



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DEROVIL ANTONIO DOS SANTOS FILHO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE INÓCULOS E DESENVOLVIMENTO DE REATOR
HORIZONTAL NO PROCESSO DA BIODIGESTÃO DE RESÍDUO SÓLIDO
ORGÂNICO**

Recife
2018

DEROVIL ANTONIO DOS SANTOS FILHO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE INÓCULOS E DESENVOLVIMENTO DE REATOR
HORIZONTAL NO PROCESSO DA BIODIGESTÃO DE RESÍDUO SÓLIDO
ORGÂNICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho.

Coorientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- S237e Santos Filho, Derovil Antonio dos.
Estudo da influência de inóculos e desenvolvimento de reator horizontal no processo da biodigestão de resíduo sólido orgânico / Derovil Antonio dos Santos Filho. – 2018.
113 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho.
Coorientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Resíduos orgânicos. 3. Ensaio BMP. 4. Reator horizontal. 5. Inovação. I. Motta Sobrinho, Maurício Alves da. (Orientador). II. Jucá, José Fernando Thomé. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-33



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Doutorado

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE INÓCULOS E DESENVOLVIMENTO DE REATOR
HORIZONTAL NO PROCESSO DA BIODIGESTÃO DE RESÍDUO SÓLIDO
ORGÂNICO**

defendida por

Derovil Antonio dos Santos Filho

Considera o candidato: APROVADO

Recife, 08 de março de 2018

Orientador - Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho – UFPE

Coorientador – Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá - UFPE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho - UFPE
(orientador)

Dr. Helder de Barros Guimarães – Exército Brasileiro
(examinador externo)

Prof. Dr. Valderi Duarte Leite – UEPB
(examinador externo)

Prof. Dr. Valmir Cristiano Marques de Arruda – UFRPE
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha– UFPE
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes – UFPE
(examinadora interna)

Dedico esse trabalho ao meu PAI (*in memoriam*), pelo eterno exemplo de força, coragem e alegria de viver. À Laís Oliveira, minha esposa, por ter contribuído para o sucesso. Ao Miguel Santos, meu filho, que nos momentos de dificuldade seu sorriso nos deu força.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos e por permitir que mais um objetivo fosse atingido em minha vida.

À Laís Oliveira, minha esposa, cúmplice e companheira em todos os momentos, pela força, incentivo nos momentos de dificuldades, os quais não foram poucos, e principalmente por está cuidando do nosso filho.

Aos meus pais, Derovil, Lindinalva e Cleide (*in memoriam*) pela educação, pelo carinho e principalmente pelo amor.

À minha avó Amara (*in memoriam*), também contribuiu para minha educação.

Aos meus irmãos Ana, Darly, Michelly e Jeane, meus eternos amigos.

À Thaís Oliveira, minha cunhada, pelo carinho e belas palavras de estímulo.

Aos meus sogros, Mirian e Ricardo, pela amizade e o estímulo.

A toda minha família, pelos bons momentos de convivência familiar, os quais foram indispensáveis para conclusão e sucesso de mais uma etapa de minha vida.

Ao amigo e orientador Maurício Motta pela confiança e pela forma de orientar nessa longa caminhada.

Ao professor e orientador Fernando Jucá, por sua amizade pela confiança depositada e por suas contribuições para o referido estudo.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo apoio desta pesquisa.

Ao Engenheiro Antônio Brito e Sr. Gutemberg (UFPE), pela sua amizade e ajuda.

Aos amigos de todas as horas: Luiz, Edécio, Talita, Sávio, Daniela, pelo apoio, pelas conversas e compreensões.

Aos meus companheiros de labuta: Charles, Cleber, Jean, Moraes, Bruno Souza, Bruno Alves, Ebson, Adson, Dayse, Geovânia, Jozivan, Edna, Camila, Hilton, Karla, Bruno Rocha, Santana e G. Neves, por toda ajuda e compreensão nos momentos de dificuldade.

Ao Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) e o Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais (GPTA), pelo companheirismo.

A todos que compõem o PCSV (Pelotão de Comando e Serviço), que mesmo a distância nos ajudou a terminar esse trabalho.

A Finep e a Facepe pelo apoio financeiro, que possibilitou a realização deste trabalho.

RESUMO

O manejo inadequado dos resíduos sólidos e semissólidos orgânicos pode resultar na poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e do ar, devido a alta carga orgânica. Nesse sentido, a biodigestão anaeróbia é uma alternativa para o tratamento desses materiais, bem como produção de biometano e energia. Assim, este trabalho desenvolveu um reator horizontal (pedido de depósito e o nº do processo: BR1020180073486) e através dele avaliou a produção de biometano oriundo da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, proveniente do Centro de Abastecimento e Logístico de Pernambuco (CEASA-PE). Sendo avaliado diferentes inóculos: líquido ruminal bovino com e sem peneiramento, lodo de esgoto e esterco caprino, bem como a adição de glicerina e agente alcalinizante (bicarbonato de sódio). Na primeira etapa do estudo foi realizada a caracterização inicial do resíduo sólido orgânico e dos inóculos, separadamente, e se pode observar que todos resíduos estudados têm um elevado potencial de biodegradabilidade. Em contraposição, o resíduo sólido e o esterco caprino possuem valores de pH e umidade que podem inibir a biodigestão anaeróbia, além disso, os inóculos líquido ruminal, lodo e o esterco caprino possuem uma relação carbono/nitrogênio inferior a proporção requerida pelos micro-organismos decompositores. Em um segundo momento, foram realizados ensaios de Potencial Bioquímico de Metano, para avaliar o potencial máximo de produção de biometano, e se obteve uma produção, aproximadamente, 3,5 vezes maior na codigestão do substrato com os diferentes inóculos, do que com os inóculos isolados, e com o inóculo aclimatado, em especial, esse incremento foi de 17 e 19 vezes. Além disso, a maior geração de biogás e metano foi para as configurações codigeridas com a mistura lodo, líquido ruminal bovino e esterco caprino (aclimatado ou não). A adição da glicerina, por sua vez, não se mostrou boa configuração, pois foi, aproximadamente, 8 vezes menor, que as sem adição do referido resíduo. Também foi projetado e construído um reator horizontal piloto com condições reais de operação, onde foi aclimatado um dos inóculos por um período de 120 dias (gerando 254,35 NL) e codigerido o mesmo como resíduo sólido orgânico, produzindo com isso, 711,20 NL de biogás (também em 120 dias) com o teor médio de metano de 50%. E por fim, foi analisado a remoção de carga orgânica antes e depois do processo de biodigestão anaeróbia, tanto nos ensaios de Potencial Bioquímico de Metano, quanto no reator horizontal, onde houve uma redução que variou entre -0,78 e -16,30%. A partir dos estudos realizados no reator horizontal, foi possível estimar a produção de energia elétrica que poderá ser oriunda do resíduo sólido orgânico do CEASA-PE, codigerido com inóculo aclimatado que resultou em aproximadamente 175.626,00 kWh/mês ou 5854,2 kWh/dia.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos. Ensaio BMP. Reator horizontal. Inovação.

