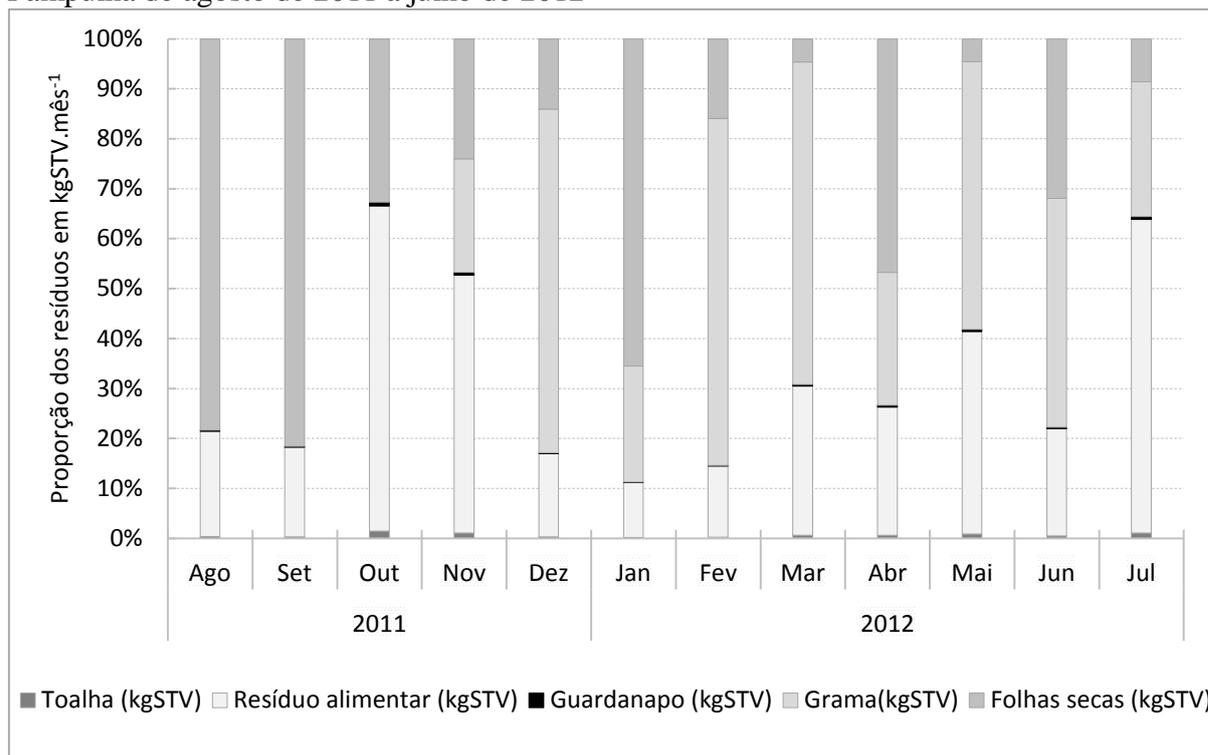
Como a umidade e densidade de cada resíduo é diferente, foram determinadas as relações de $\text{kgSTV}\cdot\text{kgresíduo}^{-1}$ (Tabela 4.5) e a média desta relação foi utilizada para extrapolar os dados dos resíduos estudados ao longo do período de agosto de 2011 a julho de 2012. Na Figura 4.7 é possível observar a variação da proporção entre os resíduos gerados mês a mês.

Tabela 4.5 – Relações de $\text{kgSTV.kgresíduo}^{-1}$

Resíduo	Mediana ($\text{kgSV.kgresíduo}^{-1}$)	Média	Desvio-padrão
Resíduo alimentar	0,200	0,199	0,022
Guardanapo	0,828	0,829	0,010
Papel toalha	0,849	0,852	0,013
Gramma	0,689	0,692	0,017
Folhas secas	0,819	0,818	0,003

Nota: n amostral = 9

Figura 4.7 – Proporção ($\% \text{kgSTV.mês}^{-1}$) entre os resíduos orgânicos gerados no câmpus Pampulha de agosto de 2011 a julho de 2012



Propostas de gerenciamento do resíduos orgânicos

Os tipos de tratamento para os quais estes resíduos podem ser enviados são vários: aterramento sanitário, compostagem, biometanização, dentro outros, e o ideal é que não sejam excludentes, pois a variação é muito grande ao longo do ano e os sistemas ficam sobrecarregados em alguns meses, a exemplo do que já acontece com a compostagem realizada pela própria UFMG.

Comparando-se a compostagem e a biometanização, ambos têm a capacidade de gerar composto orgânico, mas apenas a biometanização permite aproveitamento energético. Por outro ponto de vista, diante da necessidade de diversificar os tratamentos dos resíduos

orgânicos, a biometanização pode ser considerada uma etapa de um gerenciamento integrado com aproveitamento energético. O subproduto sólido de um sistema de biometanização precisa ser desaguado e, a depender do grau de mineralização da matéria orgânica, uma etapa de maturação, semelhante à compostagem, precisará ser executada. Logo se percebe que uma técnica não exclui a outra, mas se complementam. Além disso, abre a possibilidade de ser um sistema integrado energeticamente sustentável, pois com o biogás gerado, tanto a etapa de biometanização quanto a compostagem poderiam ser mecanizadas sem custos energéticos adicionais.

4.4 Conclusão

A partir da construção do inventário de resíduos foi possível perceber que a geração de resíduos alimentares não apresenta relação com o tipo de comercialização da refeição de almoço: *self-service*, prato-feito e restaurante universitário, visto que as faixas de geração ($\text{kgresíduos.refeição}^{-1}.\text{dia}^{-1}$) são amplas e se sobrepõem.

O consumo e desperdício de papel guardanapo ($2,35 - 3,41 \text{ un.refeição}^{-1}.\text{d}^{-1}$) e papel toalha ($2,69 - 4,56 \text{ un.refeição}^{-1}.\text{d}^{-1}$) é elevado e pode ser visto como ponto crítico para campanhas de conscientização de redução de geração na fonte.

O equivalente populacional de geração resíduos orgânicos pelo câmpus Pampulha da UFMG é de uma população de aproximadamente 2600 habitantes (média anual), mas no mês de maior geração de resíduos este equivalente atinge a marca de 4700 habitantes (média do mês crítico).

A variação de resíduos orgânicos de um câmpus universitário, em quantidade e tipo, é muito expressiva ao longo de um ano letivo, o que aumenta o desafio de se tratar todos os resíduos utilizando uma única técnica de tratamento. Uma combinação entre as técnicas de biometanização e de compostagem parece ser uma estratégia interessante e que deve ser melhor investigada para o gerenciamento integrado de resíduos orgânicos com aproveitamento energético em câmpus universitários.

5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ALIMENTARES, PAPÉIS NÃO RECICLÁVEIS E RESÍDUOS DE JARDINAGEM

5.1 Introdução

A biometanização é um processo de degradação anaeróbia de matéria orgânica, realizado por diferentes grupos de bactérias e arqueias, cujo subproduto metabólico na forma gasosa é chamado de biogás, rico em CH₄ (metano), que é um gás combustível e que se desprende com facilidade do meio líquido à temperatura ambiente. A composição típica do biogás oriunda de diferentes tipos de reatores e resíduos está ilustrada na Tabela 5.1. Os processos de conversão bioquímica da matéria orgânica são comandados por uma comunidade microbiana muito diversificada, cada qual responsável pela degradação de um composto diferente, envolvendo quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Vários são os caminhos metabólicos possíveis até a formação de metano, devido à presença de proteínas, carboidratos e lipídeos. Quanto maior a complexidade do composto, maior a dificuldade em degradá-lo por completo (CHERNICHARO, 2007; SOUZA, 2010; KHALID, *et al.*, 2011; MORITA, SASAKI, 2012).

Tabela 5.1 – Composição média do biogás.

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica do biogás		
		Esgoto sanitário em reatores anaeróbios	Resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário	Digestores de lodo de esgoto
Metano – CH ₄	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico – CO ₂	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25*	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3	Traços a <1	-
Sulfeto de hidrogênio –H ₂ S	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	Até 1000
Oxigênio – O ₂	%	Traços	0,8	-

* a elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico. Fonte: adaptado de LOBATO, 2011.

Em se tratando de complexidade do composto, os materiais lignocelulósicos, caracterizados pela combinação de celulose e hemicelulose (polímeros lineares) e a lignina (polímero não linear), são exemplos de compostos de difícil degradação, seja por vias aeróbia ou anaeróbia. A proporção destes polímeros varia de acordo com a biomassa vegetal, a idade, a posição geográfica, as condições de crescimento e, também, durante o processo de degradação devido

ao ataque diferenciado de enzimas hidrolíticas (CUNHA-SANTINO, BIANCHINI Jr., 2007). Resíduos folhosos, por exemplo, possuem em média de 18 a 25% de lignina, 45 a 55% de celulose e 24 a 40% de hemicelulose. Já as gramíneas possuem de 10 a 30% de lignina, 25 a 40% de celulose e 25 a 50% de hemicelulose. Em ambiente anaeróbio, a degradação de compostos lignocelulósicos depende de um complexo enzimático que contém exocelulases, sendo que a degradação destes polissacarídeos estruturais ocorre após o desaparecimento dos carboidratos solúveis (SALA e GUDE, 1999; MOORHEAD, SINSABAUGH, 2000). Alguns experimentos *in vitro* demonstraram que a atividade da celulase é mais intensa acima de 30 °C (CUNHA-SANTINO, BIANCHINI Jr., 2007).

Diante desta característica de resistência conferida a materiais lignocelulósicos, sabe-se que algumas bactérias e fungos presentes no rúmen bovino possuem a capacidade de excretar enzimas hidrolíticas de hemicelulose (BLANCO *et al.*, 1999; YUE, LI, YU, 2013), demonstrando que esta pode ser uma fonte de inóculo quando se pretende degradar resíduos com grandes proporções destes materiais. Entretanto, a hidrólise é apenas uma das etapas da degradação anaeróbia.

Quando se pretende promover biometanização com diversos resíduos em um mesmo reator, denomina-se codigestão anaeróbia. Este processo apresenta algumas vantagens em relação à digestão de apenas um tipo de material devido, principalmente, a: melhor balanceamento de nutrientes disponíveis para os micro-organismos decompositores; diluição de compostos tóxicos que estiverem presentes em determinado tipo de resíduo; incremento de material biodegradável e de micro-organismos decompositores com origens e metabolismos diferentes. Deste modo, a taxa de digestão e a estabilização podem ser aceleradas (LO *et al.*, 2010). Como resultado, a codigestão facilita a estabilização da matéria orgânica, torna o processo mais confiável, fornece um produto digerido de melhor qualidade e incrementa a produção de biogás (JINGURA, MATENGAIFA, 2009). Muitos estudos demonstram que a codigestão de resíduos agrícolas, municipais e industriais tem obtido sucesso e eficiência (KHALID *et al.*, 2011; KIM *et al.*, 2003; LEE *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2009).

Liu *et al.* (2009) realizaram experimento de codigestão de esterco bovino e resíduos alimentares e obtiveram incremento na produção de gás. Neste experimento, a percentagem de resíduos alimentares foi baixa, entre 2 e 3%, em termos de sólidos voláteis. A codigestão anaeróbia de resíduos alimentares e de lodo de tratamento de esgoto se mostrou mais eficiente

que a digestão anaeróbia apenas dos resíduos alimentares (KIM *et al.*, 2003; LEE *et al.*, 2009). Em ambos os experimentos, os autores estudaram o esterco bovino e o lodo de tratamento de esgoto como resíduos a serem codigeridos. Apesar do residual de matéria orgânica contido nesses materiais, ambos são fontes ricas em micro-organismos anaeróbios responsáveis pela biometanização, também chamados de inóculos.

Neste capítulo, teve-se por objetivo avaliar, comparativamente, a codigestão anaeróbia de cinco tipos de resíduos orgânicos gerados no câmpus Pampulha da UFMG, em proporções variadas.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Escolha e obtenção do inóculo e dos resíduos orgânicos

O inóculo e os resíduos utilizados neste trabalho foram coletados em diversas unidades da área de estudo: câmpus Pampulha da UFMG.

O inóculo escolhido foi o lodo de fundo, mais concentrado, do biodigestor de resíduos alimentares que integra a plataforma de metanização de resíduos orgânicos - pMethar (Figura 5.1), em operação no Quarteirão 10 da UFMG (CHERNICHARO *et al.*, 2013). O *start-up* deste biodigestor foi realizado com lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto e conteúdo ruminal de bovino coletado em abatedouro na proporção 6:1 em volume. O biodigestor, de mistura completa e com volume de 20 m³, possui capacidade para tratar de 250 a 500 kg.dia⁻¹ de resíduos alimentares oriundos do restaurante Setorial II, localizado no próprio câmpus da UFMG.

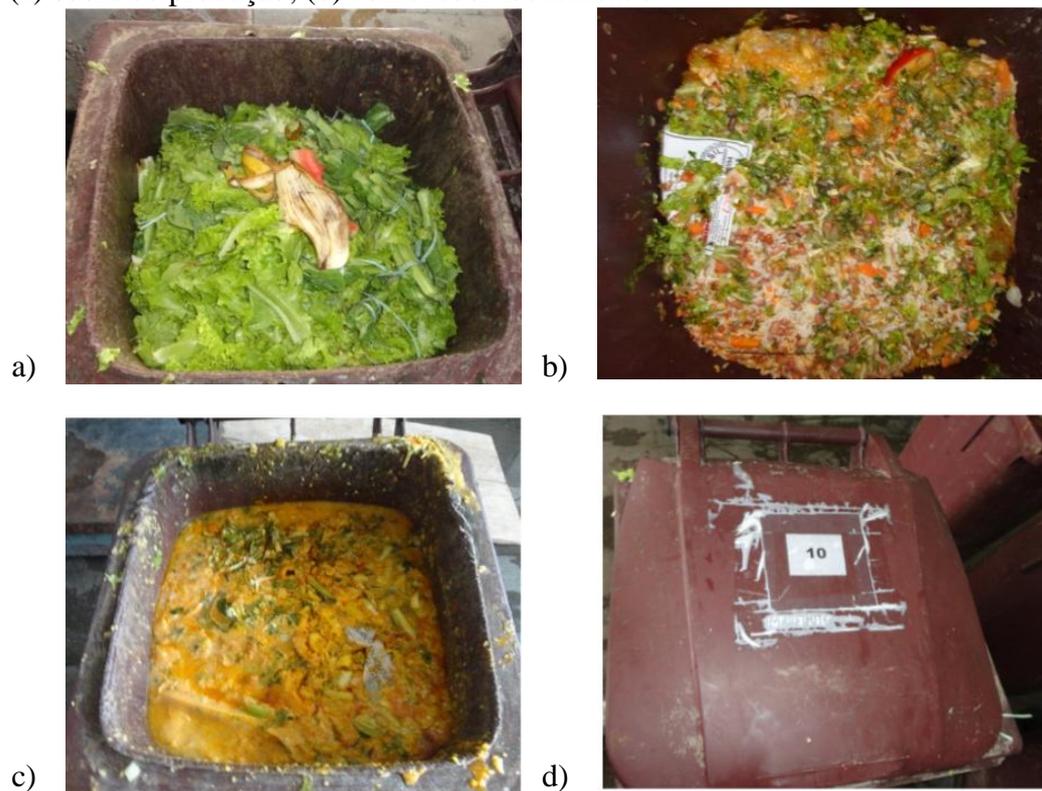
A coleta do lodo de inóculo para os experimentos descrito neste trabalho foi realizada no final do período não letivo da Universidade, no qual o biodigestor estava sem receber resíduo alimentar há cerca de 4 semanas. Esse é um indicador de que o lodo de inóculo coletado estava bem digerido e, portanto, com pequena quantidade remanescente de matéria orgânica a ser digerida. O volume de inóculo inicialmente coletado só foi suficiente para montar o primeiro ensaio. No dia seguinte, foi coletado um volume maior para posteriormente montar o segundo e terceiro ensaios e branco. Neste intervalo, o reator não recebeu alimentação, entretanto houve uma recirculação interna do lodo que alterou os resultados de STV do lodo de fundo. No total, 60 litros de inóculo foram coletados e armazenados a 4 °C, dois dias antes da montagem do experimento.

Figura 5.1 – Vista geral da plataforma pMethar, recentemente implantada no Quarteirão 10 do câmpus Pampulha (ao centro o biodigestor anaeróbio)



O resíduo alimentar foi coletado no restaurante Setorial II, supracitado. Foram coletadas amostras dos contenedores de 120 litros contendo resíduos de preparo (Figura 5.2a), como cascas e alimentos impróprios pra consumo, sobra de prato (Figura 5.2b) e sobra de produção do almoço (Figura 5.2c), que são alimentos que ficaram expostos no refeitório, mas que não foram consumidos. Todos os contenedores (Figura 4.2a) foram identificados (Figura 5.2d) pesados (vazios e cheios) em balança mecânica (Figura 4.2b) e, por fim, após subtraída a massa do contenedor da massa total, foi montada uma amostra composta proporcional à geração do dia para a utilização no experimento. O resíduo alimentar foi coletado em três campanhas distintas no restaurante Setorial II, da UFMG. Como se trata de um resíduo muito heterogêneo, torna-se necessário triturá-lo. Apesar de ter elevada umidade inerente a este tipo de resíduo, no processo de trituração é preciso acrescentar água. Para todas as campanhas de coleta a quantidade de água adicionada a massa de resíduos determinada foi sempre proporcional.

Figura 5.2 – Contenedores de 120 L. (a) resíduos de preparo; (b) sobra de prato; (c) sobra de produção; (d) contenedor identificado.



Os papéis não recicláveis escolhidos para esta pesquisa foram os guardanapos de papel e papel toalha, ambos coletados, limpos, na Escola de Engenharia. Os guardanapos de papel e papéis toalha foram escolhidos por serem resíduos de grande volume gerados nos restaurante da Universidade, entretanto, são resíduos de baixa densidade e para a montagem do experimento foram utilizados limpos para que a umidade do papel toalha e os restos de comida aderidos ao guardanapo não interferissem no momento da pesagem.

Por fim, os resíduos de jardinagem considerados para esta pesquisa foram folhas secas de árvores e poda de grama, ambos resíduos gerenciados pelo Departamento de Gestão Ambiental (DGA) da UFMG. O material foi recolhido, grama e folhas separadamente, na área de compostagem administrada pelo DGA. Ambos os materiais foram picotados aleatoriamente em partículas de tamanho ente 0,5 e 1 cm, pois a redução do tamanho das folhas era essencial para que se conseguisse uma grande diversidade de material, principalmente em relação às folhas secas, a ser incorporado aos testes de biometanização, além de permitir que as amostras passem na boca dos frascos nos quais os resíduos foram incubados, com diâmetro igual a 24 mm.

5.2.2 Planejamento do teste de biometanização

- Caracterização físico-química dos resíduos e do lodo de inóculo

A fim de subsidiar o planejamento dos ensaios de biometanização, foram realizadas, em triplicata, análises de sólidos totais e sólidos totais voláteis dos resíduos orgânicos e do lodo anaeróbio de inóculo, de acordo com os procedimentos estabelecidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2012).

- Teste de biometanização

A partir do ensaio de potencial biometanogênico inicialmente proposto por Owen *et al* (1979), o teste de biodegradabilidade anaeróbia foi realizado com algumas modificações. A principal delas foi a não utilização de solução nutriente, na busca de simular condições próximas ao biodigestor do qual foi retirado o inóculo.

