



**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**Aproveitamento energético do biogás da digestão anaeróbia  
da água residuária do café no Sul de Minas Gerais**

**Bruno Vasconcelos da Rosa Pin**

**Itajubá - MG, Março de 2018**

**Universidade Federal De Itajubá**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**Bruno Vasconcelos da Rosa Pin**

**Aproveitamento energético do biogás da digestão anaeróbia  
da água residuária do café no Sul de Minas Gerais**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Energia,

Linha de Pesquisa: *Energia, Sociedade e Meio Ambiente.*

**Banca Examinadora:**

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros (Orientadora)  
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora (Coorientador)  
Prof. Dr. Valdir Schalch  
Profa. Dra. Ana Paula Moni Silva

**Itajubá - MG, 2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por toda força espiritual, imprescindível para manter a paz de espírito e harmonia durante a execução deste trabalho e de toda minha vida.

Agradeço aos meus pais por todo suporte e apoio dado durante esses anos na UNIFEI, além de serem grandes exemplos de vida e carisma.

Agradeço à minha professora orientadora Regina Mambeli Barros por toda ajuda, compreensão, paciência e por ter me convidado a participar do programa de mestrado e me acolhido com muita simpatia e todo suporte necessário para execução dos trabalhos.

Agradeço ao meu coorientador Electo Eduardo Silva Lora por ter contribuído de inúmeras maneiras ao longo do mestrado.

Agradeço ao técnico do laboratório João Victor Rocha, por ter ajudado imensamente nas análises laboratoriais, colaborado com várias explicações dos resultados obtidos em laboratório, além de todo o carisma e simpatia.

Agradeço à professora Milady Renata Apolinário da Silva e a técnica Aline Auxiliadora Tireli Miranda por terem ajudado com os testes de Carbono Orgânico Total.

E por fim, agradeço a todas amigas, todos os amigos, familiares, pessoas queridas que de alguma forma torceram, ajudaram e colaboraram para que tudo desse o mais certo possível.

## RESUMO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café. Porém o cultivo do café gera uma grande quantidade de resíduos durante o processamento do grão, que pode ser feito por via seca ou úmida. O processamento por via úmida consome uma grande quantidade de água para separação de diferentes qualidades de grãos, resultando na produção de um efluente com elevado teor orgânico, denominado água residuária do café (ARC). A ARC possui alto potencial poluidor, devendo ser tratada antes de ser descartada, constituindo-se no principal objeto de estudo. As amostras de ARC foram coletadas em uma fazenda situada no município de Soledade de Minas – MG. Foram feitas análises físico-químicas previamente e após a biodigestão, realizada em duplicata. As amostras foram biodigeridas e estudou-se a produção de biogás, sua composição, volume produzido e de gás metano ( $\text{CH}_4$ ), principal componente do biogás, de maior interesse por seu elevado potencial energético, e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), segundo principal componente. No Primeiro Experimento, com biodigestores denominados A1, A2, A3 e A4, os três primeiros receberam inóculo. No Segundo Experimento, com biodigestores denominados B1, B2, B3 e B4, os dois primeiros não receberam inóculo e os dois últimos receberam inóculo de lodo anaeróbico em 10% de volume, todos conectados a um gasômetro. Também foi estimado a produção teórica de  $\text{CH}_4$ , potência térmica e uma análise de viabilidade econômica de um projeto de aproveitamento do biogás na torrefação do café considerando três cenários (Cenário I, II e III). Como dados de entrada a média de vazão de biogás encontradas nos experimentos foi utilizada, considerando a ARC sem inóculo. Como resultado, as análises do substrato do Primeiro Experimento apresentaram valores significativamente superiores aos do Segundo. O volume de biogás produzido foi maior no Primeiro Experimento ( $A1 = 18.75 \text{ L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ,  $A2 = 8.94 \text{ L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ,  $A3 = 24.04 \text{ L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ , and  $A4 = 40.85 \text{ L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ) que no Segundo ( $B1 = 9.62 \text{ L}\cdot\text{L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ,  $B2 = 5.69 \text{ L}\cdot\text{L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ,  $B3 = 17.45 \text{ L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ , and  $B4 = 34.83 \text{ L}\cdot\text{L}\cdot\text{kgSV}^{-1}$ ), porém em ambas as produções não foram significativas. Houve viabilidade econômica no Cenário I com retorno financeiro em 7 anos. Os Cenários II e III não apresentaram viabilidade.

**Palavras-chave:** Água Residuária do Café, biogás, metano, biodigestão, energias renováveis.

## ABSTRACT

Brazil is the largest coffee producer and exporter in the world. However, coffee cultivation generates large amounts of residue during grain processing, which can be performed either dry or wet. Wet processing consumes a large amount of water to separate the different grain qualities, resulting in the production of a highly organic effluent called coffee wastewater (CWW). The main objective of this study was to examine this CWW, which has a high polluting potential and must be treated before its discharge. The CWW samples were collected on a farm located in the municipality of Soledade de Minas - MG. Physicochemical analyses were performed in duplicate before and after biodigestion. The biogas production, composition, and volume produced were measured during biodigestion. Methane gas ( $\text{CH}_4$ ) was the major component of the biogas, of major interest due to its high energy potential, with carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) as the second major component. In the first experiment, biodigesters A1–A3 received inoculum, while A4 did not. In the second experiment, biodigesters B1 and B2 did not receive an inoculum, while biodigesters B3 and B4 received an inoculum of anaerobic sludge making up 10% of the volume. All biodigesters were connected to a gasometer. Using the average biogas flow rate found in the experiments as input data, an economic feasibility analysis was performed in three scenarios (Scenario I, II and III) estimating the theoretical amount of  $\text{CH}_4$  and thermal power production that could be achieved from a biogas utilization project during coffee roasting using CWW without inoculum. The first experiment produced significantly higher values in the substrate analyses than did those of the second experiment. In addition, the volume of biogas produced was higher in the first experiment (A1 =  $18.75 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , A2 =  $8.94 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , A3 =  $24.04 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , and A4 =  $40.85 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ ) than in the second (B1 =  $9.62 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , B2 =  $5.69 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , B3 =  $17.45 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ , and B4 =  $34.83 \text{ L}\cdot\text{kg VS}^{-1}$ ), but neither was significant. There was economic viability in Scenario I, with a year payback time, respectively. Scenarios II and III were not feasible.

**Keywords:** Coffee wastewater, Biogas, Methane, Biodigestion, Renewable energy

## Sumário

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivos Gerais	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Reaproveitamento de Resíduos Agrícolas	5
3.2 O café e sua produção	6
3.2.1 Principais Países Produtores	7
3.2.2 Produção de Café no Brasil	9
3.3 Processamento do Café	10
3.3.1 Processamento Via Seca	11
3.3.2 Processamento Via Úmida	11
3.3.3 Tratamentos dos Resíduos do Processamento Pós-Colheita	12
3.3.4. Características físico-químicas da ARC	13
3.4 Biodigestão anaeróbia	14
3.4.1 Biodigestores e Reatores utilizados no tratamento de resíduos e efluentes	15
3.4.2 O Biogás	18
3.4.3. Tratamento da ARC para produção de biogás	19
3.5 Motores para conversão energética do biogás	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 Coleta da ARC e descrição da Fazenda	22
4.2 Análises físico-químicas da ARC	26
4.3 Montagem dos Biodigestores	26
4.3.1 Composição do Biogás	27
4.4 Produção relativa de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> e biogás	34
4.5 Potencial de Produção de Metano	35
4.5.1 Estimativa da potência térmica gerada de acordo com o BMP	37
4.5.2 Análise de Viabilidade Econômica	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 Análises físico-químicas	41

5.1.1 Análises físico-químicas - Primeiro Experimento	41
5.1.2 Análises físico-químicas - Segundo Experimento	42
5.1.3 Análises físico-químicas comparado a outros estudos	43
5.2 Composição do biogás	45
5.2.1 Composição do Biogás - Primeiro Experimento	45
5.2.2 Composição do Biogás – Segundo Experimento	48
5.3 Análise geral da produção dos biodigestores de ambos Experimentos	53
5.4 Síntese dos resultados teóricos	55
6 CONCLUSÕES	57
6.1 Recomendação para Trabalhos Futuros	58
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXOS	66

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção transversal de um grão cereja. Fonte: Murthy e Naidu (2012), adaptado. ....	6
Figura 2. Fluxograma representativo das diferentes etapas da produção de café desde a colheita até o beneficiamento dos grãos. Fonte: Pandey et al. (2000), adaptado. ....	7
Figura 3. Principais importadores do café brasileiro entre janeiro-junho 2016. Fonte: adaptado de MDIC/DECEX. ....	10
Figura 4. Fluxo da biodigestão anaeróbia. Fonte: adaptado de Li et al. (2011). ....	15
Figura 5. Biodigestor modelo Indiano. Fonte: adaptado de Nogueira (1986). ....	16
Figura 6. Biodigestor modelo Chinês. Fonte: adaptado de Nogueira (1986). ....	17
Figura 7. Modelo canadense. Fonte: acervo do autor. ....	17
Figura 8. Representação de um reator UASB com vista de sua seção transversal. Fonte: adaptado de Chernicharo (2007). ....	18
Figura 9. Síntese das etapas realizadas no presente estudo. ....	22
Figura 10. Localização da fazenda do estudo de caso. Fonte: acervo do autor. ....	23
Figura 11. Caixas d'água de recirculação da ARC. Fonte: acervo do autor. ....	23
Figura 12. Grãos boia separados por densidade. Fonte: acervo do autor. Figura 13. Prensa de separação dos grãos cereja dos imaturos. Fonte: acervo do autor. ....	24
Figura 14. Coleta dos grãos cereja após passar pela prensa de separação. Fonte: acervo do autor. ....	25
Figura 15. ARC sendo descartada. Fonte: acervo do autor. ....	25
Figura 16. Depósito de ARC na fazenda. Fonte: acervo do autor. ....	25
Figura 17. Biodigestor de garrafa PET. Fonte: adaptado de Ribeiro (2015). ....	27
Figura 18. Aparelho <i>Geotech</i> ®, aferidor da composição do biogás. Fonte: acervo do autor. ....	28
Figura 19. Representação esquemática dos biodigestores. ....	29
Figura 20. Biodigestores A1, A2, A3 e A4 (a) e vista superior dos biodigestores no sistema (b). ....	29
Figura 21. Manômetro vertical (a) e manômetro em "U" (b). Fonte: acervo do autor. ...	30
Figura 22. Modelo de gasômetro. Fonte: adaptado de Fantozzi e Buratti (2009) e Ribeiro (2015). ....	33
Figura 23. Biodigestores (a) e conexão dos biodigestores aos gasômetros (b). ....	33
Figura 24. Exemplo de fluxo de caixa adotando o VPL. Fonte: acervo do autor. ....	39
Figura 25. Fluxograma do aproveitamento do biometano oriundo da ARC. ....	40
Figura 26. Percentual de CH <sub>4</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento. ....	46
Figura 27. Percentual de CO <sub>2</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento. ....	47
Figura 28. Volume de CH <sub>4</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento. ....	47
Figura 29. Volume de CO <sub>2</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento. ....	48
Figura 30. Percentual de CH <sub>4</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento. ....	50
Figura 31. Percentual de CO <sub>2</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento. ....	50
Figura 32. Volume de CH <sub>4</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento. ....	52
Figura 33. Volume de CO <sub>2</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento. ....	53



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Maiores produtores e exportadores de café do mundo .....	8
Tabela 2. Principais importadores mundiais de café .....	8
Tabela 3. Produção nacional de café por estado e por espécie .....	9
Tabela 4. Café beneficiado no estado de MG em 2015 por região e por espécie.....	10
Tabela 5. Composição do biogás .....	18
Tabela 6. Equivalência energética para 1m <sup>3</sup> de biogás .....	19
Tabela 7. Resultados de produção de biogás com ARC de diferentes autores.....	20
Tabela 8. Informações de volume referente aos biodigestores.....	28
Tabela 9. Síntese dos biodigestores do segundo experimento.....	32
Tabela 10. Parâmetros físico-químicos da ARC – Primeiro Experimento.....	41
Tabela 11. Redução dos parâmetros físico-químicos após biodigestão – Primeiro Experimento.....	41
Tabela 12. Parâmetros físico-químicos da ARC – Segundo Experimento.....	42
Tabela 13. Redução dos parâmetros físico-químicos após biodigestão – Segundo Experimento.....	43
Tabela 14. Parâmetros físico-químicos da ARC bruta segundo diferentes autores comparados aos resultados do presente estudo.....	44
Tabela 15. Dados da composição do biogás referentes Primeiro Experimento .....	45
Tabela 16. Relação de produção de biogás e CH <sub>4</sub> por volume de substrato do Segundo Experimento.....	48
Tabela 17. Dados da composição do biogás referentes Primeiro Experimento .....	49
Tabela 18. Altura (h) e pressão (P) dos gasômetros do Segundo Experimento .....	51
Tabela 19. Relação de produção de biogás e CH <sub>4</sub> por volume de substrato do Segundo Experimento.....	53
Tabela 20. Produção de biogás e CH <sub>4</sub> relativa comparada a outros estudos .....	54
Tabela 21. Resultados de pressão, vazão de CH <sub>4</sub> , potência e volume do gasômetro .....	55
Tabela 22. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás – Cenário I .....	55
Tabela 23. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás – Cenário II.....	56
Tabela 24. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás - Cenário III .....	56
Tabela 25. Síntese da análise de viabilidade econômica para os diferentes cenários ....	56

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABR	Reator de Batelada Anaeróbio
AME	Atividade Metanogênica Específica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	American Public Health Association
BEN	Balanco Energético Nacional
BMP	Potencial de Produção de Metano
CBIO	Créditos de Descarbonizaç
CEQUAM	Centro de Estudos em Qualidade Ambiental
CH <sub>4</sub>	Gás metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CTGAS	Centro de Tecnologia do Gás
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FORSU	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
GEM	Monitor de Extração de Gás
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GT	Turbina a Gás
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfídrico
IEA	International Energy Agency

IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LABRES	Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água
LAF	Lagoa Aerada Facultativa
MCI	Motor de Combustão Interna a pistão
MDIC	Comércio Exterior e Serviços
MME	Ministério de Minas e Energia
NaOH	Hidróxido de sódio
NFPCs	Polímeros de Fibra de Compostos Naturais
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
O <sub>2</sub>	Gás oxigênio
OIC	Organização Internacional do Café
PET	Politereftalato de Etileno
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
PT	Fósforo Total
PVC	Policloreto de Vinila
PVS	Processamento Via Seca
PVU	Processamento Via Úmida
RA	Resíduos Agrícolas
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
RS	Resíduos Sólidos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior
SST	Sólidos Solúveis Totais
SSV	Sólidos Solúveis Voláteis
ST	Sólidos Totais

SF	Sólidos Fixos
SV	Sólidos Voláteis
TAE	Tanque de Acidificação e Equalização
TRH	Tempos de Retenção Hidráulica
UAHR	Reator Híbrido Anaeróbio de Fluxo Ascendente
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima
VPL	Valor Presente Líquido

# 1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola e a demanda de energia são dois ramos da sociedade contemporânea que crescem e se desenvolvem concomitantemente, havendo uma constante necessidade de aprimoramento no desenvolvimento desses setores, pois apesar da relevante importância em ambos os casos, estes vêm acompanhados de impactos ambientais que, se bem evitados, mitigados ou compensados, podem agregar grandes benefícios à sociedade. O crescimento de ambos os setores vem seguido de novos desafios para encontrar fontes alternativas de energia, visto que atualmente há forte dependência dos combustíveis fósseis, que embora indeterminado seu esgotamento, estes são oriundos de recursos naturais finitos e não renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017, 43,5% da matriz energética brasileira constitui-se de energias renováveis enquanto a média mundial é de 13,5%. Houve um crescimento de 10,1% na matriz energética renovável nacional, destacando-se a energia solar, eólica e biogás, com crescimento de 44,7%, 54,9% e 46,2% no balanço 2016/2015 respectivamente. Somente o setor agropecuário brasileiro foi responsável por 4,0 % de todo o consumo de energia nacional (BEN, 2017).

Com base nos dados da *International Energy Agency* (IEA), em 2014 a economia brasileira permaneceu sendo, em média, 11% menos intensa em carbono que a economia europeia, 50% menos do que a economia dos Estados Unidos da América e 70% menos do que a economia chinesa. Porém isso não reduz a atual necessidade do país em aumentar sua matriz energética renovável, pois continuam grandes os desafios para reduzir as emissões de carbono equivalente de origem antrópica.

Segundo Nogueira (1986), com a crise energética mundial em 1973, causada pelos elevados preços do petróleo, houve um aumento no interesse por fontes renováveis de energia, havendo maior consciência sobre as limitações das reservas de combustíveis fósseis. Outra fator que impulsionou a busca por fontes renováveis de energia foi a preocupação com as mudanças climáticas, apontada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (FRONDIZI et al., 2009).

A energia solar, eólica, das marés, geotérmicas, hidráulica e o biogás são exemplos de fontes renováveis de energia que vêm crescendo em virtude dos maiores investimentos impulsionados pelo Protocolo de Quioto, em 1997. Neste, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) constitui-se uma das principais ferramentas de comércio de créditos de carbono. O Acordo de Paris de 2015, implementado na 21ª Conferência das Partes, estabelece o compromisso dos países signatários em reduzir emissões de efeito estufa de maneira a conter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais. Com isso, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões em 37% em 2025 e 43% em 2030 abaixo dos níveis de 2005 (2,1 GtCO<sub>2</sub>e), estabelecido em sua Pretendida Contribuição Nacional Determinada (iNDC). Nesta iNDC o Brasil também pretende fortalecer o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC) como a principal estratégia para o desenvolvimento sustentável na agricultura. A lei Federal nº 13.576/2017, que institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) (BRASIL, 2017), tem como instrumento as ações no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (Art. 4, alínea VI). Esta fomenta os produtores de biocombustíveis a atingirem metas de redução de emissões de carbono, denominadas metas compulsórias anuais (Art. 6), que obterão seus benefícios em Créditos de Descarbonização (CBIO). A Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010a), regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404/2010 (BRASIL, 2010b), classifica os resíduos agrossilvopastoris (Art. 13, inciso I, alínea i), assim como aponta o aproveitamento energético como um de seus objetivos (Art. 7, inciso XIV), o que pode também beneficiar projetos que visem a reduzir emissões de carbono equivalente, conforme preconiza Barros (2012), contribuindo para projetos que se enquadrem no MDL ou que contribuam com as metas estabelecidas na iNDC. Os resíduos agrossilvopastoris podem ser usados como matéria prima para produção de biogás para produção e aproveitamento energético devido a presença de metano (CH<sub>4</sub>), gás com elevado poder calorífico. Seu potencial de efeito estufa (GWP) é 25 vezes superior ao do CO<sub>2</sub> considerando um horizonte de tempo de 100 anos, segundo o *IPCC Fourth Assessment Report (AR4)* (IPCC, 2007). Logo, o aproveitamento energético do biogás apresenta-se uma boa opção para contribuir com a redução do efeito estufa, uma vez que o CH<sub>4</sub>, em sua combustão, será convertido em CO<sub>2</sub>.

Agência Nacional do Petróleo (ANP), em sua Resolução ANP nº 685 de 29/06/2017 estabelece as regras para aprovação do controle de qualidade e a especificação do CH<sub>4</sub>

oriundo do biogás, ou biometano, destinado ao uso veicular, instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado no território nacional. Em seu Art. 16 traz as especificações do biometano de produtos e resíduos agrossilvopastoris e comerciais, onde, por exemplo, o biometano deve apresentar no mínimo 90% de CH<sub>4</sub>.

Dentre os vários tipos de materiais estudados para a produção de biogás, a água residuária do café (ARC) vem demonstrando bom potencial para a produção de biogás (PRADO e CAMPOS, 2008). Outro resíduo da indústria do café que vem sendo estudado para a produção de energia a partir do biogás é o grão de café usado, popularmente conhecido por "borra de café" (CODIGNOLE et al., 2016; LUZ et al., 2017). Jácome et al. (2015) concluíram que efluentes da agroindústria oferecem boas opções para otimização da produção de energia durante o tratamento das águas residuais de processos agrícolas diversos. Os autores (*op. cit.*) preconizam que em países emergentes, como os da América Latina, havendo carência de eficientes tecnologias no tratamento de efluentes, há a preocupação em se mitigar os danos ambientais associados à agroindústria ao analisarem a produção de energia sustentável a partir de efluentes agroindustriais.

O Brasil é um grande produtor agrícola dentre os quais o café tem destaque. Durante a colheita do café é realizado o seu beneficiamento, podendo ser por via seca ou úmida. Em ambos os casos são gerados amontoados de resíduos, e estudos vem sendo realizados com intuito de encontrar soluções criativas e rentáveis para o seu gerenciamento (BOOPATHY, 1987; MURTHY e NAIDU, 2012; PANDEY et al., 2000), pois estes colocam em risco a qualidade do meio ambiente e devem ter suas propriedades poluidoras amenizadas. Embora encontrem-se muitos estudos na literatura referentes ao uso de resíduos da produção de café para a produção de biogás, ainda há uma certa limitação na quantidade de pesquisas voltadas para a produção de biogás utilizando ARC especificamente, dentro do maior conhecimento que se tem no presente estudo.

A justificativa do presente estudo consiste na busca de tratamento mais efetivos e atrativos para a ARC levando em conta a preocupação ambiental relacionada à poluição dos solos e corpos hídricos que pode em perspectiva contribuir à expansão da matriz energética renovável, tendo em vista a maior independência de combustíveis fósseis assim como a redução nas emissões de carbono equivalente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Pretende-se, com o presente estudo, avaliar a produção de biogás utilizando ARC, a eficiência de tratamento anaeróbico do efluente e a possibilidade de substituição do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) pelo biogás ou mesmo a utilização de biogás para produção de energia elétrica com a finalidade de reduzir os custos do sistema de produção, fazer o beneficiamento do café além de encontrar novas alternativas que amenizem os problemas de despejo inadequado da ARC.

### **2.2 Objetivos Específicos**

O presente estudo visa a:

- Medir o volume de biogás produzido pela amostra de ARC em um biodigestor experimental e o seu percentual do gás metano ( $\text{CH}_4$ );
- Fazer as análises de potencial hidrogeniônico (pH), Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF), Sólidos Voláteis (SV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $\text{DBO}_5$ ), Nitrogênio Total (NT) e Carbono Orgânico Total (COT) do substrato com intuito de analisar a eficiência do biodigestor e a proporção carbono:nitrogênio (C:N), ou seja, se esta variável é favorável a utilizar o material biodigerido como biofertilizante.
- Estimar a energia a ser produzida em maior escala a partir dos valores de  $\text{CH}_4$  obtidos no experimento e teórico, a fim de encontrar medidas mais adequadas de aproveitamento energético do biogás.
- Fazer uma análise de viabilidade econômica de um projeto que aproveite o biogás para fins energéticos no contexto da mini e micro geração distribuída preconizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).



## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Reaproveitamento de Resíduos Agrícolas

Os Resíduos Agrícolas (RA) variam de acordo com o cultivo, mas seu manejo e reaproveitamento podem apresentar algumas semelhanças, como a presença de lignina e celulose, que podem ser aproveitados para a produção de bioetanol (NAIR et al., 2017). A bioconversão da biomassa em bioenergia é a aplicação mais apreciada dos RA, especialmente os de natureza celulósica, porém a produção de bioprodutos de alto valor agregado tais como enzimas, ácidos orgânicos, dentre outros metabólitos de amplas utilidades e aplicações é um campo promissor no seu gerenciamento (SINGHANIA et al., 2017). Väisänen et al. (2016) avaliaram uma série de resíduos agrícolas compostos de lignina para a produção de *natural fiber-polymer composites* (NFPCs, Polímeros de Fibra de Compostos Naturais, em português), que poderiam servir, por exemplo, de matéria-prima para a produção de fibras de carbono. Sheets et al. (2015), ao apontarem a ampla utilização de biodigestores como forma de tratamento de RA para produção de energia, colocaram em pauta a importância do tratamento dos efluentes oriundos da digestão anaeróbia, que podem limitar o próprio processo anaeróbio. Neste sentido os autores (*op. cit.*) sugeriram a minimização do teor de umidade e, além de sua utilização como biofertilizante, a necessidade de se buscar por novas maneiras de uso do material biodigerido. Pois, dependendo do substrato utilizado no biodigestor há o risco de acumulação de patógenos neste material. A codigestão de alguns resíduos tais como: palhas de milho, trigo e sorgo com restos de alimentos (YONG et al., 2015); esterco de avícolas, suíno, de vaca leiteira e palha de arroz (WANG et al., 2013); resíduos de abatedouro de bovinos, mistura de esterco de suínos, equinos e bovinos, colheitas variadas (frutas verdes e resíduos vegetais) e Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) (PAGÉS-DÍAZ et al., 2014); esterco de avícolas, suínos, bovinos, resíduos de alimentos vegetais e grama de corte (POULSEN e ADELARD, 2016) vêm mostrando que a codigestão de RA com outros tipos de RS apresentam efeitos sinérgicos. Em outras palavras, produz-se mais biogás com uma mistura bem elaborada de resíduos comparado ao que produziria cada substrato biodigerido individualmente.