ABSTRACT

Improper handling of solid organic and semi-solid waste can result in pollution of surface and ground water, soil and air due to high organic load. In this sense, anaerobic biodigestion is an alternative for the treatment of these materials, but in the production of biomethane and energy. Thus, this work developed a horizontal reactor (request of deposit and process no: BR1020180073486) and through it evaluated the production of biomethane native of the anaerobic codigestión of organic solid waste, from the Center of Supply and Logistics of Pernambuco (CEASA-PE). Being evaluated different inoculums: bovine ruminal liquid with and without sieving, sewage sludge and goat manure, as well as the addition of glycerin and alkalizing agent (sodium bicarbonate). In the first stage of the study, the initial characterization of the organic solid residue and of the inocula was carried out separately, and it can be observed that, all residues studied have a high biodegradability potential. In contrast, the solid residue and goat manure have pH and humidity values that can inhibit anaerobic biodigestion, in addition, the ruminal liquid, sludge and goat manure have a carbon/nitrogen ratio lower than the ratio required by microorganisms decomposers. Second, methane biochemical potential tests were carried out to evaluate the maximum biomethane production potential, and a 3.5 times greater production of substrate codigestion was obtained with the different inocula than with the isolated inocula, and with acclimated inoculum, in particular, this increase was 17 and 19 times. In addition, the largest generation of biogas and methane was for the codigester configurations with the mixture of sludge + bovine rumen liquid + goat manure (acclimatized or not). The addition of the glycerin, in its turn, did not show good configuration, was about 8 times lower, than those without addition of said residue. A pilot horizontal reactor with real operating conditions was also designed and constructed, where one of the inoculants was acclimatized for a period of 120 days (generating 254.35 NL) and co-degenerated the same as organic solid waste, producing 711.20 NL of biogas (also in 120 days) with the average methane content of 50%. Finally, organic matter removal was analyzed before and after the anaerobic biodigestion process, both in methane biochemical potential tests and in the horizontal reactor, where there was a reduction that varied between -0.78 and -16.30%. From the studies carried out in the horizontal reactor, it was possible to estimate the electric energy production that could come from the organic solid residue of CEASA-PE, codigerido with acclimated inoculum that resulted in approximately 175,626.00 kWh / month or 5854,2 kWh/day.

Keywords: Organic Residues. BMP Test. horizontal Reactor, Innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo simplificado de gerenciamento de resíduos sólidos.....	22
Figura 2 -	Índice de abrangência da coleta de RSU no Brasil (%)......	23
Figura 3 -	Esquema geral da reação de transesterificação.....	35
Figura 4 -	Estágios do processo de digestão anaeróbica.....	37
Figura 5 -	Efeito da temperatura na atividade anaeróbia.....	40
Figura 6 -	Geração de metano por tonelada de esterco em massa fresca.....	44
Figura 7 -	Reatores para produção de metano a partir de biomassa residual.....	47
Figura 8 -	Número de plantas de biogás por país da Europa.....	50
Figura 9 -	Plantas de biogás no Brasil.....	51
Figura 10 -	Número de reatores brasileiros por porte.....	52
Figura 11 -	Coleta do resíduo sólido orgânico no CEASA-PE.....	55
Figura 12 -	Quarteamento do resíduo sólido orgânico.....	56
Figura 13 -	Reator utilizado no ensaio BMP.....	58
Figura 14 -	Reatores do ensaio BMP acondicionados em estufa.....	59
Figura 15 -	Fotografia do reator horizontal.....	61
Figura 16 -	Fotografia do interior do reator horizontal.....	62
Figura 17 -	Vistas posterior, lateral esquerda, superior, lateral direita e frontal do reator horizontal.....	62
Figura 18 -	Produção média acumulada de biogás dos diferentes inóculos avaliados.	70
Figura 19 -	Taxa diária média de produção de biogás dos diferentes inóculos avaliados.....	71
Figura 20 -	Análise cromatográfica do biogás produzido pelos diferentes inóculos avaliados, ao longo do tempo.....	72
Figura 21 -	Produção média acumulada de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP.....	73
Figura 22 -	Taxa diária média de produção de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP.....	75
Figura 23 -	Análise cromatográfica do biogás produzido pela codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante, ao longo do tempo no BMP.....	76
Figura 24 -	Produção média acumulada de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina no BMP.....	77
Figura 25 -	Taxa diária média de produção de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina no BMP.....	78

Figura 26 -	Análise cromatográfica do biogás produzido pela codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina, ao longo do tempo.....	79
Figura 27 -	Produção de biogás líquida e Potencial máximo do RSO da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP.....	81
Figura 28 -	Produção de biogás líquida e Potencial máximo do RSO da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina.....	82
Figura 29 -	Relação da Produção acumulada e concentração de metano no período de aclimação no Biodigestor Horizontal.....	87
Figura 30 -	Relação da Produção acumulada e concentração de metano na codigestão do RSO com inóculos aclimatado no Biodigestor Horizontal.....	88
Figura 31 -	Relação de concentração de metano e ácido sulfídrico na codigestão do RSO com inóculos aclimatado no Biodigestor Horizontal.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Percentual de Composição Gravimétrica dos resíduos coletado no Brasil.....	24
Tabela 2 -	Característica química dos resíduos orgânicos.....	27
Tabela 3 -	Característica bioquímica dos resíduos.....	28
Tabela 4 -	Características dos sólidos típicas do lodo de esgoto.....	29
Tabela 5 -	Característica elementar dos lodos de ETE.....	30
Tabela 6 -	Característica bioquímica de lodos de ETEs.....	30
Tabela 7 -	Características típicas do líquido ruminal bovino.....	32
Tabela 8 -	Características típicas do esterco caprino.....	33
Tabela 9 -	Características típicas da glicerina.....	35
Tabela 10 -	Características elementar da glicerina.....	36
Tabela 11 -	Relação C/N de alguns substratos e inóculos.....	42
Tabela 12 -	Quantidade de resíduos sólidos gerados por mês, no ano de 2017, e tratamento/destinação final dos mesmos.....	53
Tabela 13 -	Quantidade de abates por animal no Abatedouro de Paudalho/PE, nos período de 2011 a 2016.....	54
Tabela 14 -	Caracterização físico-química do substrato e dos inóculos.....	66
Tabela 15 -	Caracterização físico-química dos inóculos antes e depois da biodigestão anaeróbia, e variação dos mesmos.....	84
Tabela 16 -	Caracterização físico-química antes e depois da biodigestão anaeróbia da codigestão do RSO com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante com glicerina, e variação dos mesmos.....	84
Tabela 17 -	Caracterização físico-química antes e depois da biodigestão anaeróbia da codigestão do RSO com diferentes inóculos e adição de agente tamponante, e variação dos mesmos.....	85
Tabela 18 -	Caracterização físico-química do substrato e do inóculo.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	Ácidos Graxos Voláteis
AC	Aclimatado
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BMP	Potencial Bioquímico de Metano
CEASA/PE	Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco
CH ₄	Gás metano
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	Gás carbônico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EBA	European Biogas Association
EC	Esterco de Caprino
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FORSU	Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GEE	Gases do Efeito Estufa
H ₂ S	Gás sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
KWh	Kilowatt hora
L	Litro
LRB	Líquido Ruminal Bovino
LRBp	Líquido Ruminal Bovino Penerado
LD	Lodo de esgoto doméstico

L.dia ⁻¹	Litro por dia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
m ³	Metro cúbico
m ³ /tMF	Metro cúbico por tonelada por massa fresca
m ³ CH ₄ /tMF	Metro cúbico de metano por tonelada de resíduo sólido
MJ	Mega Joule
NmL	Normal mililitros (0°C, 1013 hPa)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ppm	Partes por Milhão
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
t	Tonelada
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
Vol. Máx.	Volume máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	18
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1	POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS).....	21
3.2	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	21
3.2.1	Resíduos sólidos urbanos (RSU).....	23
3.2.2	Resíduos sólidos orgânicos.....	25
3.2.2.1	Lodo de estação de tratamento de esgoto.....	28
3.2.2.2	Líquido ruminal bovino.....	30
3.2.2.3	Dejeitos de caprino.....	32
3.2.2.4	Glicerina (resíduo da produção de biodiesel).....	34
3.3	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	36
3.3.1	Fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia.....	39
3.3.1.1	pH.....	39
3.3.1.2	Temperatura.....	39
3.3.1.3	Tempo de detenção hidráulica (TDH).....	41
3.3.1.4	Relação C/N.....	41
3.4	RECOMENDAÇÃO VDI 4630 – ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES.....	42
3.5	ESTIMATIVA DE POTENCIAL DE BIOGÁS.....	42
3.6	INÓCULO.....	43
3.7	CODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	45
3.8	ADIÇÃO DE GLICERINA.....	45
3.9	DIGESTORES.....	46
3.9.1	Tipos de reatores.....	46
3.9.2	Reatores horizontais.....	49
3.10	PANORAMA DE GERAÇÃO DE BIOMETANO NA EUROPA E NO BRASIL.....	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1	LOCAL DO ESTUDO.....	53