Para este experimento foram utilizados frascos âmbar, tipo penicilina, de 250 mL, sendo que o conjunto inóculo + resíduos + água preencheu um volume útil de 150 mL. O volume de inóculo foi fixado, variando-se apenas a proporção entre os resíduos: resíduo alimentar, papel guardanapo, papel toalha, poda de grama e folhas secas de árvores. As proporções foram baseadas na geração dos resíduos, mês a mês, ao longo de um ano, após análise do inventário de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG, conforme apresentado no Capítulo 4 (Figura 4.6). Levando-se em consideração a diferença de umidade entre os resíduos escolhidos, esta proporção foi baseada em termos de massa seca, expressa em gSTV. Para análise do efeito da matéria orgânica residual no inóculo, foram montados frascos contendo apenas lodo de inóculo (mesma massa fixada para os demais frascos) e água (para completar o *head-space*).

Em relação à manutenção do head-space igual em todas as amostras testadas, foi necessário verificar a densidade específica de cada material, visto que, numa mistura de materiais sólidos e líquidos, o líquido ocuparia os espaços vazios do resíduo seco. Estes dados foram utilizados para definir qual a quantidade de água deveria ser acrescentada em cada frasco.

Os frascos foram montados respeitando-se a relação de $0,2 \text{ gSTVresíduo.gSTVinóculo}^{-1}$, tendo em vista ensaios² preliminares com as relações 0,1; 0,2 e 0,5 $\text{gSTVresíduo.gSTVinóculo}^{-1}$ que mostraram bons resultados para 0,1 e 0,2 $\text{gSTVresíduo.gSTVinóculo}^{-1}$ e acidificação para 0,5 $\text{gSTVresíduo.gSTVinóculo}^{-1}$.

Somando-se aos resultados dos testes preliminares, tem-se que Neves, Oliveira e Alves (2004) observaram que a produção de metano e a taxa de biodegradabilidade caíram consideravelmente para relações acima de $0,5 \text{ gSTVresíduo.gSTVinóculo}^{-1}$. Como para uma relação de $0,2 \text{ gSTVresíduos.gSTVinóculo}^{-1}$ é possível tratar mais resíduo para uma mesma parte de inóculo (em relação a $0,1 \text{ gSTVresíduos.gSTVinóculo}^{-1}$), optou-se por prosseguir os ensaios definitivos apenas com esta relação.

Foram realizados oito ensaios, um para cada amostra de resíduos a serem codigeridos. Em cada ensaio foram realizados três testes, cada um deles em triplicata, totalizando 9 frascos representando cada amostra. Os frascos foram incubados à temperatura de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em câmara incubadora, temperatura próxima à encontrada no biodigestor fonte do inóculo deste ensaio. Em relação às amostras, apenas o resíduo alimentar tem composição diferenciada, pois foram coletados em 3 dias diferentes. O inóculo utilizado foi obtido do mesmo reator para os três ensaios.

Todos os cálculos de volumes e massas dos materiais utilizados para a montagem do teste de biometanização foram baseados massa específica³ (Tabela 5.2) e nos resultados da série de sólidos expressos em gSTV.mL^{-1} na Tabela 5.3 e em $\text{kgSTV.kgresíduo}_{\text{in natura}}^{-1}$ na Tabela 4.5 (Capítulo 4), de forma que estas foram as primeiras análises laboratoriais realizadas com cada resíduo individualmente.

² Estes ensaios preliminares foram realizados apenas com resíduo alimentar e com lodo oriundo diretamente de um UASB tratando esgoto doméstico, entretanto, a duração deste ensaio preliminar foi por um período mais prolongado visando uma etapa de adaptação do inóculo ao novo resíduo a ser degradado.

³ razão entre massa e volume de determinado material descontado o volume dos espaços vazios. Neste caso, para os materiais aqui estudados, não é sinônimo de densidade.

Tabela 5.2 - Massa específica dos resíduos (g.mL⁻¹)

Resíduos	Massa específica média (g.mL ⁻¹)	Desvio-padrão	N amostral
Resíduo alimentar	0,96	0,01	4
Guardanapo de papel	1,01	0,01	8
Papel toalha	0,69	0,01	9
Poda de grama	0,51	0,04	4
Folha de árvore	0,45	0,05	3

Nota: o teste Q de Dixon foi aplicado em cada teste e não detectou outliers. Desta forma a média foi calculada sem a exclusão de dados.

Tabela 5.3 – Série de sólidos dos resíduo alimentar e inóculo

Teste	Amostra	Média	Desvio-padrão
		(gSTV.mL ⁻¹)	
1	Lodo de inóculo	0,034	0,0010
2 e 3		0,029	0,0001
1	Resíduo alimentar	0,056	0,0001
2		0,054	0,0011
3		0,058	0,0043

Nota: n amostral = 3

O conteúdo dos frascos-reactores durante os testes de biometanização buscou representar a proporcionalidade da geração de resíduos do câmpus Pampulha da UFMG, mês a mês, no período de agosto de 2011 à julho de 2012. Seriam, portanto, 12 amostras a serem testadas na codigestão anaeróbia dos diferentes tipos de resíduos orgânicos gerados. Após análise do inventário de resíduos do Câmpus (Figura 4.6 – Capítulo 4), verificou-se que as proporções de alguns meses eram muito parecidas e decidiu-se agrupá-las de acordo com a Tabela 5.4, cujos resultados foram calculados com a massa total de resíduos (Figura 4.6) e a relação $\text{gSTV.gResíduo}_{\text{in natura}}^{-1}$ (Tabela 5.3).

Tabela 5.4 – Proporção (gSTV) entre os resíduos

Amostra	%			Meses
	RR	FS	GR	
A1	10	70	20	Jan
A2	25	55	20	Abr
A3	15	15	70	Dez e Fev
A4	20	80	0	Ago e Set
A5	60	15	25	Nov e Jul
A6	60	40	0	Out
A7	35	5	60	Mar e Mai
A8	20	30	50	Jun

RR – resíduos de restaurantes, compreendendo os resíduos de alimentos e os resíduos de papéis não recicláveis; FS – resíduos de folhas de árvores secas; e GR – resíduos de poda de grama. RR representa três tipos de resíduos e a proporção foi mantida a mesma em todas as amostras na proporção de 100:0,27:0,48 (resíduo alimentar: papel guardanapo: papel toalha) a fim de simplificação dos cálculos subsequentes.

Após este agrupamento, foram realizados os cálculos para montagem dos frascos, cujos resultados estão resumidos na Tabela 5.5 e Tabela 5.6. Para estes cálculos foram considerados um volume final fixo de 150 mL.

Para determinar a massa (gSTV) de lodo que seria fixado em todos os frascos (buscando garantir a mesma população microbiana em todos os frascos), foram realizados cálculos com massas (gSTV) aleatórias de inóculo e amostra composta de resíduos que respeitasse a relação $0,2\text{gSTVresíduos.gSTVlodo}^{-1}$ a fim de se obter o volume de lodo e o suposto volume da amostra composta de resíduos. Testou-se diversas massas até se atingir um valor que levasse em consideração o volume útil previsto e um valor mínimo de água diferente de zero para a amostra de menor massa específica⁴ (uma vez que esta amostra teria o maior volume).

Encontradas as massas (gSTV) de lodo e da amostra composta de resíduos, as massas de cada resíduo das demais amostras foram calculadas com base na massa específica, relação $\text{gSTV.gresíduo}_{\text{in natura}}^{-1}$ e na proporção definida na Tabela 5.4. Ressalta-se que as massas (gSTV) da amostra composta de resíduos são as mesmas para se garantir a relação $0,2\text{gSTVresíduos.gSTVinóculo}^{-1}$, mas a massa (gSTV) de cada um dos cinco tipos de resíduos varia de acordo com a Tabela 5.4 e proporção 100:0,27:0,48 (resíduo alimentar: papel guardanapo: papel toalha). Após definir a massa de cada resíduo, foi possível determinar o volume que cada amostra composta ocuparia e, por fim, o volume de água a se acrescentar em cada frasco para completar o volume útil de 150 mL.

⁴ Foi calculada a massa específica de 1g de todas as amostras compostas de acordo com a Tabela 5.4.

Tabela 5.5 – Volumes e massas ($g_{in\ natural}$) de inóculo e resíduos utilizados no teste de biometanização.

Teste 1						
Amostra	Inóculo		Resíduo		Água	Volume útil mL
	gSTV	mL	gSTV	mL	mL	
A1				3	26	
A2				5	24	
A3				4	25	
A4	4,083	121	0,816	5	25	150
A5				10	20	
A6				10	20	
A7				7	23	
A8				5	25	

Testes 2 e 3						
Amostra	Inóculo		Resíduo		Água	Volume útil mL
	gSTV	mL	gSTV	mL	mL	
A1				3	7	
A2				5	5	
A3				4	6	
A4	4,083	140	0,816	5	6	150
A5				10	0	
A6				10	0	
A7				7	4	
A8				5	6	
Branco	4,083	140	-	-	10	150

Tabela 5.6 – Volumes e massas de resíduos utilizados no teste de biometanização.

Amostra	Resíduo alimentar*		Guardanapo	Papel toalha	Folha seca	Poda de grama
	g	mL	g	g	g	g
A1	1,4353	1,4499	0,0039	0,0069	0,6986	0,2360
A2	3,5883	3,6249	0,0098	0,0173	0,5489	0,2360
A3	2,1530	2,1749	0,0059	0,0104	0,1497	0,8262
A4	2,8706	2,8999	0,0079	0,0139	0,7985	0
A5	8,6118	8,6997	0,0236	0,0416	0,1497	0,2951
A6	8,6118	8,6997	0,0236	0,0416	0,3992	0
A7	5,0236	5,0748	0,0138	0,0243	0,0499	0,7081
A8	2,8706	2,8999	0,0079	0,0139	0,2994	0,5901

* para a montagem do experimento o resíduo alimentar foi amostrado em mL.

O planejamento do teste de biometanização previa o uso do mesmo inóculo e diferentes resíduos alimentares, a fim de se verificar se haveria diferença nos resultados dos testes tendo em vista que o cardápio dos restaurantes sofre variação diária e, portanto, os resíduos

alimentares também podem ser diferentes. Entretanto, o volume de inóculo coletado foi insuficiente, sendo necessária nova campanha. Por este motivo, na Tabela 5.5, é possível verificar que os volumes de inóculo são diferentes para o Teste 1 em relação aos Testes 2 e 3. Ressalta-se que o intervalo entre as coletas foi de pouco mais de 24 h. Neste intervalo não houve introdução de matéria orgânica no reator fonte dos inóculos, mas houve mudança na recirculação interna do reator, alterando os resultados de concentração (gSTV.mL^{-1}) do lodo de mais concentrado para menos concentrado. Desta forma, o volume de lodo utilizado no teste 1 é inferior aos testes 2 e 3, mas a concentração (gSTV.mL^{-1}) foi mantida. Observa-se que para as amostras A5 e A6 dos testes 2 e 3 não foi necessário o acréscimo de água para completar o volume útil, os novos cálculos poderia ter ultrapassado os 150 mL. Neste caso o teste 1 precisaria ter sido desmontado, pois perderia a característica de repetição do teste.

A água, além da função de completar o volume útil do frasco e manter o mesmo volume de *head-space*, também tem a função de carrear o material (lodo e resíduo alimentar) que permaneceu aderido à proveta após a transferência do volume aferido para dentro do frasco. Esta etapa foi realizada na expectativa de reduzir os erros acumulados no experimento, entretanto, para as amostras A5 e A6 dos testes 2 e 3, esta conduta não foi possível.

5.2.3 Montagem e monitoramento do teste de biometanização

Caracterização físico-química dos resíduos e do lodo de inóculo

As análises de sólidos totais e sólidos voláteis, de acordo com os procedimentos estabelecidos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2012), foram realizadas no início e fim do teste de biometanização para se determinar a quantidade de STV consumida ao longo do período de incubação. No momento da montagem do experimento, a análise foi realizada para o conjunto inóculo + resíduos + água proporcionalmente à cada amostra testada, tendo sido necessário pesar os materiais secos (poda de grama, folha seca, papel guardanapo e papel toalha) separadamente dos úmidos (lodo e resíduo alimentar). No fim do experimento, todo o conteúdo dos frascos foi levado para esta análise, pois não havia como separar uma alíquota de menor volume que fosse representativa do conjunto devido à presença de materiais fibrosos (grama e folhas secas) ainda não degradados.

O pH foi aferido em cada frasco no início e no fim do teste.

Teste de biodegradabilidade anaeróbia

Na montagem dos frascos, devido à dificuldade de medição dos pequenos volumes de resíduo alimentar (Tabela 5.6) que deveria ser inoculada de acordo com cálculos previamente realizados, em termos práticos, foi montada uma primeira mistura de lodo de inóculo + resíduos alimentar, com volume sete vezes maior que o volume útil previsto. Esta mistura foi intensamente agitada manualmente e, posteriormente, o volume previsto para o conjunto lodo de inóculo + resíduo alimentar foi introduzido nos frascos reatores. Os demais resíduos eram de mais fácil manuseio e foram picotados, pesados e depois introduzidos dentro dos frascos. Foi o caso do papel guardanapo, papel toalha, grama e folhas secas de árvores. Como os cinco tipos de resíduos possuem massa específica (massa desconsiderando os espaços vazios) diferentes, cada frasco recebeu uma quantidade de água para que o volume final ocupado fosse o mesmo, mantendo-se uma atmosfera interna aos frascos (*head-space*) também de igual volume. O volume do *head-space* tem fundamental importância na aferição do volume de biogás, pois ele é removido por diferença de pressão com uma seringa intercambiável. Se os volumes são diferentes, um frasco com maior *head-space* vai proporcionar uma menor pressão e a leitura seria interpretada como menor produção de biogás.

Após a montagem, os frascos foram vedados com tampas de borracha e lacres de alumínio (Figura 5.3a), com auxílio do alicate recravador (Figura 5.3b). Posteriormente, foi realizada a lavagem da atmosfera de cada frasco com gás inerte (N_2), por meio da abertura da aba do lacre de metal (Figura 5.3c) e introdução de uma agulha de entrada de gás e outra de saída na tampa de borracha (Figura 5.3d), durante 30 segundos a 1psi. Esta etapa é importante para expulsão do oxigênio presente no ar atmosférico confinado no frasco e imposição de ambiente anaeróbio. O furo na tampa foi vedado com silicone (Figura 5.3e) e os frascos foram incubados em estufa sem agitação na temperatura de 30°C (Figura 5.3f).

Figura 5.3 – Procedimentos de montagem do experimento. (a)frasco tipo penicilina, tampa de borracha, lacre de metal rasgável e alicate recravador; (b) fechamento do frasco; (c) abertura da aba do lacre de metal; (d) lavagem da atmosfera com N₂; (e) vedação do furo com silicone; (f) incubação dos frascos em estufa sem agitação.

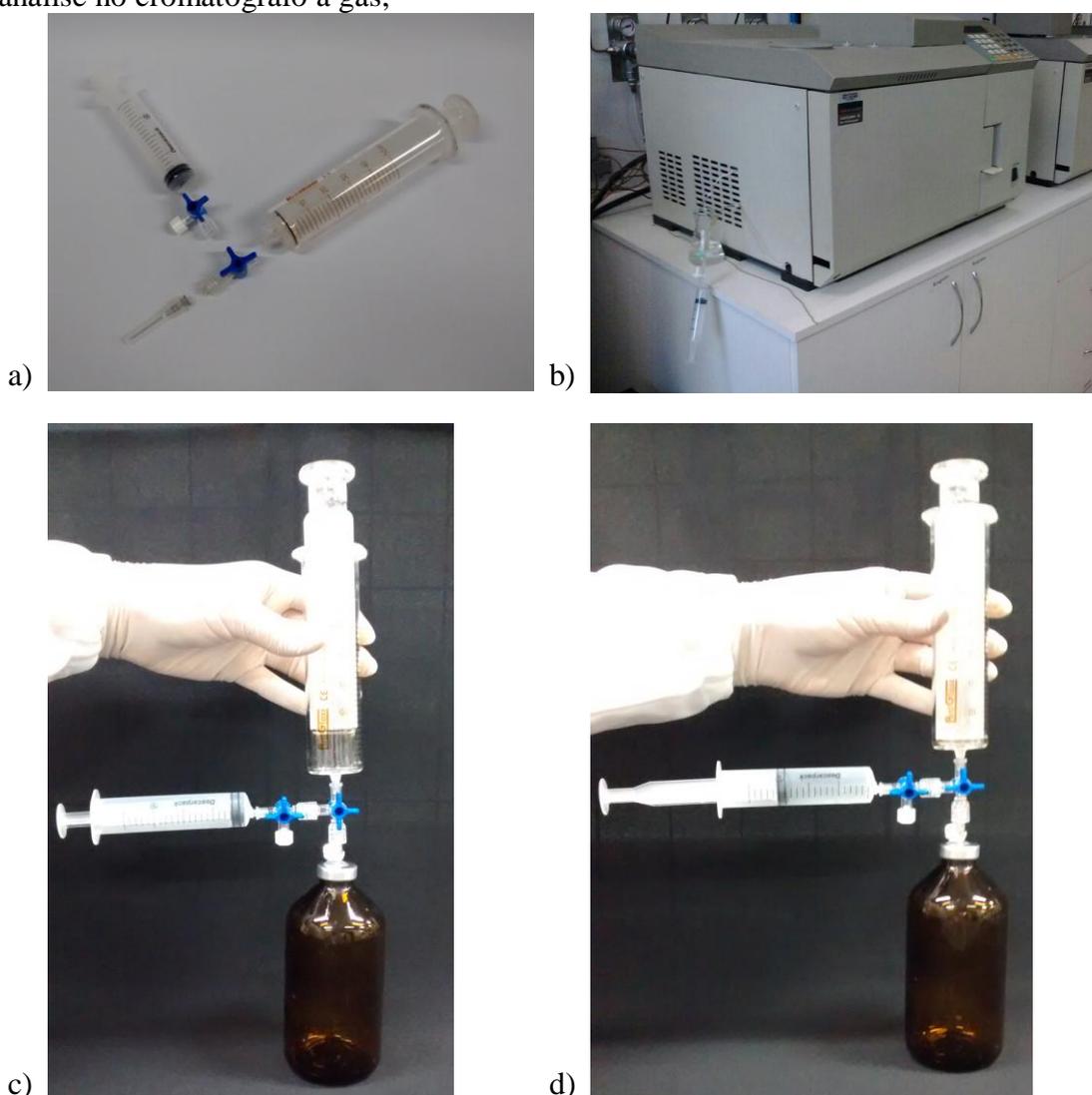


A agitação dos frascos (250 mL) foi individual, manual e intermitente tendo sido realizada apenas momento antes de cada medição volumétrica do biogás. Souto (2007), em estudo das influências das condições de incubação no teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) de lodos anaeróbios, em relação à agitação, não encontrou diferenças significativas entre a agitação manual e intermitente e agitação orbital contínua. Os frascos usados por Souto (2007) foram os mesmos utilizados nesta pesquisa de mestrado. Este resultado converge com o obtido por Penna (1994), que concluiu que em testes utilizando volume útil de até 600 mL, a agitação contínua é desnecessária.