### 3.2 O café e sua produção

A produção do café (*Coffea sp.*) corresponde a uma das maiores comódities da agroindústria do mercado mundial. As variedades *Coffea arabica* e *Coffea robusta* são as mais cultivadas e comercializadas no mundo. O café foi tradicionalmente plantado por longo período à sombra de árvores nas regiões tropicais ou em consórcio com árvores frutíferas, como bananeiras ou árvores leguminosas com a finalidade de se produzir outros alimentos, madeira, lenha e forragem. Porém, com o aumento da demanda comercial deste fruto, até então cultivado em ambientes sombreados, passou por uma grande mudança em 1970, em que houve fortes investimentos de melhoramento genético da planta para ser cultivada em ambientes ensolarados e em monocultura a fim de atender o mercado (PANDEY et al., 2000). A Figura 1 ilustra as principais partes constituintes de um fruto de café, usualmente chamado de grão cereja.

O cultivo de *Coffea arabica*, embora tenha sua origem na Etiópia, foi disseminado pelos árabes no século XIII, quando algumas sementes foram levadas ao Iêmen, na Península Arábica. Desse modo, foram estabelecidas as primeiras culturas, enquanto o *Coffea robusta* é nativo da África Central (MONACO et al., 1977 apud MURTHY e NAIDU, 2012, p.49).



Figura 1. Seção transversal de um grão cereja. Fonte: Murthy e Naidu (2012), adaptado.

Os grãos de café têm sido usados desde o século IX para a produção de bebidas e é atualmente uma das bebidas mais consumidas no mundo. O seu cultivo tem lugar nos países em desenvolvimento, servindo de fonte de renda para vários produtores e

trabalhadores do meio. Mas a produção do meio dá-se ainda com grandes desafios para um gerenciamento mais adequado dos resíduos gerados no processamento dos frutos. Há uma busca por um exemplo de desenvolvimento sustentável de natureza complexa, interligando os aspectos econômicos, igualdade social e preocupações ambientais (FERRELL e COCKERILL, 2012).

A produção de café desde a colheita até seu beneficiamento é resumida conforme ilustra a Figura 2, podendo ser feita com processamento via seca ou úmida.

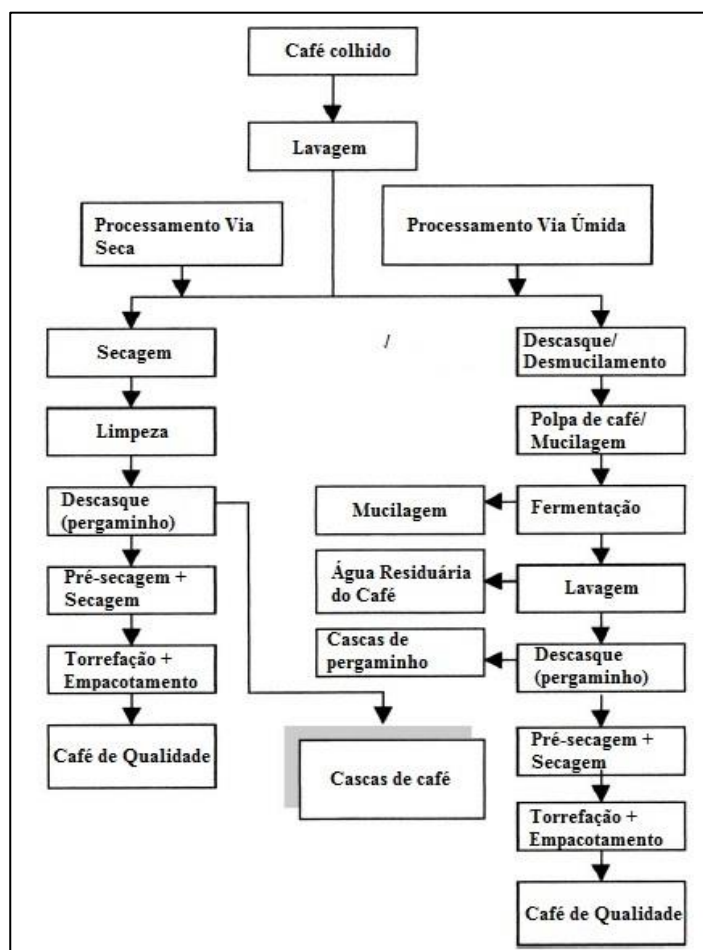


Figura 2. Fluxograma representativo das diferentes etapas da produção de café desde a colheita até o beneficiamento dos grãos. Fonte: Pandey et al. (2000), adaptado.

### 3.2.1 Principais Países Produtores

Segundo informações da Organização Internacional do Café (OIC), os três maiores produtores mundiais de café respondem por mais de 50% da produção e exportação global. Vale destacar que somente o Brasil é responsável por cerca de um terço de toda produção e exportação mundial, conforme dados sintetizados na Tabela 1. Na Tabela 2

constam os maiores importadores de café mundiais, em que a União Europeia, Estados Unidos e Japão são responsáveis por mais de 90% de todas importações.

Tabela 1. Maiores produtores e exportadores de café do mundo

País	Produção 2016		Exportação 2015	
	t	%	t	%
Brasil	3.300.000	36,27%	2.220.600	32,49%
Vietnã	1.530.000	16,82%	1.239.300	18,13%
Colômbia	870.000	9,56%	762.960	11,16%
Indonésia	600.000	6,60%	502.740	7,36%
Etiópia	396.000	4,35%	179.100	2,62%
Honduras	356.040	3,91%	301.800	4,42%
Índia	319.980	3,52%	315.720	4,62%
Peru	228.000	2,51%	167.400	2,45%
Uganda	228.000	2,51%	215.760	3,16%
Guatemala	210.000	2,31%	177.660	2,60%
México	186.000	2,04%	151.380	2,21%
Nicarágua	126.000	1,39%	105.180	1,54%
Costa do Marfim	120.000	1,32%	85.080	1,24%
Costa Rica	89.160	0,98%	67.680	0,99%
Papua Nova Guiné	54.000	0,59%	42.660	0,62%
Tanzânia	48.000	0,53%	42.540	0,62%
Quênia	46.980	0,52%	42.720	0,63%
El Salvador	37.380	0,41%	34.560	0,51%
Equador	36.000	0,40%	52.140	0,76%
Outros	315.840	3,47%	128.040	1,87%
<b>Total</b>	<b>9.097.440</b>	<b>100%</b>	<b>6.835.020</b>	<b>100%</b>

Fonte: adaptado de OIC (s.d.)

Tabela 2. Principais importadores mundiais de café

Importadores	Ano: 2015	
	t	%
União Europeia	4.613.160	62,70%
Estados Unidos	1.662.480	22,60%
Japão	483.780	6,58%
Rússia	282.600	3,84%
Suíça	164.880	2,24%
Turquia	74.940	1,02%
Noruega	48.000	0,65%
Tunísia	27.540	0,37%
<b>Total</b>	<b>7.357.380</b>	<b>100%</b>

Fonte: adaptado de OIC (s.d.)

### 3.2.2 Produção de Café no Brasil

Segundo o levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) para o ano de 2016, o Brasil possui aproximadamente 6,7 bilhões de pés de café. Quanto aos maiores estados produtores, contidos na Tabela 3, Minas Gerais lidera o ranking, responsável por mais da metade da produção nacional tomando-se 2016 como ano de referência.

Tabela 3. Produção nacional de café por estado e por espécie

Estado	<i>C.arabica</i>	<i>C.robusta</i>	Total - Estado	%
	t	t	t	
MG	1.825.674	17.772	1.843.446,00	59,81%
ES	235.926	302.118	538.044,00	17,46%
SP	361.860	-	361.860,00	11,74%
BA	76.032	49.566	125.598,00	4,08%
RO	-	97.614	97.614,00	3,17%
PR	62.820	-	62.820,00	2,04%
RJ	20.844	-	20.844,00	0,68%
GO	13.608	-	13.608,00	0,44%
MT	78	7.446	7.524,00	0,24%
PA	-	546	546,00	0,02%
AM	-	360	360,00	0,01%
Outros	6.090	3.798	9.888,00	0,32%
<b>Total</b>	<b>2.602.932</b>	<b>479.220</b>	<b>3.082.152,00</b>	<b>100%</b>

Fonte: adaptado de Conab (2017)

De todo café brasileiro exportado em 2016, 84,45% corresponde à espécie *C.arabica*, sendo esta a variedade mais comercializada no mundo de acordo com as séries históricas da OIC.

Os dados relativos aos principais importadores de café brasileiro foram obtidos pelo levantamento do Departamento de Operações de Comércio Exterior (DECEX), órgão do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), sintetizados na Figura 3, compreendendo ano de 2016.

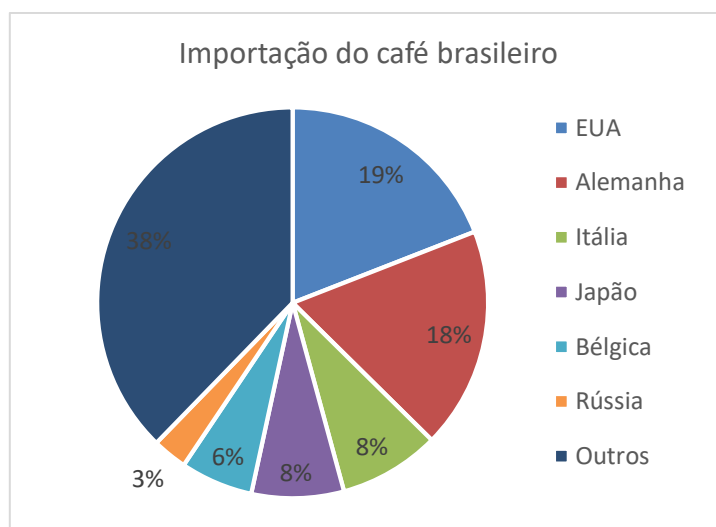


Figura 3. Principais importadores do café brasileiro entre janeiro-junho 2016. Fonte: adaptado de MDIC/DECEX.

Nota-se que os Estados Unidos e a Alemanha são os dois grandes importadores do café brasileiro, tendo importado, respectivamente, cerca de 393.366 t e 377.946 t de café verde, solúvel, torrado e moído.

### 3.2.2.1 Produção de Café em Minas Gerais

Segundo o levantamento feito de café beneficiado durante o ano de 2016 pela Conab, a região Sul e Centro-Oeste de Minas Gerais (MG) é a maior produtora de café do estado, responsável por 54,12% de todo café beneficiado em seu território, com 16.627.700 sacas de 60 kg (997.662 t). Na Tabela 4 estão contidos os dados deste levantamento.

Tabela 4. Café beneficiado no estado de MG em 2015 por região e por espécie

Região de MG	Ano: 2016			
	<i>C.arabica</i> t	<i>C.robusta</i> t	Total	%
Sul e Centro-Oeste	997.662	-	997.662	54,12%
Triângulo, Alto Paranaíba e Noroeste	444.096	-	444.096	24,09%
Zona da Mata, Rio Doce e Central	353.364	11.550	364.914	19,80%
Norte, Jequitinhonha e Mucuri	30.552	6.222	36.774	1,99%
<b>Total</b>	<b>1.825.674</b>	<b>17.772</b>	<b>1.843.446</b>	<b>100%</b>

Fonte: adaptado de Conab (s.d.)

## 3.3 Processamento do Café

O processamento é a principal atividade na indústria do café que converte o fruto *in natura* em café líquido, podendo ser por via seca ou via úmida, que se diferenciam em

complexidade, qualidade do grão de café e da bebida a ser produzida (MURTHY e NAIDU, 2012). Tais processamentos estão mais detalhadamente descritos a seguir.

### **3.3.1 Processamento Via Seca**

No Processamento Via Seca (PVS) os frutos recém colhidos são distribuídos uniformemente a uma espessura aproximada de 8 cm sobre um pátio limpo, usualmente chamado de terreiro. Os grãos normalmente estão suficientemente secos após 12 a 15 dias sob condições de tempo ensolarado. Os grãos secos não são expostos a condições úmidas, que poderia comprometer suas qualidades com formações de fungos e mofo. Cada lote de grãos é ensacado separadamente em um saco próprio e limpo. A secagem apropriada contribui com a qualidade do café em relação à cor, forma e aroma. A taxa de secagem do pergaminho depende de sua umidade inicial, temperatura ambiente, umidade do ar, espessura de distribuição e frequência de revolvimento (MURTHY e NAIDU, 2012).

### **3.3.2 Processamento Via Úmida**

No Processamento Via Úmida (PVU) ocorre a remoção da polpa (ou mucilagem) dos frutos por meio de um despoldador antes destes serem postos para secagem. O descascamento ocorre de maneira mecânica no despoldador, em que parte da mucilagem é removida e parte continua aderida ao pergaminho, sendo extraída por processo de fermentação natural em água. A fermentação, quando demasiadamente prolongada, afeta na coloração do grão e na qualidade da bebida. E quando muito curta, leva a absorção da umidade pelos grãos devido à mucilagem, de característica pegajosa, aderida ao pergaminho, favorecendo à formação de mofo. A temperatura ótima de fermentação situa-se entre 30°C e 35°C. A massa de café deve ser agitada 2 a 3 vezes durante o período de fermentação. A degradação da mucilagem leva em torno de 24h a 36h para o *C.arabica* e 72h para o *C.robusta*. Quando, pelo tato, há ausência de pegajosidade do pergaminho, estes estão prontos para secagem no terreiro (MURTHY e NAIDU, 2012). De acordo com os mesmos autores (*op. cit*), a desmucilagem pode ser feita de maneira mecânica, passando por um processo de lavagem e posteriormente mergulhado em água por cerca de 12h até finalmente ser drenado e esparramado no terreiro a uma espessura de 5 cm. Segundo Oliveira et al. (2008), a remoção tradicional da mucilagem produz um café com mais aroma. Os autores (*op. cit.*) também constataram que a influência microbiológica da

fermentação atribui ao café notas mais frutadas, florais e caramelizadas enquanto que o café submetido pela remoção mecânica apresenta estas qualidades de forma mais neutra.

### **3.3.3 Tratamentos dos Resíduos do Processamento Pós-Colheita**

#### *3.3.3.1 Tratamento dos Resíduos do PVS*

No PVS são gerados amontoados de cascas de café, e embora muitos busquem um adequado gerenciamento desses resíduos, ainda não há usos efetivamente rentáveis para esses resíduos que representam grandes preocupações ambientais no Brasil (OLIVEIRA et al., 2008). Gouvea et al. (2009), analisando a produção de etanol utilizando cascas de café, obtiveram uma produção de 8,49g etanol para cada 100g de cascas de café ressecadas, que lhe confere um ótimo potencial para a produção deste biocombustível. Ademais, esses resíduos podem ser utilizados como biomassa para produção de energia (WILSON et al., 2010) ou mesmo usados em bioprocessos para a produção de compostos variados (PANDEY et al., 2000). Shankaranand e Lonsane (1994), utilizando o agente fermentador *Aspergillus niger* (espécie de fungo) obtiveram uma eficiente produção de 1,3g de ácido cítrico por 10g de cascas de café umedecido com solução de NaOH  $0,075\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  após 72h de fermentação. Leifa et al. (2001) foram os precursores das pesquisas que utilizam esses resíduos para produção de cogumelos, mostrando ser uma alternativa viável. Murthy e Naidu (2012) apontam a compostagem e vermicompostagem uma possível solução, assim como é feita com vários outros resíduos da agroindústria e da indústria de alimentos. Jayachandra et al. (2011) analisaram a decomposição anaeróbia desses resíduos em biodigestores utilizando o agente fermentador *Mycotypha*. Os autores (*op. cit.*) constataram que a biodigestão pode ser uma boa opção de tratamento. Esses resíduos apresentam significativos teores de taninos e polifenóis, que podem restringir seu uso como matéria-prima para produção de alimentos, mas a fermentação desses resíduos pode ser uma boa opção de desintoxicação e conseqüentemente aumentar sua viabilidade de uso (PANDEY et al., 2000).

#### *3.3.3.2 Tratamento dos Resíduos do PVU*

A água residuária do café (ARC) é o resíduo gerado no PVU junto às cascas externas e polpa, ou *cascas frescas*. Prata e Oliveira (2007) verificaram a possibilidade de usar as *cascas frescas* para produção de corante de alimentos, pois estas são ricas em *antocianinas*, compostos responsáveis pela coloração. No PVU a polpa com a casca são



removidas para uma secagem prévia, e sua coloração vai sendo rapidamente degradada por algumas enzimas presentes nestes compostos (*peroxidases* e *polifenoloxidasas*) liberadas na hora do descascamento ou por influência de outros agentes oxidantes, ocasionando uma grande perda de colorantes neste processo (MURTHY e NAIDU, 2012). Mazzafera (2002) alerta para o uso da polpa de café gerada no PVU na produção de alimentos a animais, pois embora seja rica em cafeína e taninos, compostos indesejáveis para se produzir alimentos, a polpa do café é rica em proteínas, carboidratos e minerais. Sistemas de tratamento tipo *wetlands* vêm sendo aplicados para o tratamento de efluentes industriais e domésticos, sendo um sistema viável no tratamento de ARC (HARSONO et al., 2015; SHENOY et al., 2011; YADIRA et al., 2014). No que concerne a produção de biocombustíveis, resultados promissores têm sido obtidos no uso dos resíduos do PVU que possuem alto teor de carboidratos para produção de bioetanol (HARSONO et al., 2015; SHENOY et al., 2011; YADIRA et al., 2014). O tratamento da ARC com a finalidade de produção de biogás tem sido estudado por diferentes autores, correspondendo um dos objetivos principais do presente estudo, por isso apresentado com mais detalhes no item 3.4.3.

#### **3.3.4. Características físico-químicas da ARC**

O alto consumo de água nos diferentes estágios do PVU acaba gerando grandes quantidades de ARC, rica em matéria orgânica e nutrientes, o que lhe atribui alto potencial poluente para ser descartada sem tratamento prévio (BEYENE et al., 2014; FIA et al., 2012; SELVAMURUGAN et al., 2010). Este efluente apresenta pH relativamente ácido, altos teores de ST dos quais a maior parte são SV, elevadas DQO e DBO<sub>5</sub>.

No que concerne a legislação brasileira vigente, a ARC trata-se de um efluente, e de acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 430, Seção II, Artigo 16, os efluentes devem ser lançados com pH entre 5 e 9, temperatura inferior a 40°C, sendo que a variação da temperatura do corpo receptor não deve exceder a 3°C no limite da zona de mistura, remoção mínima de 60% da DBO<sub>5</sub>, com tal valor podendo ser reduzido caso comprovado a capacidade de autodepuração do corpo hídrico receptor (CONAMA, 2011). Em MG, a Deliberação Normativa (DN) n° 26/2008 dispõe sobre procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água

superficiais. Em seu Art. 2º, inciso I, fica estabelecido que a DBO<sub>5</sub> é o parâmetro referência de requerimento de outorga para o lançamento de efluentes no estado.

### 3.4 Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia envolve complexas reações bioquímicas que resultam na produção de diversos compostos e culminam com a produção de biogás, onde o CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub> apresentam-se em maiores proporções. Para Chernicharo (2007), embora a digestão anaeróbia possa ser dividida em duas etapas, acidogênica e metanogênica, esta pode ser subdividida nas seguintes rotas metabólicas:

- Hidrólise: é primeira fase de degradação anaeróbia, onde compostos orgânicos complexos são hidrolisados em compostos mais simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos (AG), possibilitando a absorção pelas paredes das bactérias fermentativas hidrolíticas.
- Acidogênese: os produtos solúveis, oriundos da hidrólise, são metabolizados pelas bactérias fermentativas acidogênicas e produzidos compostos mais simples, como ácidos orgânicos, álcoois, cetonas, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, além de novas células bacterianas.
- Acetogênese: compostos intermediários, como propionato e butirato, são oxidados pelas bactérias acetogênicas, produzindo acetato, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, substratos essenciais para os microorganismos metanogênicos. As reações acetogênicas ocorrem com boa eficiência quando as concentrações de H<sub>2</sub> e acetato são baixas, o que é conseguido pela ação de microorganismos consumidores de H<sub>2</sub> e acetato.
- Metanogênese: é a etapa final da biodigestão anaeróbia, onde os compostos orgânicos são convertidos em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Ocorre por meio da metanogênese acetotrófica e hidrogenotrófica. Os microorganismos metanogênicos nesta etapa são denominados *archaeas* metanogênicas,
- Sulfetogênese: as bactérias redutoras de sulfato competem com as *archaeas* metanogênicas por acetato e H<sub>2</sub>, o que vai depender da concentração de compostos de enxofre no meio. O produto final é o sulfeto de hidrogênio, onde em meio aquoso reage e ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) é produzido.

Li et al. (2011) apresenta o fluxo da biodigestão anaeróbia conforme a Figura 4.

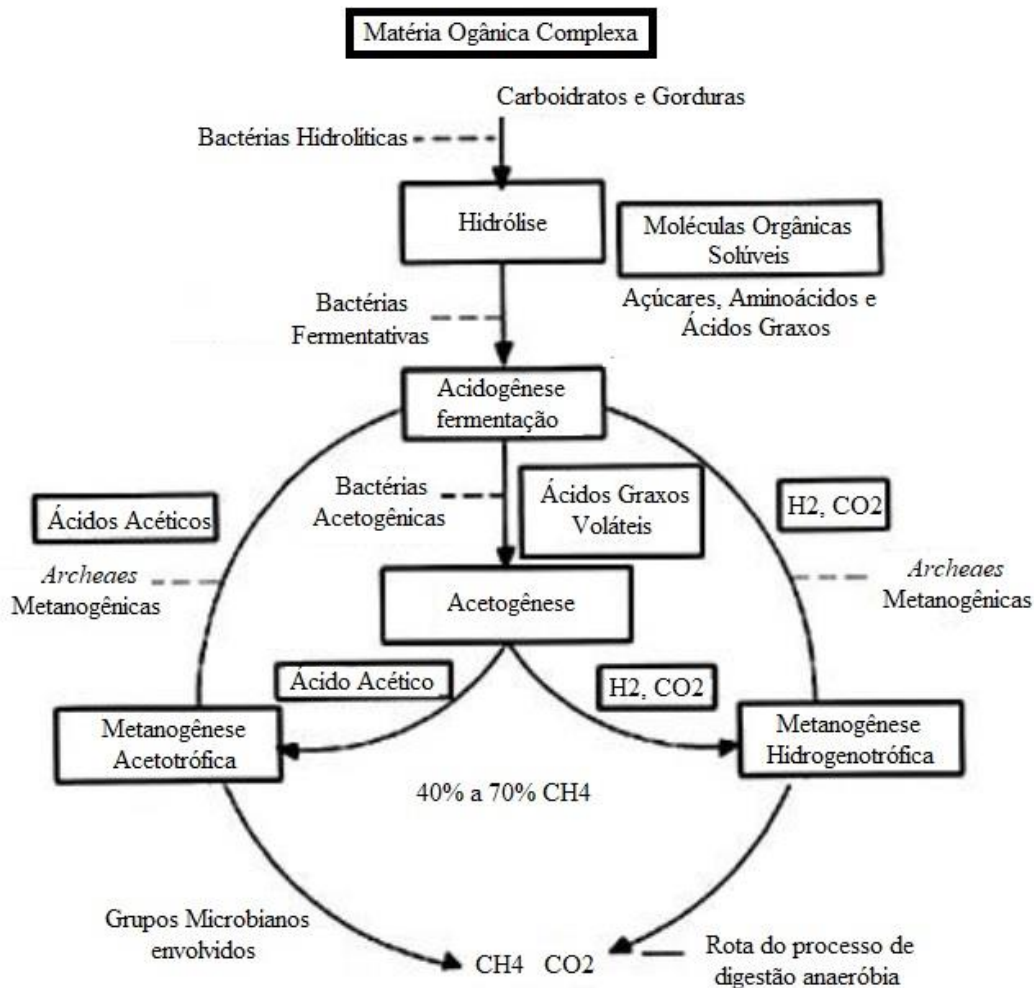


Figura 4. Fluxo da biodigestão anaeróbia. Fonte: adaptado de Li et al. (2011).