4.1.1	CEASA-PE.....	53
4.1.2	Abatedouro de Paudalho.....	54
4.1.3	Estação de Tratamento de Esgoto Dancing Days.....	54
4.1.4	Usina Experimental de Biodiesel.....	55
4.2	COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO, DOS INÓCULOS E DA GLICERINA.....	55
4.3	ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	57
4.3.1	Ensaio do Potencial Bioquímico de Metano.....	57
4.3.2	Desenvolvimento do Reator horizontal em escala de laboratório.....	61
4.3.3	Aclimação no reator de laboratório horizontal.....	63
4.3.4	Produção de biogás e metano do inóculo aclimatado no reator de laboratório horizontal.....	63
4.3.5	Produção de biogás e metano da Co-digestão no reator de laboratório horizontal.....	63
4.4	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS ANTES E DEPOIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	65
4.5	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOMETANO ORIUNDO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICO.....	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E DOS INÓCULOS.....	66
5.2	ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	69
5.2.1	Ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (BMP).....	69
5.2.1.1	Produção de biogás dos inóculos.....	69
5.2.1.2	Produção de biogás da codigestão do substrato com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante no BMP.....	73
5.2.1.3	Produção de biogás da codigestão do substrato com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante e glicerina.....	77
5.2.1.4	Produção líquida de biogás e Potencial máximo do resíduo sólido orgânico	80
5.2.1.5	Análise das condições ambientais antes e depois da biodigestão anaeróbia..	83
5.2.2	Reator de laboratório horizontal.....	86
5.2.2.1	Aclimação e produção de inóculo mesófilo anaeróbio.....	86
5.2.2.2	Produção acumulada de biogás e metano.....	87
5.2.2.3	Análise das condições ambientais antes e depois da biodigestão anaeróbia.	90
5.3	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOMETANO ORIUNDO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS.....	92
6	CONCLUSÕES.....	93

6.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Atualmente tem-se vários questionamentos sobre a questão econômica e ambiental, com isso, é um desafio para o mercado ser produtivo e ter um padrão de consumo menos poluente, nesse sentido, é fundamental tornar o processo mais integrado (CARNEIRO, 2015).

O Programa Ambiental das Nações Unidas e a Organização Meteorológica Ambiental criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, no ano de 1988 (ANDRADE e COSTA, 2008). No entanto, mesmo com a existência do Programa não se fixou qualquer meta específica, deixando essa providência para protocolos subsequentes. Posteriormente, em 1997, foi realizada uma conferência em Kyoto, no Japão, onde os países participantes adotaram o Protocolo de Kyoto (ANDRADE e COSTA, 2008). Entretanto, só entrou em 2005, o Protocolo de Kyoto criou o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que na prática, é o instrumento de compra de “créditos de carbono”, denominados “Reduções Certificadas de Emissões” (RCEs) resultantes de atividades de projeto criado em qualquer país em desenvolvimento, por um país desenvolvido (BRASIL, 2017a).

Sob esse ponto de vista, os projetos do modelo MDL devem, essencialmente, envolver a troca de energia de linhagem fóssil por outra de energia limpa. Ainda se faz necessário a moderação do uso de energia e dos serviços urbanos, visando promover o desenvolvimento sustentável e a redução dos gases que causam o efeito estufa, citados no protocolo de Kyoto (MANETTI *et al.*, 2016).

De acordo com o estudo descrito pelo Observatório do Clima (2016), no período 1970 a 2014, as emissões acumulada do setor de resíduos foram de 1.450.769.630 toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente), que representam cerca de 2,5% das emissões totais do país. Vale salientar que as emissões do ano de 2014, para o setor de tratamento de resíduos, foi de 68.350.264 toneladas de CO₂e, que representa o valor absoluto mais alto desde 1970 (MANETTI *et al.*, 2016).

Com esse cenário, consolida-se uma oportunidade para a sustentabilidade ambiental, social e econômica dos sistemas de gestão de resíduos sólidos, trazendo uma visão sistêmica em relação à gestão de resíduos orgânicos, produção de energia renovável e conservação do ambiente (FELIPETTO, 2009; GOUX *et al.*, 2017).

Diante disso, esse estudo está embasado em 3 (três) Políticas Públicas Nacionais: A primeira é a Lei nº 13.576 de 26 de dezembro de 2017, que é a Política Nacional de

Biocombustíveis (RenovaBio), que visa reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética do Brasil, tanto para a garantia energética quanto para minimizar as emissões de gases causadores do efeito estufa (BRASIL, 2017); a segunda é a Lei 12.187 de 29 de dezembro de 2009, é a Política Nacional sobre Mudança do clima (PNMC), que realiza o compromisso espontâneo do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de diminuição de emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2018) e por fim, a Política Nacional de Resíduo Sólidos, a Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010, que estabelece sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2018).

Diante desse contexto, o tratamento de resíduos orgânicos a partir da biodigestão anaeróbia vem ganhando destaque, não apenas devido a produção de energia renovável, como a obtenção de subprodutos de alto valor agregado. Em relação à aplicação energética, que pode ser direta ou indireta, tem a combustão em caldeiras para geração de calor e a combustão em motores para geração de energia elétrica como principais aplicações (GUNASEELAN, 2009).

Ge *et al.* (2014) mencionam que o uso de resíduo orgânico como substrato para digestão anaeróbia é uma opção ambientalmente correta para o manejo e tratamento desses resíduos. Para isso, deve-se considerar o estudo da biodigestão anaeróbia aplicada a resíduos orgânicos, em grande escala, visando autossuficiência de energia, e que tenha simplicidade operacional, com tecnologia de baixo custo e eficiência satisfatória (FERREIRA, 2015).

Além disso, a necessidade de aumentar a oferta de energia, devido ao incremento do consumo, a partir, principalmente, da metanização da biomassa residual oriunda do agronegócio, culminando em um incremento de 30% da energia renovável, em 2016 (GALVÃO, 2017). Além do mais, houve uma tendência à expansão nos últimos anos, especialmente após a consolidação da geração distribuída e do reconhecimento pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através da Resolução nº 08/2015, a qual faz menção ao valor da concentração de biometano de 96,5% mol, destinado a uso automotivo. Foi também instituída a Resolução Normativa nº 687, 24 de novembro de 2015 (que alterou a Resolução Normativa nº 482, 17 de abril de 2012), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que aprimorou as possibilidades de uso do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Ambas visam incrementar o uso do biometano, oriundo de resíduos orgânicos agrossilvopastoris,

destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o estado brasileiro (ANP, 2015).

A questão emergente e que será tratada neste trabalho diz respeito à disponibilidade dos resíduos orgânicos como fonte de matéria-prima para o processo produtivo do biogás, e tornar relevante o estudo de configuração de reatores e técnicas de maximização da produção do metano a partir da conversão dessa biomassa residual em biometano em Pernambuco e no Brasil, que se torna uma energia renovável, transformando um passivo ambiental em ativo energético de valor econômico agregado.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

De acordo com a FAO (2016), cerca de 1,3 bilhões toneladas de alimentos são perdidas por ano no mundo, já na América Latina este valor é de aproximadamente 127 milhões de toneladas ano. No Brasil, o desperdício chega a 14,6 milhões toneladas por ano (SAVICZKI, 2015).

Segundo o IPEA (2009), 30% do desperdício é oriundo das centrais de abastecimentos, ou seja, aproximadamente 4,38 milhões de toneladas por ano. Considerando, apenas, o Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco (CEASA-PE), tem-se uma produção mensal de resíduos sólidos de cerca de 1.100 toneladas, sendo 90% destes de natureza orgânica (CEASA-PE, 2017).

Os lodos provenientes das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), por sua vez, são gerados em grande quantidade no Brasil. São cerca de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, mesmo considerando que apenas 30% da população urbana têm seu esgoto devidamente coletado e tratado (PEDROZA *et al.*, 2010; SOARES, 2004). A destinação correta do lodo de ETE não é só um problema local, mas também um dos problemas mais urgentes em muitos países (Rizzardini e Goe, 2014).

Ainda, tem-se a problemática dos resíduos agropecuários, que são gerados, principalmente, na zona rural, mas também em matadouros e frigoríficos localizados na região metropolitana das capitais. A geração de líquido ruminal bovino, em especial, apenas no 3º trimestre de 2017, foi de aproximadamente 62.615 milhões de toneladas, oriunda das 2.504.625 cabeças de bovinos abatidas (IBGE, 2017), produzindo, em média, 25 kg de líquido ruminal (MORALES *et al.*, 2006) no Brasil.