A coleta e leitura do biogás acumulado foi realizada com frequência de 1 a 2 vezes por semana. O volume de biogás produzido foi medido com seringas esmerilhadas (seringas

intercambiáveis, 50 mL) acopladas a bico de três vias (válvula de três vias ou torneirinha de três vias) e agulha comum (Figura 5.4). O biogás pressurizado empurra naturalmente o êmbolo da seringa intercambiável (Figura 5.4c). Quando o êmbolo para de subir é feita a aferição do volume e posteriormente puxa-se uma amostra com o êmbolo da seringa descartável (Figura 5.4d). Em todas as aferições de volume, uma amostra de aproximadamente 10 mL do biogás foi coletada, acondicionada em seringas de plástico e encaminhadas para a análise cromatográfica (Figura 5.4b) para obter informações quanto ao teor de CH_4 e CO_2 .

Figura 5.4 – Monitoramento da produção de biogás. (a) seringa de vidro esmerilhada, bico de três vias, seringa de plástico e agulha comum; (b) amostra em análise no cromatógrafo a gás;



O encerramento do teste se deu quando a curva de produção acumulada de biogás se estabilizou. Todos os frascos foram encerrados com a mesma duração. O resultado foi

expresso em volume acumulado de metano, e $\text{mLCH}_4.\text{gSTVresíduos}^{-1}$, onde o numerador (mLCH_4) representa o volume de metano da amostra subtraída a produção de metano do branco, considerando-se que havia matéria orgânica residual no inóculo; e o denominador (kgSTVresíduos) representa a massa da mistura de resíduos introduzida nos frascos da condição do teste em questão.

Os resultados de produção volumétrica de CH_4 acumulado foram avaliados com 30, 60 e 83 dias de duração do experimento. O teste prolongou-se por 83 dias aguardando a estabilização da curva de produção de CH_4 . Como 30 dias é o tempo de detenção hidráulica (TDH) médio do reator de onde foi coletado o inóculo, este foi escolhido para a discussão principal. O período de 60 dias foi escolhido para avaliar o ganho de produção de CH_4 que se teria caso o TDH operacional do biodigestor fosse aumentado

5.2.4 Tratamento dos dados

Para as triplicatas de cada amostra foram verificadas a existência de *outliers* com o Teste Q de Dixon ($\alpha = 0,05$) para a variável volume acumulado de metano. Esta análise foi feita isoladamente para o teste 1, teste 2 e teste 3. Após a verificação de *outliers* foi feita a média dos valores de cada teste. Para obter o resultado final de cada ensaio, foi calculada a média e desvio padrão das médias de cada teste.

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Monitoramento do teste de biometanização

O teste de biometanização foi realizado em triplicata e repetido três vezes para cada amostra com data de início diferentes. O Teste 1 foi iniciado no dia 17, o Teste 2, no dia 22 e Teste 3 no dia 29, todos no mês de janeiro de 2014. Todos os testes foram encerrados com 83 dias de duração. A diferença entre os testes está apenas no resíduo alimentar, que foi coletado em dias diferentes para cada teste.

Em relação ao pH, houve uma ligeira queda ao final de 83 dias de experimento como pode ser observado na Tabela 5.7. Esta queda é esperada devido aos subprodutos ácidos da fase inicial de degradação, mas as quedas mais intensas, que se afastam muito do pH 7 é que são motivo de preocupação para a digestão anaeróbia, pois influencia muito sensivelmente na atividade metabólica das arqueias metanogênicas, responsáveis pela produção de metano. Como todos os pH finais se mantiveram em torno do pH 7, pode se concluir que a estabilização da curva

de metano acumulado (Figura 5.5 a Figura 5.12) é de fato devido ao esgotamento da matéria orgânica disponível para degradação (possivelmente só restaram resíduos de difícil degradação, como os resíduos de jardinagem) e não devido ao azedamento do conteúdo dos frascos.

Tabela 5.7 – pH inicial e final dos ensaios de codigestão anaeróbia

Ensaio	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
A1	7,54	7,05	7,68	7,2	7,74	7,19
A2	7,49	6,99	7,7	7,24	7,82	7,18
A3	7,83	6,93	7,58	7,19	7,65	7,16
A4	7,57	7,15	7,65	7,2	7,48	7,2
A5	7,59	6,97	7,35	7,21	7,57	7,21
A6	7,49	6,99	7,33	7,23	7,6	7,22
A7	7,72	7,45	7,44	7,2	7,85	7,15
A8	7,7	6,65	7,44	7,18	7,87	7,16
Branco	Inicial	Final				
	7,65	7,27				

A metodologia escolhida para montar os frascos, detalhada no item 5.2.3 (dificuldade de medir pequenos volumes), poderia ter acarretado problemas nos resultados, pois não havia garantia de que todos os frascos estariam recebendo a mesma quantidade de resíduo alimentar. Além disso, também havia uma expectativa sobre os resultados do teste 1 em relação ao teste 2, devido à necessidade da segunda coleta de lodo de inóculo. No entanto, como pode ser observado nos resultados apresentados da Figura 5.5 à Figura 5-12, a resposta das triplicatas e da repetição dos testes foram muito próximas.

Figura 5.5 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 1 e do branco.

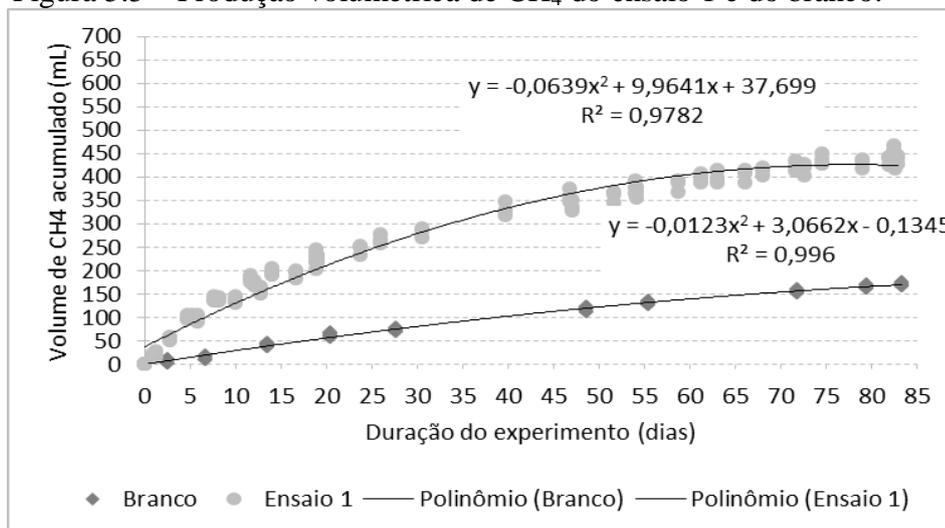


Figura 5.6 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 2 e do branco.

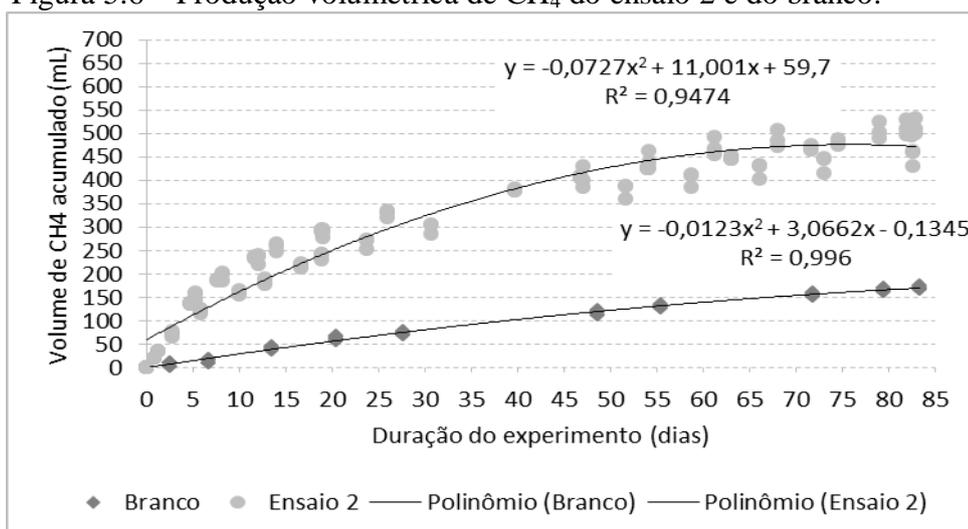


Figura 5.7 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 3 e do branco.

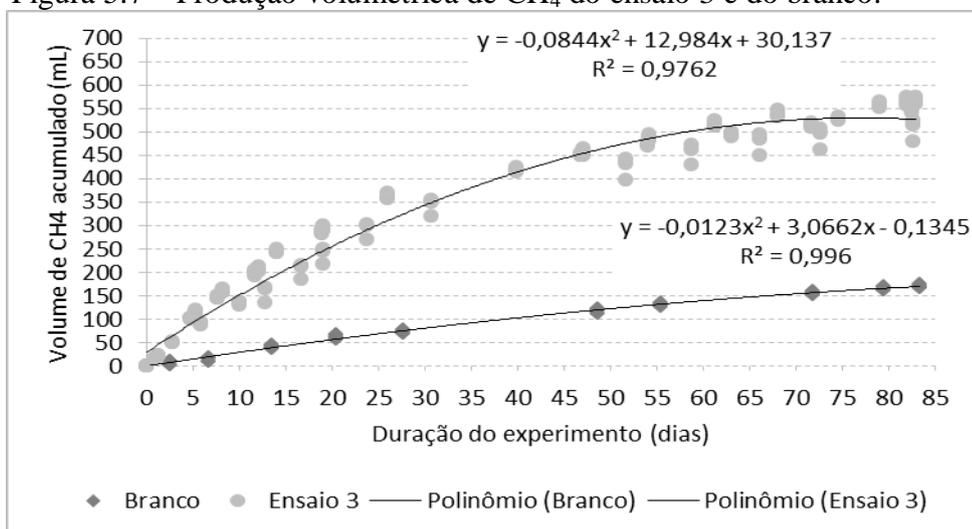


Figura 5.8 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 4 e do branco.

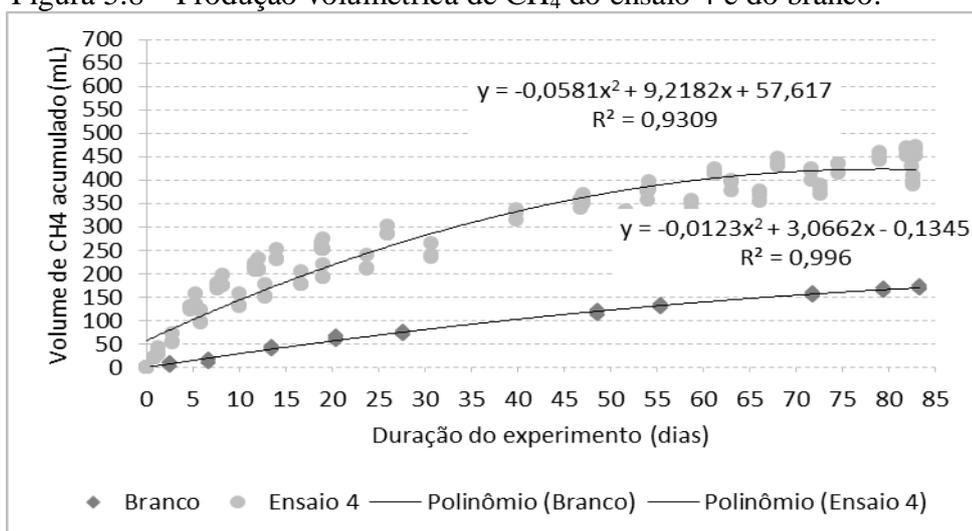


Figura 5.9 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 5 e do branco.

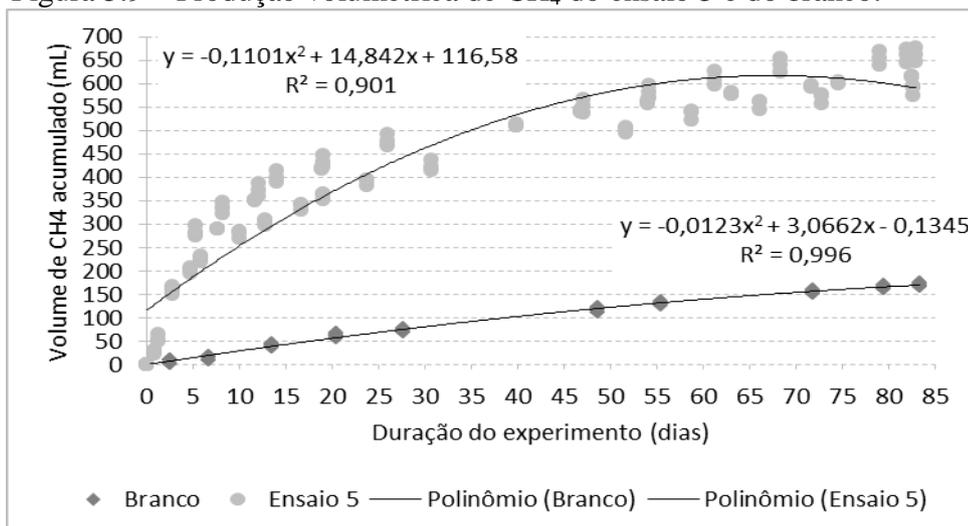


Figura 5.10 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 6 e do branco.

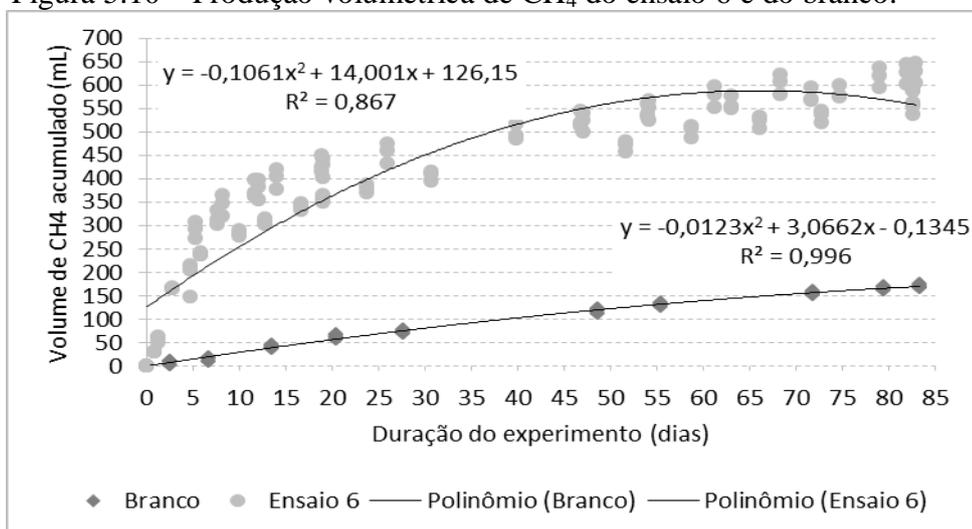


Figura 5.11 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 7 e do branco.

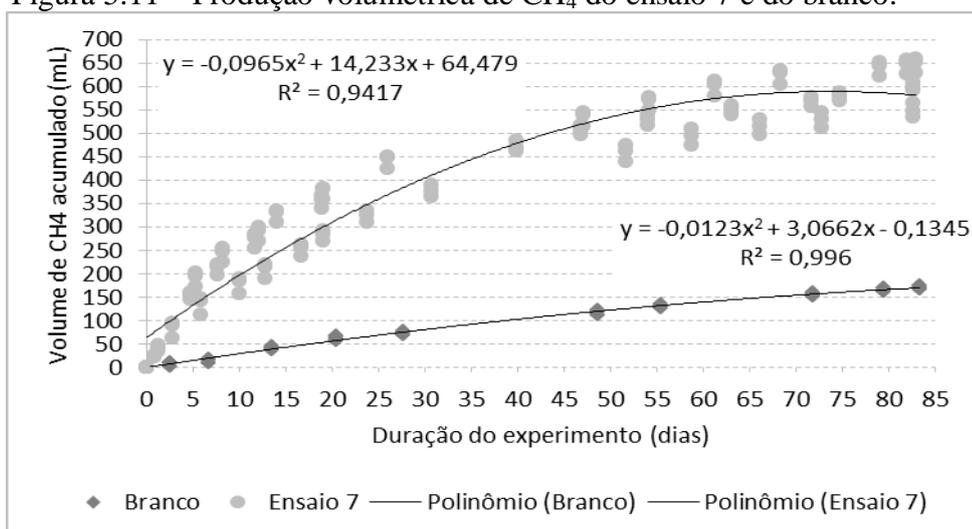
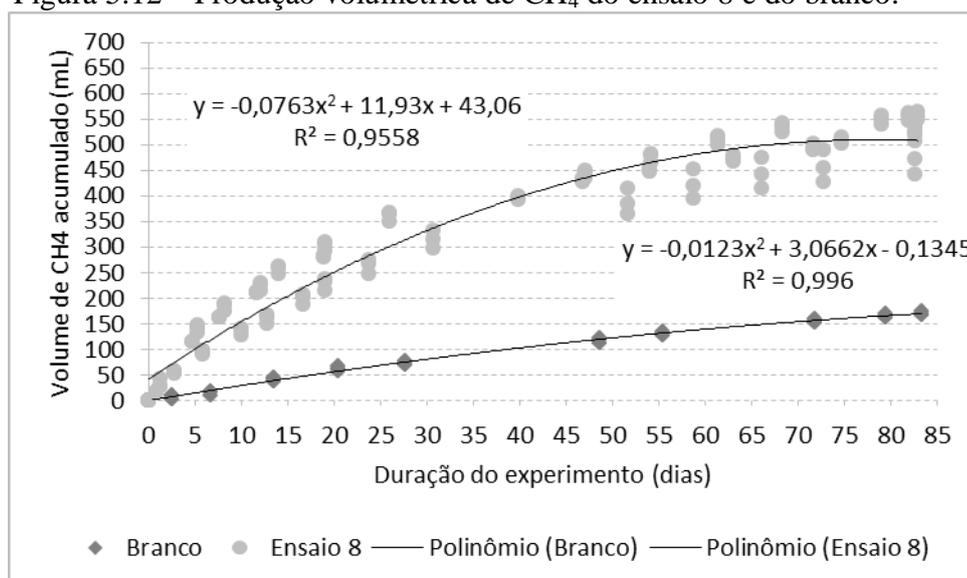


Figura 5.12 – Produção volumétrica de CH₄ do ensaio 8 e do branco.



Para a verificação de *outliers* nos resultados das triplicatas de volume acumulado de CH₄, foi utilizado o teste Q de Dixon ($\alpha=0,05$). O teste foi aplicado separadamente para cada amostra, incluindo o branco, e cada repetição do teste e nenhum *outlier* foi detectado, o que indica que metodologia de montagem dos frascos não influenciou nos resultados de forma a perder o teste. Desta forma, sem remover nenhum dado, foi realizada a média das triplicatas. Como havia um residual de matéria orgânica contida no lodo, a análise dos dados volumétricos não foi realizada com os dados brutos. O resultado de volume acumulado médio de CH₄ dos frascos branco (Figura A1-0.1) nos dias 30 (67 mLCH₄), 60 (138 mLCH₄) e 83 (171 mLCH₄) foram descontados dos valores de cada teste nos respectivos períodos. Os resultados de cada teste dos oito ensaios de codigestão anaeróbia são apresentados por completo no Apêndice 1.