Nogueira (1986) cita algumas vantagens da biodigestão anaeróbia: produção de gás combustível, controle de poluição das águas, controle dos odores, preservação do valor fertilizante do resíduo e remoção ou eliminação dos agentes patogênicos da matéria orgânica.

### 3.4.1 Biodigestores e Reatores utilizados no tratamento de resíduos e efluentes

Existe uma grande variedade de biodigestores dos quais não há uma regra para definir qual é o melhor modelo a ser usado. A escolha depende do substrato a ser utilizado, das condições externas e/ou controle de temperatura, formas de manejo e para qual finalidade será usado. Quando o resíduo a ser tratado tem características de sólido, como esterco bovino, é necessário adicionar uma quantidade de água antes de ser inserido no biodigestor. Os biodigestores mais amplamente usados são possivelmente os modelos indiano, chinês

e canadense (NOGUEIRA, 1986), detalhados a seguir, ilustrados nas Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

- Modelo indiano: construído em alvenaria e gasômetro de aço, possui dois compartimentos, onde o fluxo de entrada preenche o primeiro compartimento de maneira a otimizar a atividade microbológica anaeróbia até transpor para o segundo compartimento. Neste, pela própria pressão exercida pelo substrato o conduz para fora do biodigestor por um tubo de descarga. Ao topo do gasômetro é conectado um tubo de captação do biogás.

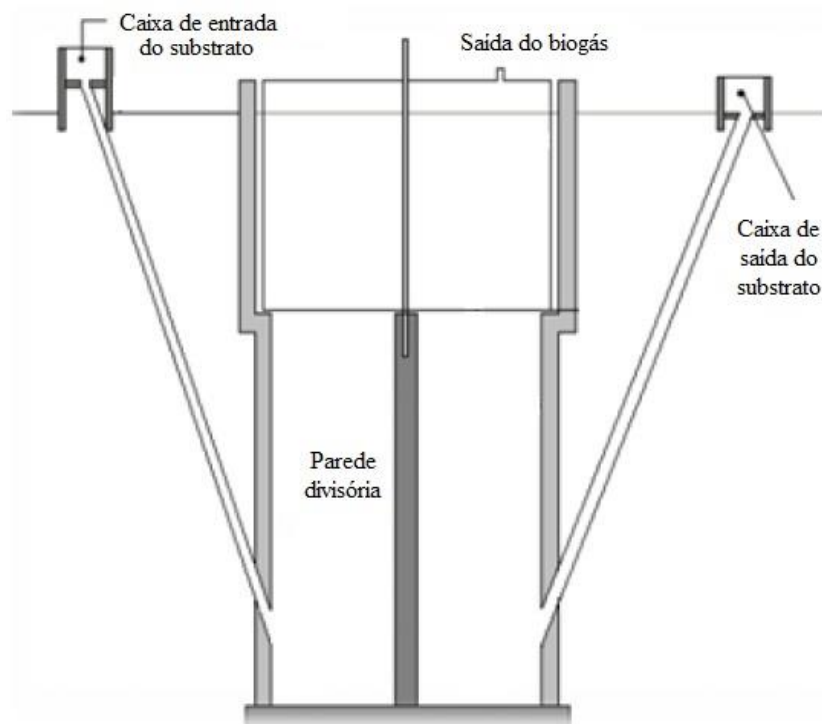


Figura 5. Biodigestor modelo Indiano. Fonte: adaptado de Nogueira (1986).

- Modelo chinês: construído em alvenaria com parte superior côncava de maneira a dispensar gasômetro para armazenamento do biogás, se assemelha em alguns aspectos ao modelo indiano. Esta semelhança exemplifica-se, como por exemplo, pela existência de uma caixa de entrada para inserir o substrato e saída do mesmo, após biodigerido, com auxílio da pressão interna. Na sua parte superior possui uma saída para captação do biogás.

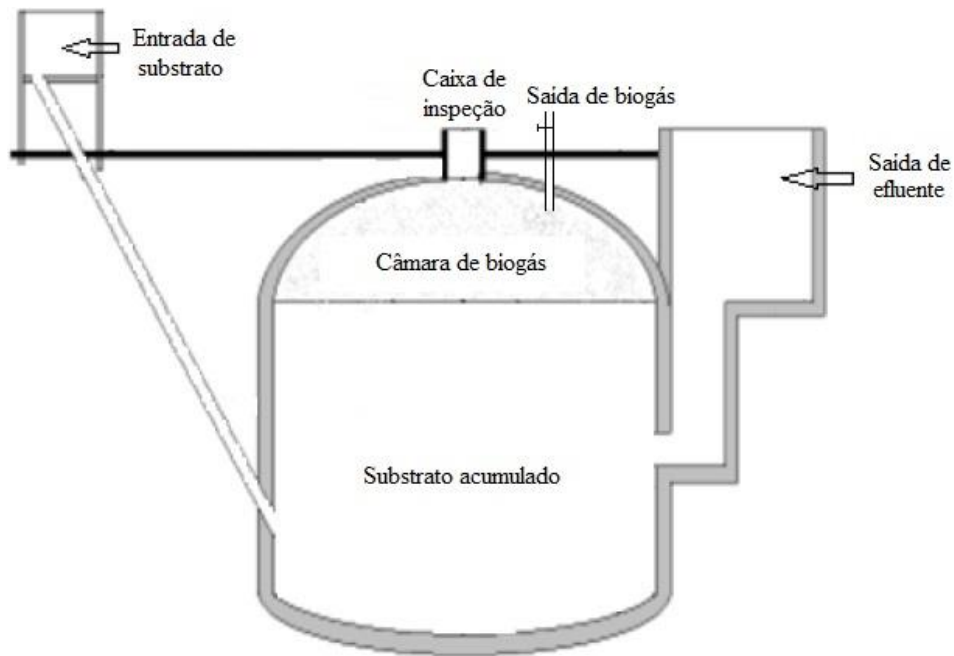


Figura 6. Biodigestor modelo Chinês. Fonte: adaptado de Nogueira (1986).

- Modelo canadense: também conhecido como modelo marinha, trata-se de um compartimento retangular construído em solo ligeiramente escavado, impermeabilizado por alvenaria (ou algum outro material impermeabilizante). Uma manta de policloreto de vinila constitui o gasômetro, que se dilata à medida que biogás vai sendo produzido. O substrato, após biodigerido, é impulsionado pela pressão interna do gasômetro a uma caixa de saída, podendo ser utilizado como biofertilizante.

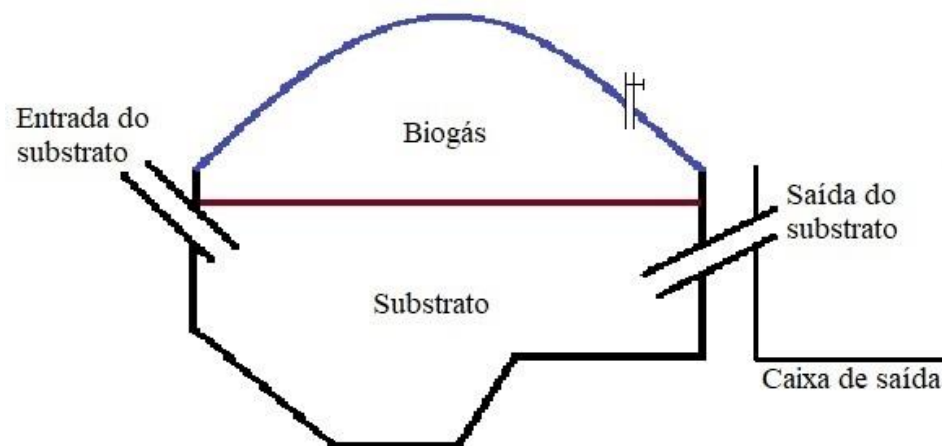


Figura 7. Modelo canadense. Fonte: acervo do autor.

Para efluentes líquidos, são comumente utilizados reatores. Chernicharo (2007) apresenta o reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) como uma boa alternativa no tratamento de efluentes, a princípio esgotos. Porém seu uso pode ser expandido caso o efluente apresente um fluxo líquido com elevado potencial de eutrofização. A Figura 8 ilustra um exemplo típico de reator UASB.

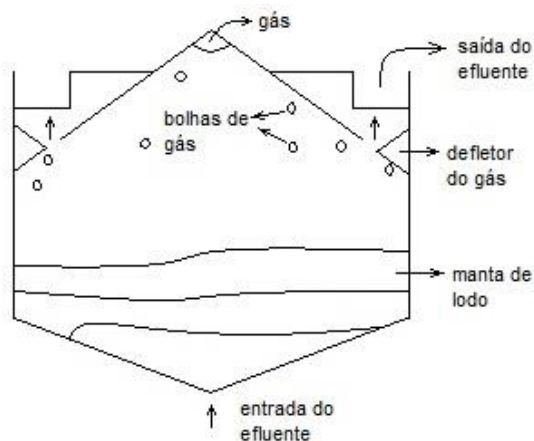


Figura 8. Representação de um reator UASB com vista de sua seção transversal. Fonte: adaptado de Chernicharo (2007).

No reator UASB o efluente entra pela base a uma baixa velocidade de fluxo, suficiente para a matéria em suspensão decantar e depositar-se ao fundo, fazendo com que o efluente saia pelas laterais superiores livre de quase todo material suspenso, ao passo que o material depositado no fundo tende a se acumular, onde a atividade microbiológica anaeróbia tende a agir. O biogás é conduzido a um tubo de saída no topo do reator com o auxílio de defletores laterais que impedem o escape do biogás pela saída do efluente.

### 3.4.2 O Biogás

O biogás é composto por um conjunto de gases que variam em suas respectivas quantidades (Tabela 5) além de possuir um considerável potencial energético comparado a outros tipos de combustíveis (Tabela 6).

Tabela 5. Composição do biogás

Gás	% em Volume
CH <sub>4</sub>	55 - 75
CO <sub>2</sub>	25 - 45
N <sub>2</sub>	0 - 3
H <sub>2</sub>	0 - 2
O <sub>2</sub>	0 - 0,1
H <sub>2</sub> S	0 - 1

Fonte: adaptado de Nogueira (1986).

Tabela 6. Equivalência energética para 1m<sup>3</sup> de biogás

Combustível	Quantidade
Carvão vegetal	0,80 kg
Lenha	3,50 kg
Óleo diesel	0,55 L
Gasolina	0,61 L
Querosene	0,62 L

Fonte: adaptado de Nogueira (1986).

Ribeiro (2015) cita diferentes maneiras de uso do biogás: queima no próprio local, produção de energia elétrica para consumo nas próprias instalações ou venda à rede de distribuição, purificado e injetado na rede de gás natural ou utilizado como combustível em veículos de maneira a substituir o gás natural veicular (GNV). Santos et al. (2018) calcularam que o potencial de produção de biogás no Brasil seria suficiente para abastecer uma frota de pelo menos 180.000 ônibus nos centros urbanos brasileiro. Os autores (*op. cit.*) também calcularam que esse potencial corresponde a uma potência instalada de 4,5 a 6,9 GW.

### 3.4.3. Tratamento da ARC para produção de biogás

Selvamurugan et al. (2010), trataram ARC em um Reator Híbrido Anaeróbico de Fluxo Ascendente (UAHR, em inglês) com diferentes tempos de retenção hidráulica (TRH). O melhor TRH foi 18h, alcançando uma produção de 1,335 L.dia<sup>-1</sup> de biogás com um conteúdo de 60,7% de CH<sub>4</sub>, que corresponde a 430 L, 775 L e 840 L de biogás por kg de DQO, DBO<sub>5</sub> e ST removidos, respectivamente. Com TRH de 24 h, a remoção de DBO<sub>5</sub>, DQO e ST foram de 71%, 70%, e 64%. Novita (2016) simulou a produção de biogás a partir de ARC sintética, elaborada com a mistura de café instantâneo baseando-se na DQO do substrato desejado e utilizando lodo de esgoto granular e flocular como inóculo. Embora não tenha medido o volume de biogás, chegou a encontrar um teor médio de 57,01% de CH<sub>4</sub> na sua amostra com 20 g.L<sup>-1</sup> de DQO com inóculo em 40% de volume (20% lodo de esgoto granular e 20% flocular), e 27,38% de CH<sub>4</sub> com inóculo em 30% de volume (apenas lodo granular), sem e com neutralização do pH respectivamente. Beyene et al. (2014) ao analisarem o tratamento da ARC em um Reator de Batelada Anaeróbico (ABR), após 70 dias de biodigestão, obteve mais de 90% de redução da carga orgânica (DBO<sub>5</sub>, DQO, sólidos suspensos totais e voláteis e sólidos dissolvidos totais) e 82% de remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo total). Os autores (*op. cit.*) obtiveram uma

estimativa teórica de 46 kW e 116 kW de potência após 10 e 50 dias de TRH, considerando uma taxa de produção diária de 147 m<sup>3</sup> de ARC, resultando na produção teórica de 18,78 - 25,23 kg.dia<sup>-1</sup> de biofertilizante. Puebla et al. (2014), por meio de um reator UASB, adotando diferentes TRH, controlando o pH com bicarbonato de sódio e temperatura regulada a 37°C, obtiveram uma redução de 77,2% da DQO, produção de biogás na faixa de 186-346 L.kgDQO<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e teor de 61% de CH<sub>4</sub>. Prado e Campos (2008) avaliaram o tratamento da ARC no sistema que compreendia um Tanque de Acidificação e Equalização (TAE), com controle de valores ácidos de pH com solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) 10%, um reator UASB e uma Lagoa Aerada Facultativa (LAF), denominado TAE-UASB-LAF, encontraram uma produção de biogás teórica de 580 L.kgDBO<sub>5</sub><sup>-1</sup> e uma composição média de 57,10% de CH<sub>4</sub>, com valores máximos de remoção: 98%, 98%, 77%, 35%, 89% e 60% de DQO, DBO<sub>5</sub>, ST, SF, SV, e NT, respectivamente. Corro et al. (2013), tendo como objetivo principal a codigestão da polpa de café com esterco de vaca, verificaram a produção de biogás somente da polpa de café em uma proporção 80% polpa e 20% água em massa, 0,5 L de volume de substrato, durante 8 meses. A porcentagem máxima de CH<sub>4</sub> na composição do biogás oscilou nos arredores de 20% a partir do quarto mês de experimento. Vale ressaltar que os autores não acrescentaram inóculo e não houve controle de pH. A Tabela 7 sintetiza alguns resultados de composição e produção relativa de biogás obtidos por diferentes autores.

Tabela 7. Resultados de produção de biogás com ARC de diferentes autores

Teor de CH <sub>4</sub>	L <sub>biogás</sub> .kgDQO <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> .kgDBO <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> .kgSV <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgDQO <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgDBO <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgSV <sup>-1</sup>	Autores
60,70%	430,00	775,00	840,00	258,86	466,55	505,68	(1)
57,19%	-	580,00	-	-	330,00	-	(2)
58,50%	266	-	-	-	-	-	(3)
57,01%	-	-	-	-	-	-	(4a)
27,38%	-	-	-	-	-	-	(4b)

(1) Selvamurugan et al. (2010); (2) Prado e Campos (2006); (3) Puebla et al. (2013); (4) Novita (2016) a) 1° frasco e b) 2° frasco

A maioria dos resultados obtidos aproximaram-se dos 60% de CH<sub>4</sub> exceto Novita (2016) em seu 2° frasco experimental. O autor (*op. cit.*) explica que este baixo teor de CH<sub>4</sub> se deve, provavelmente, às altas concentrações de CO<sub>2</sub> e ácidos graxos voláteis.



### 3.5 Motores para conversão energética do biogás

Bove e Lunghi (2006) avaliaram uma série de tecnologias voltadas para a produção de energia elétrica a partir de biogás de aterros, geralmente com menor percentual de CH<sub>4</sub> (50%) que biodigestores rurais (70%). Segundo os autores (*op.cit.*), no contexto do biogás de aterros sanitários, os dois motores mais utilizados são:

- Motor de combustão interna a pistão (MCI): apresenta uma boa proporção entre a produção de energia e boa economia devido aos menores custos de implantação. Sua eficiência gira em torno de 33%. É viável economicamente quando a potência instalada se situa na faixa 1 - 3 MW. O MCI é compacto e pode ser facilmente transportado. Sua principal desvantagem concerne à alta produção de monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), considerados poluentes.
- Turbina a gás (GT): apresenta cerca de 28% de eficiência energética. Sua principal vantagem é a baixa emissão de poluentes, o que reduz o custo do tratamento dos gases produzidos na combustão.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo apresentou uma sequência de execuções. Foram feitas análises físico-químicas da ARC, avaliados a produção de biogás e, por fim, realizada uma análise teórica de produção de CH<sub>4</sub> e seu potencial energético assim como uma análise de viabilidade econômica, resumidas na Figura 9.

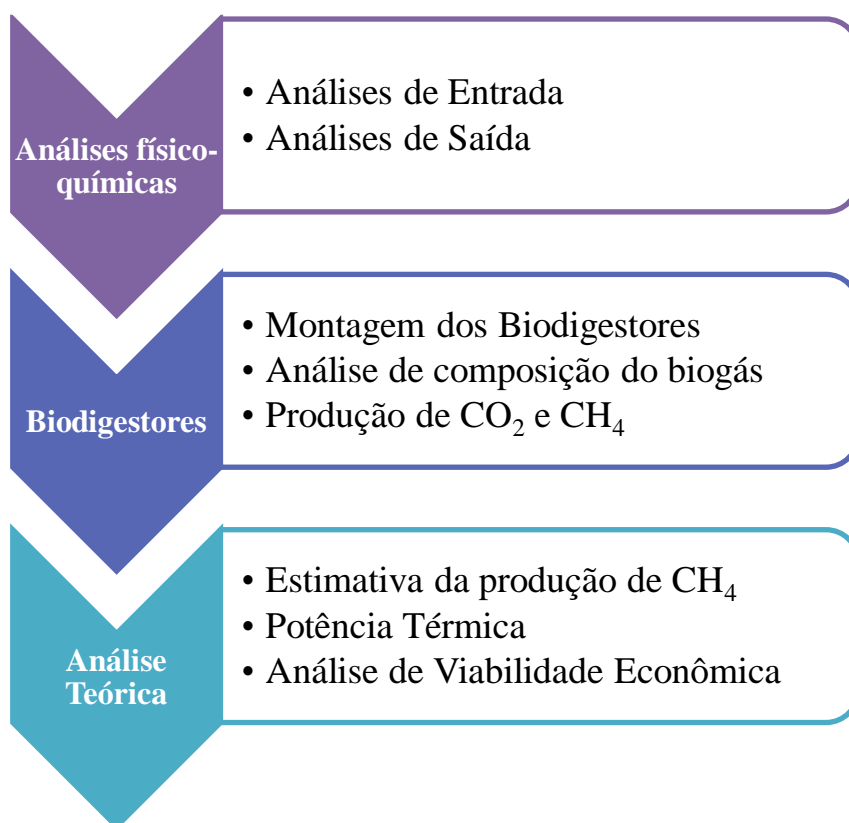


Figura 9. Síntese das etapas realizadas no presente estudo.

### 4.1 Coleta da ARC e descrição da Fazenda

As amostras de ARC foram coletadas em uma fazenda com cerca de 100,30 ha, localizada no município de Soledade de Minas - MG, latitude 22° 03' 36"S, longitude 45°02'42"O e altitude de 938m no pátio de secagem dos grãos. O mapa da propriedade está ilustrado na Figura 10.



Figura 10. Localização da fazenda do estudo de caso. Fonte: acervo do autor.

A recirculação da ARC ocorre em um conjunto de quatro caixas d'água de 2,5 m<sup>3</sup> cada (10 m<sup>3</sup> no total), conforme a Figura 11. Em um primeiro tanque, a ARC é despejada, onde a matéria em suspensão é decantada. Na parte superior, uma conexão por cinco tubos a um segundo tanque recebe a ARC com menor quantidade de material particulado, sendo assim sucessivamente até um quarto tanque. A partir deste último o efluente é reinjetado no processamento com a finalidade de se economizar água. São utilizados 12 m<sup>3</sup> de água<sup>(1)</sup> durante um período de 4h diárias tendo em vista o descarte de ARC e a adição de água para diluição da água de recirculação. Com este volume de água, são processados cerca de 14.000 L de grãos de café, o que gera uma taxa diária de 0,86 L de ARC para 1,00 L de café em grão ( $0,86 \text{ L}_{ARC} \cdot \text{L}^{-1}_{\text{café\_grão}}$ ).



Figura 11. Caixas d'água de recirculação da ARC. Fonte: acervo do autor.

<sup>(1)</sup> Informação fornecida pelo proprietário da fazenda.

A seguir, seguem algumas ilustrações do processamento onde são separados os grãos boia (Figura 12), a prensa pela qual os grãos cereja passam e são descascados (Figura 13), a deposição dos grãos cereja logo após passarem pela prensa (Figura 14) e o descarte final da ARC (Figura 15) em um local escavado em terra para conter o efluente produzido (Figura 16).



Figura 12. Grãos boia separados por densidade. Fonte: acervo do autor.



Figura 13. Prensa de separação dos grãos cereja dos imaturos. Fonte: acervo do autor.



Figura 14. Coleta dos grãos cereja após passar pela prensa de separação. Fonte: acervo do autor.



Figura 15. ARC sendo descartada. Fonte: acervo do autor.



Figura 16. Depósito de ARC na fazenda. Fonte: acervo do autor.

As amostras foram coletadas em três datas. A primeira no dia 27/05/2016, usada para fazer as análises físico-químicas, a segunda no dia 15/06/2016, usada como substrato nos biodigestores experimentais (Primeiro Experimento); a terceira no dia 12/06/2017, usada como substrato no Segundo Experimento. Nesta última, tanto os parâmetros físico-químicos quanto a aplicação nos novos biodigestores foram realizados. Após coletadas, as amostras foram levadas ao Laboratório de Resíduos Sólidos, Hidrogeologia e Qualidade da Água - LABRES/UNIFEI, armazenadas em uma geladeira (primeira coleta) a 4°C e em um congelador (segunda e terceira coleta) a -5°C.

## **4.2 Análises físico-químicas da ARC**

As seguintes análises foram realizadas segundo o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012): demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), método 5210 B (incubadora a 20°C durante 5 dias); demanda química de oxigênio (DQO), método 5220 D (digestão por refluxo fechado e leitura por espectrofotometria); sólidos totais (ST), método 2540 B (estufa a 103°C -105°C); sólidos totais fixos (SF) e voláteis (SV), método 2540 E (mufla a 550°C); pH, método 4500-H<sup>+</sup>-B (potenciométrico); Nitrogênio Total (NT), método 4500-N<sub>org</sub>-C (método Kjeldahl); e Carbono Orgânico Total (COT), método 5310 B (combustão à alta temperatura). Todos os experimentos foram realizados no LABRES/UNIFEI, com exceção do COT, que foi realizado no Laboratório de COT do Centro de Estudos em Qualidade Ambiental (CEQUAM/UNIFEI). Essas análises foram realizadas em duas etapas: a primeira do substrato antes de ser biodigerido (análises de entrada) e a segunda do substrato após ser biodigerido (análises de saída). O COT foi realizado apenas nas análises de entrada do primeiro experimento, pois o aparelho encontrou-se danificado antes que fosse possível fazer as análises posteriores.