Do mesmo modo, o esterco de ovelhas/cabras também pode ser utilizado para fins de produção de metano, o qual tem uma produção de 9,2 m³ de biogás ano e um potencial teórico de produção de dejetos de 0,5 kg/dia (SILVA e PALHA, 2016).

Com a expectativa do aumento de desenvolvimento de pesquisas e tecnologias alternativas para o suprimento energético, busca-se a redução da dependência dos combustíveis fósseis, além de reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GÊNERO *et al.*, 2013; European Commission, 2011).

2 OBJETIVOS

Nessa seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos desse estudo.

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para uma solução tecnológica de aproveitamento de resíduos, proveniente do Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco (CEASA-PE), em reatores de laboratório em batelada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a influência da codigestão de diferentes inóculos e da glicerina bruta no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos (em condições mesofílicas);
- Adequar e aplicar a metodologia, em escala laboratorial, para produção e conservação de inóculo mesofílico anaeróbio para o uso em ensaios de medida do potencial bioquímico de biogás de acordo com requisitos da recomendação VDI 4630;
- Desenvolver um biorreator horizontal que vise avaliar o potencial de metanização a partir da biodegradação anaeróbia de biomassa residual e conse.
- Estimativa da produção de energia elétrica a partir dos resíduos oriundos do Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco - CEASA/PE.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção serão apresentados os conceitos sobre os resíduos sólidos, de um modo geral (geração, composição, tratamento e disposição), dos resíduos estudados.

3.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é constituída por uma gestão integrada, que articula a dimensão socioambiental e econômica na atual administração dos resíduos sólidos (IPEA, 2016) . Com isso, a sua implementação será um enorme desafio num país continental como o Brasil (BESEN *et al.*, 2017).

Vale salientar que a PNRS visa o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão e tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente correta. Nesse contexto, os resíduos orgânicos (de origem urbana ou rural), tem-se a possibilidade da biodigestão anaeróbia, que gera dois produtos comerciais: a energia (biogás) e o biofertilizante (digestato), além de proporcionar uma redução de carga orgânica do resíduo tratado (BRASIL, 2010).

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

A PNRS classifica esses resíduos quanto a sua origem, em: resíduos domiciliares, resíduos de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde, resíduos da construção civil, resíduos agrosilvopastoris, resíduos de serviços de transportes e, por fim, os resíduos de mineração (BRASIL,2010). Desta forma, a partir do conhecimento da fonte geradora dos resíduos, fica mais fácil de gerencia-los. Todavia, caso esse processo não ocorra de forma satisfatória, provavelmente, irá ocorrer uma destinação final inadequada.

Para a NBR 10004/2004 define-se resíduos sólidos como:

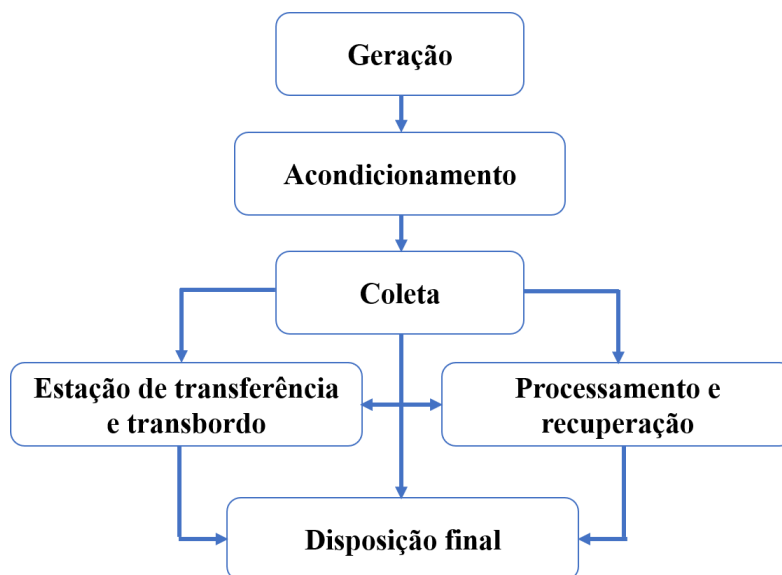
“Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”

(ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos também podem ser classificados quanto à periculosidade, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004), que os nomeiam como: perigosos, não perigosos, não inertes e inertes; ou Classe I, IIA e IIB, respectivamente.

O modelo simplificado de gerenciamento de resíduos sólidos poderá ser visualizado na Figura 1, que vai desde a etapa de geração até o seu destino final.

Figura 1 - Modelo simplificado de gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Tchobanoglous (1977) *apud* Cunha e Caixeta Filho (2002).

3.2.1 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Segundo a PNRS (BRASIL, 2010), pode ser definido como resíduos sólidos urbanos todo resíduo oriundo de varrição pública e das residências urbanas, bem como de outros serviços considerado de limpeza pública. Dentre os vários RSU gerados, são normalmente encaminhados para a disposição em aterros sanitários, sob responsabilidade do poder municipal, os resíduos de origem domiciliar ou aqueles com características similares, bem como os comerciais e os resíduos da limpeza pública.

Estima-se que o Brasil tenha coletado, em 2012, entre 180 a 250 toneladas de RSU, apesar de existir características específica para cada região no país, a produção média de RSU era próximo de 1kg por habitante/dia, taxa parecida com alguns países europeus (GOUVEIA, 2012).

A Figura 2 traz uma avaliação temporal de índice de abrangência da coleta de RSU no Brasil, diferenciando a coleta na zona urbana e rural e por região, na qual fica evidenciado que a produção de resíduos no Brasil pode ser ainda maior, visto que mais de 10% ainda não é coletado. Nota-se também que a região Nordeste apresenta menor índice de coleta dentre as regiões brasileiras, bem como a zona rural de todas as regiões.

Figura 2 - Índice de abrangência da coleta de RSU no Brasil (%)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Brasil	83,2	84,8	85,6	84,7	85,7	86,5	87,3	87,9	88,6
Urbano	94,9	95,9	96,5	96,3	97,0	97,4	97,9	98,1	98,5
Rural	15,7	18,6	20,5	21,6	23,9	26,0	28,4	30,2	32,7
Norte	82,2	85,1	85,7	71,3	74,1	76,6	79,0	80,1	82,2
Urbano	85,3	88,1	88,6	88,9	91,6	93,5	95,2	95,7	97,1
Rural	...	...	...	17,0	19,2	20,6	23,3	24,9	29,4
Nordeste	66,3	68,5	70,1	69,8	71,9	72,8	73,9	75,4	76,2
Urbano	88,4	90,3	91,8	90,8	92,8	93,3	94,3	95,3	95,8
Rural	8,7	10,2	11,6	11,4	15,0	15,4	16,9	18,4	19,8
Sudeste	92,3	93,6	93,9	94,2	94,4	94,8	95,3	95,3	95,9
Urbano	97,8	98,5	98,6	98,7	98,9	99,1	99,3	99,2	99,5
Rural	27,9	34,1	35,0	38,0	39,0	42,1	44,7	47,0	50,5
Sul	84,4	85,4	86,7	87,3	87,9	89,3	90,5	90,7	91,5
Urbano	98,1	98,4	98,7	98,8	98,8	99,2	99,4	99,4	99,6
Rural	20,6	23,6	28,2	30,7	32,5	38,8	44,2	46,2	49,0
Centro-Oeste	84,4	85,8	86,1	86,7	87,1	87,8	88,2	89,2	89,9
Urbano	95,7	96,7	97,5	97,4	98,1	98,7	98,6	98,9	98,8
Rural	11,4	13,5	15,4	20,4	19,6	19,5	21,7	21,8	26,4

Fontes: IPEA (2012).

Na região Nordeste, com seus nove estados e 1.794 municípios, foram coletados, em 2008, 47.203,80 tonelada/dia, que resultou em uma taxa de geração *per capita* de 1,2

kg/hab/dia (IPEA, 2012). A geração *per capita* pode sofrer alteração devidos aos fatores econômicos como crise ou não refletem diretamente no consumo e na consequente geração per capita de resíduos sólidos (CAMPOS, 2012).