5.3.2 Avaliação comparativa da codigestão anaeróbia de resíduos de restaurante, papéis não-recicláveis e resíduos de jardinagem

De posse do valor médio de produção volumétrica de CH₄ de cada teste foi calculada a produção específica (mLCH₄·gSTV_{resíduo}⁻¹) para cada amostra (Apêndice 2). Buscando um valor único para cada ensaio, foi calculada média e desvio-padrão para as médias encontradas, referentes à mesma amostra (Apêndice 2). Utilizando-se deste resultado final (Tabela 5.8) é que a avaliação comparativa das oito amostras estudadas é discutida.

O biodigestor fonte do lodo de inóculo utilizado nesta pesquisa opera com tempo de detenção de 30 dias. Desta forma, optou-se por focar a discussão nos dados referentes a este intervalo de tempo. Nas Tabelas Tabela A2-0.1 a Tabela A2-0.8 do Apêndice 2, também é possível

observar que o incremento de metano com os intervalos de tempo de 60 e 83 dias não são muito elevados e, possivelmente, de pouca viabilidade para uma aplicação na prática. Todavia, demonstram que ainda há matéria orgânica remanescente após os 30 dias de digestão, e que os subprodutos líquido e sólido possivelmente precisaram de pós-tratamento, a exemplo da compostagem ou secagem térmica para a fração sólida.

Tabela 5.8 – Resultado final dos ensaios de codigestão

Amostra	Proporção de resíduos incubados (%)			Dias			Meses de referência
				30	60	83	
	RR	GR	FS	Produção específica (mLCH ₄ .gSTV _{resíduos} ⁻¹)			
A1	10	20	70	262	308	332	Jan
A2	25	20	55	316	366	389	Abr
A3	15	70	15	356	426	452	Dez e Fev
A4	20	0	80	262	300	324	Ago e Set
A5	60	25	15	483	532	551	Nov e Jul
A6	60	0	40	464	497	514	Out
A7	35	60	5	428	497	523	Mar e Mai
A8	20	50	30	393	513	566	Jun

RR – resíduos de restaurantes, compreendendo os resíduos de alimentos e os resíduos de papéis não recicláveis; FS – resíduos de folhas de árvores secas; e GR – resíduos de poda de grama.

Na codigestão de resíduos não é possível avaliar exatamente qual a contribuição de cada resíduo na produção de CH₄. Considerando que todos os frascos tinham a mesma concentração de resíduos (gSTV), poderia se esperar por uma produção semelhante de CH₄, entretanto, dos resíduos estudados nesta pesquisa, os resíduos de restaurantes (RR) são mais facilmente degradáveis que os resíduos lignocelulósicos, folha seca (FS) e poda de grama (GR), sendo que a degradação destes últimos só ocorre após a degradação do primeiro (MOORHEAD; SINSABAUGH, 2000; SALA;GUDE, 1999). A longo prazo, pode ser que a produção volumétrica acumulada de CH₄ seja igual para todas as amostras, entretanto, no curto prazo desta pesquisa, não foi possível esta observação.

No curto prazo, esperava-se que a produção de CH₄ fosse crescente com a proporção de RR das amostras, mas isto não foi linearmente observado como mostra a Tabela 5.9. Os melhores resultados estão associados à maior %RR, mas para menores concentrações de RR, outros fatores interferiram. A Figura 5.13 permite melhor visualização da discussão a seguir.

A amostra A4 teve resultado semelhante à A1, apesar de possuir o dobro de %RR. Por outro lado, A4 não possui GR e nos demais resultados para amostras com grande %GR, os resultados indicam boa produção específica de CH₄. A amostra A3 resultou em melhor resultado de produção específica que A2 e A4, apesar de possuir menor %RR. Confrontando-se as amostras A4 e A8, que possuem mesma %RR, A8 possui produção específica bem superior. Nesta linha de raciocínio, os 30% GR da amostra A8 parecem dar boa contribuição na produção específica de CH₄. Confrontando-se as amostras A5 e A6, novamente observa-se este comportamento. Ambas possuem mesma %RR, mas a amostra A6, que não possui grama, possui produção específica ligeiramente inferior à A5. Por outro lado, os três piores resultados de produção específica de CH₄, referentes às amostras A1, A4 e A2, estão associados a baixa %RR e alta %FS.

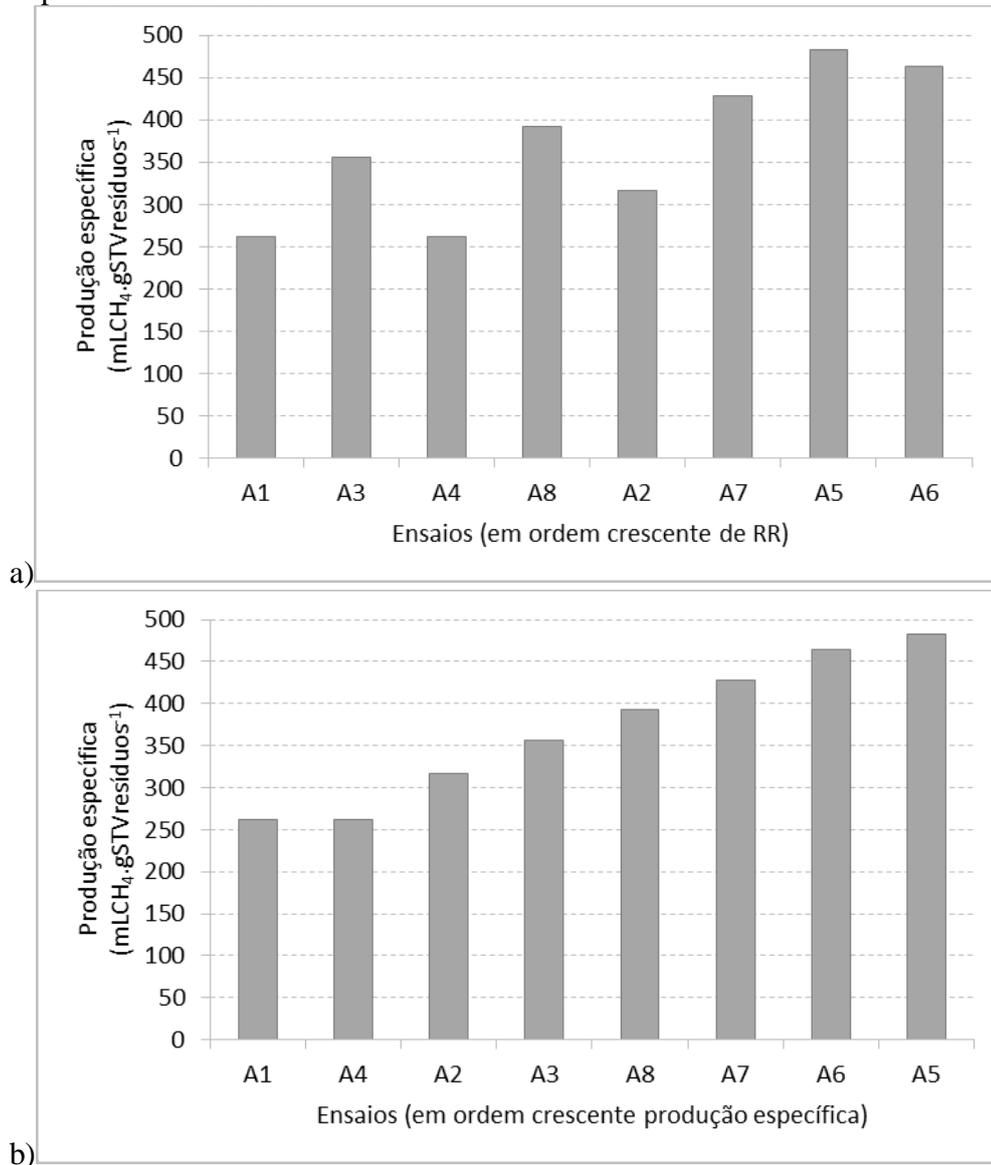
Tabela 5.9 – Resultados em ordem crescente de %RR e de produção específica de metano.

Amostra*	Proporção de resíduos incubados (%)			30 Dias
	RR	GR	FS	Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)
A1	10	20	70	262
A3	15	70	15	356
A4	20	0	80	262
A8	20	50	30	393
A2	25	20	55	316
A7	35	60	5	428
A5	60	25	15	483
A6	60	0	40	464

Amostra**	Proporção de resíduos incubados (%)			30 Dias
	RR	GR	FS	Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)
A1	10	20	70	262
A4	20	0	80	262
A2	25	20	55	316
A3	15	70	15	356
A8	20	50	30	393
A7	35	60	5	428
A6	60	0	40	464
A5	60	25	15	483

Obs.:*Amostras em ordem crescente de %RR; ** Amostras em ordem crescente de produção específica (mLCH₄.gSTVresíduo⁻¹)

Figura 5.13 – Resultados em ordem crescente de: a) %RR; b) produção específica de metano.



Esta tendência de melhor produção na presença de poda de grama pode ser explicada pela característica do inóculo. Apesar do reator fonte do inóculo tratar apenas resíduo alimentar, em seu processo de *start-up* o reator recebeu, além de lodo de UASB tratando esgoto doméstico, um inóculo mais adaptado à degradação de gramíneas, que foi conteúdo ruminal bovino, coletado em abatedouro. Neste caso, como não há presença de inóculo adaptado à degradação anaeróbia de folhas secas, em relação a codigestão de resíduos e visando melhor uso do volume de um suposto reator anaeróbio, sugere-se não codigerir este material e aprofundar os estudos para este tipo de resíduo. Por outro lado, considerando que apenas uma pequena fração das folhas secas foi degradada, é possível que este mesmo inóculo, em longo prazo, se torne capaz de degradar este resíduo a taxas mais elevadas.

Não foi possível discutir a influência dos papéis não recicláveis devido à baixa proporção, em termos de STV, que eles possuíam em relação aos demais resíduos e, como mencionado anteriormente, no tratamento e discussão dos dados, estes resíduos foram considerados dentro de um grupo de resíduos de restaurante, facilmente degradáveis. Do ponto de vista do gerenciamento de resíduos, a introdução destes resíduos no reator anaeróbio pode ser interessante, por que, apesar do grande volume representado por grande número de sacos de resíduos sólidos dos restaurantes e cantinas, a massa gerada mensalmente é muito inferior aos demais resíduos. Além disso, estes resíduos, quando umedecidos, se tornam menos resistentes e a princípio não representariam problemas hidráulicos para o reator, ao passo que, para a grama, isto precisaria ser melhor avaliado.

5.4 Conclusão

Os melhores resultados de produção específica de CH₄ estiveram associados às amostras com maior teor de resíduos de restaurante (resíduo alimentar, papel guardanapo e papel toalha), facilmente degradáveis. Os resultados intermediários estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e elevados teores de poda de grama. Ao passo que os piores resultados estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e folhas secas de árvores.

Os bons resultados obtidos nos ensaios em que se utilizou elevados teores de um resíduo lignocelulósico de difícil degradação, como é o caso da poda de grama, estão possivelmente associados ao uso de inóculo misto no *start-up* do reator anaeróbio fonte do inóculo da pesquisa, uma mistura de lodo de reator UASB tratando esgoto doméstico e conteúdo ruminal bovino (6:1 em volume).

6 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO NA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DO CÂMPUS PAMPULHA

6.1 Introdução

O biogás, subproduto gasoso da decomposição anaeróbia de materiais orgânicos, é uma mistura de vários gases, entre eles, o metano (CH_4). Este gás tem propriedade de efeito estufa e elevado poder calorífico, razão pela qual existem em torno dele preocupações ambientais e interesses econômicos. A simples combustão do CH_4 já reduz seu efeito poluidor, uma vez que ocorre a sua oxidação a gás carbônico e água, mas o aproveitamento da energia liberada desta queima tem sido objeto de diversas pesquisas com vistas à sua utilização como fonte de energia, seja térmica, mecânica ou elétrica.

O interesse pelo CH_4 vem aumentando desde o final do último século, quando, após o estabelecimento do Protocolo de Kyoto, diversos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo vem sendo desenvolvidos. Além disso, alguns países já possuem diretrizes em suas legislações que induzem ou incentivam o tratamento anaeróbio de resíduos em sistemas específicos, proibindo a disposição de resíduos orgânicos em aterros sanitários. Embora nos aterros também ocorram reações bioquímicas com geração de CH_4 , os impactos ambientais, sociais e econômicos dos mesmos não são mais aceitos em algumas sociedades (TOMALSQUIM, GUERREIRO, GORINI, 2007; ABRAMOVAY, 2010, GOMES, AQUINO, COLTURATO, 2012).

Segundo a Matriz Energética Nacional 2030 (MEN2030), relatório que consolida os estudos desenvolvidos sobre a expansão da oferta e da demanda de energia no Brasil nos próximos 20 anos, juntamente com o Plano Nacional de Energia 2030, o “aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos apresenta diversas vantagens socioambientais e, por isso, há um grande interesse em viabilizar o seu aproveitamento energético”, uma vez que “a produção de energia elétrica a partir desses materiais já apresenta alternativas tecnológicas maduras” (BRASIL, 2007).

A MEN2030 faz considerações em relação às áreas consideradas estratégicas para investimentos em pesquisas no setor energético e dentre as área prioritárias encontra-se a dos RSU. O documento ainda ressalta que a competitividade do Brasil no cenário internacional

está concentrada no desenvolvimento de tecnologias de conversão de energia e produção de biocombustíveis, ambas a partir de fontes renováveis.

A recuperação energética é possível tanto por tratamentos físico-químicos, como incineração, pirólise, gaseificação, quanto por tratamentos biológicos, por meio de sistemas de digestão anaeróbia, a qual é tratada, nesse texto, por biometanização.

O biogás pode ser utilizado energeticamente de várias formas, como uso direto em substituição a outros tipos de combustíveis, ou indireto, na geração de eletricidade e cogeração de eletricidade e calor. A forma mais eficiente de aproveitamento é a cogeração, visto que o potencial energético que não puder ser convertido em energia elétrica poderá sê-lo em calor (CHERNICHARO, 2007; LOBATO, 2011; SOUZA, 2010; USEPA, 2003; ZANETTE, 2009).

Para estimar o aproveitamento elétrico e térmico do biogás é preciso considerar que a mudança da energia de sua matriz original, ou seja, de energia química para energia elétrica, ou energia térmica, acarreta em perdas no potencial original. O poder calorífico do CH_4 é $35,9 \text{ MJ.m}^{-3}$, entretanto, no biogás existe uma mistura de gases. Por exemplo, uma amostra de biogás com cerca de 60% de metano tem potencial energético de $21,5 \text{ MJ.m}^{-3}$.

Quando o biogás é utilizado como combustível em um motogerador de eletricidade, por exemplo, o rendimento teórico esperado é da ordem de 30%, ou seja, a energia elétrica gerada tem o potencial de apenas 30% do combustível original. Este baixo rendimento se deve à limitação das tecnologias de conversão de energia. Como exemplo, Lobato (2013), em experimento com um moto gerador (Caetano Branco, modelo B4T-5000 Bio) movido a biogás oriundo de tratamento de esgoto, alcançou rendimento de 23%.

Dos 70% restantes, cerca de 60% foram convertidos em calor e 10% estiveram relacionados com perdas em atritos e outras dissipações de energia (COSTA, 2006; SANTOS, 2009). Para o aproveitamento térmico desta fração convertida em calor, é preciso promover a troca de calor com uma matriz de temperatura inferior a qual se pretende aquecer.

O objetivo desta pesquisa foi o de estimar a produção de CH_4 a partir da biometanização de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG e o potencial de produção de energia elétrica ao longo de 12 meses.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Área de estudo e inventário de resíduos

A área de estudo foi delimitada no câmpus Pampulha da UFMG. Foi realizado um inventário de geração de resíduos orgânicos (resíduos alimentares, guardanapos de papel, papéis toalha, folhas de árvores e poda de grama) para o período de agosto de 2011 e julho de 2012 (Figura 4.6a e b) e a partir de ensaios realizados em laboratório determinou-se a proporção em kgSTV entre estes resíduos (Figura 4.7) que serviu de base para ensaios de codigestão anaeróbia representando as variações mensais entre as proporções de resíduos.

6.2.2 Produção específica de CH₄ da codigestão de resíduos orgânicos

Conforme tratado no capítulo 5, as produções específicas de CH₄ resultantes das diferentes proporções de resíduos testadas nos ensaios de codigestão estão apresentados na Tabela 6.1. Embora os ensaios tenham se estendido por 83 dias, os resultados apresentados na Tabela 6.1 referem-se à produção de CH₄ em 30 dias, por ser este o período usual de tratamento de resíduos orgânicos em digestores anaeróbios. A Tabela 6.1 traz também informações sobre os meses de referência de cada amostra estudada.

Tabela 6.1 – Produção específica de CH₄ das proporções de resíduos mensais.

Amostra	Proporção de resíduos incubados (%)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduos ⁻¹)	Meses de referência
	RR	GR	FS		
A1	10	20	70	262	Jan
A2	25	20	55	316	Abr
A3	15	70	15	356	Dez - Fev
A4	20	0	80	262	Ago - Set
A5	60	25	15	483	Nov - Jul
A6	60	0	40	464	Out
A7	35	60	5	428	Mar - Mai
A8	20	50	30	393	Jun

RR – resíduos de restaurantes, compreendendo os resíduos de alimentos e os resíduos de papéis não recicláveis; FS – resíduos de folhas de árvores secas; e GR – resíduos de poda de grama.

A metodologia de obtenção destes dados de produção específica de CH₄ está descrita no Capítulo 5.

6.2.3 Consumo energético do câmpus Pampulha

Para efeito de comparação da estimativa de produção de eletricidade com a demanda deste recurso do câmpus Pampulha, foram coletados dados secundários do consumo de energia elétrica do período agosto de 2011 a julho de 2012 de todos os prédios do câmpus, conforme mostrado na Figura 6.1. Destaca-se o consumo na ponta, pois trata-se do horário cuja tarifa chega a valores nove vezes maior que a tarifa nos demais horários. O impacto do valor da tarifa pode ser observado na Figura 6.2, portanto, a estimativa de produção de eletricidade a partir dos resíduos orgânicos do câmpus foi comparada ao consumo na ponta.