## **4.3 Montagem dos Biodigestores**

Os biodigestores seguiram o modelo proposto por Ribeiro (2015) (Figura 17). Este consiste no uso de garrafas de Politereftalato de Etileno (PET) e substrato colocado em batelada para o tratamento anaeróbio, assim como Beyene et al. (2014) avaliaram a produção de biogás a partir de ARC. A temperatura foi controlada a 37 ± 2°C conforme alguns autores citam ser temperaturas entre 35-40°C a melhor faixa de temperatura mesofílica na biodigestão anaeróbia (FEZZANI e CHEIKH, 2010; OBIUKWU e

GREMA, 2014; ZHAO, 2011). De duas a três vezes ao dia os biodigestores foram agitados manualmente a fim de homogeneizar o substrato e estimular a atividade microbiana do meio.

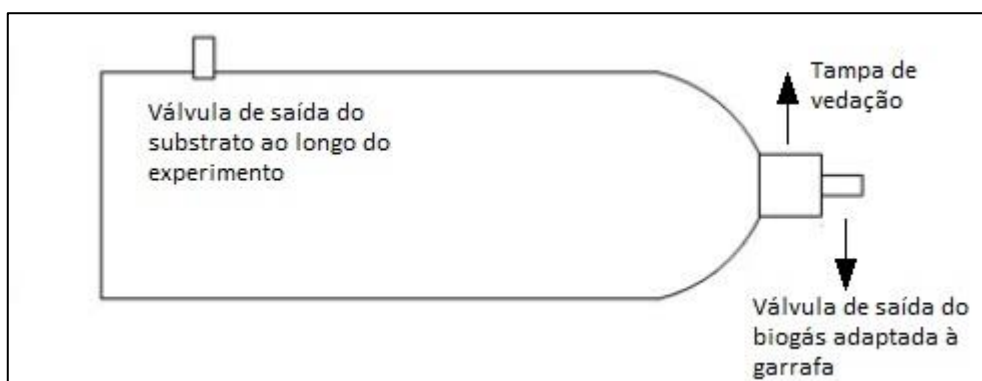


Figura 17. Biodigestor de garrafa PET. Fonte: adaptado de Ribeiro (2015).

Cada biodigestor é composto de um bico de bicicleta tipo *Schrader* anexado à tampa da garrafa, uma mangueira de gás 5/16" ligada ao bico, uma válvula de gás na outra extremidade da mangueira, braçadeiras para fixar a mangueira à válvula e ao bico. Em um recipiente de 50L, foi adicionado água para banho dos biodigestores com temperatura controlada por um termostato *Tiwa 20/120°C 30A* modelo *Robertshaw®* com uma resistência em "U" de 500W de potência. Utilizando um termômetro de mercúrio graduado de -1°C a 43°C, foi possível verificar a temperatura de controle no termostato. Não foram colocadas as válvulas de saída do substrato, pois as análises físico-químicas foram realizadas apenas antes da partida e após a retirada do substrato dos biodigestores.

No Anexo I constam todos os materiais utilizados na confecção dos biodigestores e do sistema térmico.

#### 4.3.1 Composição do Biogás

A composição do biogás foi medida pelo aparelho *Geotech®*, modelo *GEM5000*, Monitor de Extração de Gás (*Gas Extration Monitor*) (Figura 18), fornecendo os valores de porcentagem em volume de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, gás oxigênio (O<sub>2</sub>) e Balanço (Bal); em partes por milhão (ppm) de CO e H<sub>2</sub>S. O Bal refere-se a outros gases que completam a composição do biogás, sendo a maior parte gás nitrogênio (N<sub>2</sub>).



Figura 18. Aparelho *Geotech*®, aferidor da composição do biogás. Fonte: acervo do autor.

Como mencionado anteriormente, houve uma repetição do experimento com os biodigestores, sendo o primeiro realizado com a ARC colhida durante a colheita de café do ano 2016 e o segundo realizado com a ARC do ano 2017. Mais detalhes sobre tais experimentos estão descritos a seguir.

#### 4.3.2. Primeiro Experimento

Foram utilizadas quatro garrafas denominadas A1, A2, A3 e A4 (Figuras 19 e 20) com volume de 3,15 L, 3,5 L, 2,25 L e 1,75 L (volumes comerciais de 3,0 L, 3,3 L, 2,0 L e 1,5 L respectivamente). A Tabela 7 sintetiza as informações referentes aos biodigestores, incluindo o gasômetro interno, que consiste no espaço interior da garrafa não preenchido pela amostra e a ser ocupado pelo biogás produzido, além da data em que os substratos foram inseridos. A composição do biogás destes biodigestores foi aferida conectando-se o tubo de sucção do aparelho *Geotech*® diretamente à válvula superior do biodigestor logo após aferir a pressão do gasômetro interno.

Tabela 8. Dados de volume referente aos biodigestores

Garrafa (Biodigestor)	Data de partida	Vol. da garrafa (L)	Vol. ARC (L)	Vol. Inóculo (L)	Vol. Substrato Total (L)	Vol. Gasômetro interno (L)
A1*	20/10/2016	3,15	2,45	0,05	2,50	0,75
A2	23/01/2017	3,50	2,40	0,10	2,50	1,10
A3	23/01/2017	2,25	1,65	0,10	1,75	0,60
A4	20/02/2017	1,75	1,20	0	1,20	0,55

Adição de inóculo em TRH = 98 dias

O biodigestor A4 não recebeu inóculo. Os biodigestores A2 e A3, em seus pontos de partida, receberam uma pequena quantidade de inóculo de lodo de esgoto do reator UASB



da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Santa Rita do Sapucaí - MG. O biodigestor A1 teve seu ponto de partida com ARC pura e adição de lodo ativado após 98 dias.

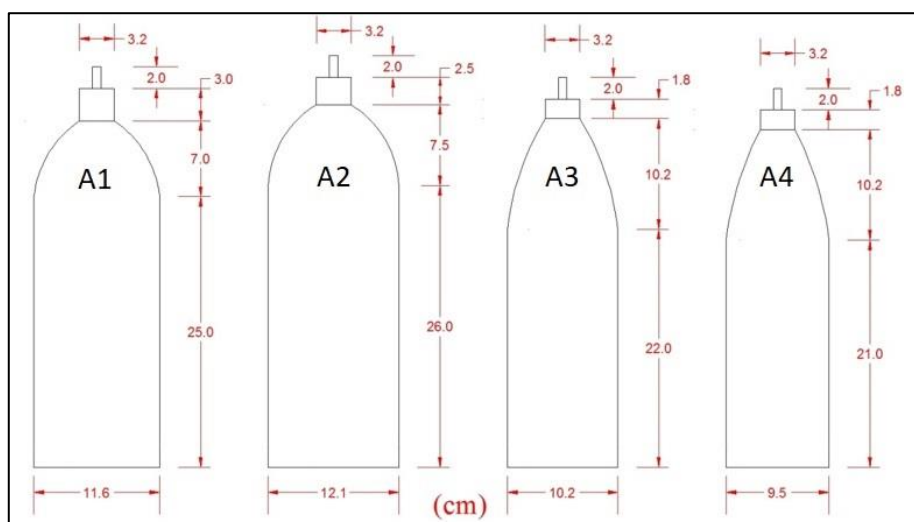


Figura 19. Representação esquemática dos biodigestores.



Figura 20. Biodigestores A1, A2, A3 e A4 (a) e vista superior dos biodigestores no sistema (b).

#### 4.3.2.1 Estimativa do biogás do Primeiro Experimento

As medidas de pressão foram aferidas com dois diferentes manômetros (Figura 21). Um manômetro analógico, quando as pressões dos gasômetros internos eram nitidamente altas, de acordo com a rigidez das garrafas; um manômetro em "U", que consiste em um papel milimetrado sobre uma prancheta com fita métrica em suas laterais e uma mangueira cristal de silicone 5/16" em "U" fixada por braçadeiras. Neste último, a pressão foi medida pela diferença de coluna d'água, quando as pressões dos gasômetros internos eram nitidamente baixas, de acordo com a rigidez das garrafas. Maiores detalhes dos manômetros estão contidos no Anexo II.

Sabendo-se a pressão interna do biogás e sua composição, foi possível estimar a produção de biogás, sobretudo de CH<sub>4</sub>, que é o gás de principal interesse do presente estudo.

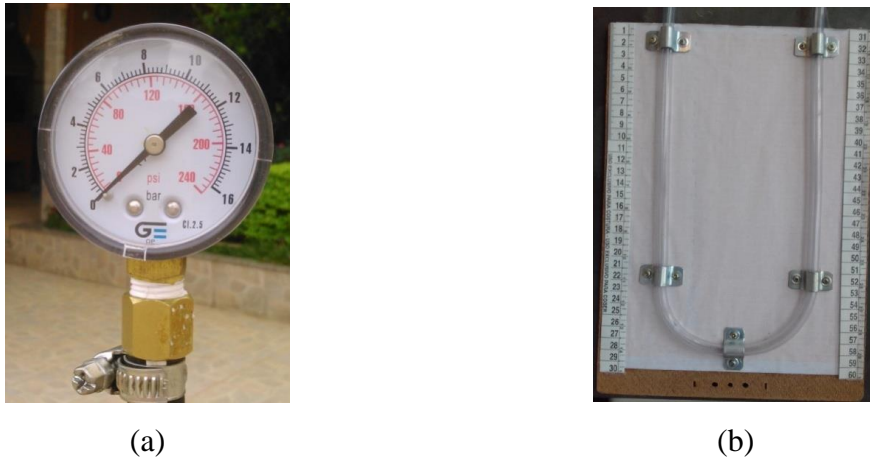


Figura 21. Manômetro vertical (a) e manômetro em "U" (b). Fonte: acervo do autor.

Utilizando-se a fórmula barométrica de Edmund Halley (1686) (equação 1), a pressão local foi calculada.

$$P_{local} = P_{CNTP} \cdot e^{\frac{-M_{ar} \cdot g \cdot z}{R \cdot T}} \quad (1)$$

Onde:

$P_{local}$ : pressão nas condições locais [Pa];

$P_{CNTP}$ : pressão atmosférica nas CNTP [101.325 Pa];

$M_{ar}$ : massa molar média do ar [0,0289 kg.mol<sup>-1</sup>];

$g$ : aceleração da gravidade [9,80665 m.s<sup>-2</sup>];

$z$ : altitude local [m];

$R$ : constante universal dos gases [8,314413 J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>]

$T$ : temperatura local [K]

A conversão de [°C] para [K] foi feita conforme a seguinte equação:

$$T = T_{°C} + 273,15 \quad (2)$$

Onde:

$T$ : temperatura [K];

$T_{°C}$ : temperatura [°C].

As temperaturas adotadas para os cálculos, relativas a cada dia de aferição, foram as temperaturas médias locais referentes à estação meteorológica da UNIFEI, situada a 22° 24' 49" S, 45°27'7" O, 848,86 m de altitude, coletadas no Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG). A pressão absoluta local, necessária para o cálculo do volume de biogás produzido nas CNTP, foi calculada pela equação 3. A pressão interna do biodigestor, inicialmente a 37°C, foi primeiramente corrigida para a pressão correspondente à temperatura ambiente analogamente à equação 4, do gás ideal de Charles, Boyle e Gay-Lussac.

$$P_{biogás} = P_{biod} + P_{local} \quad (3)$$

Onde:

$P_1$ : pressão absoluta do gasômetro [Pa];

$P_{biod}$ : pressão interna do biodigestor [Pa].

Logo, com a equação 4, obteve-se o volume do biogás correspondente às CNTP.

$$V_{CNTP} = \frac{P_{biogás} \cdot V_{biogás} \cdot T_{CNTP}}{T \cdot P_{CNTP}} \quad (4)$$

Onde:

$V_{CNTP}$ : volume de biogás nas CNTP [L];

$V_{biogás}$ : Volume do biogás contido no gasômetro interno do biodigestor [L];

$P_{biogás}$ : pressão absoluta do biogás nas condições locais [Pa];

$P_{CNTP}$ : pressão nas CNTP [101.325 Pa];

$T_1$ : temperatura do biogás [K];

$T_{CNTP}$ : temperatura nas CNTP [273,15 K].

Os volumes de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> produzidos nas CNTP correspondeu ao produto do percentual obtido nas respectivas medições com o volume de biogás produzido, conforme a equação 5.

$$V_{i(Y)} = V_{CNTP} \cdot \%Y_i \quad (5)$$

Onde:

$V_{i(Y)}$ : volume de Y aferido na medição  $i$ ;

Y: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>;

% Y <sub>$i$</sub> : percentual de Y aferido na medição  $i$ .

### 4.3.3 Segundo Experimento

Esta etapa da pesquisa foi realizada com intuito de aprimorar a produção de biogás e padronizar o experimento. Desta vez foram utilizadas quatro garrafas PETs retornáveis (com espessura mais grossa e rígida que as convencionais) com volume total de 2,25 L (volume comercial de 2 L, igual A3) denominadas B1, B2, B3 e B4, todas preenchidas com 1,5 L de substrato. Os biodigestores B1 e B2 foram preenchidos apenas com ARC bruta enquanto os biodigestores B3 e B4 foram preenchidos com uma mistura, em volume, 90% de ARC e 10% de lodo anaeróbio, proveniente da ETE de Itajubá. O lodo de ETE foi usado para servir de inóculo no processo biodigestivo, o qual deve estar na faixa de 10-30% de volume do substrato (SPEECE, 2008). O pH das amostras, de característica ácida, foram neutralizados com NaOH em 50% de solução aquosa na faixa 6-8, que é a ideal para a produção de biogás (NOGUEIRA, 1986). A Tabela 9 sintetiza as informações sobre os biodigestores.

Tabela 9. Síntese dos biodigestores do segundo experimento

Data de partida	Biodigestor	Vol. Biodigestores (L)	Vol. ARC (L)	Vol. Inóculo (L)	Vol. Substrato Total (L)	Data de Saída
19/09/2017	B1	2,25	1,50	0	1,50	10/11/2017
	B2		1,50	0	1,50	
	B3		1,35	0,15	1,50	
	B4		1,35	0,15	1,50	

Diferentemente do primeiro experimento, cada garrafa foi conectada a um gasômetro, elaborado com tubos de Policloreto de Vinila (PVC) com diâmetros comerciais de 50 mm, comprimento de 1,0 m e todos mergulhados em água dentro de um tubo PVC 150 mm, com uma tampa em sua base. O gasômetro foi feito de acordo com o modelo proposto por Fantozzi e Buratti (2009) e adaptado por Ribeiro (2015) conforme a Figura 22. Na parte superior de cada gasômetro haviam dois bicos de bicicleta tipo *Schrader*, um para a entrada de biogás, sem válvula e outro com válvula, por onde as aferições de composição do biogás foram feitas. Os materiais que constituem o gasômetro constam no Anexo III.

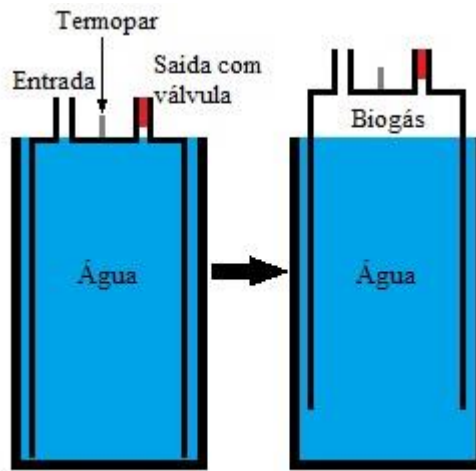


Figura 22. Modelo de gasômetro. Fonte: adaptado de Fantozzi e Buratti (2009) e Ribeiro (2015).

Foram usados tubos de silicone de diâmetro 5/16” e comprimento de 1,5 m para conectar os gasômetros às válvulas de controle de saída de biogás dos biodigestores. A Figura 23 ilustra os biodigestores conectados aos seus respectivos gasômetros. Porém, não foram anexados termopares aos gasômetros, considerando-se assim a temperatura do biogás presente no gasômetro como a temperatura média do dia em que foram feitas as aferições.

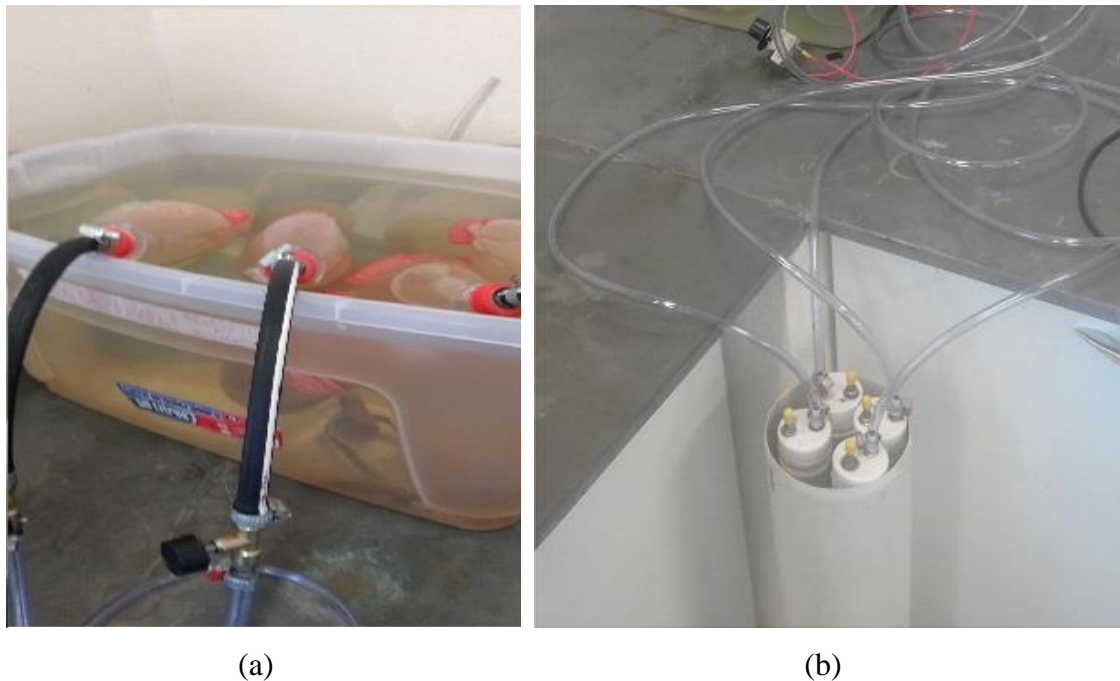


Figura 23. Biodigestores (a) e conexão dos biodigestores aos gasômetros (b).

A pressão interna do biodigestor e a composição do biogás foram aferidas com o aparelho *Geotech*® anexado a uma mangueira para bomba de encher pneu, que permitiu a abertura da válvula do bico de câmara de ar de bicicleta para sucção do biogás no interior do gasômetro.

#### 4.3.3.1 Estimativa do biogás do Segundo Experimento

O volume de biogás produzido nas condições locais foi calculado de acordo com a altura do gasômetro, ou seja, o volume do cilindro que se obteve com a ascensão do gasômetro, conforme a equação 6. A altura do gasômetro foi medida com uma fita métrica graduada de 0 a 150 cm.

$$V_{\text{biogás}} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (6)$$

Onde:

$V_{\text{biogás}}$ : volume de biogás nas condições locais [cm<sup>3</sup>];

$r$ : raio da circunferência do tubo PVC (seção transversal) [cm];

$h$ : altura do gasômetro medida com a fita métrica [cm].

O volume nas CNTP foi calculado conforme a equação 4, mencionada anteriormente, onde as diferenças foram a temperatura do biogás e  $P_{\text{biogás}}$ . Desta vez  $P_{\text{biogás}}$  foi a pressão absoluta no interior do gasômetro, obtida com soma da pressão medida pelo aparelho *Geotech*® com a pressão local, esta última calculada pela equação 1. As temperaturas adotadas para os cálculos foram, novamente, as temperaturas médias locais referentes à estação meteorológica da UNIFEI. Os volumes de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> foram calculados novamente pela equação 5.

#### 4.4 Produção relativa de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e biogás

O volume acumulado de biogás foi considerado como a soma do volume acumulado de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, pois o gás atmosférico presente nos gasômetros de ambos experimentos (N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) são contabilizados na sua composição, o que ocasionaria uma superestimação do biogás produzido. Além disso, o CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> estão presentes em quantidades bem mais expressivas que CO e H<sub>2</sub>S. Portanto, pela equação 7 e 8 calculou-se o volume total e acumulado de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> respectivamente.

$$V_{i(Y)} = V_{\text{CNTP}} \cdot \%Y_i \quad (7)$$

$$V_{T(Y)} = \sum_{i=1}^n V_{i(Y)} \quad (8)$$

Onde:

$V_{i(Y)}$ : volume de Y do biodigestor na medição i;  
Y: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>;  
% Y<sub>i</sub>: percentual de Y aferido na medição i.

A produção relativa de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e biogás, calculadas pela equação 9 e 10, referem-se ao volume de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e biogás produzidos em função da atividade microbológica do meio, decorrente da redução de SV, que se trata da matéria orgânica mais facilmente assimilável aos microorganismos presentes no substrato.

$$V_{Y:SV} = \frac{V_{T(Y)}}{(SV_{entrada} - SV_{saída}) \cdot V_{substrato}} \quad (9)$$

$$V_{biogás:SV} = V_{CO_2:SV} + V_{CH_4:SV} \quad (10)$$

Onde:

$V_{Y:SV}$ : volume de Y por massa de SV removida [ $L_Y \cdot kgSV_{removido}$ ];  
 $V_{biogás:SV}$ : volume de biogás por massa de SV removida [ $L_{biogás} \cdot kgSV_{removido}$ ];  
Y: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>;  
 $V_{T(Y)}$ : volume total acumulado de Y;  
 $X_{entrada}$ : parâmetros de DQO, DBO<sub>5</sub> e SV de entrada;  
 $X_{saída}$ : parâmetros de DQO, DBO<sub>5</sub> e SV de saída;  
 $V_{substrato}$ : volume de substrato no biodigestor.

## 4.5 Potencial de Produção de Metano

O Potencial de Produção de Metano (BMP, *Biomethane Potential*) refere-se ao potencial teórico de produção de biogás oriundo da degradação anaeróbia da matéria orgânica, conforme suas características físico-químicas. Segundo Chernicharo (2007), a produção de CH<sub>4</sub> em função da remoção da DQO pode ser estimada de acordo com a equação a seguir.



Pela equação 11, nota-se que 16g de CH<sub>4</sub> removem 64g de DQO. Tal relação em volume representa 0,35 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por cada kg de DQO degradada nas CNTP, segundo o princípio de Avogrado para volume de gás ideal (22,4 L.mol<sup>-1</sup>). Sendo assim, para um efluente que apresenta determinada carga orgânica, a produção de CH<sub>4</sub> pode ser estimada pela remoção da DQO do efluente. Logo, a produção de CH<sub>4</sub> pode ser estimada de acordo com a equação 12, conforme Chernicharo (2007), adaptado.

$$BMP = Q_{ef} \cdot (CT_{DQO} - CT_{biom}) \cdot V_{CH_4_{DQO}} \quad (12)$$

Onde:

Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>: produção diária de CH<sub>4</sub> [m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>];

Q<sub>ef</sub>: vazão do efluente líquido a ser degradado [m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup>];

CT<sub>DQO</sub>: carga de DQO convertida em CH<sub>4</sub> [kgDQO.m<sup>-3</sup>];

CT<sub>biom</sub>: carga de DQO convertida em biomassa microbiana, [kgDQO.m<sup>-3</sup>] (18% da CT<sub>DQO</sub>);

V<sub>CH<sub>4</sub>\_DQO</sub>: volume de CH<sub>4</sub> produzido por massa de DQO removida [0,35 m<sup>3</sup>.kgDQO<sup>-1</sup>].