Com relação a constituição dos RSU, os resíduos são bastante influenciados pelos hábitos alimentares, educação, sistema de coleta, entre outros. Nesse sentido, a composição gravimétrica, expressa a presença de cada componente, em porcentagem, em relação ao peso total do lixo. Nela, estão relacionados os componentes mais comuns, como: vidro, plástico, metais, papel, matéria orgânica e outros. A Tabela 1 representa a composição gravimétrica dos RSU total coletado no Brasil, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (resíduos coletados em 2008).

Tabela 1- Percentual de Composição Gravimétrica dos resíduos coletado no Brasil

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metais total (aço + alumínio)	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total (filme + rígido)	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: PNRS (2012).

O Tabela 1 chama atenção pelo fato do estudo apontar uma participação de mais de 50% de matéria orgânica e 30% de materiais recicláveis.

Para o estado de Pernambuco, de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (SEMAS, 2012), 56,46% dos resíduos produzidos são matéria orgânica e 25,70% são recicláveis, valores bem próximos da média nacional.

3.2.2 Resíduos sólidos orgânicos

Nesse tópico, os resíduos orgânicos serão discutidos a sua composição e natureza (urbana, agrícola e Industrial). Deve-se destacar que os resíduos sólidos orgânicos (RSO) estão inseridos nos resíduos sólidos urbanos (maior fração), nos resíduos agrícolas, em alguns tipos de resíduos industriais e lodo de estação de tratamento de esgoto doméstico (LEITE, 2014).

Já Silva (2009) considera que os RSU podem possuir natureza putrescível e não putrescível. São classificados como putrescíveis os resíduos provenientes de Estações de Tratamento de Água (ETAs) e de Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) (esgotos domésticos), da coleta e processamento de resíduos recolhidos nas áreas urbanas (como restos de alimentos, papel, papelão, cortes de gramado, podas, etc.), resíduos produzidos pelas indústrias de alimentos, e resíduos gerados de atividades agrícolas (como ração, adubos, esterco de animais, etc.).

Já para Menezes (2012), os resíduos sólidos orgânicos abrangem qualquer resíduo de alimento, bagaço de frutas, vegetais putrescíveis, mas também faz parte do resíduo sólido orgânico qualquer material sólido de origem orgânica, como papéis e plásticos que se decompõe na natureza.

Nesse sentido, Silva e Palha (2016) verificaram no seu estudo que a produção agrícola tem grandes perdas e variam de acordo com o tipo do cultivo manejado e a capacidade tecnológica empregada, podendo ter perdas em torno de 40% (no caso por exemplo da banana e do tomate), e com isso, gerando uma elevada quantidade de resíduos orgânicos.

Por outro lado, o reaproveitamento, em grande escala, dos alimentos desperdiçados é considerado atrativo, tendo destaque o aproveitamento energético (FERREIRA, 2015), visto que o tratamento via digestão anaeróbia proporciona a degradação da matéria orgânica complexa por meio da ação de micro-organismos, produzindo o biogás.

O tratamento e a destinação final ambientalmente correta dos resíduos sólidos contribui, principalmente, para o incremento dos ativos ambientais. Segundo Santos *et al.* (2001), o ativo ambiental é tudo aquilo que é destinado para o gerenciamento ambiental, no qual, é referenciado como ativo ambiental imobilizado, que está relacionado à melhoria do sistema de tratamento.

Existem vários métodos para o tratamento de resíduos orgânicos, entretanto a digestão anaeróbia vem sendo apontada como uma abordagem mais próspera (LEE *et al.*, 2009; LESTEUR *et al.*, 2010; QIAO *et al.*, 2012).

Nesse contexto, segundo Chernicharo (1997), o sucesso da digestão anaeróbia está relacionado ao controle rigoroso das condições ambientais, tais como: presença de macronutrientes (nitrogênio, fósforo e enxofre), de micronutrientes (ferro, cobalto, níquel e molibdênio), temperatura, pH, controle da alcalinidade e dos ácidos voláteis gerados.

Alves (2016) sugere que o potencial de produção de biogás está diretamente ligado a composição elementar do material que está sendo degradado. Um exemplo disso foi o estudo de Sagagi (2009), que avaliou o potencial de metanização de resíduos de frutas e vegetais conclui que as frutas apresentaram um melhor rendimento em metano.

Nesse sentido, a Tabela 3 mostra alguns valores de composição elementar do substrato (resíduo orgânico) obtido por diferentes estudos, onde pode-se observar claramente diferentes dados de composição, que está relacionado à variação dos constituintes dos resíduos.

No que diz respeito a relação do C/N, Yadvika *et al.* (2004) estabelecem valores entre 25 e 30, como faixa necessária para a degradação da matéria orgânica pelos micro-organismos. Sendo assim apenas o estudo de Di Maria *et al.* (2014) e Melo (2010) utilizaram a relação C/N ideal.

Pode-se ainda observar na tabela 3 que os teores de carbono, situam-se entre 40 e 50% para a maioria dos estudos. Constata-se ainda que o enxofre está em menores concentrações na fração orgânica dos RSU que nos resíduos de restaurantes (cerca de 10 vezes menor). Este valor mais baixo, possivelmente devido a diluição com outros constituintes do RSU favorece o processo de biodigestão, pois haverá uma menor produção de gás sulfídrico, que é altamente corrosivo.

Tabela 2 - Característica química dos resíduos orgânicos

Característica dos Resíduos	C (%)	N (%)	H (%)	P (%)	S (%)	Relação C/N	Referências
Frutas e Verduras	13,4	1,7	N.I.	0,3	N.I.	7,88	Qiao <i>et al.</i> (2012)
	39,5	2,4	N.I.	N.I.	N.I.	16,45	Cabbai <i>et al.</i> (2013)
	48,2	1,31	N.I.	6,20	N.I.	36,79	Di Maria <i>et al.</i> (2014)
Orgânicos de Restaurante	46,48	3,16	N.I.	N.I.	N.I.	14,70	Zhang <i>et al.</i> (2007)
	47,6	3,44	N.I.	N.I.	N.I.	13,84	De Clercq <i>et al.</i> (2016)
	44,35	3,36	5,75	N.I.	0,62	13,19	Oliveira <i>et al.</i> (2017)
Fração Orgânica RSU	48,0	2,6	6,4	N.I.	0,6	18,46	Tchobanoglous <i>et al.</i> (1994)
	31,78	1,02	5,07	N.I.	0,07	31,16	Melo (2010)

Legenda: N.I. – não informado. Fonte: Autor (2018).

Em uma análise mais aprofundada dos resíduos, Kiran *et al.* (2014) citam que os resíduos orgânicos são constituídos principalmente de polímeros de carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina, proteínas, lipídeos, ácidos orgânicos. Desta forma, a análise bioquímica (principalmente da lignina) do resíduo é importante devido a relação que representa entre a fração biodegradável (FB) e o teor de lignina expresso em base seca (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Na Tabela 3 traz alguns valores das características bioquímicas dos resíduos sólidos orgânico oriundo de diferentes estudos.

A lignina apresenta uma molécula mais complexa de baixa biodegradabilidade, desta forma, valores mais elevados podem indicar a necessidade de um pré-tratamento para incrementar a biodigestão. Nesse sentido, a variação no teor de lignina vai depender muito do tipo de fruta.

Tabela 3 - Característica bioquímica dos resíduos

Característica dos Resíduos	Carboidratos (%)	Lignina (%)	Lipídeos (%)	Referências
RSU	39,3	10,4	6,1	Alves (2008)
Frutas e Verduras	34	N.I.	5,9	Cabbai <i>et al.</i> (2013)

Legenda: N.I. – não informado. Fonte: Autor (2018).

Em resumo, o aproveitamento energético de resíduos orgânicos deve ser em função do elevado potencial de geração de metano desse resíduo (KIRAN *et al.*, 2014). Logo, o ponto chave para o desenvolvimento de qualquer projeto de aproveitamento energético é a realização de uma caracterização mais detalhada do resíduo.