Figura 6.1– Consumo de energia elétrica (total e na ponta) do câmpus Pampulha no período de agosto de 2011 a julho de 2012

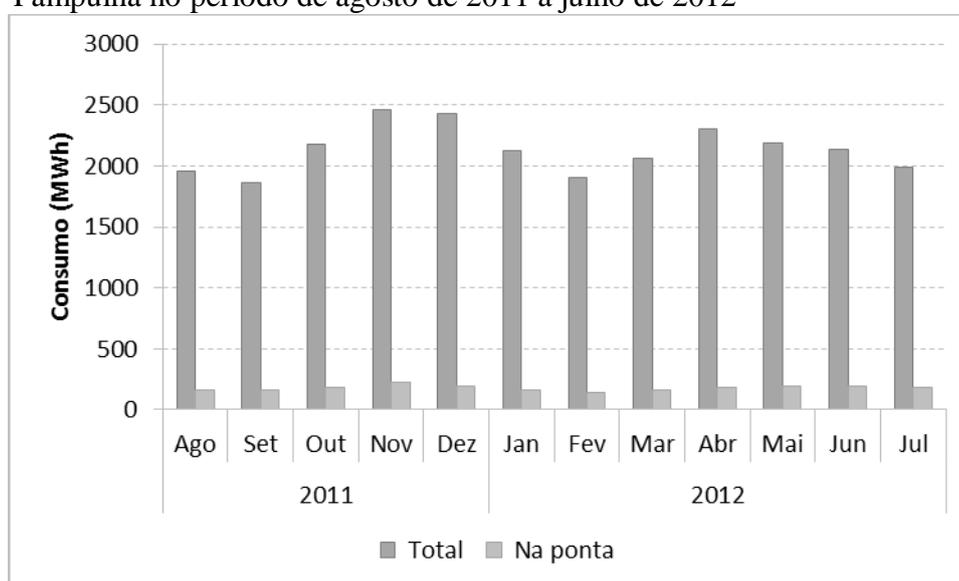
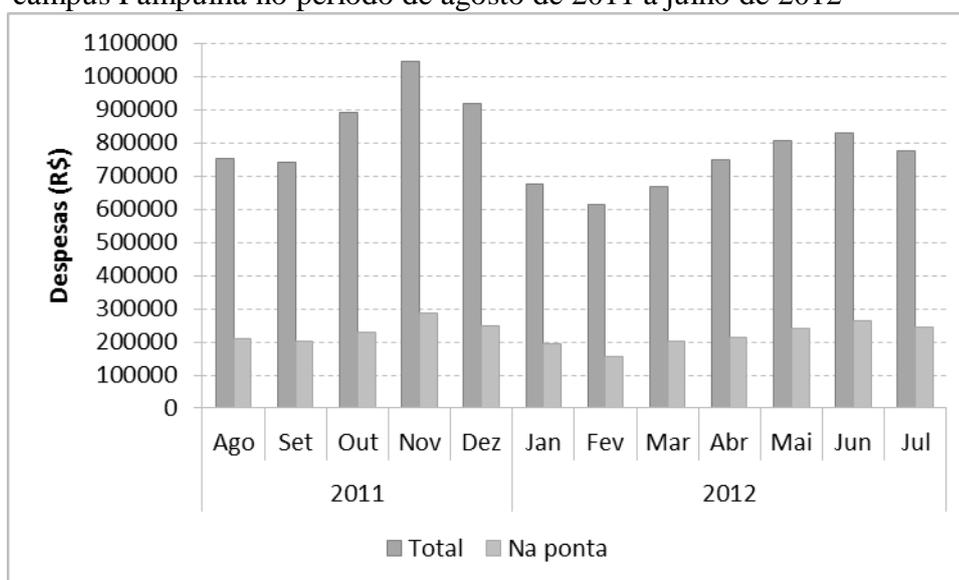


Figura 6.2 – Despesas (R\$) com energia elétrica (total e na ponta) do câmpus Pampulha no período de agosto de 2011 a julho de 2012



6.2.4 Extrapolação de dados em diferentes cenários de gerenciamento de resíduos do câmpus Pampulha

Utilizando-se dos dados do inventário de resíduos orgânicos (Figura 4.6a e b) e dos dados de produção específica de CH₄, foi possível estimar a produção de CH₄ no período de agosto de 2011 a julho de 2012. Para converter o volume total de CH₄ oriundo da biometanização dos resíduos a cada mês, a produção específica de CH₄ da Tabela 6.1 foi corrigida para as Condições Normais de Temperatura e Pressão – CNTP e os novos valores se encontram na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Produção específica de CH₄ nas Condições Normais de Temperatura e Pressão

Amostra	Produção específica (NmLCH ₄ .gSTVresíduos ⁻¹)	Meses de referência
A1	236	Jan
A2	285	Abr
A3	321	Dez e Fev
A4	236	Ago e Set
A5	435	Nov e Jul
A6	418	Out
A7	385	Mar e Mai
A8	354	Jun

Por fim, sabendo-se que o poder calorífico do CH₄ é 35,9 MJ.Nm⁻³ e considerando 30% o rendimento típico de um motor gerador de energia elétrica utilizando CH₄ como combustível, foi estimado o potencial de produção de energia elétrica a partir da codigestão dos resíduos orgânicos do câmpus Pampulha no referido período. Este foi denominado Cenário 1 – C1.

Na expectativa de melhorar a eficiência de produção de CH₄, foi criado o Cenário 2 – C2, substituindo os três piores valores de produção específica (A1, A2 e A4) por outros que melhor se adequassem com a geração de resíduos do mês de referência. No C2, há, portanto, descentralização do gerenciamento dos resíduos e sugestões de gerenciamento do excedente.

Na tentativa de aproximar a estimativa de produção de CH₄ das condições operacionais mais reais, foi criado o C3, que delimita um volume para o biodigestor e rearranja o gerenciamento de resíduos.

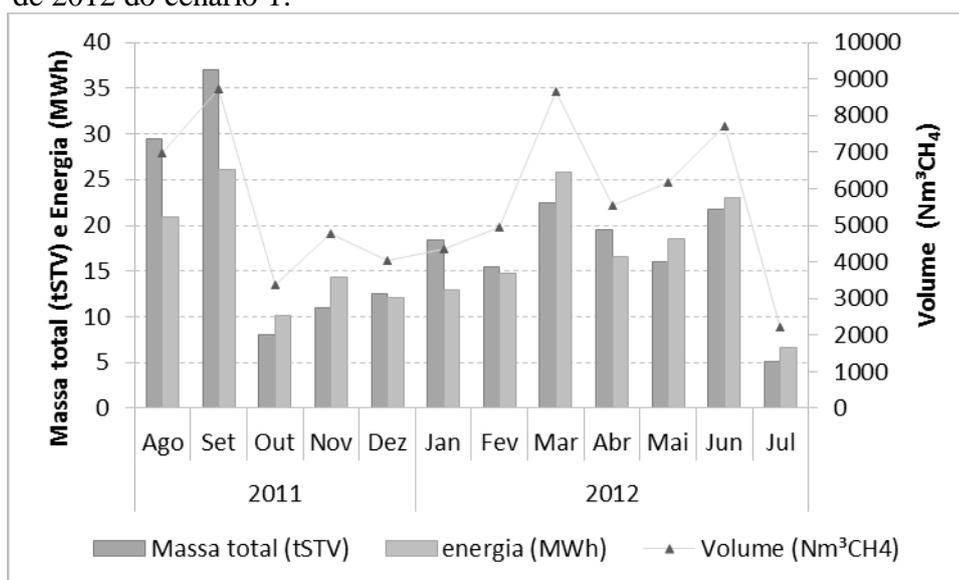
Os resultados de produção de eletricidade foram realizados para ambos os cenários, mas somente o C3 foi comparado com o consumo de eletricidade na ponta do câmpus no período de agosto de 2011 a julho de 2012.

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Cenário 1

Considerando a produção específica de CH₄ (Tabela 6.2) e o inventário de resíduos do câmpus (Figura 4.6 a e b), a estimativa de produção resultante de CH₄ está apresentada na Figura 6.3, bem como o potencial de produção de energia (MWh.mês⁻¹). A massa de resíduos (tSTV) também compõe a figura para efeito de comparação com os cenários posteriores, nos quais é proposto um gerenciamento descentralizado dos resíduos.

Figura 6.3 - Estimativa de produção mensal de CH₄ (Nm³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 1.



É possível perceber, pela Figura 6.3, que a variação na produção de CH₄ tem comportamento similar ao da variação da massa de resíduos (gSTV) gerada mensalmente no período estudado. Entretanto, a proximidade da curva de volume de CH₄ da barra de massa total de resíduos indica os meses com os piores valores de produção específica de CH₄ (ver Tabela 6.2).

A fim de melhorar a eficiência nos resultados de produção mensal de CH₄, ou seja, gerar mais CH₄ e energia com menor quantidade de resíduos, é possível gerenciar os resíduos de forma

diferente, destinando, por exemplo, o excesso de resíduos de jardinagem para a compostagem e, desta forma, aumentando o teor de resíduo alimentar, nos períodos onde ele não é tão expressivo.

6.3.2 Cenário 2

No cenário 2, os meses com produções específicas de CH₄ mais baixas foram selecionados para uma proposta diferenciada de gerenciamento dos resíduos orgânicos. Se por um lado, no cenário 1, foi considerado que todos estes resíduos seriam biometanizados, no cenário 2, apenas parte dos resíduos dos meses de agosto e setembro de 2011 e janeiro e abril de 2012 foram considerados para a biometanização.

Nos meses de agosto e setembro de 2011, referentes à amostra A4, não há geração de poda de grama, portanto, para se escolher melhor produção específica de CH₄ dentre as proporções testadas, não houve outra opção além da produção específica de CH₄ referente à amostra A6. Considerando tratar todo o resíduo de restaurante, as massas (kgSTV) de resíduo de restaurante passam a representar 60% do total e a fração referente a folhas secas é reduzida para 40%.

No mês de janeiro, referente à amostra A1, mês crítico por ter baixa geração de resíduos de restaurante e baixa produção específica de CH₄, a escolha da produção específica mais elevada teve como critérios: i) tratar todo o resíduo de restaurante; ii) avaliar o melhor uso de grama; e, como critério final, iii) optar pela alternativa que gera maior volume de CH₄. Os dados de geração de resíduos do mês de janeiro foram comparados com as proporções de resíduos das amostras A5, A3 e A7. Para A3, não haveria grama suficiente para a proporção testada. A amostra A5 gera um excedente de grama maior que A7. Comparando-se o potencial de geração de CH₄ com os resíduos gerados no mês de janeiro e a produção específica de CH₄ de A5 e A7, os resultados de A7 são melhores: menor excedente de grama e maior produção de CH₄.

Em relação ao mês de abril, referente à amostra A2, os procedimentos foram os mesmos que para janeiro. Seus dados foram comparados com as proporções de resíduos e produções específicas de CH₄ das amostras A5, A7 e A8. Para a condição de A7 e A8, não há grama suficiente, restando apenas as condições referente à amostra A5.

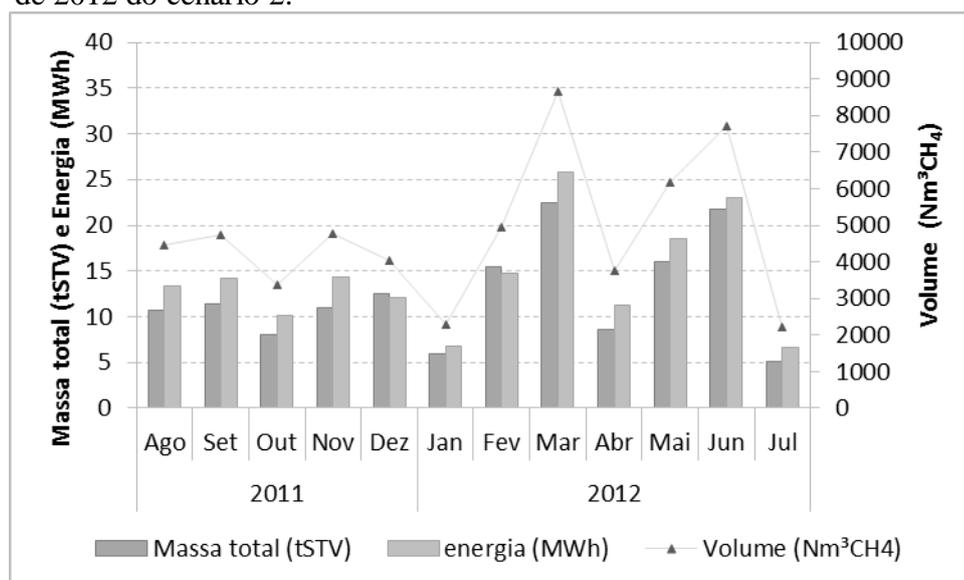
Para todos os excedentes de folha seca e poda de grama (Tabela 6.3), sugere-se a realização de compostagem. Ressalta-se que um procedimento semelhante à compostagem pode ser realizado para o subproduto sólido do sistema de biometanização. Nos períodos em que houver este excedente, pode se optar pela mistura dos dois, pois um irá absorver a umidade do outro, ou a compostagem do excedente com outros resíduos orgânicos não estudados nesta pesquisa. Como a duração total do processo de compostagem pode chegar a 90 dias (VILHENA, 2010), percebe-se que este excedente gerado em agosto e setembro representaria uma sobrecarga para os operadores da compostagem, entretanto, a energia gerada no processo de biometanização poderia ser também utilizada para a mecanização do processo.

Tabela 6.3 - Massa de excedentes de poda de grama e folhas secas do cenário 2.

		Poda de grama		Folhas secas	
		(kgSTV)	(kg)	(kgSTV)	(kg)
2011	Agosto	-	-	18859	23048
	Setembro	-	-	25663	31364
2012	Janeiro	697	920	11756	14367
	Abril	3025	3991	7810	9544

Como o excedente de folhas secas e poda de grama representam uma fração significativa, a produção de CH₄ não se eleva em relação ao cenário 1, mas torna-se mais eficiente por conseguir gerar mais CH₄ com menor quantidade de resíduo (Figura 6.4).

Figura 6.4 - Estimativa de produção mensal de CH₄ (Nm³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 2.



O cenário 2, assim como o cenário 1, não faz considerações em relação ao volume do reator anaeróbio. Desta forma, buscando aproximar a estimativa de produção de metano a uma condição operacional mais real, foi criado o cenário 3.

6.3.3 Cenário 3

A proposta do cenário 3 é basear o gerenciamento de resíduos considerando um sistema que tenha uma determinada capacidade volumétrica para receber a maior quantidade possível de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha.

A fim de encontrar este volume, inicialmente foi calculado o volume mensal que os resíduos ocupariam dentro do reator em um TDH de 30 dias. Para o cálculo deste volume, levou-se em consideração a massa específica (Tabela 5.2) de cada resíduo, que desconsidera os espaços vazios destes resíduos tão heterogêneos, e a massa de resíduos do cenário 2 (Figura 6.4), cujo valor total já havia sido modificado em quatro meses. Analisando-se os valores de mediana e média (Tabela 6.4), optou-se por um volume de 50 m³ reservado para os resíduos, ou seja, este valor não leva em consideração o volume necessário para o lodo de inóculo e nem demais estruturas e elementos de projeto inerentes ao sistema.

Tabela 6.4 – Volume (m³) mensal dos resíduos orgânicos

Mês de referência	Volume de resíduos (m ³)	Amostra
Agosto	44,3	A6
Setembro	47,3	A6
Outubro	35,0	A6
Novembro	44,4	A5
Dezembro	40,4	A3
Janeiro	21,7	A7
Fevereiro	48,8	A3
Março	79,6	A7
Abril	36,2	A5
Mai	60,9	A7
Junho	72,0	A8
Julho	22,2	A5
Mediana	44,35	
Média	46,08	
Desvio-padrão	17,72	

Alguns meses possuem volume total de resíduos bem superior a 50 m³ e, para calcular o potencial de geração de metano e energia deste novo cenário, foi necessário recalculá-los.

volumes sempre mantendo as proporções de resíduos estudadas (A1 a A8) com o intuito de poder utilizar os valores de produção específica de CH₄ obtidos em laboratório. Por outro lado, alguns meses possuem valor muito inferior a 50 m³, sendo que para alguns foi possível absorver o excedente do mês anterior e outros não.

Nos meses de outubro de 2011 e janeiro de 2012, por exemplo, não havia excedentes do mês anterior e os volumes foram mantidos. No mês de março, que representava a amostra A7, é necessário destinar parte dos resíduos para outro tratamento. O principal critério no remanejamento foi tratar todo o volume referente aos resíduos de restaurante e deixar como excedente apenas os resíduos de jardinagem. Logo, no caso do mês de março era preciso uma amostra com maior teor de RR para poder descartar poda de grama e folha seca. As únicas opções com concentrações maiores de RR seriam A5 e A6, mas A6 não contém grama, logo os volumes e massas foram recalculados para atender as proporções do ensaio A5. O volume encontrado foi de aproximadamente 48m³, próximo ao almejado.

O próximo mês que precisou de remanejamento foi abril. No cenário 1, abril era representado por A2. Em busca de melhores eficiências, no cenário 2, abril passou a ser representado por A5. Como o volume encontrado foi muito pequeno, novamente foram testadas as proporções do ensaio (A2, A7, A8 e A3). Todos os resultados foram superiores a 50m³, mas a proporção de A7 gerou um volume próximo (54m³). Para completar este volume falta uma porcentagem de grama que pode ser preenchida com o excedente do mês anterior. Entretanto, para aproximar o volume total do volume previsto para o reator, como foi discutido no Capítulo 5 sobre a possibilidade das folhas secas não terem contribuído para a geração de metano nos ensaios, optou-se por remover o volume referente a este resíduos, chegando num volume final de 52m³ mantendo a produção específica de A7.

No mês de maio também foi necessário reduzir o volume de resíduos. Maio era representado por A7 e mantendo o critério de tratar todo o resíduo de restaurante, a estratégia foi a mesma adotada para o mês de março, entretanto, falta volume para completar a proporção de folha seca. Como há excedente deste resíduo do mês anterior, o volume foi remanejado para maio. O ensaio de referência de maio passa a ser A5, que resultou num volume de aproximadamente 47m³.

Em junho a alternativa também era reduzir o volume. O ensaio que representava o mês de junho era A8 e para aumentar a proporção de resíduos de restaurante para ter excedente de

resíduos de jardinagem, as opções de ensaio foram A7 e A5. A7 foi o escolhido, pois o volume gerado por A5 era ainda muito pequeno e o volume gerado com as proporções de A7 foram de aproximadamente 50m³.

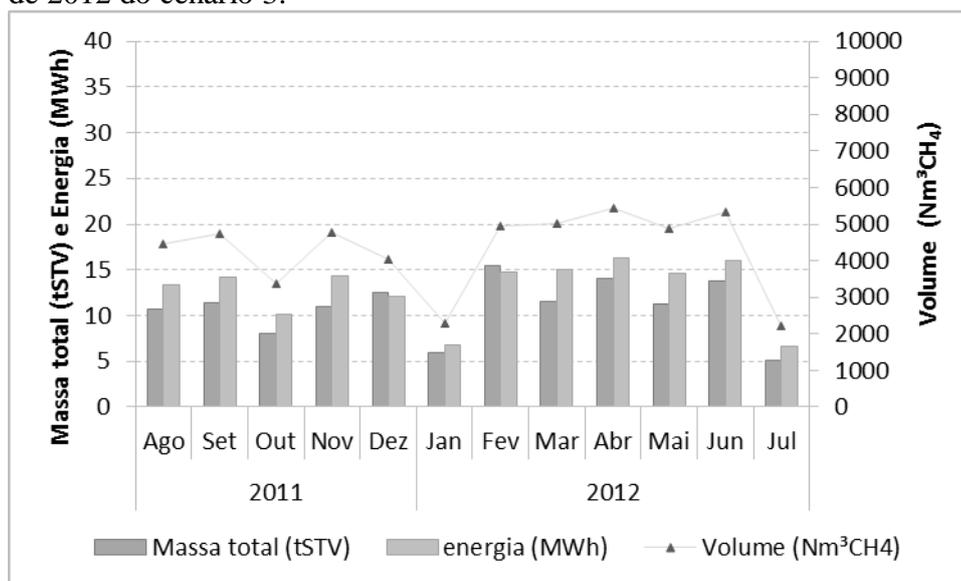
Por fim, em julho, a tentativa era de remanejar resíduos excedentes de junho e foi feita a tentativa com as proporções de A7, A8 e A3, mas não havia resíduo excedente o suficiente. Optou-se por manter a proporção de julho referente ao ensaio A5.