São usados 12 m<sup>3</sup> de água<sup>(2)</sup> no processamento do café. De acordo com o Centro de Tecnologias do Gás (CTGÁS, s.d.), são necessários 40 m<sup>3</sup> de gás natural para torrar 1t de café. O gás natural (GN) é composto por 88% de CH<sub>4</sub> (Machado et al., 2007). A partir do poder calorífico (PC) de CH<sub>4</sub> (35.530 kJ.m<sup>-3</sup> (CETESB, 2006)) e do GN (38.346 kJ.m<sup>-3</sup> (Eletrobrás, 2005)), obteve-se a relação HV<sub>GN</sub>: HV<sub>CH<sub>4</sub></sub> (1,08). Esta foi usada como fator proporcional para estimar a taxa de CH<sub>4</sub> necessária para torrar os grãos de café (43,17 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.t<sup>-1</sup><sub>café\_torrado</sub>). A ARC é produzido durante 14 semanas<sup>(3)</sup> de segunda a sexta-feira, 70 dias no total, em um total de 52 semanas por ano. Na fazenda são utilizados botijões de gás liquefeito de petróleo (GLP) P45 (45 kg). Cada botijão é suficiente para torrar 1.270 kg de café<sup>(4)</sup>. Portanto, a quantidade total de café a ser torrada e o número de cilindros a serem substituídos foram calculados pelas equações 13 e 14, respectivamente.

$$M_{café_torrado} = \frac{BMP}{TX_{torra}} \cdot N_{dias} \quad (13)$$

$$N_{P45} = \frac{M_{café_torrado}}{M_{café_botijão}} \quad (14)$$

<sup>(2)</sup> Informação fornecida pelo proprietário da fazenda

<sup>(3)</sup> Informação fornecida pelo proprietário da fazenda

<sup>(4)</sup> Informação fornecida pelo proprietário da fazenda.



Onde:

$M_{\text{café\_torrado}}$ : massa de café a ser torrada durante o ano [t];

$N_{\text{dias}}$ : número de dias em que a ARC é produzida [70 dias];

$TX_{\text{torra}}$ : taxa de  $\text{CH}_4$  necessário para a torra de café [ $43,17 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}_{\text{café}}$ ];

$N_{\text{P45}}$ : número de botijões P45 a serem substituídos;

$M_{\text{café\_botijão}}$ : massa de café torrada por um botijão na fazenda [ $1,27 \text{ t}_{\text{café}} \cdot \text{botijão}^{-1}$ ].

Aproximou-se o número de botijões para o menor número inteiro calculado, desconsiderando-se as casas decimais, pois este é o número efetivo de botijões que podem ser substituídos pelo BMP. O gasômetro, responsável pelo armazenamento do biogás, foi concebido pela equação 15. Esta considera a produção teórica, teor de 90% de  $\text{CH}_4$  no biometano conforme a Resolução ANP 685/2017, o número de dias de produção de ARC e o fator de multiplicação relativo ao inverso da fração anual de produção de biogás.

$$V_g = \frac{BMP}{\%CH_4} \cdot F \quad (15)$$

Onde:

$V_g$ : volume recomendado para o gasômetro [ $\text{m}^3$ ];

$\%CH_4$ : teor de  $\text{CH}_4$  no biogás exigido pela Resolução ANP 685/2017 [90%];

F: número de semanas no ano pelo número de semanas em que a ARC é produzida [52/14].

A 938 m de altitude e temperatura média mensal mais fria do ano  $15,7^\circ\text{C}$ , segundo o *CLIMATE-DATA.ORG*, a pressão referente ao local da fazenda do estudo de caso foi estimada conforme a equação 1 e o volume com relação às CNTP conforme a equação 4. Tal temperatura considerada na equação 1 justifica-se pelo fato de o dimensionamento de biodigestores rurais adotar as temperaturas médias de inverno (NOGUEIRA, 1986). Outrossim, a ARC é produzida nos meses mais frios do ano na região de estudo (maio, junho e julho).

#### **4.5.1 Estimativa da potência térmica gerada de acordo com o BMP**

A potência a ser gerada tomando-se por base o BMP a partir da DQO foi calculada conforme a equação 16, adaptada de CETESB (2006). A energia liberada com a combustão do  $\text{CH}_4$  não foi considerada para conversão em energia elétrica, que se

limitaria ao rendimento do motor a ser utilizado, sendo que no mercado os motores mais comuns não ultrapassam o rendimento de 40% (BOVE e LUNGHI, 2006).

$$P_{ot} = \frac{BMP \cdot PC_{CH_4}}{t_{proc}} \cdot E_c \cdot \eta_c \frac{k}{1000} \quad (16)$$

Onde:

$P_{ot}$ : potência disponível por dia [kW];

$PC_{CH_4}$ : Poder Calorífico do  $CH_4$   $35,53 \cdot 10^6$  [J.m<sup>-3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>];

$E_c$ : eficiência de coleta do biogás [%];

$\eta_c$ : eficiência da conversão em calor na combustão do  $CH_4$  [%];

k: 1,00 [adimensional];

$t_{consumo}$ : período de consumo diário [s].

Segundo Meneses-Jácome et al. (2016) quando os vazamentos são rigorosamente controlados, estes chegam a 1%, e a eficiência de coleta do biogás em biodigestores é elevada. Assim, considerou-se 99% de eficiência de coleta. Não obstante, quando refere-se a tratamento anaeróbio de efluentes, pode haver perda pelo  $CH_4$  dissolvido no próprio líquido, porém minimizado quanto maior TRH e temperatura do reator (GIMÉNEZ et al., 2012). Foi considerado uma eficiência de 88% de conversão energética do  $CH_4$  em calor (Eletrobrás, 2005). O período de consumo diário foi de 8h, referente à jornada de trabalho na fazenda.

#### 4.5.2 Análise de Viabilidade Econômica

Foram elaborados três cenários de análise de viabilidade econômica considerando os BMP's calculados:

- Cenário I: BMP referente à média das DQO's do Primeiro e Segundo Experimento da ARC sem inóculo;
- Cenário II: BMP referente à DQO do Segundo Experimento da ARC sem inóculo;
- Cenário III: BMP referente à DQO do Segundo Experimento da ARC com inóculo;

Não se adotou a DQO do Primeiro Experimento pois esta foi consideravelmente elevada comparada às do Segundo, o que poderia levar a superestimar a quantidade de biogás a

ser produzida. Com estas produções foi possível fazer o orçamento dos equipamentos necessários para aproveitamento do biogás eliminando suas impurezas de H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, conforme exigido pela Resolução ANP n° 685/2017 para o controle de qualidade do biometano, sendo utilizado para a torrefação de café. O custo dos equipamentos para aproveitamento do biogás foi elaborado conforme CETESB (2006) e adaptado por Barros et al. (2014), com reajuste para dezembro de 2017 calculado pelo Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M) para o consumidor, criado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), usando-se a calculadora do Banco Central. Foi adotado o Valor Presente Líquido (VPL) para analisar a viabilidade conforme a equação 17 e ilustrado na Figura 24. O teor de CH<sub>4</sub> considerado foi de 60% para os cálculos de custo de tratamento do biogás, conforme as estimativas encontradas por diferentes autores (NOVITA, 2016; PRADO e CAMPOS, 2008; PUEBLA et al., 2014; SELVAMURUGAN et al., 2010) enquanto que o custo para o gasômetro foi considerado os 90% de teor mínimo de CH<sub>4</sub> exigidos pela Resolução ANP n° 685/2017.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (17)$$

Onde:

VPL: valor presente líquido [R\$];

r: taxa de desconto [12%];

FC<sub>t</sub>: fluxo de caixa no tempo t de 1 a n [n = 20 anos];

I<sub>0</sub>: investimento inicial [R\$].

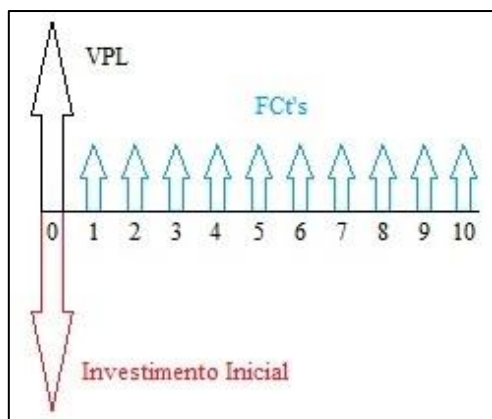


Figura 24. Exemplo de fluxo de caixa adotando o VPL. Fonte: acervo do autor.

O tempo de retorno, ou *payback*, período de duração em que os custos iniciais são sanados de acordo com o investimento inicial e a taxa interna de retorno (TIR), taxa necessária para que haja total recuperação dos custos iniciais, também foram considerados na análise de viabilidade econômica.

Uma vez que o tratamento do efluente é obrigatório, não foram considerados os custos relativos a implantação de um sistema de tratamento da ARC. Anualmente são consumidos, em média, 17 botijões<sup>5</sup> P45. O preço de mercado do botijão P45 varia de R\$ 240,00 a R\$ 380,00, atualizados em dezembro de 2017 (MERCADO MINEIRO, 2017), com preço médio de R\$ 307,88, sendo este o preço adotado na substituição de um botijão pelo BMP. Foi considerado um aumento de 1% ao ano no preço do botijão P45 uma vez que há aumento do seu preço em decorrência da inflação. Apesar a produção de biogás durar cerca de 3 meses, foi considerado que o biogás será armazenado em um gasômetro dimensionado para funcionar ao longo de 1 ano. O período de projeto adotado foi de 20 anos. A Figura 25 resume as etapas consideradas na análise teórica. Nesta figura, as três últimas etapas foram consideradas na análise de viabilidade econômica.

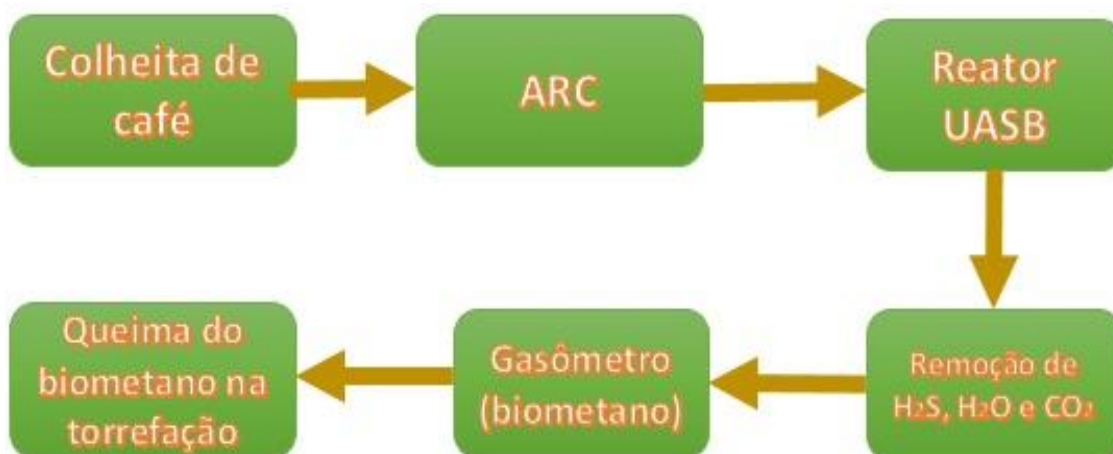


Figura 25. Fluxograma do aproveitamento do biometano oriundo da ARC.

<sup>(5)</sup> Informação fornecida pelo proprietário da fazenda.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análises físico-químicas

A ARC apresentou elevados valores de DQO, DBO<sub>5</sub> e ST, que condiz com a presença de elevadas quantidades de matéria orgânica presente no efluente. Nos itens a seguir estão descritos mais detalhadamente os resultados obtidos no Primeiro e Segundo Experimento.

#### 5.1.1 Análises físico-químicas - Primeiro Experimento

Os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos da ARC utilizadas no Primeiro Experimento e a redução dos parâmetros após biodigestão anaeróbia constam na Tabela 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10. Parâmetros físico-químicos da ARC – Primeiro Experimento

Parâmetro	Entrada		Saída		
	s/inóculo	c/inóculo			s/inóculo
	ARC bruta	A1	A2	A3	A4
pH	5,08	-	-	-	-
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	10.032	925	975	1.028	3.201
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	6.233	648	836	847	2.362
ST(g.L <sup>-1</sup> )	14,39	2,95	2,69	1,74	5,01
SF(g.L <sup>-1</sup> )	2,28	1,04	0,68	0,57	1,15
SV (g.L <sup>-1</sup> )	12,11	1,91	2,02	1,17	3,87
NT (mg.L <sup>-1</sup> )	34	3,36	3,36	6,72	2,8
COT (mg.L <sup>-1</sup> )	4.142	-	-	-	-
SV:ST	84%	65%	75%	67%	77%
DQO:DBO	1,61	1,43	1,17	1,21	1,36
C:N	123,27	-	-	-	-

Tabela 11. Redução dos parâmetros físico-químicos após biodigestão – Primeiro Experimento

Parâmetro	Redução			
	A1 (182 dias)	A2 (87 dias)	A3 (87 dias)	A4 (59 dias)
DQO	91%	90%	90%	68%
DBO <sub>5</sub>	90%	87%	86%	62%
ST	79%	81%	88%	65%
SF	54%	70%	75%	50%
SV	84%	83%	90%	68%
NT	90%	90%	80%	92%

Dos resultados apresentados nas tabelas 10 e 11, notam-se elevados valores de SV da ARC bruta, e uma relação SV:ST de 84%, que sugere uma boa tendência à produção de biogás. A relação DQO:DBO de 1,61 nas análises de entrada apresenta-se favorável à opção de tratamento biológico, uma vez que esta relação é inferior a 2,5 (VON SPERLING, 2005). Em contrapartida, a relação C:N obtida no experimento (123,27) apresentou-se elevada comparado à faixa ideal C:N 20-30 (BARROS, 2012; LI et al., 2011; NOGUEIRA, 1986). O pH apresentou-se abaixo da faixa ótima 6,0 – 8,0 para biodigestão. No que tange a eficiência do tratamento da ARC, as reduções de sólidos, DQO, DBO<sub>5</sub> e NT foram menores no biodigestor A4, que condiz com o menor tempo de biodigestão, mas ainda assim atingindo os 60% de redução de DBO<sub>5</sub> exigidos pela resolução CONAMA n° 430 (CONAMA, 2011). Entretanto, não houve grandes diferenças entre as reduções dos biodigestores A2 e A3 com relação ao A1, visto que os dois primeiros ficaram 95 dias a menos sob biodigestão anaeróbia que o segundo. Em todos os casos, a redução de SV foram maiores que a dos SF. Porém, ainda assim, os SV compõem a maioria dos sólidos, havendo uma ligeira redução na relação SV:ST de 84% para 65%, 75%, 67%, 77% nos biodigestores A1, A2, A3 e A4, respectivamente.

### 5.1.2 Análises físico-químicas - Segundo Experimento

Os resultados referentes aos parâmetros físico-químicos da ARC utilizadas no Segundo Experimento e a redução dos parâmetros após biodigestão anaeróbia constam na Tabela 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12. Parâmetros físico-químicos da ARC – Segundo Experimento

Parâmetro	Entrada		Saída			
	S/inóculo	C/inóculo	S/inóculo		C/inóculo	
	B1 e B2	B3 e B4	B1	B2	B3	B4
pH	3,87	4,50	3,41	3,38	4,34	4,27
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	2.082	2.485	1.546	1.756	728	566
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	1.503	602	1.135	1.197	326	314
ST(g.L <sup>-1</sup> )	6,64	7,27	2,23	4,24	2,38	2,14
SF(g.L <sup>-1</sup> )	0,54	1,05	0,35	0,53	0,76	0,43
SV (g.L <sup>-1</sup> )	6,10	6,22	1,88	3,70	1,62	1,70
NT (mg.L <sup>-1</sup> )	25,20	11,20	5,60	5,60	5,60	8,40
SV:ST	92%	86%	85%	87%	68%	80%
DQO:DBO	1,39	4,13	1,36	1,47	2,32	1,74

Tabela 13. Redução dos parâmetros físico-químicos após biodigestão – Segundo Experimento

Parâmetro	Redução (52 dias)			
	B1	B2	B3	B4
DQO	25,74%	15,66%	70,70%	77,22%
DBO <sub>5</sub>	24,47%	20,34%	45,81%	47,81%
ST	66,46%	36,20%	67,30%	70,59%
SF	35,51%	0,56%	27,34%	58,51%
SV	69,17%	39,33%	74,02%	72,62%
NT	77,78%	77,78%	50,00%	25,00%

Nota-se na Tabela 12 menor pH nos biodigestores sem inóculo (B1 e B2) com relação aos com inóculo (B3 e B4). Não obstante, embora com pH corrigidos para a faixa ótima de 6-8, os valores de saída apresentaram-se mais ácidos que os valores de entrada, o que indica uma estagnação na etapa de acidogênese. Isto pode ser justificado, pois além dos baixos valores de pH, não houve produção suficiente de biogás para posteriores aferições, conforme será apresentado nos itens 5.2.2. A relação DQO:DBO<sub>5</sub> de 4,13 apresentou-se elevada no substrato composto por ARC com inóculo (B3 e B4), superando a relação DQO:DBO<sub>5</sub> de 2,5 conforme sugerido por Von Sperling (2005) para tratamentos biológicos. Porém tal proporção ficou abaixo de 2,5 em B3 (2,32) e B4 (1,74) após biodigestão, indicando que o tratamento biológico pode ser viável neste caso. A maior DQO da ARC com inóculo é atribuída aos compostos de difícil degradabilidade presentes no lodo de esgoto.

Conforme ilustra a Tabela 13, nenhuma redução de DBO<sub>5</sub> superou os 50%. Os valores de pH ficaram fora da faixa 5-9, conforme exigidos pela Resolução CONAMA n° 430 (CONAMA, 2011), apesar de redução superior aos 70% da DQO em B3 e B4. Todavia, o TRH foi menor com relação ao primeiro experimento. Tal tempo reduzido não implica, porém, a irrisória redução de SF em B2, que foi de apenas 0,56%, provavelmente relacionada às condições internas desfavoráveis à atividade microbiana do biodigestor. Beyene et al. (2014) chegaram a atingir 79% de redução da DBO<sub>5</sub> com 50 dias de biodigestão da ARC, e eficientes remoções de sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos voláteis suspensos, fósforo e nitrogênio total.

### 5.1.3 Análises físico-químicas comparado a outros estudos

A Tabela 14 compara os resultados de entrada com outros autores, a relação DQO:DBO<sub>5</sub>,

inerente a escolha de tratamento (química ou biológica) e a relação C:N, referente a qualidade do substrato biodigerido como biofertilizante.

Tabela 14. Parâmetros físico-químicos da ARC segundo diferentes autores comparados aos resultados do presente estudo

Parâmetro físico-químico	Autores						Presente Estudo		
	a	b*	c*	d	e	f*	s/inóculo (1)	s/inóculo (2)	c/inóculo (2)
pH	-	4,05	4,57	3,79	4,5	4,4	5,08	3,87	4,50
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	8.079	7.450	3.769	2.545	22.000	978	10.032	2.082	2.485
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	5.861	4.290	1.899	-	12.000	-	6.233	1.503	602
ST (g.L <sup>-1</sup> )	-	3,86	3,91	1,23	2,05	-	14,39	7,27	6,64
SF (g.L <sup>-1</sup> )	-	-	1,24	-	-	-	2,28	1,05	0,54
SV (g.L <sup>-1</sup> )	-	-	2,77	1,14	-	1,34	12,11	6,22	6,10
NT (mg.L <sup>-1</sup> )	350	150	21	-	-	-	34	25	11
COT (mg.L <sup>-1</sup> )	-	4.200	-	-	-	-	4.142	-	-
SV:ST	-	-	71%	93%	-	-	84%	92%	86%
DQO:DBO <sub>5</sub>	1,38	1,74	1,99	-	1,83	-	1,61	1,39	4,13
C:N	-	28	-	-	-	-	123	-	-

a: Beyene et al. (2014); b: Selvamurugan et al. (2010); c: Prado e Campos (2008); d: Puebla et al. (2014); e: Devi et al. (2008); f: Fia et al. (2012); \* valores médios; (1) 1º experimento; (2) 2º experimento

Notam-se significativas diferenças entre os valores da maioria dos parâmetros, que pode ser em decorrência do tipo e quantidade de inóculo, das diferenças entre as ARCs estudadas, dentre outros fatores. Recirculação de água no PVU, diferentes relações de volume de água por grãos processados e TRH são alguns fatores que influenciam as características da ARC. Selvamurugan et al. (2010a) apresentaram resultado semelhante de COT (4.200 mg.L<sup>-1</sup>), as com uma relação C:N, 28, diferente da relação C:N 123 encontrada no presente estudo devido à alta concentração de NT na ARC analisada. Os valores de DQO e DBO<sub>5</sub> obtidos se enquadram na faixa de valores encontrados na literatura. Os resultados de ST e SV foram elevados comparados aos de Prado e Campos (2008) e Puebla et al. (2014). O pH demonstrou similaridade em todos os estudos, o que evidencia a necessidade de neutralização do pH em caso de tratamento anaeróbio.

Ao comparar as análises deste estudo, verifica-se que a DQO do Primeiro Experimento foi cerca de 4,8 vezes superior à DQO da ARC coletada no Segundo Experimento e 4,0 vezes maior que a DQO da ARC com inóculo do mesmo. Tal diferença pode decorrer de alguns fatores como: maior quantidade de grãos cereja processados no dia da coleta do Primeiro Experimento em decorrência do horário de coleta (quanto mais tarde, mais grãos foram processados), sendo esta a maior suspeita; uma menor quantidade de água utilizada no processamento; coleta realizada no momento da mistura da ARC com a água de



desmucilagem dos grãos recém despulpados, que, embora não tenha sido o atual estudo de caso, apresenta uma carga orgânica significativamente maior que a ARC.

## 5.2 Composição do biogás

### 5.2.1 Composição do Biogás - Primeiro Experimento

Os resultados referentes à composição do biogás estão ilustrados na Tabela 15. Vale ressaltar que durante a primeira medição de A2 e A3, após apenas 3 dias de biodigestão, houve uma significativa produção de biogás, ultrapassando 200 mbar, limite de pressão suportado pelo aparelho *Geotech*®, sendo necessário purgar boa parte do gasômetro interno desses biodigestores.

Tabela 15. Dados da composição do biogás referentes Primeiro Experimento

Data de Partida	Data de medição	TRH	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Balanco
A1* 20/10/2016	18/01/2017	90	0%	15,5%	3,1%	3	11	81,4%
	20/03/2017	151	30,4%	15,9%	2,4%	23	8	51,3%
	20/04/2017	182	7,1%	15,7%	10,2%	3	4	67,0%
A2 23/01/2017	26/01/2017	3	1,4%	23,4%	0,3%	1.515	819	74,9%
	20/03/2017	56	0,7%	28,5%	0,2%	92	9	70,6%
	20/04/2017	87	0,4%	39,5%	0,5%	56	5	59,6%
A3 23/01/2017	26/01/2017	3	0,5%	23,6%	0,3%	1.515	3.221	72,3%
	20/03/2017	56	28,1%	31,6%	0,3%	13	3	40,0%
	20/04/2017	87	0,2%	0,7%	19,0%	9	4	80,1%
A4 20/02/2017	20/03/2017	28	31,9%	27,2%	0,2%	258	21	40,7%
	20/04/2017	59	4,1%	22,3%	7,2%	45	3	66,4%

\*Adição de inóculo: TRH = 98°dia

Embora o gás CH<sub>4</sub> seja o gás de maior interesse, vale analisar todos os componentes do biogás conjuntamente no intuito de melhor compreender os processos microbiológicos que ocorrem no substrato de estudo (ARC) assim como possíveis falhas na integridade dos biodigestores. Nota-se elevados valores de H<sub>2</sub>S nas primeiras medições de A2 e A3, podendo ter sofrido influência do inóculo de lodo de esgoto, com maior aporte de compostos de enxofre, pois A1 e A4, isentas de inóculo em suas primeiras medições, apresentaram baixos valores de H<sub>2</sub>S, gás indesejável sobretudo quando a finalidade principal é o aproveitamento energético do biogás. O mesmo pode ser justificado em relação aos resultados de CO. Os valores de “Balanco”, resumido a N<sub>2</sub>, apresenta-se em altas proporções pois o gasômetro interno do biodigestor está inicialmente preenchido por

gás atmosférico, composto por cerca de 78% de  $N_2$  e 21% de  $O_2$ . Com exceção de A2, houve significativo aumento de  $N_2$  e  $O_2$  nas últimas medições acompanhado de queda de  $CH_4$  e  $CO_2$ , implicando em suspeita de vazamento nos biodigestores, que permitiram a entrada de ar e interferiram os processos anaeróbios do sistema. Apesar de A2 não ter apresentado indícios de vazamento, sua produção de  $CH_4$  foi a mais baixa, acompanhada de alta produção de  $CO_2$ . A1, A3 e A4 chegaram a apresentar teores ao entorno de 30% de  $CH_4$ , onde A4 apresentou o maior valor percentual de  $CH_4$  com o menor TRH, sem adição de inóculo. Tais resultados, em âmbito geral, encontram-se fora do estabelecido pela Resolução ANP n° 685/2017, com as seguintes especificações do biometano: concentrações máximas de 0,001 ppm de  $H_2S$ , 3% de  $CO_2$ , 0,8% de  $O_2$ , 90% de  $CH_4$  e 10% de  $N_2+O_2+CO_2$ .