3.2.2.1 Lodo de estação de tratamento de esgoto

Devido a grande geração de lodo é de extrema importância conhecer a sua composição para um real aproveitamento e correta destinação.

Com isso, estima-se que a geração de lodo no Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (Soares, 2004). Todavia, como apenas 30% da população urbana têm sua água residuária devidamente coletada e tratada. Nesse sentido, a produção de lodo pode superar 400 mil toneladas por ano, caso os esgotos fossem totalmente tratados no Brasil.

O lodo de esgoto doméstico é oriundo do processo de tratamento de esgoto, podendo ter como origem dos decantadores (primários e secundários) ou mesmo de tratamento anaeróbio em reatores como no reator anaeróbio de manta de lodo (Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB) ou no Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) segundo (ROSA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o seu gerenciamento é necessário, e atualmente têm tido como principais alternativas de destino final o aterro sanitário e a queima direta, respectivamente, o que resulta em elevados gastos com transporte e desperdício de seu potencial energético (ROSA *et al.*, 2018).

Ratanatamskul *et al.* (2011) fizeram o uso da digestão anaeróbia para biodegradar lodo de ETE com outros resíduos orgânicos, visando a otimização da produção de biogás. No entanto, para que se tenha uma produção de biogás satisfatória, o lodo de esgoto deve

ter condições favoráveis, tais como: umidade, pH, sólidos totais e voláteis, dentro da faixa de condições que favoreça os micro-organismos formadores de metano.

A Tabela 4 apresenta a composição dos sólidos, com valores típicos para lodos de ETEs. Pode-se constatar que a fração orgânica dos lodos (sólidos voláteis) correspondem a cerca 50% em massa. Estes valores correspondem principalmente aos micro-organismos presentes, os quais são responsáveis pela degradação dos substratos.

Tabela 4 - Características dos sólidos típicas do lodo de esgoto

Origem do lodo	pH	ST - Sólidos totais (%)	SV - Sólidos voláteis (%)	Referências
-	N.I.	N.I.	44,7	Alves (2008)
UASB	N.I.	15,86	45,33	Firmo (2013)
UASB	8,3	6,18	3,50	Pavi <i>et al.</i> (2017)
UASB	6,80	5,39	56,00	Santos <i>et al.</i> (2017)

*Legenda: N.I. – não informado. Fonte: O Autor.

Com relação à umidade, Santos *et al.* (2017) utilizaram um lodo de esgoto (proveniente de um reator UASB) com uma umidade superior a 90%, entretanto, Firmo (2013) encontrou valores acima de 80% de umidade para um dos lodos estudados.

Além dos parâmetros supracitados é importante avaliar a composição elementar e bioquímica do lodo, pois as mesmas revelam a facilidade ou dificuldade da degradação da matéria orgânica presente no resíduo orgânico. Com isso, nas Tabelas 5 e 6, tem-se valores médios da análise elementar e bioquímica realizada por diferentes estudos, em lodos de ETE.

A partir do tabela 5, pode-se observar que os teores de carbono dos lodos de ETE são mais baixos que o dos resíduos orgânicos (Tabela 5). Ressalta-se ainda que a relação C/N está muito aquém da citada por Yadvika *et al.* (2004), que deveria se situar entre 25 e 30.

Tabela 5 Característica elementar dos lodos de ETE

Origem do lodo	C (%)	N (%)	H (%)	P (%)	S (%)	Relação C/N	Referências
Ativado (aerado)	37,6	6,9	N.I.	N.I.	N.I.	5,45	Siddiqui <i>et al.</i> (2011)
Digestor anaeróbico	23,5	3,0	N.I.	5,6	N.I.	7,83	Fernandes e Souza (2001)
UASB	28,69	4,47	4,26	N.I.	N.I.	6,41	Firmo (2013)
	29,5	4,45	2,72	N.I.	1.1	6,62	Melo (2010)
Sanitário	27,5	4,40	4,32	N.I.	0,86	6,25	Borges <i>et al.</i> (2008)

Legenda: N.I. – não informado. Fonte: Autor (2018).

Através do Tabela 6 pode-se constatar uma elevada variabilidade da concentração de lignina nos estudos de Firmo (2013) e Melo (2010). No entanto, que valores de carboidratos estão próximos .

Tabela 6 - Característica bioquímica de lodos de ETEs

Origem do lodo	Carboidratos (%)	Lignina (%)	Lipídeos (%)	Referências
UASB	36,60	11,40	4,30	Firmo (2013)
UASB	36,54	22,74	4,48	Melo (2010)

Fonte: Autor (2018).

3.2.2.2 Líquido ruminal bovino

O líquido ruminal bovino (LRB) é um resíduo oriundo dos conteúdos estomacais dos ruminantes, por isto é gerado, em larga escala, em locais onde é realizado o abate desses animais.

O manejo inadequado dos efluentes e resíduos agrícolas de um modo geral pode resultar uma alta poluição, devido ao elevado teor de matéria orgânico e a presença de agentes patogênicos, além da produção de gases do efeito estufa (GEE) durante o

processo de decomposição natural dos compostos orgânicos. Tal problemática abrange todos os herbívoros ruminantes, ou seja, os bovinos, os ovinos, os bubalinos e os caprinos, que por meio da fermentação ruminal também produzem metano (NEVES *et al.* 2008).

Estima-se que sejam emitidas por esses ruminantes a partir do seu processo digestivo são estimadas em 80 milhões de toneladas anuais de gás, correspondendo a cerca de 22% das emissões totais de metano geradas por fontes antropogênicas globalmente (USEPA, 2000).

Santos Filho *et al.* (2017) estimaram a quantidade de resíduos agropecuários, como esterco (bovino, suíno e ovino/caprino) e o resíduo do líquido ruminal bovino, produzidos pelos abatedouros públicos gerenciados pelo CEASA-PE, localizado nos municípios pernambucanos de Paudalho, Ribeirão, Escada e Itambé. Nesse estudo, os autores encontraram valores de 777, 1082 e 928 toneladas de LRB para os anos de 2013, 2014 e 2016, respectivamente.

O LRB, especificamente, apresenta características peculiares que o tornam um ecossistema anaeróbico propício para o desenvolvimento microbiano (TEIXEIRA, 1991), possibilitando assim condições melhores para a biodegradação anaeróbia. Sendo assim, pode representar uma alternativa de substrato para produção de biogás, pois permite redução do potencial poluidor e a geração de energia (MACHADO, 2011).

De acordo com Brulc *et al.* (2010), a comunidade microbiana contida no LRB é caracterizado pela sua alta densidade populacional, contendo uma heterogeneidade (bactérias, protozoários e fungos) e uma ampla complexidade de interações. Essa biocenose microbiana, que pode ser considerada um “reator de fermentação”, pois mantém um ambiente propício em relação ao pH, a disponibilidade de nutrientes e a temperatura, resultando numa elevada capacidade de degradar polímeros naturais (celulose, hemicelulose) e compostos orgânicos complexos de outras origens.

Diante disso, a Tabela 7 mostra a composição do LRB em diferentes estudos disponíveis na literatura, onde pode-se observar grande variação entre os parâmetros, (exceto os valores de pH), os quais dependem da alimentação do animal, do processo de coleta, dentre outros fatores.

Tabela 7 - Características típicas do líquido ruminal bovino

Parâmetro	Leite <i>et al.</i> (2002)	Barcelos (2009)	Valencia <i>et al.</i> (2011)	Santos Filho <i>et al.</i> (2016)	Oliveira <i>et al.</i> (2017)
Umidade (%)	92,6	68,9	N.I.	N.I.	95,45
pH	7,6	7,5	7,50	7,33	6,91
DQO mg/L	N.I.	N.I.	43.733	32.200	N.I.
ST – Sólidos totais (%)	N.I.	31,1	N.I.	N.I.	4,55
SV – Sólidos voláteis (%)	N.I.	67,1	N.I.	N.I.	77,91
C – carbono (%)	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	37,55
N – nitrogênio (%)	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	2,21
Relação C/N	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.	16,99

Legenda: N.I. – não informado. Fonte: Autor (2018).