Tabela 6.5 – Volume (m³) mensal dos resíduos orgânicos – Cenário 3.

Mês de referência	Volume de resíduos (m ³)	Amostra
Agosto	44,3	A6
Setembro	47,3	A6
Outubro	35,0	A6
Novembro	44,4	A5
Dezembro	40,4	A3
Janeiro	21,7	A7
Fevereiro	48,8	A3
Março	48,3	A5
Abril	51,9	A7
Maiο	46,9	A5
Junho	50,3	A7
Julho	22,2	A5
Mediana	45,65	
Média	41,80	
Desvio-padrão	10,33	

Os novos valores de volume de resíduos (Tabela 6.5) foram utilizados para a nova estimativa de energia elétrica. Como pode ser observado na Figura 6.5, com algum esforço no planejamento para o tratamento descentralizado de resíduos é possível estabelecer uma produção mais constante ao longo dos meses. Isto é importante para dar segurança para a instituição renegociar seu contrato de fornecimento de energia elétrica da concessionária local. Os dados encontrados no cenário 3 (Figura 6.5) poderiam ser melhorados diante de novos valores de produção específica de CH₄, pois testando-se novas proporções para janeiro, julho e outubro, por exemplo, o potencial energético poderia se aproximar de 15MWh, ao qual se aproximaram os demais meses.

Figura 6.5 – Estimativa de produção mensal de CH₄ (Nm³) e energia (MWh) e massa de resíduos (tSTV) no período de agosto de 2011 a julho de 2012 do cenário 3.



6.3.4 Estimativa da contribuição de energia elétrica nas demandas do câmpus Pampulha da UFMG

Pelos resultados apresentados nos três cenários (Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5) é possível perceber a quantidade de energia elétrica que se pode aproveitar dos resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG. Resíduos que antes seriam destinados à compostagem, alimentação animal e aterramento sanitário podem gerar quantidades consideráveis de energia elétrica e vir a suprir demandas do próprio câmpus, especialmente nos horários cujas tarifas da concessionária local são mais caras.

Este estudo levou em consideração apenas o potencial de produção de energia elétrica, entretanto, o calor dos gases de escape do motorizador também podem ser aproveitados no sistema de biometanização. Por exemplo, o aquecimento do conteúdo interno do biodigestor possibilitaria se atingir a temperatura ótima mesofílica (35 °C) dos micro-organismos metanogênicos, resultando na elevação da produção de CH₄ e, conseqüentemente, de energia elétrica.

É preciso esclarecer que nem toda esta energia pode ser aproveitada diretamente para o câmpus, uma vez que o próprio sistema de biometanização demanda uma pequena parcela de energia para o acionamento de seus equipamentos eletromecânicos, a exemplo de trituradores e bombas. A demanda de energia do sistema de biometanização não foi estimada nesta

pesquisa. Entretanto, para efeito de comparação e entendimento do potencial de produção de energia, estes dados estão confrontados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Estimativa de produção de energia elétrica do cenário 3 e consumo energético do câmpus Pampulha, total e na ponta (kWh)

Ano	Mês	Energia (MWh)			Economia*
		Consumo total	Consumo na ponta	Produção C3	
2011	Ago	1.957,20	167,7	13,3	8%
	Set	1.867,30	161,8	14,2	9%
	Out	2.174,30	179,6	10,1	6%
	Nov	2.462,90	222,1	14,3	6%
	Dez	2.432,20	196,5	12	6%
2012	Jan	2.128,00	163	6,9	4%
	Fev	1.909,90	136,3	14,8	11%
	Mar	2.066,30	167,2	15	9%
	Abr	2.298,80	179,7	16,2	9%
	Mai	2.187,30	193,4	14,6	8%
	Jun	2.137,30	198,1	16	8%
	Jul	1.988,70	178,8	6,7	4%

Nota: *porcentagem em relação ao consumo na ponta.

Diante do elevado consumo energético da UFMG, a porcentagem de energia que pode ser fornecida pela biometanização dos resíduos orgânicos, aqui estudados, não parece tão animadora confrontando-se com os investimentos que seriam necessários para implantação e operação do sistema. Na Tabela 6.7 estão os valores em reais (considerando o valor da tarifa no período de agosto de 2011 a julho de 2012). No total anual, cerca de 192 mil reais poderiam ser utilizados em outros investimentos, como o próprio sistema de biometanização e gerenciamento do excedente de resíduos (pátio de compostagem).

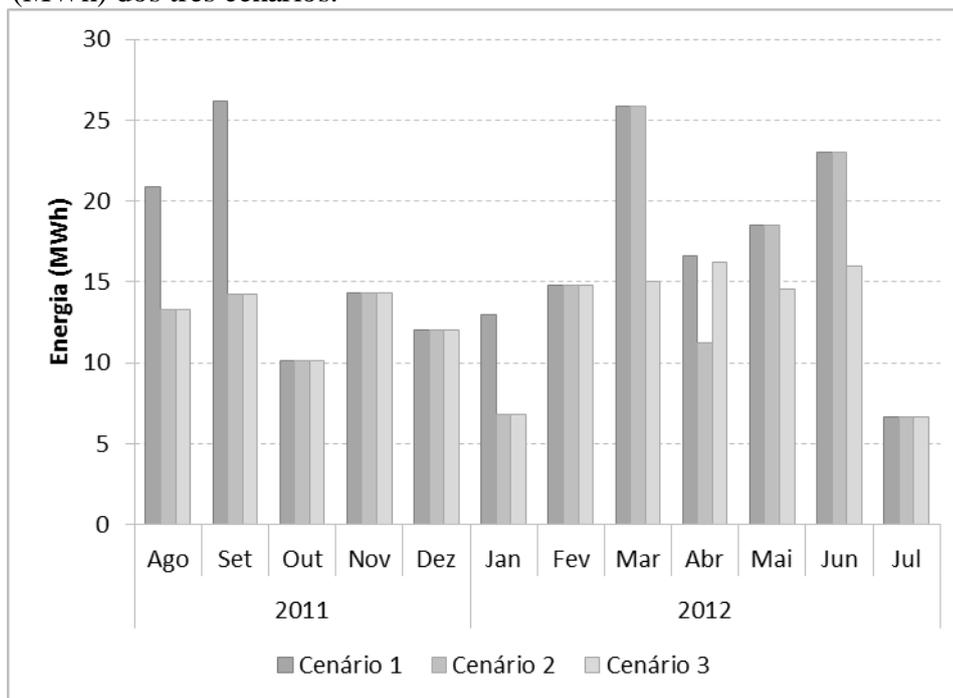
Tabela 6.7 – Despesas (R\$) com o consumo energético do câmpus Pampulha, total e na ponta e estimativa da economia com o uso da energia do C3.

Ano	Mês	Gastos (R\$)		Economia (R\$)
		Total	Na ponta	Resultado C3*
2011	Ago	753.944,49	208.354,27	16.540,01
	Set	741.506,03	202.162,06	17.745,68
	Out	889.958,36	228.001,45	12.856,76
	Nov	1.044.777,52	286.968,99	18.523,93
	Dez	917.880,27	250.047,41	15.319,43
2012	Jan	674.967,04	195.354,98	8.214,29
	Fev	612.998,90	156.427,68	16.991,23
	Mar	667.194,72	202.099,70	18.126,42
	Abr	746.829,93	213.101,23	19.256,90
	Mai	804.976,83	239.850,72	18.079,68
	Jun	830.871,42	262.529,49	21.143,46
	Jul	773.752,71	243.226,01	9.091,04

Nota: * valor que poderia ter sido economizado considerando o uso da energia oriunda do biodigestor e não da concessionária.

Além disso, como já mencionado anteriormente, outras proporções de resíduos podem gerar melhores resultados do que as aqui testadas e, a julgar pelo potencial total apontado pelo C1, ou mesmo um sistema de biometanização apenas dos resíduos alimentares. A Figura 6.6 permite a visualização das estimativas de produção de energia elétrica (MWh) do C1, C2 e C3, onde é possível perceber o potencial máximo (C1) e o que se “perde” e o que se “ganha” na mudança de gerenciamento proposta os demais cenários.

Figura 6.6 – Comparação entre as estimativas de produção de energia (MWh) dos três cenários.



Implantar um sistema de biometanização para todos os resíduos do câmpus Pampulha parece ser um investimento importante para a instituição dos mais diversos pontos de vista. Da mesma forma, investimentos em outras fontes de energia alternativa são sempre bem-vindos, a exemplo da energia solar, para a qual se pode aproveitar a grande área de telhados que o câmpus possui..

6.4 Conclusão

Considerando possível tratar via biometanização todos os resíduos orgânicos (alimentares, papel não reciclável, folhas secas e poda de grama) do câmpus Pampulha da UFMG, o potencial de produção de energia elétrica variou de 7.400 a 29.000 kWh.mês⁻¹. Esta energia poderia suprir a demanda nos horários onde a tarifa da concessionária local é mais cara, reduzindo a possibilidade de ultrapassagem da demanda contratada e geração de multas de contrato.

Por outro lado, considerando-se um cenário mais próximo do real, o potencial de produção de energia se aproxima de um valor constante igual a 15 MWh.mês⁻¹. Este resultado pode ser

melhorado com testes de outras proporções de resíduos, ou, eventualmente, apenas resíduo alimentar.

A economia de recursos financeiros com a concessionária local se aproxima de 192 mil reais em um ano.

7 CONCLUSÕES FINAIS

O equivalente populacional de geração resíduos orgânicos pelo campus Pampulha da UFMG é de uma população de aproximadamente 2600 habitantes (média anual), mas no mês de maior geração de resíduos este equivalente atinge a marca de 4700 habitantes (média do mês crítico).

A variação de resíduos orgânicos de um campus universitário, em quantidade e tipo, é muito expressiva ao longo de um ano letivo, o que aumenta o desafio de se tratar todos os resíduos utilizando uma única técnica de tratamento. Uma combinação entre as técnicas de biometanização e de compostagem parece ser uma estratégia interessante e que deve ser melhor investigada para o gerenciamento integrado de resíduos orgânicos com aproveitamento energético em campi universitários.

Os melhores resultados de produção específica de CH₄ estão associados às amostras com maior teor de resíduos de restaurante (resíduo alimentar, papel guardanapo e papel toalha), facilmente degradáveis. Os resultados intermediários estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e elevados teores de poda de grama. Ao passo que os piores resultados estão associados a baixos teores de resíduos de restaurante e folhas secas de árvores.

Os bons resultados obtidos nos ensaios em que se utilizou elevados teores de um resíduo lignocelulósico, de difícil degradação, como é o caso da poda de grama, estão possivelmente associados ao uso de inóculo oriundo de reator anaeróbio que utilizou inóculo misto no seu *start-up*, constituído de uma mistura de lodo de reator UASB tratando esgoto doméstico e conteúdo ruminal bovino.

O potencial de produção de metano a partir dos resíduos orgânicos do campus Pampulha é muito variável ao longo do ano. Os potenciais são maiores no período de maior geração de resíduo, independente de qual resíduo, entretanto, a fim de se viabilizar um reator em escala real, não há como tratar todos os resíduos de forma anaeróbia. É preciso gerenciar os resíduos para outros tipos de aproveitamento ou tratamento, como a compostagem.

Considerando possível tratar via biometanização todo resíduo orgânico do câmpus Pampulha da UFMG, o potencial de produção de energia variou de 7.400 a 29.000 kWh.mês. Considerando condições de operação de um biodigestor mais próxima do real (volume do

reator fixado em 50m³), o potencial de geração de energia gira em torno de 15 MWh. Este potencial pode ser responsável pela economia de 192 mil reais ao ano (considerando o valor da tarifa de energia no período estudado).

As possibilidades de variações no gerenciamento dos resíduos orgânicos é muito ampla. Em virtude disso, outras proporções de resíduos, tratados via digestão anaeróbia, que não foram estudados nesta pesquisa, podem gerar melhores resultados, aumento o potencial de produção de energia.

8 RECOMENDAÇÕES

- Testar o a codigestão de papéis não recicláveis e poda de grama no biodigestor em escala piloto a fim de se verificar a produção de metano e as necessidades específicas de mudanças na operação do sistema, uma vez que estes resíduos, especialmente a poda de grama pode acarretar problemas nos acessórios hidráulicos.
- Realizar ensaios de biometanização apenas com as folhas secas de árvores para verificar se há geração de resíduos oriundo da degradação deste resíduos e, em paralelo, utilizar alguma fonte de inóculo específica para este resíduo.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVAY, R. Desenvolvimento sustentável: qual a estratégia para o Brasil? *Novos Estudos – CEBRAP*, n.87, p.97-113. São Paulo, 2010.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2009*. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2010. 200p.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010*. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2011. 184 p.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012*. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2013. 116 p.

APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, WEF - Water Environment Federation. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. Washington, DC, 2012. 1360p.

BAUCHOP, T., MOUNTFORT, D.O. Cellulose fermentation by a rumen anaerobic fungus in both the absence and the presence of rumen methanogens. *Applied Environmental Microbiology*, n.42 p.1103-1110, 1981.

BARROS, R.T.V. O papel da universidade na gestão de resíduos sólidos: o caso da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Paranoá (UnB), v. 1, p. 87-92, 2012.

BLANCO, A., DÍAZ, P., ZUECO, J., PARASCANDOLA, P., PASTOR, J.F. A multidomain xylanase from a *Bacillus sp.* with a region homologous to thermostabilizing domains of thermophilic enzymes. *Brazilian Journal of Microbiology*, v.145 p.2163–2170, 1999

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Brasília: Diário Oficial da União, 2 ago. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Matriz Energética Nacional – 2030*. Brasília: Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética, 2007.

BRASIL. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ed. – Brasília: Aneel, 2008.

CARDOSO, A.M., CLEMENTINO, M.B.M., MARTINS, O.B., VIEIRA, R.P. ALMEIDA, R.V., ALQUERES, S.M.C., ALMEIDA, W.I. *Archaea: Potencial biotecnológico*. *Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento*, n.30, p.71-77, 2003.

CASTRO, M.C.A.A. *Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de reciclagem e compostagem na recuperação dos materiais recicláveis e na transformação da*

matéria orgânica em composto. São Carlos. 113p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1996.

CASTILLO, E., VERGARA, M., MORENO, Y., 2007. Landfill leachate treatment using arotating biological contactor and an upward-flow anaerobic sludge bed reactor. *Waste Manage*, v.27 p.720–726.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).

CHERNICHARO, C. A. L, SOUZA, C.L. de, COLTURATO, L.F.D.B. COLTURATO, T.D. B., GOMES, F.C.S.P, SERAVAL, T.A., BORGES, C.A., TEMPONI, A.A., PEREIRA, F.L.P. *Desenvolvimento e construção de unidade piloto de tecnologia nacional de metanização de resíduos sólidos urbanos aplicável a pequenos e médios municípios*. Relatório parcial de atividades apresentado à FAPEMIG. Belo Horizonte, 2013. 55p.

CORTEZ, C.L, COELHO, S.T, GRISOLI, R., GAVIOLI, F. *Compostagem de resíduos de poda urbana*. Centro Nacional de Referência em Biomassa, Nota Técnica IX. São Paulo, 2008.

CORTEZ, C.L. *Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para geração de energia: Estudo de caso AES ELETROPAULO*. Tese (Doutorado), USP, São Paulo, 2011. 246p

CUNHA-SANTINO, M.B., BIANCHINI Jr., I. Cellulase activities during decomposition of a submerged aquatic macrophyte (*Utriculariabreviscapa*): a microcosm assay. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2007, v. 38, p. 230-236.

D'ALMEIDA, M. L.; VILHENA, A. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 2a ed. São Paulo: IPT/CEMPRE , 2000. 370 p.

FERREIRA, L.R MINEIRO, E.F. VEIGA, R.T. Energias alternativas e adoção da inovação pelo consumidor. *Espaço Energia*, n.12, p.31-35, 2010.

FOSTER-CARNEIRO, T. PÉREZ, M., ROMERO, L.I., SALES, D. Dry-thermofilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on the inoculum sources. *Bioresource Technology*, v.98, p. 3195-3203, 2007a.

FOSTER-CARNEIRO, T., PÉREZ, M., ROMERO, L.I. Composting potential of different inoculum sources in the modified SEBAC system treatment of municipal solid wastes. *Bioresource Technology*, v.98, p. 3354-3366, 2007b.

GOMES, F. C. S. P., AQUINO, S. F., COLTURATO, L. F. D. B. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p.295-304, 2012.

GRIFFIN, M. E., MCMAHON, K.D., MACKIE, R.I., RASKIN, L. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnology and bioengineering*, v. 57, n. 3, p. 342, 1998.

IKAWA, G.A., GOMES, J.N.C., SILVA, M.P.C. *Readequação de uma usina de triagem e compostagem sob a perspectiva da saúde ocupacional*. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

JAGUARIBE, E.F., LOBO, P.C., SOUZA, W.L., ROCHA, R.M., NASCIMENTO, E.T. Vender bagaço ou comercializar energia gerada pela cogeração? *Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering-ABCM*, Rio de Janeiro, Brazil, 2004.

JINGURA, R.M., MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2009. v. 13, p. 1116-1120.

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

KIM, H.W., HAN, S.K., SHIN, H.S. The optimization of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management & Research*, 2003, v. 21, p. 515–526.

KLASS, D.L. *Biomass for renewable energy and fuels*. Encyclopedia of Energy, v1. Barrington, Illinois, United States Elsevier, 2004.

LEE, M., HIDAKA, T., HAGIWARA, W., TSUNO, H. Comparative performance and microbial diversity of hyper thermophilic and thermophilic co-digestion of kitchen garbage. *Bioresearch Technology*, 2009, v. 101, p. 578-585.

LETTINGA, G., FIELD, J., VAN LIER, J., ZEEMAN, G., HULSHOFF POL, L.W. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. Proc. IAWQ-NVA Conf. on Advanced wastewater treatment, Amsterdam. IAWQ-NVA Rijswijk, The Netherlands (1996) 25-32.

LIU, K. TANG, Y.Q. MATSUI, T. MORIMURA, S. WU, X.L. KIDA, K. Thermophilic anaerobic co-digestion of garbage, screened swine and dairy cattle manure. *Journal Bioscience Bioenergy*, v.107 n.1 p.54-60, 2009.

LO, H.M., KURNIAWAN, T.A., SILLANPAA, M.E.T., PAI, T.Y., CHIANG, C.F., CHAO, K.P., LIU, M.H., CHUANG, S.H., BANKS, C.J., WANG, S.C., LIN, K.C., LIN, C.Y., LIU, W.F., CHENG, P.H., CHEN, C.K., CHIU, H.Y., WU, H.Y. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. *Bioresource Technology*, 2010. v.101, pp. 6329–6335

LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.2011. 174p.

LOBATO, L. C. S., CHERNICHARO, C. A. L., PUJATTI, F. J. P.; MARTINS, O. M., MELO, G. C. B., RECIO, A. A. R. Use of biogas for cogeneration of heat and electricity for local application: performance evaluation of an engine power generator and a sludge thermal dryer. *Water Science & Technology*, 2013, v.67 n.1 p.159.

MACHADO Jr., C., SOUZA, M.T.S, FURLANETO, C.J. Overview of energy consumption and alternative sources. *Journal Health Science Institute*, v.28, n.3, p. 215-223, 2010.