As Figuras 26 e 27 ilustram, respectivamente, a variação percentual de  $CH_4$  e  $CO_2$  nos biodigestores.

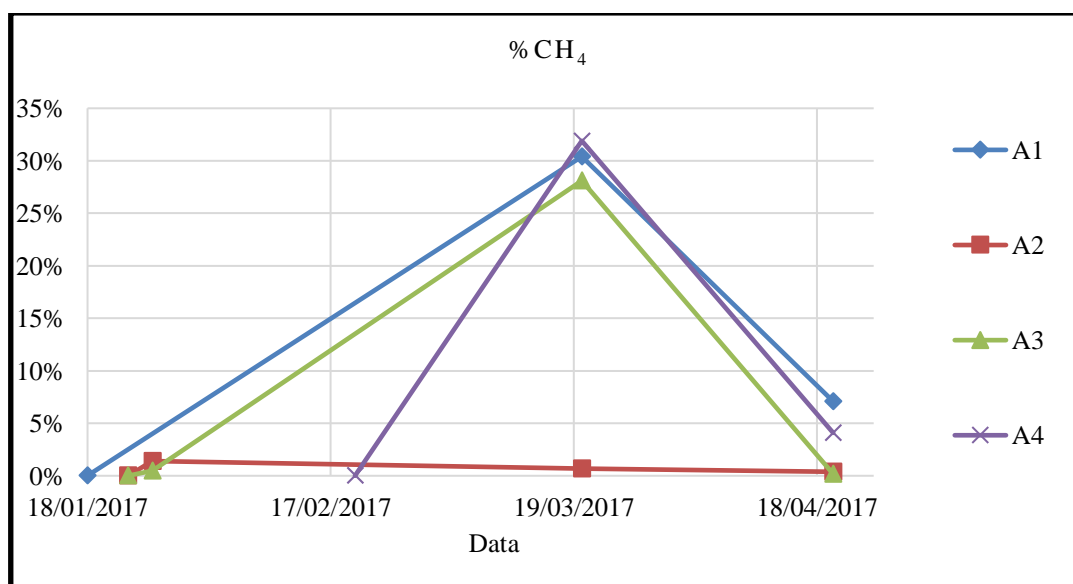


Figura 26. Percentual de  $CH_4$  nos biodigestores do Primeiro Experimento.

A partir da Figura 26 fica mais evidente um aumento da presença de  $CH_4$  no biogás nas primeiras medições dos biodigestores A1, A3 e A4, com maior valor percentual encontrado na penúltima medição, enquanto a produção de  $CH_4$  foi nitidamente inferior aos demais em A2. Essa diferença significativa de produção de  $CH_4$  entre A2 e as demais pode ser explicada pela provável prevalência de bactérias acidogênicas neste biodigestor. A alta presença de AGV e  $CO_2$  na acidogênese afeta negativamente a produção de  $CH_4$ , semelhante às baixa produção de  $CH_4$  nos estudos de Novita (2016).

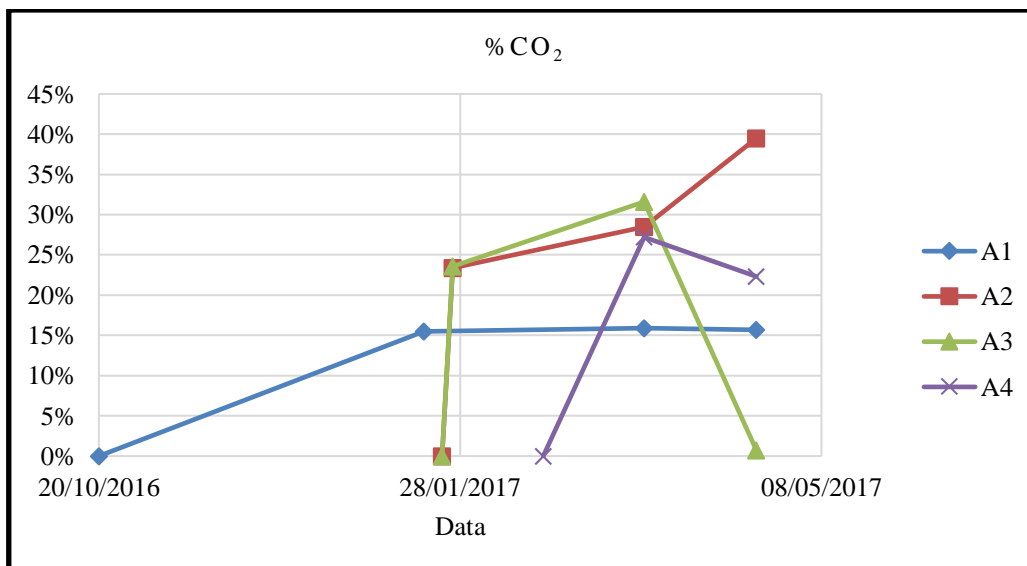


Figura 27. Percentual de CO<sub>2</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento.

Quanto ao percentual de CO<sub>2</sub>, A2 foi o único que apresentou constante aumento desse biogás, enquanto A1 manteve-se estável, A4 apresentou uma leve queda e A3 reduziu bruscamente na última medição. As Figuras 28 e 29 ilustram, respectivamente, a quantidade em volume de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> produzidos nas CNTP calculados pela equação 3. Apesar da semelhança com as Figuras 25 e 26, em termos quantitativos, A1 se sobressaiu na produção de CH<sub>4</sub>, produzindo 177 mL de CH<sub>4</sub>, e A2 na produção de CO<sub>2</sub>, produzindo 331 mL. Em volumes acumulados, A1 apresentou as maiores produções de CH<sub>4</sub> (215 mL) e A2 de CO<sub>2</sub> (773 mL).

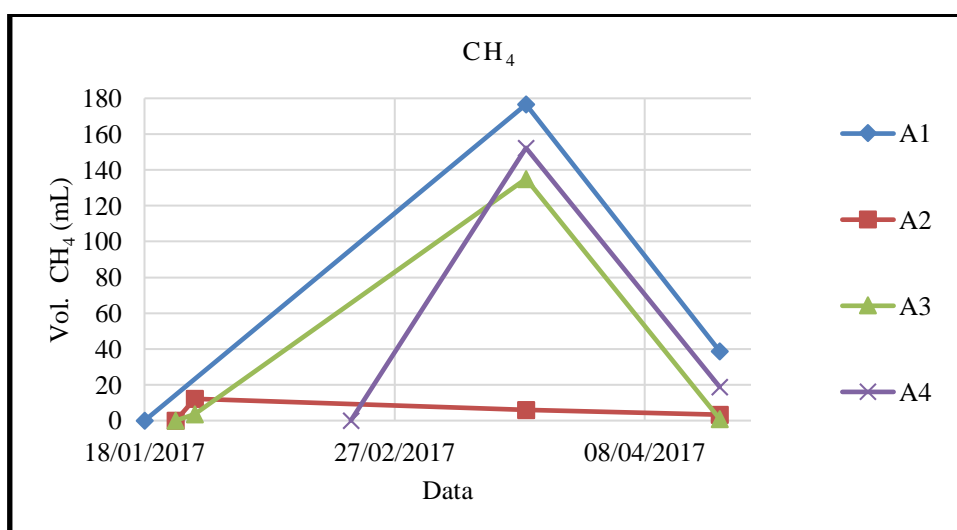


Figura 28. Volume de CH<sub>4</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento.

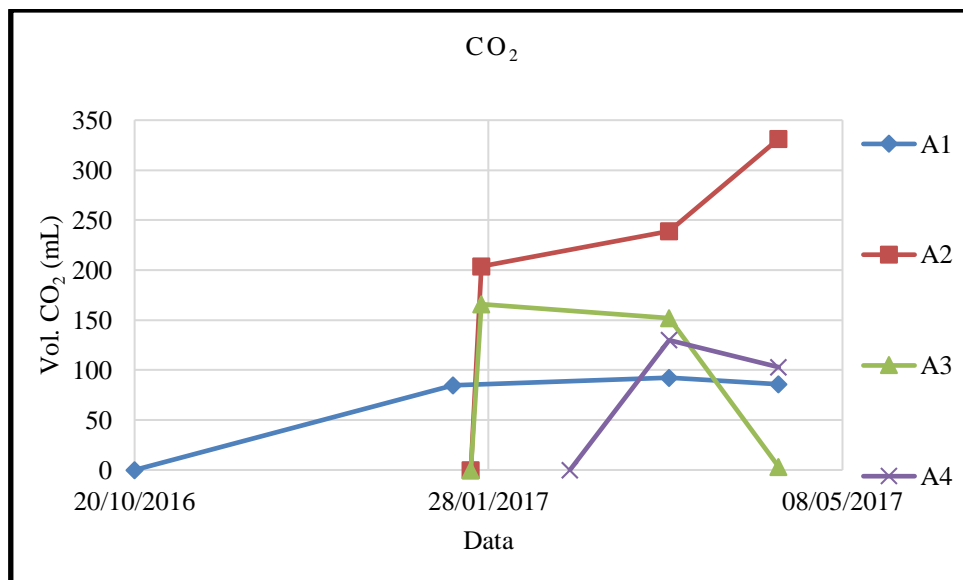


Figura 29. Volume de CO<sub>2</sub> nos biodigestores do Primeiro Experimento.

No que concerne a produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> produzidos nas CNTP, foi feita uma relação da produção desses gases pela quantidade de SV removida do substrato, conforme a equação 5, contidos na Tabela 16, apresentando maior precisão da efetividade dos biodigestores, pois os volumes de substrato dos biodigestores se diferenciam.

Tabela 16. Relação de produção de biogás e CH<sub>4</sub> por volume de substrato do Segundo Experimento

Biodigestor	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgSV <sup>-1</sup>	L <sub>CO<sub>2</sub></sub> .kgSV <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> .kgSV <sup>-1</sup>
A1	8,43	10,29	18,71
A2	0,85	30,64	31,48
A3	7,23	16,51	23,74
A4	17,28	23,50	40,78

\*Adição de inóculo no 98º dia de TRH

Nota-se que apesar de A1 ter produzido as maiores quantidades em volume de CH<sub>4</sub>, foi A4 que apresentou maior produção relativa desse gás, visto que este apresentou a maior relação de L<sub>CH<sub>4</sub></sub>.KgSV<sup>-1</sup>. O biodigestor A2 foi o que apresentou a menor produção de CH<sub>4</sub>, mas com a maior produção relativa de CO<sub>2</sub> e segunda maior produção relativa de biogás. A última coluna a direita da Tabela 16 remete a eficiência na produção de biogás, e conseqüentemente, a qualidade da atividade microbológica nos biodigestores. Logo, a produção de biogás foi mais eficiente em A4, seguido de A2, A3 e A1.

### 5.2.2 Composição do Biogás – Segundo Experimento

Os resultados referentes à composição do biogás estão contidos na Tabela 16, onde desta

vez as aferições foram feitas diretamente do gasômetro. Há diferentes quantidades de medições para cada biodigestor por conta da não produção de biogás dos mesmos durante as diferentes datas de aferição

Tabela 17. Dados da composição do biogás referentes ao Primeiro Experimento

Data de Partida	Data de medição	TRH	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Balanço
B1 19/09/2017	29/09/2017	10	0,8%	18,8%	9,9%	183	33	70,5%
	06/10/2017	17	0,2%	11,0%	14,0%	54	9	74,8%
B2 19/09/2017	29/09/2017	10	0,8%	11,5%	11,3%	127	23	76,4%
	29/09/2017	10	1,3%	11,7%	13,4%	> 2.000	192	73,6%
B3 19/09/2017	06/10/2017	17	0,6%	22,2%	9,4%	65	441	67,8%
	20/10/2017	31	0,7%	35,7%	10,5%	114	6	53,1%
	29/09/2017	10	1,8%	22,1%	9,1%	> 2.000	1474	61,0%
B4 19/09/2017	06/10/2017	17	7,5%	28,1%	9,7%	182	1648	54,7%
	20/10/2017	31	11,4%	17,8%	13,6%	55	600	57,2%
	27/10/2017	38	3,8%	6,4%	17,3%	13	112	72,5%

Os altos valores de “Balanço” e O<sub>2</sub> estão relacionados mais uma vez à presença de ar atmosférico presentes no interior das garrafas e das mangueiras que acoplam os biodigestores ao gasômetro, somados à pouca produção de biogás nos biodigestores. Não obstante, houve uma significativa produção inicial de CO<sub>2</sub> em decorrência do consumo de O<sub>2</sub> presente no meio. A produção de CH<sub>4</sub> foi baixa, inferiores ao Primeiro Experimento, não chegando a 1% em B1 e B2, sem inóculo, diferentemente do que ocorreu em A4 (31,9%), embora a produção de CH<sub>4</sub> desta última não tenha sido tão expressiva. Desta vez a adição de inóculo (B3 e B4) influenciou em uma maior produção de biogás assim como de CH<sub>4</sub>, os quais foram possíveis mais medições do que nos biodigestores sem inóculo (B1 e B2). Houve uma alta produção inicial de CO em B3 e B4, que ultrapassou o limite de 2000 ppm, e alta produção de H<sub>2</sub>S, certamente relacionados com as características do inóculo (lodo anaeróbio de esgoto), o que não ocorreu em B1 e B2.

Embora não tenham aparentemente ocorrido vazamentos nos biodigestores, obteve-se um aumento de O<sub>2</sub> e “Balanço” nas últimas medições de B1 e B4. A suspeita para este caso é que houve leves sucções de ar no momento das aferições dos gasômetros, uma vez que o encaixe da mangueira de bomba à válvula do bico de bicicleta pode não ter sido 100%

efetivo. As Figuras 30 e 31 ilustram como foi, respectivamente, a composição de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  do biogás produzido.

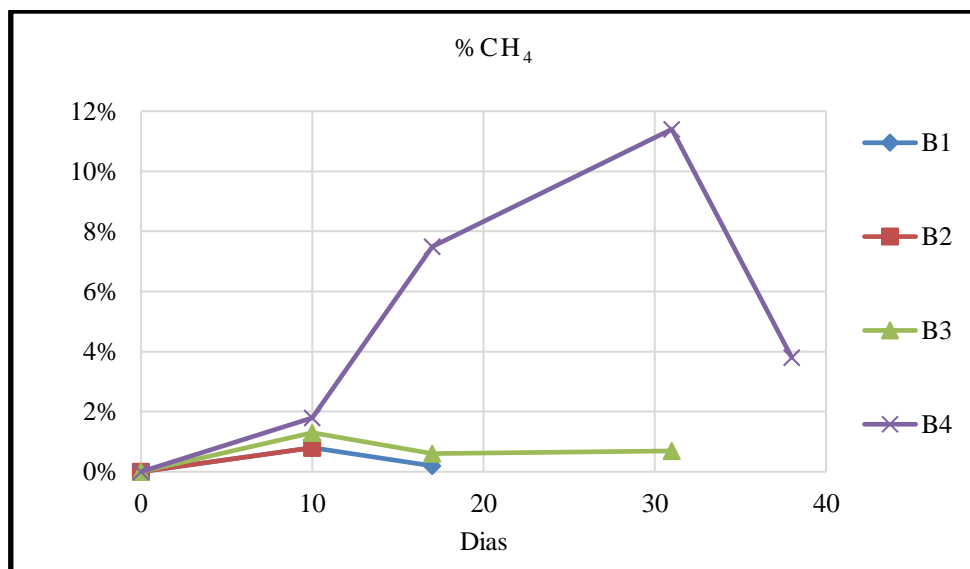


Figura 30. Percentual de  $\text{CH}_4$  nos biodigestores do Segundo Experimento.

Conforme a Figura 30, somente B4 apresentou uma produção mais significativa de  $\text{CH}_4$ , a 11,4% após 31 dias de TRH, mas baixando a 3,8% no 38º dia. Com o segundo melhor desempenho, B3 apresentou teores de  $\text{CH}_4$  abaixo de 2% em suas três medições. B1 e B2 apresentaram os mesmos 0,8% de  $\text{CH}_4$  na primeira medição (10 dias de TRH), mas somente B1 chegou a produzir biogás suficiente para obter uma segunda medição, o qual o teor de  $\text{CH}_4$  foi de apenas 0,2%.

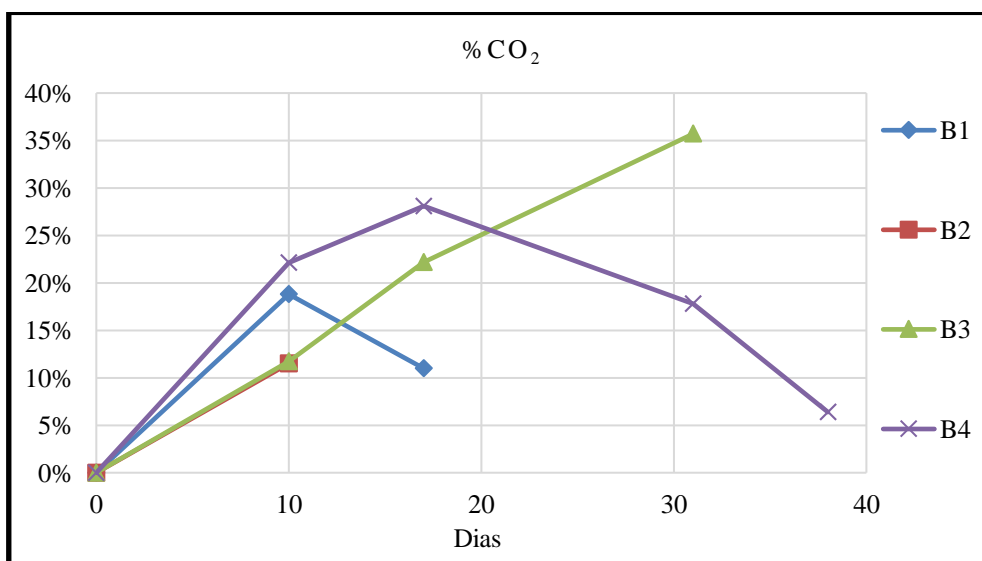


Figura 31. Percentual de  $\text{CO}_2$  nos biodigestores do Segundo Experimento.

Ao analisar a Figura 31, verifica-se teores de  $\text{CO}_2$  mais expressivos que os de  $\text{CH}_4$ , chegando a 35,7% em B3 com 31 dias de TRH. Tais valores expressam a predominante

atividade microbiana aeróbia, que consome o O<sub>2</sub> inicialmente presente do meio liberando CO<sub>2</sub>, mais evidente em B3, onde os teores de CO<sub>2</sub> foram sempre crescentes. Porém, como mencionado anteriormente, os teores de CO<sub>2</sub>, assim como de CH<sub>4</sub> reduziram nas últimas medições de B1 e B4. Essa baixa produção de biogás e CH<sub>4</sub> também pode decorrer da presença de compostos orgânicos tóxicos de difícil degradabilidade na ARC bruta, como polifenóis (taninos e cafeína), que foram mais facilmente degradáveis pelo aporte microbiológico oriundo do inóculo, conforme Novita (2016). O autor (*op. cit.*) demonstrou que altas concentrações de compostos fenólicos podem inibir as atividades microbiológicas do lodo granular adicionado à ARC como inóculo. Corro et al. (2013) afirmaram ser necessário uma alta concentração de bactérias para degradar os compostos tóxicos presentes na polpa de café, o que justifica a necessidade de adição de inóculo na ARC para a produção de biogás.

Os valores obtidos de altura e pressão interna absoluta do gasômetro (pressão medida no aparelho mais a pressão atmosférica local) estão contidos na Tabela 18, os quais possibilitaram o cálculo do volume de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> nas CNTP, conforme as equações 3 e 4, ilustrados nas Figuras 32 e 33.

Tabela 18. Altura (h) e pressão (P) dos gasômetros do Segundo Experimento

Biodigestor	TRH = 10 dias		TRH = 17 dias		TRH = 31 dias		TRH = 38 dias	
	h (cm)	P (Pa)	h (cm)	P (Pa)	h (cm)	P (Pa)	h (cm)	P (Pa)
B1	14,0	94.235	8,0	93.241	-	-	-	-
B2	10,0	93.560	-	-	-	-	-	-
B3	14,5	94.319	13,0	94.084	6,5	93.018	-	-
B4	15,5	94.488	18,0	94.928	12,0	93.946	4,0	92.517

Quanto maior a altura (h) do gasômetro, maior sua pressão (P) interna, devido ao aumento de peso exercido sobre o biogás com sua elevação, diminuindo a força de empuxo exercida pela água, onde este se encontra previamente mergulhado. Além dessa relação, quanto maior o volume de biogás, maior foi o teor de CH<sub>4</sub> obtido, demonstrando a produção desse biogás estar diretamente relacionada com a qualidade da atividade microbiológica dos biodigestores. Assim como os teores de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, os volumes desses gases foram significativamente menores no segundo experimento.

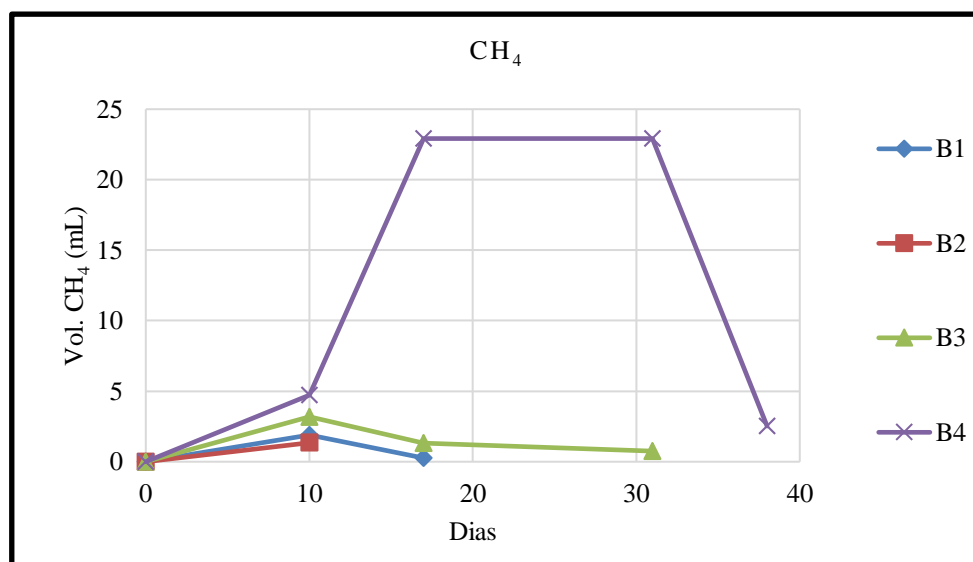


Figura 32. Volume de CH<sub>4</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento.

No que concerne a produção de CH<sub>4</sub>, somente B4 apresentou produções mais significativas comparado aos outros biodigestores, com uma produção acumulada de 53 mL. Apesar de B3 também estar com inóculo, apresentou uma produção acumulada de CH<sub>4</sub> quase 10 vezes inferior a B4 (5 mL). Ao analisarmos a Tabela 17, na 3ª medição, os teores de CO<sub>2</sub> em B3 são maiores que os teores de CO<sub>2</sub> em B4, o que indica uma prevalência da atividade aeróbia. Logo, visto a sensibilidade do substrato à inibição por retroalimentação de ácidos intermediários (LI et al., 2011), tudo indica uma estabilização na fase acidogênese em B3.