3.2.2.3 Dejetos de caprino

A região semiárida do Brasil tem uma extensão territorial de cerca de 900.000 km², aproximadamente de 10% do território nacional. Nessa região, a caprino/ovinocultura é uma das atividades, com o destaque para a agricultura familiar (QUADROS *et al.*, 2010). Nesse sentido, existe a necessidade de uso de novas tecnologias para a atividade pecuária atual, dentro da atividade de agricultura familiar e/ou em grandes produções. Dessa forma, inovações são necessária para melhorar a produção e utilização de subprodutos desta atividade. Estas irão resultar, para essa atividade econômica, um grande benefício socioeconômico e ambiental (TEIXEIRA *et al.* 2013).

Segundo Santos e Junior (2013) a produção animal é uma das atividades de grande impacto ambiental, considerada pelos órgãos de controle ambiental como uma das causadoras de degradação. Com isso, o seu gerenciamento é um desafio. O resíduo conhecido usualmente por esterco, pode ser definido como uma mistura de fezes, urina e camas, que podem ser constituídas de palhas, folhas secas, serragem, turfa. Sua composição dependerá de espécie animal, se ruminante ou não, da idade e das condições do animal, da natureza e quantidade de alimento que os mesmos recebem, do tipo de manipulação e conservação do esterco e da composição das camas (AMORIM *et al.*, 2002).

Para Quadros *et al.* (2010), a utilização da digestão anaeróbia contribui para união das atividades agropecuárias, aproveitando o esterco, o qual normalmente é dado pouco ou nenhum valor comercial, convertendo-o em duas bases para o desenvolvimento sustentável.

Zhang *et al.* (2013) indicaram que o esterco da caprinocultura, mais especificamente, é uma excelente matéria-prima para a digestão anaeróbia devido ao seu elevado teor de nitrogênio total e estabilidade na codigestão.

Nesse sentido, a essa influência direta na composição do resíduo é importante analisar a composição inicial, ou seja, antes da biodegradação. A Tabela 8 mostra a caracterização físico-química do esterco de cabra, em dois estudos.

Tabela 8 - Características típicas do esterco caprino

Parâmetro	Quadros <i>et al.</i> (2010)	Zang <i>et al.</i> (2013)
Umidade (%)	N.I.	N.I.
pH	6,13	7,94
DQO - Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	17808	N.I.
ST – Sólidos Totais (%)	143,7	33,65
SV – Sólidos voláteis (%)	82,5	82,21
NT – Nitrogênio total (%)	N.I.	1,014
C – carbono (%)	N.I.	18,22
N – nitrogênio(%)	N.I.	1,014
Relação C/N	N.I.	17,97

Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar, ao se comparar nas tabelas 7 e 8, que o pH do esterco caprino situa-se na mesma faixa do LRB. O mesmo é observado para relação C/N que deveria se situar entre 25 e 30, de acordo com Yadvika *et al.* (2004). Igualmente, para os ST, estão fora da faixa, que deveriam ser até 20%, segundo (FERNANDES E SOUZA, 2001) e para a VDI 4630 (2006) a quantidade de ST não deve exceder a 10%.

3.2.2.4 Glicerina (resíduo da produção biodiesel)

O biodiesel pode ser gerado a partir de qualquer base de óleo natural extraído de plantas. No Brasil, as plantas oleaginosas mais empregadas são: soja, algodão, dendê, girassol, babaçu, amendoim, mamona, pinhão-manso ou a partir de ácidos graxos, como a gordura animal. Destaca-se ainda que são mais de 100 plantas com potencial energético para a geração do biodiesel (PORTAL BRASIL, 2014).

O referido combustível vem rapidamente se desenvolvendo em todo mundo, e devido a isso, tem gerado um incremento da geração dos resíduos. A cada 100 kg de biodiesel gerado, é produzido, aproximadamente, 10 kg de glicerina residual (APOSTOLAKOU *et al.*, 2009), ou seja, cerca de 10% da produção.

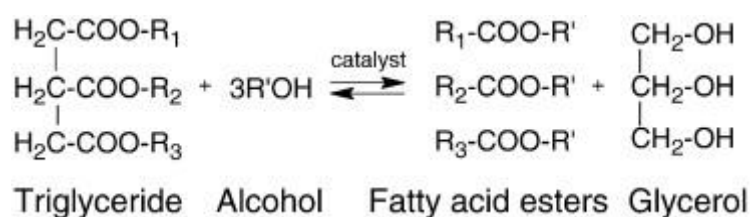
O termo glicerol geralmente aplica-se somente ao componente químico puro 1,2,3- propanotriol, é um composto orgânico de função álcool com três hidroxilas, fórmula molecular $C_3H_8O_3$ (PEITER *et al.*, 2016). O glicerol também pode ser obtido a partir da síntese microbiana, sendo que numa proporção menor (ALVES, 2016).

Atualmente, há um gama de aplicações para utilização do uso da glicerina, mas não são suficientes para absorver toda a quantidade produzida. Apenas no ano de 2016, teve-se uma produção de biodiesel cerca de 3.801.339 de m^3 e com isso, uma geração de glicerina de 380.140 m^3 (ANP, 2016).

Arelado a isso, em 2004, teve início a mistura do biodiesel ao diesel fóssil, em caráter experimental, e entre 2005 e 2007, foi estabelecido um teor de 2% de biodiesel no diesel comercializado (B2), hoje, a partir da criação da Lei nº 13.263/2016 (que alterou a Lei nº 13.033/2014), aumentou para 8% no teor de biodiesel (B8) (a partir de março de 2017), chegando a 9% em março de 2018 (B9) e 10% em março de 2019 (B10) (ANP, 2016). com isso, a geração de glicerina tende aumentar com o passar dos anos.

A Figura 2 apresenta o processo de produção do biodiesel, assim como a formação da glicerina residual.

Figura 3 - Esquema geral da reação de transesterificação



Fonte: Silva *et al.* (2011).

Nesse contexto, tem-se então a inserção da glicerina na biodigestão de resíduos orgânicos, para potencializar a produção de biogás, já tendo sido realizados alguns estudos neste sentido, como os trabalhos de Robra *et al.* (2006), Holanda *et al.* (2013), Alves (2016) e Silva *et al.* (2017).

Alves (2016) relata que é preciso criar alternativas de utilização desse resíduo que viabilizem seu aproveitamento, através do melhoramento das técnicas de codigestão com outros resíduos, para geração de recursos com fins energéticos.

Para que a glicerina residual seja utilizada na otimização da produção de biogás, deve-se levar em consideração as características intrínsecas ao resíduo. Segundo Alves (2016), as características da glicerina variam em função de dois fatores a matéria prima e o processo de produção.

Nesse sentido, na tabela 9 apresenta valores médios de alguns parâmetros da glicerina oriundos de diferentes estudos relatados na literatura.

Tabela 9 - Características típicas da glicerina

Parâmetro	Nakamura <i>et al.</i> (2008)	Nghiem <i>et al.</i> (2014)	Silvestre <i>et al.</i> (2015)	Alves (2016)
Pureza (%)	58	80	N.I.	70
pH	N.I.	8-9	5,5	6,35
DQO - Demanda química de oxigênio (g O ₂ /L)	1.217	1.140	1.517	1.023
SV - Sólidos voláteis (%)	N.I.	N.I.	99,8	98,78

Fonte: Autor (2018).

Os valores de pureza variaram de 60 a 80% e, consequentemente, o restante dos parâmetros obtidos por diversos autores, exceto o parâmetro de SV, que ficou bem próximo nos estudos de Alves (2016) e Silvestre *et al.* (2015).

Na sua forma pura, o glicerol se apresenta como um líquido viscoso, incolor, inodoro e higroscópico, com sabor doce, solúvel em água e álcool, insolúvel em éter e clorofórmio (MORRISON, 1994). O mesmo apresenta diferentes aplicações na indústria de cosméticos, farmacêutica, detergentes, na fabricação de resinas e aditivos na indústria de alimentos (APOLINÁRIO *et al.*, 2012). Mesmo com diversas aplicações na forma pura, a sua utilização direta (bruta) possui pouca aplicabilidade, ainda há escassez de informações sobre a utilização da glicerina bruta (GB). Diante disso, Botini *et al.* (2015) realizaram no seu estudo a suplementação de bovinos de corte em pastejo, usando a substituição do milho pela GB em suplementos concentrados.