MATA-ALVAREZ, J.; CECCHI, F. A review of kinetic models applied to the anaerobic biodegradation of complex organic matter. Kinetics of the biomethanization of organic fractions of municipal solid waste. In Kamely, D., Chackrobordy, A., Ommen, G. S. (Eds.), *Biotechnology and Biodegradation*. Portfolio Publishing Company: The Woodlands, Texas, pp 27-54, 1990.

MATA-ALVAREZ, J., MACÉ, S., LLABRES, P. Anaerobic of organic solids wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource and Technology*, 2000, v.74, p.3-16

MATTOS, L.B. Uma estimativa da demanda industrial de energia elétrica no Brasil: 1974-2002. *Organizações rurais e agroindustriais*, Lavras, v. 7, n. 2, p. 238-246, 2005.

MC CARTY, P.L. The development of anaerobic treatment and its future. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 8, p. 149-156, 2001.

MOORHEAD, D.L., SINSABAUGH, R.L. Simulated patterns of litter decay predict patterns of extracellular enzyme activities. *Applied Soil Ecology*, 2000, v. 14 p. 71-79.

MORITA, M., SASAKI, K. Factors influencing the degradation of garbage in methanogenic bioreactors and impacts on biogas formation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, v.94 n.3 p.575-82.

NEVES, L.; OLIVEIRA, R.; ALVES, M. M. Influence of inoculum activity on the biomethanization of a kitchen waste under different waste/ inoculum ratios. *Process Biochemistry*, v. 39, n. 12, p. 2019-2024, 2004.

OWEN, W. F.; STUCKEY, D. C.; HEALEY Jr., J. B.; YOUNG, L.Y.; McCARTY, P. L. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, v. 13, p. 485-492, 1979

OWENS, J.M. CHYNOWETH, D.P. Biochemical methane potencial of municipal solid waste (MSW) components. *Water Science and Technology*, v.27, n.2, p.1-14, 1993.

PENNA, J. A. *Estudo da metodologia do teste de atividade metanogênica específica*. 1994. 517 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

SALA, M.M., GUDE, H. Role of protozoans on the microbial ectoenzymatic activity during the degradation of macrophytes. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999. v. 20 p. 75-82.

SANTOS, M.G.R.S MOTHE, C.G. Fontes alternativas de energia. *Revista Analytica*, n.32, p.56-70, 2008.

SANTOS, N.S. *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de Madre de Deus – Bahia*. Dissertação (mestrado profissional em

tecnologias aplicáveis à bioenergia). Faculdade de Tecnologia e Ciências, Salvador, BA. 2009. 61 p.

SANTOS, R. C. CAMPOS, J.F. PINHEIRO, C.D. TOLON, Y.B. SOUZA, S.R.L. BARACHO, M. CARMO, E.L. *Usinas de Compostagem de Lixo como alternativa viável à problemática dos lixões no meio urbano*. 2ed. Belo Horizonte: Enciclopédia Biosfera, 2006.

SILVA, W.R. Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais. Tese (Programa de Pós-graduação em Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2009. 174p.

SMIL, V. Energy Resources and Uses: A Global Primer for the Twenty-First Century. *Current History*, v. 101, n. 653, p. 126-132, 2002

SOUTO, T. F. S. *Influência das Condições de Incubação no Teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) de Lodos Anaeróbios*. 2007. 194 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SOUZA, C. L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. 2010. 127 p. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

TIGRE, P.B. Informática como base técnica do novo paradigma. *São Paulo em Perspectiva*, v. 7, n. 4, p. 26-33. São Paulo, 1993.

TOLMASQUIM, M.T., GUERREIRO, A., GORINI, R. Matriz energética brasileira. *Novos Estudos – CEBRAP*, v.0, n.79, p.47-69. São Paulo, 2007.

USEPA. A brief characterization of reciprocating engines in combined heat and power applications. Washington, D.C.: U.S. *Environmental Protection Agency*. 2003.

VILHENA, A. (Coordenação). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 3ª. Ed. São Paulo, CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2010. 350p.

XIMENES, E.A. Fungos anaeróbios. *Revista Ciências Médicas e Biológicas*, v.2 n.2 p.269-275, 2003.

YUE, Z., LI, W., YU, H. Application of rumen microorganisms for anaerobic bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource & Technology*, 2013, v.128, p.738-44.

ZANETTE, A.L. *Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil*. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

APÊNDICE

Apêndice 1 – RESULTADOS DO MONITORAMENTO INDIVIDUAL DOS TESTES.

Neste apêndice estão reunidos os gráficos com resultados de biogás e metano acumulados de cada teste isoladamente para eventual necessidade de consulta do leitor.

Figura A1-0.1 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ do branco.

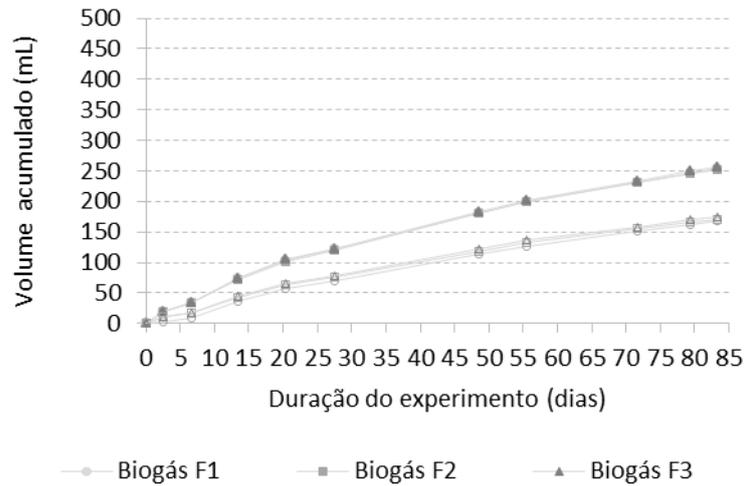


Figura A1-0.2 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A1. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

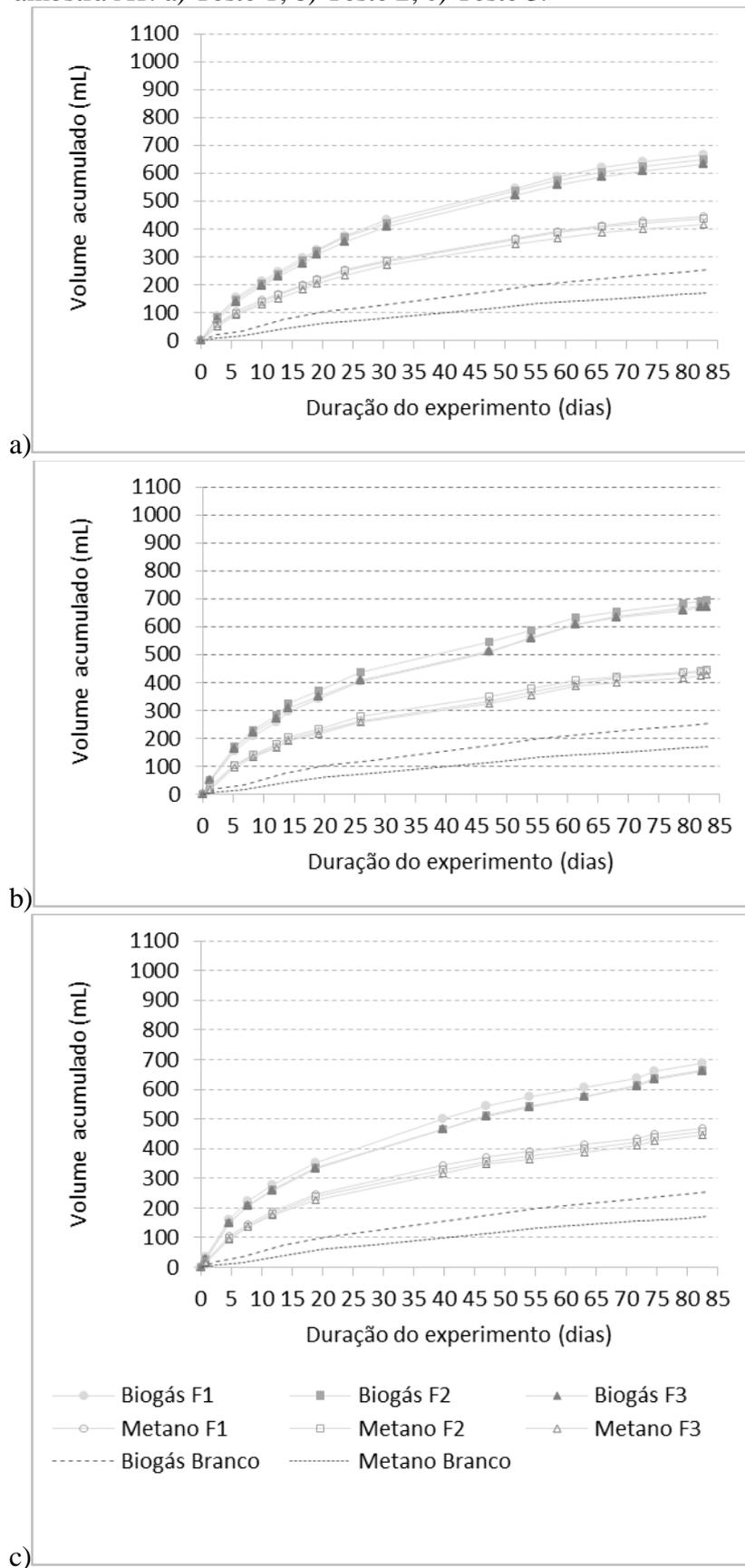


Figura A1-0.3 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A2. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

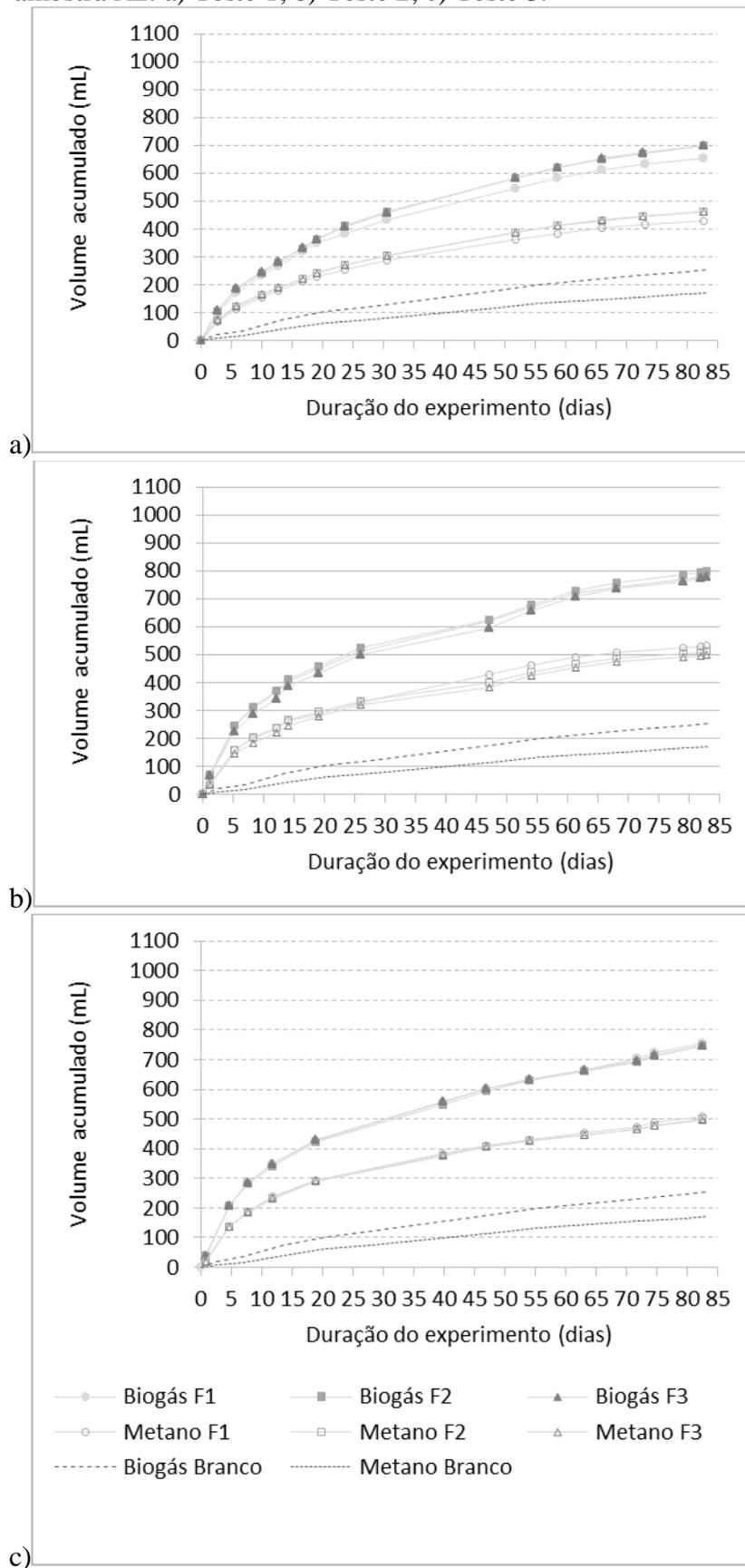


Figura A1-0.4 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A3. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

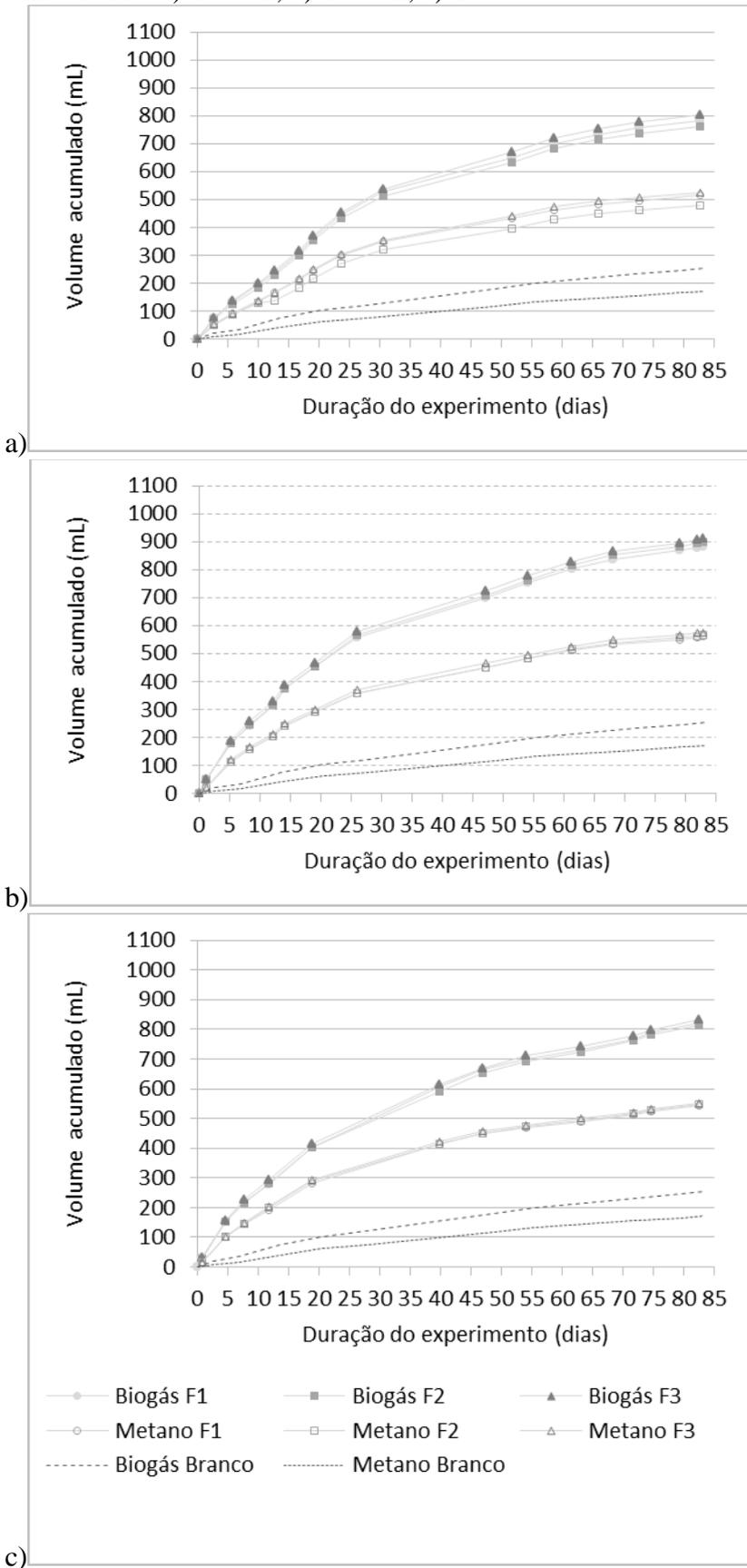


Figura A1-0.5 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A4. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

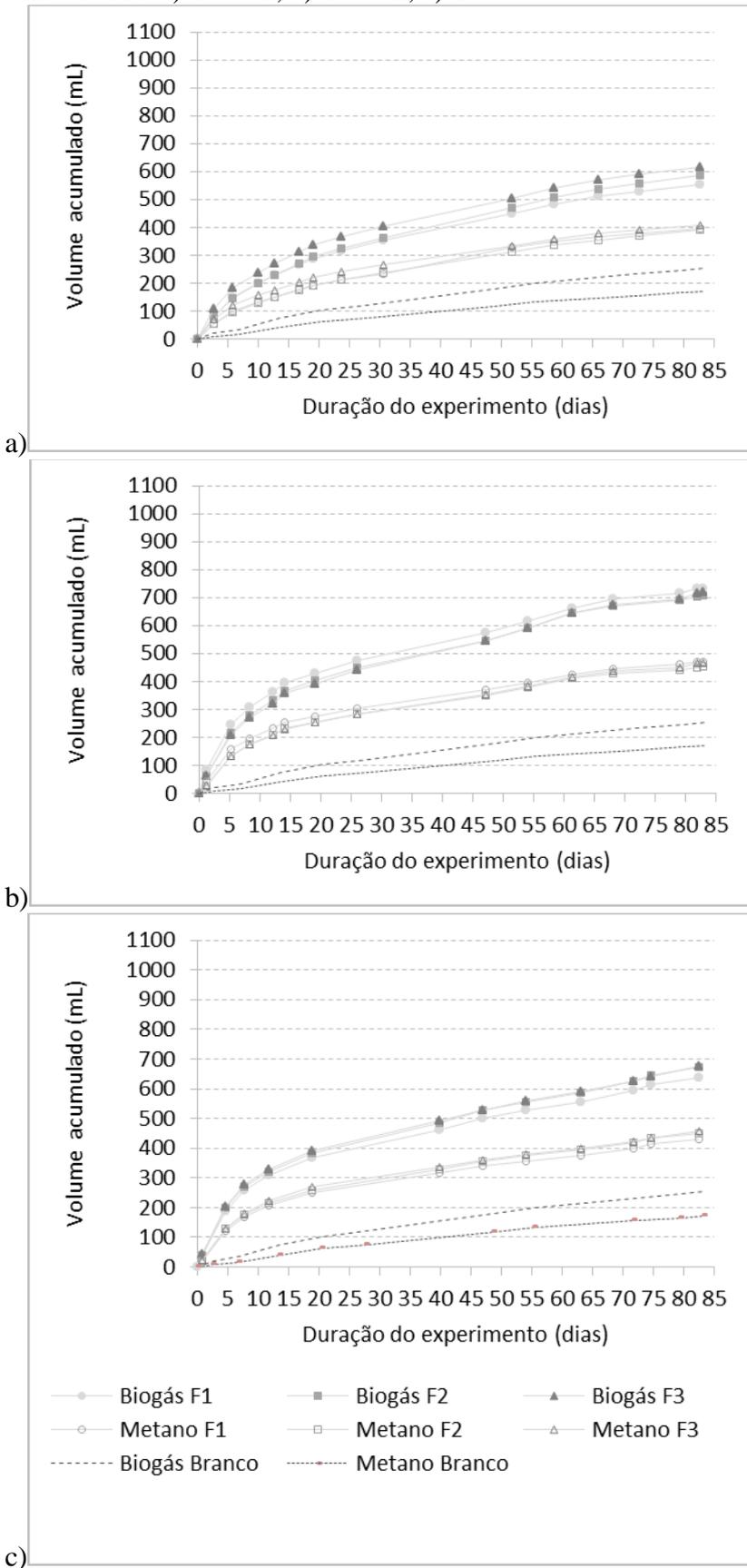


Figura A1-0.6 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A5. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