No que concerne a produção de CO<sub>2</sub>, esta foi nitidamente superior à de CH<sub>4</sub>, mas não superou a produção de CO<sub>2</sub> do Primeiro Experimento. Embora este não seja o biogás desejado em questão, sua baixa produção, junto à baixa produção de CH<sub>4</sub>, é um forte indicador de baixa atividade microbiana. Por outro lado, o Segundo Experimento passou por um TRH de apenas 38 dias, enquanto o menor TRH do Primeiro Experimento foi de 59 dias (A4). A eficiência da produção de biogás pode ser analisada com maior exatidão na Tabela 19, onde há a proporção de volume de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> por massa de SV removidos.



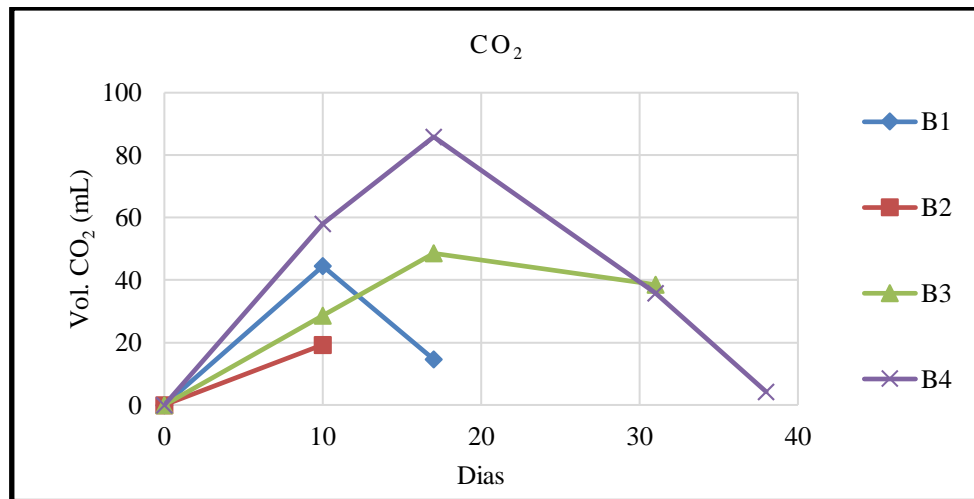


Figura 33. Volume de CO<sub>2</sub> nos biodigestores do Segundo Experimento.

Tabela 19. Relação de produção de biogás e CH<sub>4</sub> por volume de substrato do Segundo Experimento

Biodigestor	$L_{CH_4}.kgSV^{-1}$	$L_{CO_2}.kgSV^{-1}$	$L_{biogás}.kgSV^{-1}$
B1	0,34	9,33	9,67
B2	0,37	5,35	5,72
B3	0,76	16,74	17,50
B4	7,81	27,12	34,95

No Segundo Experimento, com exceção de B4, houve uma maior discrepância entre produção de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> comparado ao Primeiro. Considerando o volume de biogás produzido por SV removidos, a produção do Primeiro Experimento foi 70% superior ao do Segundo. A média do Primeiro Experimento foi de 28,68  $L_{biogás}.kgSV^{-1}$  enquanto a do Segundo foi 16,97  $L_{biogás}.kgSV^{-1}$ . Certamente isso ocorreu em razão do menor TRH deste último. A produção de biogás foi mais eficiente em B4, seguida de B3, B1 e B2. Como última observação, embora a produção de CH<sub>4</sub> em B4 tenha sido 10 vezes a de B3, em termos de produtividade de biogás foi apenas o dobro.

A composição do biogás de cada biodigestor, em ambos Experimentos, encontra-se no Anexo IV.

### 5.3 Análise geral da produção dos biodigestores de ambos Experimentos

Substituindo o parâmetro SV pela DQO e DBO<sub>5</sub> nas equações 5 e 6, calculou-se a produção relativa de biogás e CH<sub>4</sub>, possibilitando uma melhor comparação com resultados obtidos em outros estudos, ilustrado na Tabela 20. Nesta, foram inseridos os

valores máximos encontrados de teor de CH<sub>4</sub> ao passo que inseridos os valores médios para os outros estudos.

Tabela 20. Produção de biogás e CH<sub>4</sub> relativa comparada a outros estudos

% CH <sub>4</sub>	L <sub>biogás</sub> .kgDQO <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> .kgDBO <sub>5</sub> <sup>-1</sup>	L <sub>biogás</sub> .kgSV <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgDQO <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgDBO <sub>5</sub> <sup>-1</sup>	L <sub>CH<sub>4</sub></sub> .kgSV <sup>-1</sup>	Autores
60,70%	430,00	775,00	840,00	258,86	466,55	505,68	(1)
57,19%	-	580,00	-	-	330,00	-	(2)
58,50%	266,00	-	-	-	-	-	(3)
57,01%	-	-	-	-	-	-	(4a)
27,38%	-	-	-	-	-	-	(4b)
30,40%	20,94	34,15	18,71	9,46	15,42	8,45	A1
1,40%	40,26	67,57	31,48	0,95	1,59	0,85	A2
28,10%	28,84	48,22	23,74	8,85	14,79	7,28	A3
31,90%	49,22	86,85	40,78	20,89	36,87	7,83	A4
0,80%	76,20	111,09	9,67	2,68	3,91	0,34	B1
0,80%	42,16	44,97	5,72	2,74	2,92	0,37	B2
1,30%	45,88	292,52	17,50	1,99	12,70	0,76	B3
11,40%	82,30	549,18	34,95	18,43	123,01	17,31	B4

(1) Selvamurugan et al. (2010); (2) Prado e Campos (2008); (3) Puebla et al. (2013); (4) Novita (2016), a) 1º frasco e b) 2º frasco

Verifica-se que os teores de CH<sub>4</sub> obtidos em outros estudos foram satisfatórios, a exceção de Novita (2016) em seu segundo frasco (27,38%), que atribuiu esse resultado à alta presença de AGV e CO<sub>2</sub> no substrato. Esta justificativa pode ser um dos principais motivos da baixa produção de CH<sub>4</sub> no presente estudo. Outro fator que pode ter comprometido a produção de biogás foram variações de temperatura, pois embora houvesse o controle de temperatura do termostato, esta não é sempre constante. Segundo Chernicharo (2007), variações de temperatura superiores a 2°C afetam negativamente as atividades microbiológicas do ambiente anaeróbio, sobretudo ao desenvolvimento das *archaeas* metanogênicas. A exceção foi a produção relativa de biogás por DBO<sub>5</sub> removida em B4 (549,18 L<sub>biogás</sub>.kgDBO<sub>5</sub><sup>-1</sup>) que se equipara ao encontrado por Prado e Campos (2008) (580,00 L<sub>biogás</sub>.kgDBO<sub>5</sub><sup>-1</sup>). Entretanto, a DBO<sub>5</sub> obtida no presente estudo (602 mg.L<sup>-1</sup>) foi baixa se comparada à DBO<sub>5</sub> encontrada por Beyene et al. (2014) (5.861 mg.L<sup>-1</sup>), Selvamurugan et al. (2010) (4.290 mg.L<sup>-1</sup>), Prado e Campos (2008) (1.899 mg.L<sup>-1</sup>) e Devi et al. (2008) (12.000 mg.L<sup>-1</sup>), além de apresentar uma redução de apenas 47,81%. Ao analisar-se a produção de biogás por remoção de SV (40,85 L<sub>biogás</sub>.kgSV<sup>-1</sup>), que reduziu em 72% no biodigestor B4, fica evidente a baixa produção de biogás, bem abaixo dos 840,00 L<sub>biogás</sub>.kgSV<sup>-1</sup> obtido por Selvamurugan et al. (2010). Ao analisar-se a

produção de CH<sub>4</sub> por DQO removida, os resultados obtidos ficaram distantes dos 350 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>.kgDQO<sup>-1</sup> preconizados por Chernicharo (2007).

## 5.4 Síntese dos resultados teóricos

Os resultados obtidos com as equações contidas na seção 4.5 estão listados na Tabela 21. Em consequência das diferenças das DQO obtidas entre o Primeiro e o Segundo Experimento, houve uma significativa diferença entre as estimativas teóricas de CH<sub>4</sub> e, conseqüentemente, da potência térmica a ser gerada em questão.

Tabela 21. Síntese dos resultados referentes à fazenda e ao BMP

Experimento (ARC)	P <sub>local</sub> da fazenda (Pa)	BMP CNTP (m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> )	BMP local (m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> )	P <sub>ot</sub> (kW)	Gasômetro (m <sup>3</sup> ) (eq. 15)	Torra de café Total (eq. 13)	Substituição de P45 por ano (eq. 14)
1° (s.in.)	90.708	34,55	40,81	37,13	142,98	56,0 t	44 botijões
2° (s/in.)		7,17	8,47	7,7	35,05	11,6 t	9 botijões
2° (c/in.)		8,56	10,11	9,2	41,84	13,9 t	10 botijões
Média (s/in.)		20,86	24,64	22,42	101,97	33,8 t	26 botijões

Assim como a DQO, houve uma grande variação entre as potências do Primeiro e Segundo Experimento. Na Tabela 22, 23 e 24 constam, respectivamente, o orçamento do projeto de captação do biogás dos Cenários I, II e III, conforme o subitem 4.3.2. As tabelas de viabilidade econômica constam no Anexo V. Na Tabela 24 constam os VPL's, TIR's e payback dos três cenários avaliados.

Tabela 22. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás – Cenário I

Equipamento	Preço	Quantidade	Total
Tubulação	487,83 R\$/m	10 m	R\$ 3.902,64
Gasômetro	175,62 R\$/m <sup>3</sup>	101,97 m <sup>3</sup>	R\$ 17.908,23
Compressor	975,66 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	10,20 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 12.436,18
Remoção H <sub>2</sub> O	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,13 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
Remoção H <sub>2</sub> S	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,13 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
Remoção de CO <sub>2</sub>	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,13 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 34.247,36</b>

Fonte: Adaptado de CETESB (2006)

Tabela 23. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás – Cenário II

Equipamento	Preço	Quantidade	Total
Tubulação	487,83 R\$/m	10 m	R\$ 3.902,64
Gasômetro	175,62 R\$/m <sup>3</sup>	35,05 m <sup>3</sup>	R\$ 6.155,83
Compressor	975,66 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	3,51 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 4.274,85
Remoção H <sub>2</sub> O	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	4,38 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,09
Remoção H <sub>2</sub> S	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	4,38 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,09
Remoção de CO <sub>2</sub>	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	4,38 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,09
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 14.333,58</b>

Fonte: Adaptado de CETESB (2006)

Tabela 24. Orçamento dos equipamentos a serem utilizados no aproveitamento de biogás - Cenário III

Equipamento	Preço	Quantidade	Total
Tubulação	487,83 R\$/m	10 m	R\$ 3.902,64
Gasômetro	175,62 R\$/m <sup>3</sup>	41,84 m <sup>3</sup>	R\$ 7.347,37
Compressor	975,66 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	4,18 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 5.102,31
Remoção H <sub>2</sub> O	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,23 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
Remoção H <sub>2</sub> S	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,23 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
Remoção de CO <sub>2</sub>	0,02 R\$/m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	5,23 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	R\$ 0,10
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 16.352,64</b>

Fonte: Adaptado de CETESB (2006)

Tabela 25. Síntese da análise de viabilidade econômica para os diferentes cenários

Cenário	VPL	TIR	Payback
I	R\$ 29.319,17	23,99%	7 anos
II	-R\$ 11.888,72	-6,12%	-
III	-R\$ 9.018,04	2,10%	-

Os Cenários I apresentara viabilidade (VPL positivo) enquanto os Cenários II e III foram inviáveis (VPL negativo). Apesar dos maiores custos, o Cenário I apresentou o mais rápido retorno econômico, favorecido pela sua alta produção de CH<sub>4</sub>, que supre em até 9 botijões a mais que os 17 botijões anuais usados na torrefação de café da fazenda. O Cenário III seria economicamente viável caso a taxa de desconto fosse inferior a 2,10% respectivamente, ou os custos referentes aos equipamentos fossem menores. Há a necessidade de se comprar 7 botijões por ano para suprir os 17 usados, impactando negativamente no retorno econômico anual. O Cenário II, assim como o Cenário III, há a necessidade de comprar botijões para suprir a demanda de torrefação. Porém seu maior sua TIR negativa implica que nem se a taxa de desconto fosse nula, não haveria viabilidade econômica.

## 6 CONCLUSÕES

Em posse das análises físico-químicas da ARC antes e após a biodigestão, a produção de biogás no Primeiro e Segundo Experimento, análise teórica da BMP e viabilidade econômica, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Em posse das relações DQO:DBO e da eficiência da biodigestão anaeróbia, conclui-se que as medições deveriam ser feitas em intervalos de tempo maiores, favorecendo uma melhor relação de coleta de biogás com a redução da carga orgânica, visto que o fator limitante dessas coletas foi a cessão da produção de biogás. No Segundo Experimento ficou evidente uma linearidade entre produção de biogás e redução da carga orgânica, pois quanto mais biogás foi produzido, maior foi a redução dos parâmetros físico-químicos. Em termos de valores absolutos desses parâmetros, conclui-se que a ARC não possui uma característica padrão de DQO, DBO<sub>5</sub>, ST, SF e SV, pois estes variam de acordo com a quantidade diária de grãos processados, inerente a safra, o mês de colheita ou o horário de coleta, o percentual de grãos cereja, a quantidade de água usada com ou sem recirculação, entre outros aspectos, que influenciam na significativa oscilação desses parâmetros.
- Quanto à produção de biogás, o aproveitamento energético não seria viável ao considerar-se o presente estudo, até por isso não se alcançando o objetivo de calcular a energia a ser produzida com a produção de CH<sub>4</sub> obtido no experimento. Isto pois, a produção ocorreu de forma irregular, reduzida e a baixas porcentagens de CH<sub>4</sub>. Mas visto que na literatura foram encontrados resultados satisfatórios de produção de CH<sub>4</sub>, em termos absolutos e relativos à redução de parâmetros físico-químicos como a DQO, DBO<sub>5</sub> e SV, conclui-se que provavelmente devem ter ocorrido algumas falhas de manejo do sistema como alterações bruscas de temperatura em decorrência do mau contato da fiação da resistência e vazamentos. Analisando pontualmente o comportamento dos biodigestores, conclui-se que existe a possibilidade de produção de CH<sub>4</sub> sem a necessidade de inóculo, a exemplo de A4 comparado aos demais. Mas vale lembrar que A1 apresentou semelhante comportamento antes de ser adicionado inóculo apesar de B1 e B2 apresentarem baixos teores de CH<sub>4</sub> com pouca produção de biogás. Logo, a adição de inóculo se mostrou preferível para sua produção.

- Quanto ao uso do biogás para torrefação, conforme os resultados teóricos, este não depende somente da quantidade de ARC a ser produzida na fazenda, mas também de sua carga orgânica característica, atribuída a sua DQO. Isto pois, calculados em função da DQO, o Cenário I foi favorável, enquanto que os Cenários II e III, desfavoráveis. Havendo a possibilidade de estoque do biogás, com separação de CH<sub>4</sub> como forma de otimizar o armazenamento e a combustão, pode-se promover grandes economias ao evitar a compra de GLP se houver um bom manejo do efluente para a produção de biogás e, sobretudo, se a produção real condizer com a produção teórica.

## 6.1 Recomendação para Trabalhos Futuros

De maneira a promover um melhor manejo dos biodigestores assim como novas pesquisas com a ARC, a seguir estão listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Fazer o experimento em triplicata.
- No mesmo dia de coleta das amostras, coletar de 30 em 30 minutos, ou de hora em hora, e verificar se há grandes diferenças nos parâmetros físico-químicos entre as ARC's coletadas em diferentes horários, como ocorreu entre o Primeiro e Segundo Experimento.
- Quando houver gasômetro, que as mangueiras de conexão ao biodigestor não sejam tão longas. Os gasômetros, nas proporções do presente estudo, poderiam ter sido menores. Como havia gasômetro, poderia ter sido colocado mais substrato nos biodigestores. Portanto, atentar para as proporções dos equipamentos a serem usados.
- Adicionar nitrogênio na ARC antes de colocá-las nos biodigestores de maneira a obter um melhor balanço C:N e otimizar as atividades microbiológicas do meio.
- Avaliar a Atividade Metanogênica Específica (AME), que concerne a taxa de produção de CH<sub>4</sub>, ou seja, quanto mais CH<sub>4</sub> for produzido em um determinado intervalo de tempo, maior será a AME, que serve como indicador da qualidade da biodigestão.
- Além do uso da ARC para a produção de biogás, esta pode ser utilizada para produzir bioetanol, ou na produção de alimentos para animais. Sistemas de tratamento tipo *wetlands* mais eficientes também é uma alternativa.

- Pesquisar selos de sustentabilidade que podem agregar valor ao café cultivado na propriedade e sirvam de incentivo para a implementação de projetos de tratamento da ARC.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Resolução ANP n° 685 de 29 de junho de 2017: Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 de junho de 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 71 p., 2004.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Relatório Síntese. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. 61 p., 2017. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf)>. Acesso em 20/01/2018

BARROS, R.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, p. 150–164, 2014.

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos : gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro : Interciência, 2012.

BEYENE, A. et al. Experimental evaluation of anaerobic digestion for coffee wastewater treatment and its biomethane recovery potential. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 7, p. 1881–1886, 2014.

BOOPATHY, R. Inoculum source for anaerobic fermentation of coffee pulp. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 26, n. 6, p. 588–594, 1987.

BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. v. 47, p. 1391–1401, 2006.

BRASIL. Lei n°12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n°9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRASIL. Lei n° 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 de dezembro de 2017.

BRASIL. Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima. Disponível em <[http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)>. Acesso em 21/01/2018.

BRASIL. Decreto n° 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê



Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 23 de dezembro de 2010.

Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais - CEPremG. Banco de Dados. Disponível em <<https://cepremg.unifei.edu.br/index.html>>. Acesso em 23/01/2018.

CENTRO DE TECNOLOGIS DO GÁS -CTGÁS. Dados de Unidades de Conversão. Disponível em <<https://fr.scribd.com/document/341803477/dados-unidade-conversao-pdf>>. Acesso em 01/02/2018.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CODIGNOLE, F. et al. Anaerobic Digestion of Liquid Fraction Coffee Grounds at Laboratory Scale : Evaluation of the Biogas Yield. **Energy Procedia**, v. 0, n. May, p. 1–6, 2016.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Manual do Usuário do Programa de Computador**, 61p. 2006. Disponível em <[http://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/manual\\_aterro.zip](http://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/manual_aterro.zip)>. Acesso em 27/12/2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Séries Históricas. Disponível em <[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos)>. Acesso em 16/08/2017

Consórcio Pesquisa do Café. Disponível em <<http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/420-aprespdfviiiispcb>>. Acesso em 22/01/2018.

CORRO, G. et al. Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 471–481, 2013.

**Departamento de Operações de Comércio Exterior – DECEX**. Disponível em <<http://www.mdic.gov.br/legislacao/9-assuntos/categ-comercio-exterior/112-sistemas-on-line-20>>. Acesso em 21/01/2018.

DEVI, R.; SINGH, V.; KUMAR, A. COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1853–1860, 2008.

ELETROBRÁS Centrais Elétricas Brasileiras. Eficiência Energética no Uso de Vapor - Manual Prático. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196p.

FANTOZZI, F.; BURATTI, C. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester. **Bioresource**

**Technology**, v. 100, n. 23, p. 5783–5789, 2009.

FERRELL, J.; COCKERILL, K. Closing coffee production loops with waste to ethanol in Matagalpa, Nicaragua. **Energy for Sustainable Development**, v. 16, n. 1, p. 44–50, 2012.

FEZZANI, B.; CHEIKH, R. BEN. Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1628–1634, 2010.

FIA, F. R. L. et al. Treatment of wastewater from coffee bean processing in anaerobic fixed bed reactors with different support materials: Performance and kinetic modeling. **Journal of Environmental Management**, v. 108, p. 14–21, 2012.

FRONDIZI et al. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Guia de Orientação**. 132p. 2009.

GONZALEZ-RIOS, O. et al. Impact of “ecological” post-harvest processing on coffee aroma: II. Roasted coffee. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, n. 3–4, p. 297–307, 2007.

GOUVEA, B. M. et al. Feasibility of ethanol production from coffee husks. **Biotechnology Letters**, v. 31, n. 9, p. 1315–1319, 2009.

HARSONO, S. S. et al. Second Generation Bioethanol from Arabica Coffee Waste Processing at Smallholder Plantation in Ijen Plateau Region of East Java. **Procedia Chemistry**, v. 14, p. 408–413, 2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Fourth Assessment Report (AR4). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC**. 996p. 2007. Disponível em <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4\\_wg1\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf)>. Acesso em 15/01/2018.

International Energy Agency - IEA. Disponível em <<http://www.iea.org/>>. Acesso em 15/05/2017.

JAYACHANDRA, T.; VENUGOPAL, C.; APPAIAH, K. A. A. Energy for Sustainable Development Utilization of phytotoxic agro waste — Coffee cherry husk through pretreatment by the ascomycetes fungi *Mycotypha* for biomethanation. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 1, p. 104–108, 2011.

LEIFA, F.; PANDEY, A.; SOCCOL, C. R. Production of *Flammulina velutipes* on Coffee Husk and Coffee Spent-ground. v. 44, p. 205–212, 2001.

LI, Y.; PARK, S. Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 821–826, 2011.

LUZ, F. C. et al. Analysis of Residual Biomass Fast Pyrolysis at Laboratory Scale: Experimental and Numerical Evaluation of Spent Coffee Powders Energy Content. *Energy Procedia*, v. 105, n. May, p. 817–822, 2017.

MACHADO, B. G.; MELO, T.C.C.; LASTRES, L.F.M. Utilização de gás Natural em Motores e Cenários do Uso no Brasil. **Universidade Petrobras**. Maio, 2007. 89p.

MAZZAFERA, P. Degradation of caffeine by microorganisms and potential use of decaffeinated coffee husk and pulp in animal feeding. p. 815–821, 2002.

MENESES-JÁCOME, A. et al. Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 1249–1262, 2016.

MERCADO MINEIRO. **Gás de Cozinha**: Pesquisa de preços de Gás de Cozinha (Botijão e Cilindro). 2017. Disponível em: <<http://www.mercadomineiro.com.br/pesquisa/gas-cozinha-pesquisa-precos>> Acesso em 20 de dezembro de 2017.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa nº 26, de 18 de dezembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais no domínio do Estado de Minas Gerais. **Diário do Executivo**, Minas Gerais, 30 de dezembro de 2008.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS - MDIC. Disponível em < <http://www.mdic.gov.br/>>. Acesso em 15/05/17

MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 45–58, 2012.

NAIR, R. B.; LENNARTSSON, P. R.; TAHERZADEH, M. J. Bioethanol Production From Agricultural and Municipal Wastes. **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**, p. 157–190, 2017.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1986.

NOVITA, E. Biodegradability Simulation of Coffee Wastewater Using Instant Coffee. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 9, p. 217–229, 2016.

OBIUKWU, O. O.; GREMA, L. U. The Optimum Mesophilic Temperature of Batch Process Biogas Production from Animal-based Wastes. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 8, n. 16, p. 1772–1776, 2014.

OLIVEIRA, L. S. et al. Evaluation of untreated coffee husks as potential biosorbents for treatment of dye contaminated waters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 155, n. 3, p. 507–512, 2008.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. Dados históricos. Disponível em <[http://www.ico.org/pt/new\\_historical\\_p.asp?section=Estat%EDstica](http://www.ico.org/pt/new_historical_p.asp?section=Estat%EDstica)>. Acesso em 15/05/2017.

PAGÉS-DÍAZ, J. et al. Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays. **Chemical Engineering Journal**, v. 245, p. 89–98, 2014.

PANDEY, A. et al. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochem. Eng. J.**, v. 6, p. 153–162, 2000.

POULSEN, T. G.; ADELARD, L. Improving biogas quality and methane yield via co-digestion of agricultural and urban biomass wastes. **Waste Management**, v. 54, p. 118–125, 2016.

PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M. Produção de Biogás no Tratamento dos Efluentes Líquidos do Processamento de Coffea arabica L. em Reator Anaeróbico UASB para o Potencial Aproveitamento Na Secagem do Café. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, n. 3, p. 938–947, 2008.

PRATA, E. R. B. A.; OLIVEIRA, L. S. Fresh coffee husks as potential sources of anthocyanins. v. 40, p. 1555–1560, 2007.

PUEBLA, C. Y. G.; PÉREZ, C. S. R.; HERNÁNDEZ, J. J. POSTHARVEST : BIOLOGY AND TECHNOLOGY Performance of a UASB reactor treating coffee wet wastewater Digestión anaerobia , aguas residuales de café , reactor UASB. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 23, n. 2, p. 50–56, 2014.

RIBEIRO, E. M. **Avaliação da Produção de Biogás em Aparato Experimental e seu Potencial Técnico e Econômico para Geração de Energia Elétrica em Aviários de Postura**. [s.l.] UNIFEI, Itajubá, 2015.

ROSSMANN, M. et al. Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: Removal of nutrients and phenolic compounds. **Ecological Engineering**, v. 49, p. 264–269, 2012.

ROSSMANN, M. et al. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 912–919, 2013.

SELVAMURUGAN, M. et al. High Rate Anaerobic Treatment of Coffee Processing. **Methods**, v. 7, n. 2, p. 129–136, 2010.

SELVAMURUGAN, M.; DORAISAMY, P.; MAHESWARI, M. An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 12, p. 1686–1690, 2010.

SHANKARANAND, V. S.; LONSANE, B. K. Coffee husk : an inexpensive substrate for production of citric acid by *Aspergillus niger* in a solid-state fermentation system. v. 10, p. 165–168, 1994.

SHEETS, J. P. et al. Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. **Waste Management**, 2015.

SHENOY, D. et al. A study on bioethanol production from cashew apple pulp and coffee pulp waste. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 10, p. 4107–4111, 2011.

SILVA DOS SANTOS, I. F. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, n. May 2017, p. 54–63, 2018.

SINGHANIA, R. R.; PATEL, A. K.; PANDEY, A. Biotechnology for Agricultural Waste Recycling. **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**, p. 223–240, 2017.

SPEECE, R. E. **Anaerobic Biotechnology and Odor/Corrosion Control for Municipalities and Industries**. Nashville: Archae Press, 2008.

VÄISÄNEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPPONEN, L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. **Waste Management**, 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WANG, X. et al. Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: Mixture design and central composite design. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 172–178, 2013.

WILSON, L. et al. Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 10, p. 1330–1337, 2010.

YADIRA, P. S. B. et al. Bioethanol production from coffee mucilage. **Energy Procedia**, v. 57, p. 950–956, 2014.

YONG, Z. et al. Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. **Renewable Energy**, v. 78, p. 527–530, 2015.

ZHAO, C. Effect of temperature on biogas production in anaerobic treatment of domestic wastewater UASB system in Hammarby Sjöstadverket. **Royal Institute of Technology (KTH)**, 2011.

## ANEXOS

### Anexo I

<b>Materiais para cada biodigestor</b>
Garrafa PET com tampa
1 pino de bicicleta <i>Shrader</i> (sem válvula)
Mangueira Alta Pressão 1000 psi 5/16"
Registro Regulador Gás Alta Pressão 2 Saídas 5/16" (Válvula)
Cola de sapato (Cascola)
2 braçadeiras
Câmara de ar de bicicleta (fragmento, colocado na parte interna da tampa da garrafa)
Teflon

<b>Sistema de aquecimento</b>
Pote de plástico 50L
Água para preenchimento do pote
Termostato Tiwa 20/120°C 30A modelo Robertshaw
Resistência em "U" 500 W

### Anexo II

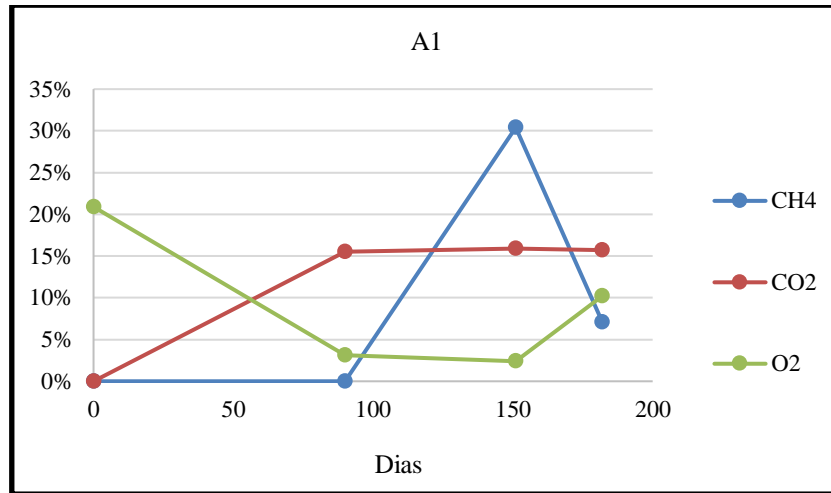
<b>Medidores de pressão</b>	
a) Manômetro vertical 240 psi /16 bar com rosca 1/4" BSP e caixa em ABS/Seco no Ø 53 mm	
b) Manômetro em "U"	5 braçadeiras
	1,5 m de mangueira cristal silicone 5/16"
	Folha A4 de papel milimetrado
	10 Parafusos autoatarraxante, cabeça panela, 2,9 mm x 13 mm
	Fita métrica 150 cm

### Anexo III

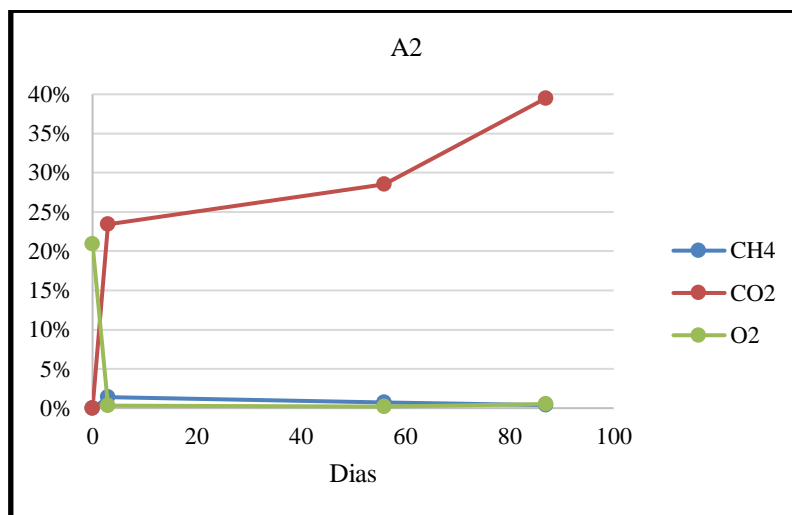
<b>Gasômetro</b>
4 tubos PVC Ø 50 mm de 1m
1 tubo PVC Ø 150 mm de 1m
4 tampões PVC Ø 50 mm de 1m
1 tampão PVC Ø 150 mm de 1m
4 Anéis de Vedação tipo O'ring Ø 50 mm de 1m
1 Anéis de Vedação tipo O'ring Ø 150 mm de 1m

8 pinos de bicicleta *Shrader* (4 com válvula; 4 sem válvula)

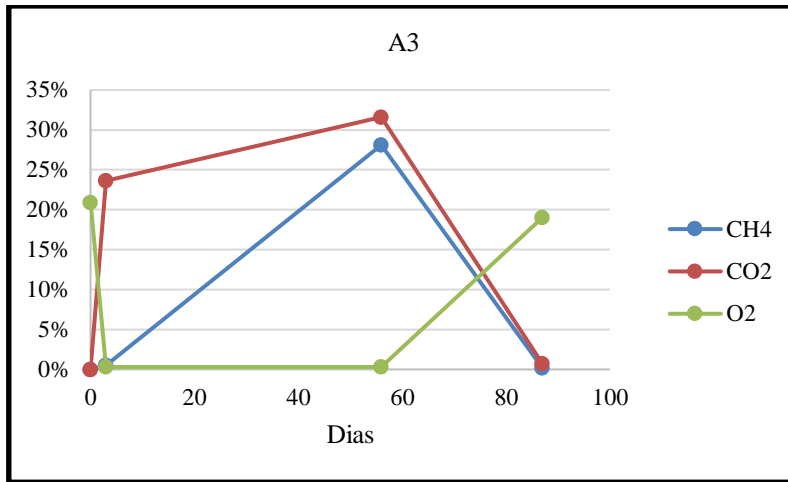
## Anexo IV



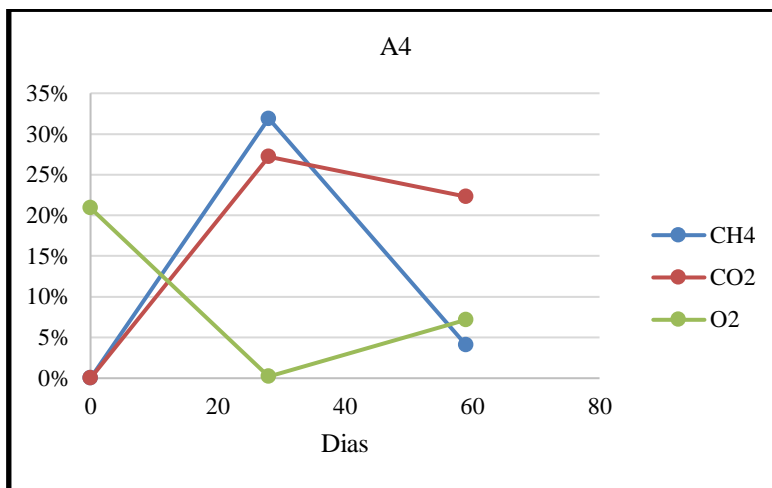
Composição do biogás do biodigestor A1.



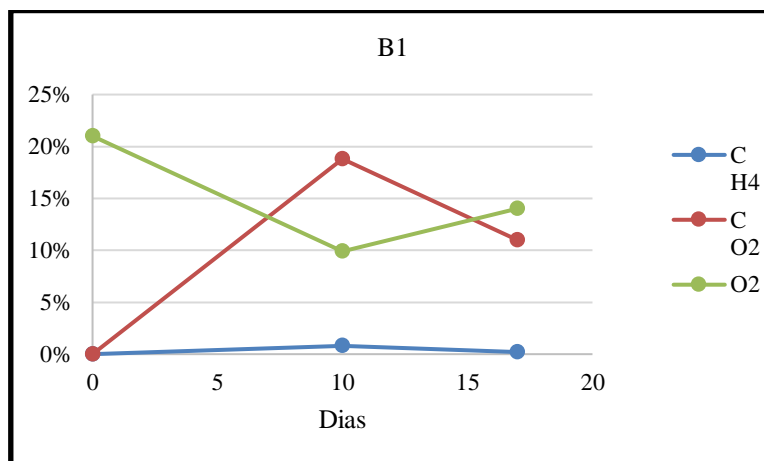
Composição do biogás do biodigestor A1.



Composição do biogás do biodigestor A3.

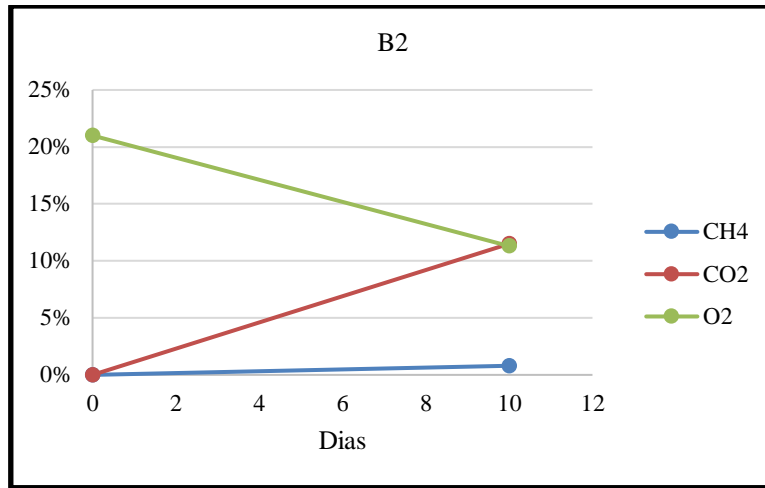


Composição do biogás do biodigestor A4.

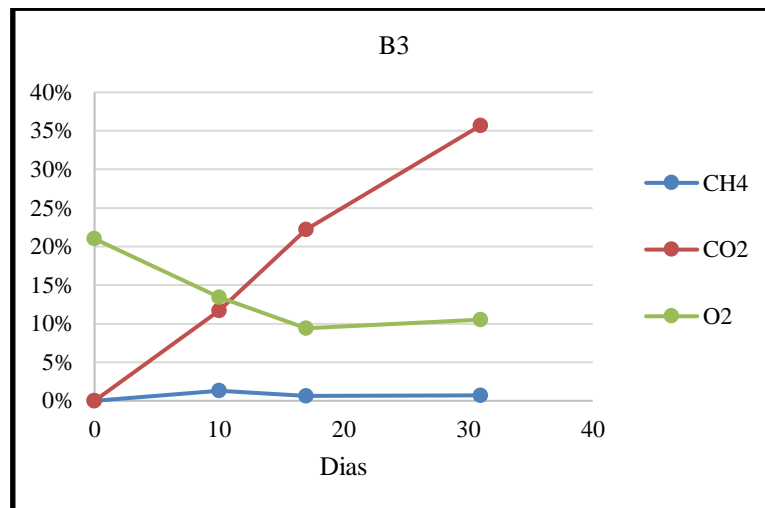


Composição do biogás do biodigestor B1.

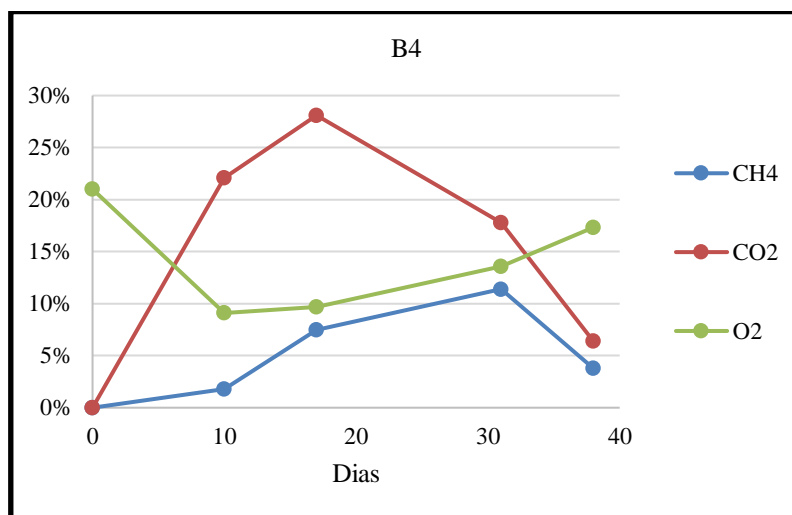




Composição do biogás do biodigestor B2.



Composição do biogás do biodigestor B3.



Composição do biogás do biodigestor B4.

## Anexo V

### Análise de Viabilidade Econômica – Cenário I

Ano	Saída	Entrada	FC <sub>t</sub>	VP <sub>t</sub>	VP <sub>acumulado</sub>
0	R\$ 34.247,36	R\$ 0,00	-R\$ 34.247,36	-R\$ 34.247,36	-R\$ 34.247,36
1	R\$ 0,00	R\$ 8.004,88	R\$ 8.004,88	R\$ 7.147,21	-R\$ 27.100,14
2	R\$ 0,00	R\$ 8.084,93	R\$ 8.084,93	R\$ 6.445,26	-R\$ 20.654,89
3	R\$ 0,00	R\$ 8.165,78	R\$ 8.165,78	R\$ 5.812,24	-R\$ 14.842,65
4	R\$ 0,00	R\$ 8.247,44	R\$ 8.247,44	R\$ 5.241,39	-R\$ 9.601,25
5	R\$ 0,00	R\$ 8.329,91	R\$ 8.329,91	R\$ 4.726,61	-R\$ 4.874,64
6	R\$ 0,00	R\$ 8.413,21	R\$ 8.413,21	R\$ 4.262,39	-R\$ 612,24
7	R\$ 0,00	R\$ 8.497,34	R\$ 8.497,34	R\$ 3.843,77	R\$ 3.231,52
8	R\$ 0,00	R\$ 8.582,31	R\$ 8.582,31	R\$ 3.466,25	R\$ 6.697,78
9	R\$ 0,00	R\$ 8.668,14	R\$ 8.668,14	R\$ 3.125,82	R\$ 9.823,59
10	R\$ 0,00	R\$ 8.754,82	R\$ 8.754,82	R\$ 2.818,82	R\$ 12.642,41
11	R\$ 0,00	R\$ 8.842,37	R\$ 8.842,37	R\$ 2.541,97	R\$ 15.184,38
12	R\$ 0,00	R\$ 8.930,79	R\$ 8.930,79	R\$ 2.292,31	R\$ 17.476,69
13	R\$ 0,00	R\$ 9.020,10	R\$ 9.020,10	R\$ 2.067,17	R\$ 19.543,87
14	R\$ 0,00	R\$ 9.110,30	R\$ 9.110,30	R\$ 1.864,15	R\$ 21.408,01
15	R\$ 0,00	R\$ 9.201,40	R\$ 9.201,40	R\$ 1.681,06	R\$ 23.089,08
16	R\$ 0,00	R\$ 9.293,42	R\$ 9.293,42	R\$ 1.515,96	R\$ 24.605,03
17	R\$ 0,00	R\$ 9.386,35	R\$ 9.386,35	R\$ 1.367,07	R\$ 25.972,10
18	R\$ 0,00	R\$ 9.480,21	R\$ 9.480,21	R\$ 1.232,80	R\$ 27.204,90
19	R\$ 0,00	R\$ 9.575,02	R\$ 9.575,02	R\$ 1.111,72	R\$ 28.316,63
20	R\$ 0,00	R\$ 9.670,77	R\$ 9.670,77	R\$ 1.002,54	R\$ 29.319,17

### Análise de Viabilidade Econômica – Cenário II

Ano	Saída	Entrada	FC <sub>t</sub>	VP <sub>t</sub>	VP <sub>acumulado</sub>
0	R\$ 14.333,58	R\$ 0,00	-R\$ 14.333,58	-R\$ 14.333,58	-R\$ 14.333,58
1	R\$ 2.463,04	R\$ 2.770,92	R\$ 307,88	R\$ 274,89	-R\$ 14.058,69
2	R\$ 2.487,67	R\$ 2.798,63	R\$ 310,96	R\$ 247,89	-R\$ 13.810,79
3	R\$ 2.512,55	R\$ 2.826,62	R\$ 314,07	R\$ 223,55	-R\$ 13.587,25
4	R\$ 2.537,67	R\$ 2.854,88	R\$ 317,21	R\$ 201,59	-R\$ 13.385,65
5	R\$ 2.563,05	R\$ 2.883,43	R\$ 320,38	R\$ 181,79	-R\$ 13.203,86
6	R\$ 2.588,68	R\$ 2.912,26	R\$ 323,58	R\$ 163,94	-R\$ 13.039,92
7	R\$ 2.614,57	R\$ 2.941,39	R\$ 326,82	R\$ 147,84	-R\$ 12.892,09
8	R\$ 2.640,71	R\$ 2.970,80	R\$ 330,09	R\$ 133,32	-R\$ 12.758,77
9	R\$ 2.667,12	R\$ 3.000,51	R\$ 333,39	R\$ 120,22	-R\$ 12.638,55
10	R\$ 2.693,79	R\$ 3.030,51	R\$ 336,72	R\$ 108,42	-R\$ 12.530,13
11	R\$ 2.720,73	R\$ 3.060,82	R\$ 340,09	R\$ 97,77	-R\$ 12.432,36
12	R\$ 2.747,94	R\$ 3.091,43	R\$ 343,49	R\$ 88,17	-R\$ 12.344,20
13	R\$ 2.775,42	R\$ 3.122,34	R\$ 346,93	R\$ 79,51	-R\$ 12.264,69
14	R\$ 2.803,17	R\$ 3.153,57	R\$ 350,40	R\$ 71,70	-R\$ 12.192,99
15	R\$ 2.831,20	R\$ 3.185,10	R\$ 353,90	R\$ 64,66	-R\$ 12.128,33
16	R\$ 2.859,51	R\$ 3.216,95	R\$ 357,44	R\$ 58,31	-R\$ 12.070,03
17	R\$ 2.888,11	R\$ 3.249,12	R\$ 361,01	R\$ 52,58	-R\$ 12.017,45
18	R\$ 2.916,99	R\$ 3.281,61	R\$ 364,62	R\$ 47,42	-R\$ 11.970,03
19	R\$ 2.946,16	R\$ 3.314,43	R\$ 368,27	R\$ 42,76	-R\$ 11.927,27
20	R\$ 2.975,62	R\$ 3.347,57	R\$ 371,95	R\$ 38,56	-R\$ 11.888,72

Análise de Viabilidade Econômica – Cenário III

Ano	Saída	Entrada	FC <sub>t</sub>	VP <sub>t</sub>	VP <sub>acumulado</sub>
0	R\$ 16.352,64	R\$ 0,00	-R\$ 16.352,64	-R\$ 16.352,64	-R\$ 16.352,64
1	R\$ 2.155,16	R\$ 3.078,80	R\$ 923,64	R\$ 824,68	-R\$ 15.527,96
2	R\$ 2.176,71	R\$ 3.109,59	R\$ 932,88	R\$ 743,68	-R\$ 14.784,27
3	R\$ 2.198,48	R\$ 3.140,68	R\$ 942,21	R\$ 670,64	-R\$ 14.113,63
4	R\$ 2.220,46	R\$ 3.172,09	R\$ 951,63	R\$ 604,78	-R\$ 13.508,85
5	R\$ 2.242,67	R\$ 3.203,81	R\$ 961,14	R\$ 545,38	-R\$ 12.963,48
6	R\$ 2.265,09	R\$ 3.235,85	R\$ 970,75	R\$ 491,81	-R\$ 12.471,66
7	R\$ 2.287,75	R\$ 3.268,21	R\$ 980,46	R\$ 443,51	-R\$ 12.028,15
8	R\$ 2.310,62	R\$ 3.300,89	R\$ 990,27	R\$ 399,95	-R\$ 11.628,20
9	R\$ 2.333,73	R\$ 3.333,90	R\$ 1.000,17	R\$ 360,67	-R\$ 11.267,53
10	R\$ 2.357,07	R\$ 3.367,24	R\$ 1.010,17	R\$ 325,25	-R\$ 10.942,28
11	R\$ 2.380,64	R\$ 3.400,91	R\$ 1.020,27	R\$ 293,30	-R\$ 10.648,97
12	R\$ 2.404,44	R\$ 3.434,92	R\$ 1.030,48	R\$ 264,50	-R\$ 10.384,48
13	R\$ 2.428,49	R\$ 3.469,27	R\$ 1.040,78	R\$ 238,52	-R\$ 10.145,96
14	R\$ 2.452,77	R\$ 3.503,96	R\$ 1.051,19	R\$ 215,09	-R\$ 9.930,86
15	R\$ 2.477,30	R\$ 3.539,00	R\$ 1.061,70	R\$ 193,97	-R\$ 9.736,89
16	R\$ 2.502,07	R\$ 3.574,39	R\$ 1.072,32	R\$ 174,92	-R\$ 9.561,98
17	R\$ 2.527,09	R\$ 3.610,14	R\$ 1.083,04	R\$ 157,74	-R\$ 9.404,24
18	R\$ 2.552,37	R\$ 3.646,24	R\$ 1.093,87	R\$ 142,25	-R\$ 9.261,99
19	R\$ 2.577,89	R\$ 3.682,70	R\$ 1.104,81	R\$ 128,28	-R\$ 9.133,71
20	R\$ 2.603,67	R\$ 3.719,53	R\$ 1.115,86	R\$ 115,68	-R\$ 9.018,04