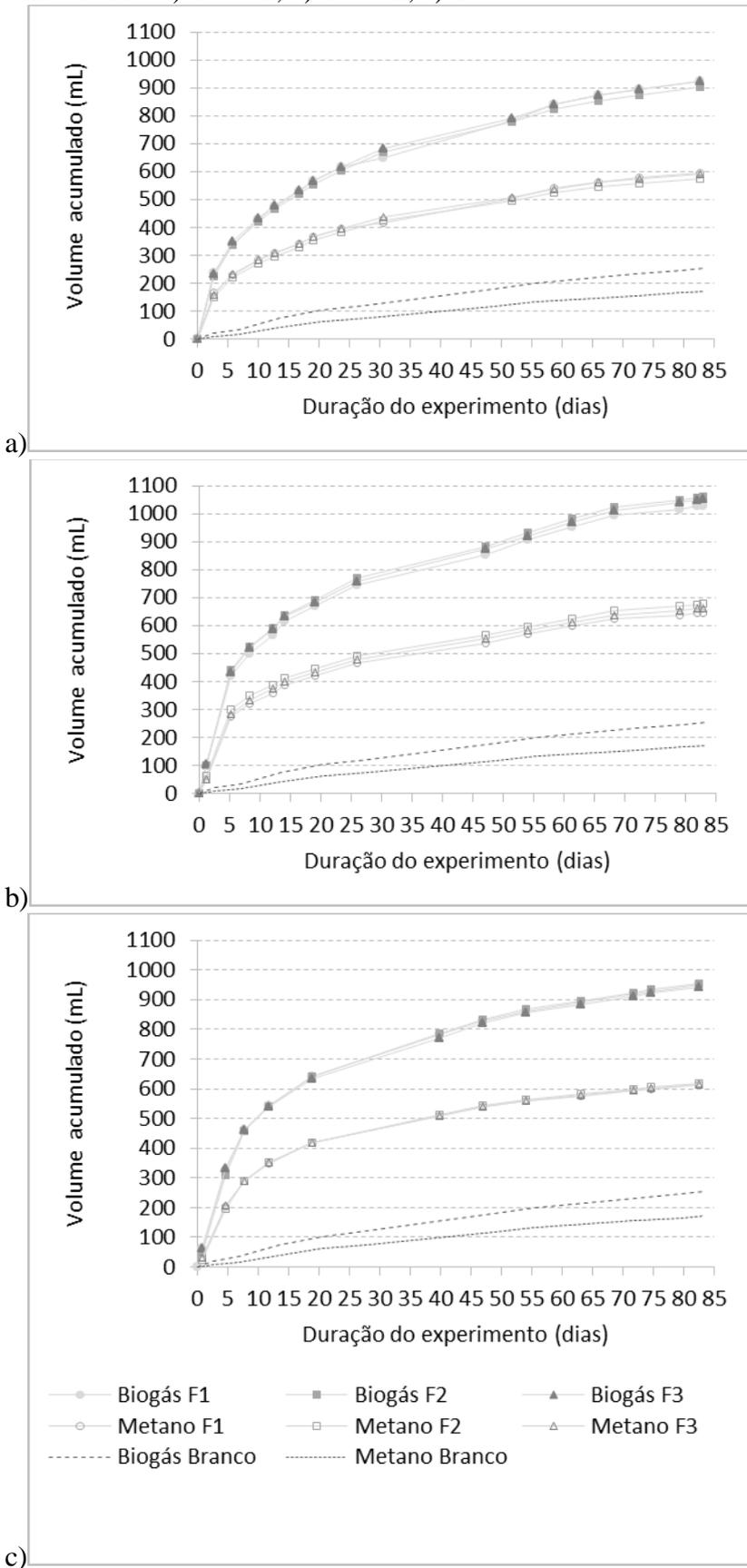


Figura A1-0.7 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A6. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

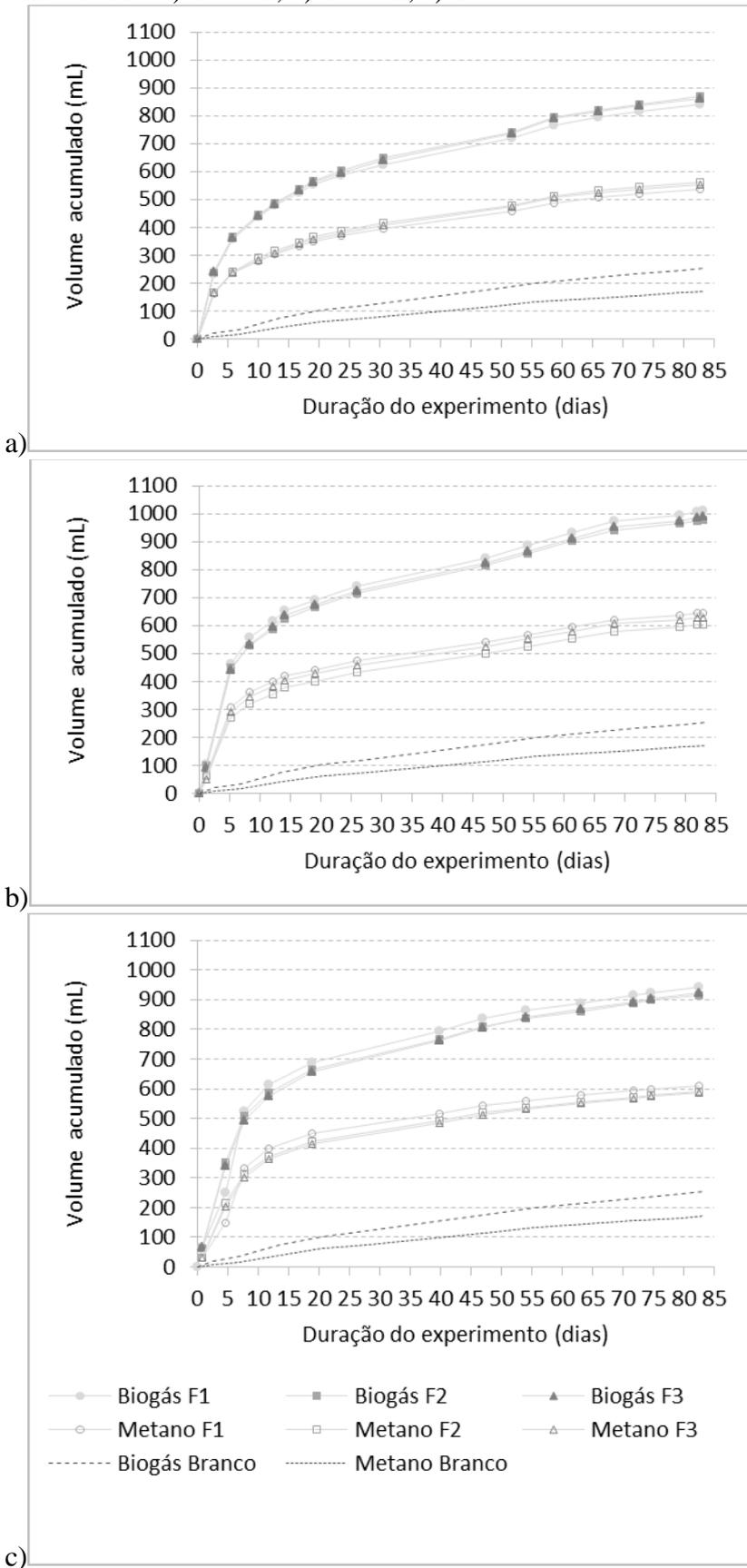


Figura A1-0.8 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A7. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.

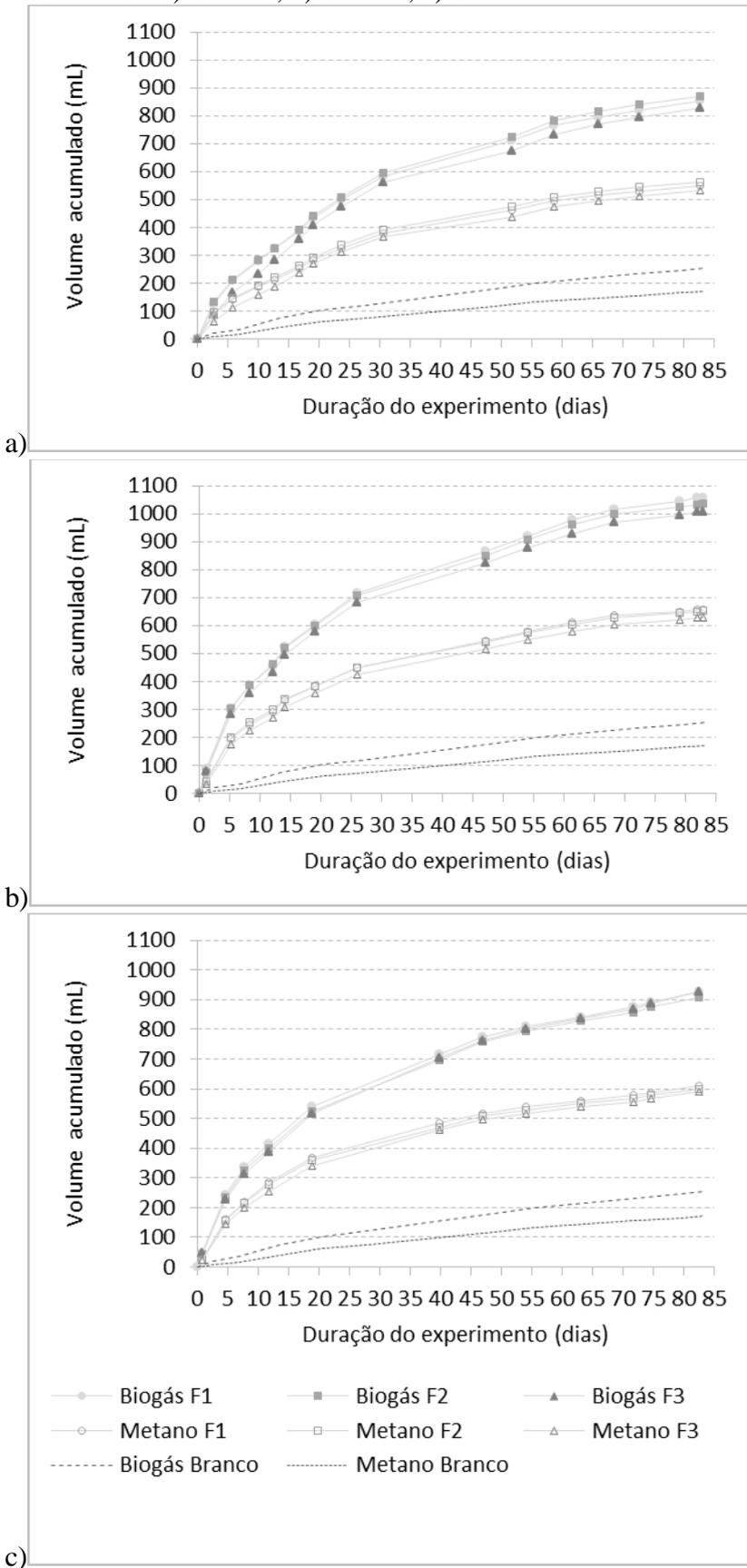
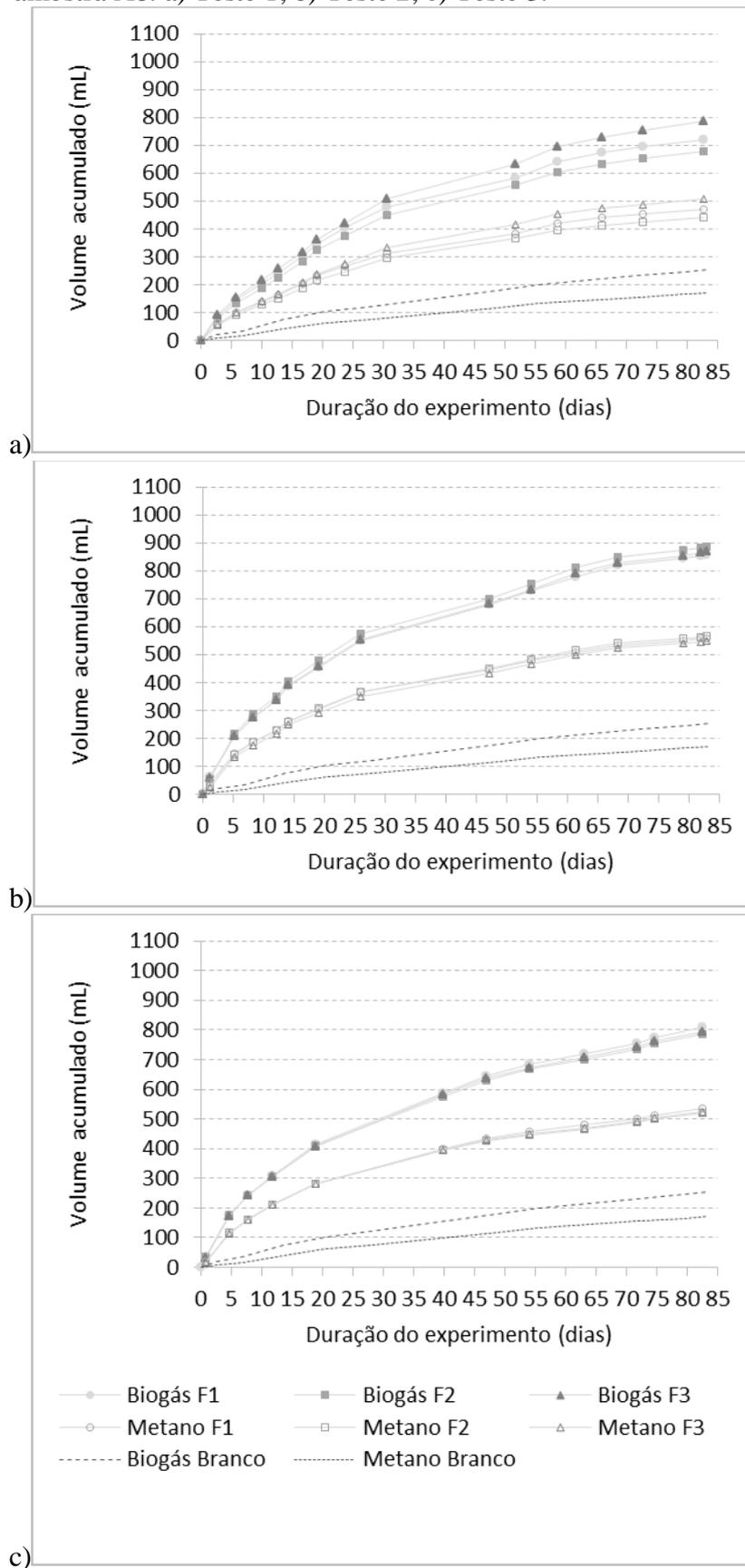


Figura A1-0.9 – Produção volumétrica de biogás e CH₄ da amostra A8. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3.



Apêndice 2 – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE, PAPÉIS NÃO-REICLÁVEIS E RESÍDUOS DE JARDINAGEM

Tabela A2-0.1 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 1

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	210	248	261	258	304	320
2	212	253	266	260	310	326
3	220	254	285	269	312	349
Média	214	252	271	262	308	332
Desvio-padrão	4,96	3,42	12,41	6,08	4,19	15,21
Incremento em relação a 30 dias				-	18%	26%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	8%

Tabela A2-0.2 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 2

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	228	267	280	279	328	343
2	275	327	342	337	401	419
3	271	302	330	332	370	405
Média	258	299	318	316	366	389
Desvio-padrão	26,05	30,18	32,94	31,92	36,99	40,36
Incremento em relação a 30 dias				-	16%	23%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	6%

Tabela A2-0.3 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 3

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	270	320	335	331	392	410
2	313	374	396	383	458	485
3	290	349	376	355	428	461
Média	291	348	369	356	426	452
Desvio-padrão	21,42	26,86	31,03	26,25	32,91	38,03
Incremento em relação a 30 dias				-	19%	27%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	6%

Tabela A2-0.4 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 4

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	177	213	227	217	261	278
2	236	275	292	290	337	358
3	228	245	274	280	301	336
Média	214	244	264	262	300	324
Desvio-padrão	32,33	31,01	33,95	39,62	38,00	41,60
Incremento em relação a 30 dias				-	14%	24%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	8%

Tabela A2-0.5 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 5

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	355	400	416	435	490	509
2	426	468	491	522	574	601
3	400	435	444	491	533	544
Média	394	434	450	483	532	551
Desvio-padrão	36,12	34,08	37,87	44,27	41,76	46,40
Incremento em relação a 30 dias				-	10%	14%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	4%

Tabela A2-0.6 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 6

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	336	367	380	412	450	465
2	400	433	455	491	530	557
3	399	417	424	489	511	519
Média	378	406	419	464	497	514
Desvio-padrão	36,65	34,13	37,63	44,92	41,82	46,12
Incremento em relação a 30 dias				-	7%	11%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	3%

Tabela A2-0.7 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 7

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	305	359	377	374	439	462
2	392	455	475	480	557	583
3	350	404	429	429	495	525
Média	349	406	427	428	497	523
Desvio-padrão	43,30	48,01	49,27	53,06	58,84	60,37
Incremento em relação a 30 dias				-	16%	22%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	5%

Tabela A2-0.8 – Resultados de volume de CH₄ acumulado, produção específica, estatística descritiva e incremento de produção do ensaio 8

Teste	Volume acumulado (mLCH ₄)			Produção específica (mLCH ₄ .gSTVresíduo ⁻¹)		
	30 dias	60 dias	83 dias	30 dias	60 dias	83 dias
1	242	288	302	297	353	370
2	376	502	557	461	615	682
3	343	466	526	420	571	645
Média	320	419	462	393	513	566
Desvio-padrão	69,89	114,63	139,09	85,65	140,47	170,46
Incremento em relação a 30 dias				-	31%	44%
Incremento em relação a 60 dias				-	-	10%