Em relação a composição analítica dos macronutrientes, pode-se visualizar no Tabela 11 valores oriundos da análise elementar da glicerina de acordo com a literatura.

Tabela 10 - Características elementar da glicerina

C (%)	N (%)	Relação C/N	Referências
26,0	0,04	650	Thompson e He (2006)
51,2	-	-	Nakazawa (2015)

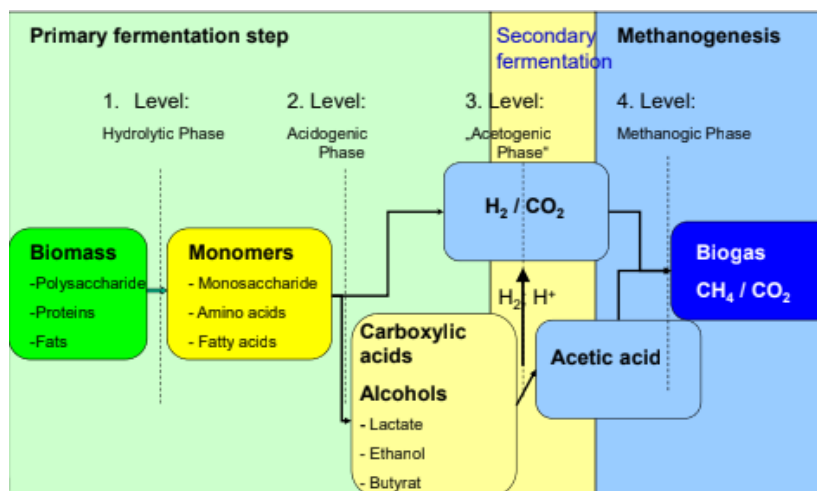
Fonte: Autor (2018).

Através da Tabela 11, observa-se também a faixa de variação da composição das amostras, com uma diferença de 100% entre os dois estudos apresentados. Esta diferença deve estar possivelmente associado, entre outros fatores, como a pureza.

3.3 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbica é um processo bioquímico que se processa em vários estágios, nos quais os materiais orgânicos complexos sofrem degradação em compostos mais simples e cada estágio metabólico são realizados por diferentes grupos de micro-organismos (GUO *et al.*, 2014). Esse processo, também conhecido como biometanogênese, ocorre naturalmente em áreas úmidas, campos de arroz, intestinos de animais e sedimentos (ARSORVA, 2010). O citado autor também aponta que as fontes naturais e antropogênicas representam 30 e 70%, respectivamente, do total de metano liberado na atmosfera a cada ano. Diante disso, segue o fluxograma simplificado do processo de degradação anaeróbia é apresentado na Figura 3.

Figura 4 - Estágios do processo de digestão anaeróbica



Fonte: Lemmer e Oechsner (2017)

Na fase inicial, os micro-organismos produtores de tais enzimas podem ser aeróbios, anaeróbios, mesófilos e termófilos (BORTOLAZZO, 2011). Diante disso, os micro-organismos convertem materiais orgânicos complexo (celulose, proteínas e gorduras) em compostos solúveis. Essa etapa é conhecida como o estágio de degradação hidrolítica, devido aos micro-organismos que são chamados hidrolíticos. Os produtos de hidrólise são os ácidos graxos, aminoácidos e carboidrato (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Nessa etapa pode ocorrer um processo de inibição devido a presença e proporção de materiais lignocelulósicos, que faz com que a velocidade de degradação seja lenta, tornando-se um fator limitante (CARREAS, 2013).

A segunda fase é inicializada a partir dos materiais orgânicos dissolvidos gerados no processo anterior, os quais, são absorvidos nas células das bactérias fermentativas e após esta etapa, são expelido substâncias orgânicas simples, como ácidos graxos voláteis de cadeias curtas (AGV), alcoóis, ácido láctico e elementos minerais. No processo de acidogênese a maioria das bactérias são anaeróbias obrigatórias, existindo também espécies facultativas, que metabolizam o material orgânico pela via oxidativa (SILVA, 2009).

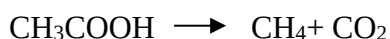
Posteriormente, na fase de acetogênese, as bactérias acetanogênicas ou formadora de hidrogênio convertem os produtos gerados pelas acidogênicas (ácidos voláteis maiores que acetato) em acetato, H₂ e CO₂. Já o outro grupo, as homoacetogênicas são caracterizadas por possuírem um metabolismo quimiolitotrófico, e utilizam H₂ e CO₂ para produzirem acetato. O referido grupo vem sendo estudo devido à importância do

composto final gerado, o acetato, que tem um papel importante como precursor do metano (CHERNICHARO, 1993).

Por fim, o processo da reação metanogênica, na qual compostos como o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono são transformados em CH₄, CO₂ e água. Os micro-organismos inseridos neste processo constituem um único grupo composto por várias espécies distintas e que se caracterizam por crescerem na ausência de O₂. Existem duas principais associações de micro-organismos, os que degradam o ácido acético (archeas metanogênicas acetoclásticas) e os que consomem H₂ (archeas metanogênicas hidrogenotróficas). Salientando que a principal via de formação do metano é do grupo acetoclásticas, com cerca de 70% do metano produzido, na segunda via de produção as bactérias tem dupla finalidade produzir metano a partir do H₂ e CO₂, e eliminar o H₂ (SCHIMITT, 2006).

Abaixo estão apresentadas as equações das reações das duas vias de produção de metano, conforme (SCHIMITT 2006).

- Primeira via Metanogênese Acetotrófica:



- Segunda via Hidrogenotrófica:



Por fim, a etapa chamada de metanogênese, que é especificamente restrita aos micro-organismos produtores de metano e pertencente ao domínio *Archeabacteria* (LUCENA, 2008). As arqueias metanogênicas são representantes do filo *Euryarchaeota*, compreendendo quatro classes (*Methanobacteria*, *Methanococci*, *Methanopyri* e *Methanomicrobia*) com suas respectivas ordens: *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanopyrales*, *Methanomicrobiales* e *Methanosarcinales*, sendo as duas últimas pertencentes à classe *Methanomicrobia* (ABREU, 2007).

Destaca-se que há outro grupo importante presente na digestão anaeróbia, que é grupo que atua na presença do sulfato (Espinosa-Chávez, 2007), que compete com os grupos formadores de metano. Elas podem elevar a quantidade de gás sulfídrico presente no biogás, que é altamente corrosivo (CARREAS, 2013).

Sabe-se que existem diversas condições e variáveis que devem ser consideradas para aperfeiçoar a digestão dos componentes orgânicos (MONNET, 2003), devido a isso,

as respectivas fases metabólicas deverão ocorrer de forma a potencializar a produção de biogás e a metanização.

3.3.1 Fatores que influenciam a biodigestão anaeróbia

Os parâmetros de operação dos bioreatores devem ser controlados de modo a que a atividade dos grupos microbianos seja ideais e deste modo, a produção máxima deverá ocorrer na digestão anaeróbia (JARDIM, 2013). Os micro-organismos metanogênicos anaeróbios podem ser estritos (só sobrevivem na ausência de oxigênio) ou facultativos, podendo ser afetados pelas oscilações das condições do meio reacional dos biodigestores verificar!.. As archeas metanogênicas são estritas, têm um crescimento lento e não toleram mudanças bruscas, nem concentrações de oxigênio acima de 0,5%.

Ressalta-se ainda que a etapa limitante do processo de digestão anaeróbia pode ser a hidrolítica ou a metanogênica, sendo esta última a mais frequente.

Dentre os parâmetros que podem afetar a produção de metano, destacam-se: O pH, Temperatura, Tempo de detenção hidráulica e a relação Carbono e nitrogênio.

3.3.1.1 pH

Nos processos de biodegradação, o desenvolvimento dos micro-organismos está relacionado diretamente às faixas predominantes de pH. Nesse contexto, Adekunle e Okolie (2012) cita que o pH ótimo para obtenção de rendimento máximo de biogás na biodigestão anaeróbia é entre 6,7 - 7,5, próximo da neutralidade. Desta forma, pode ser considerado um fator limitante, que indica a estabilidade do digestor (JACINTO, 2014).

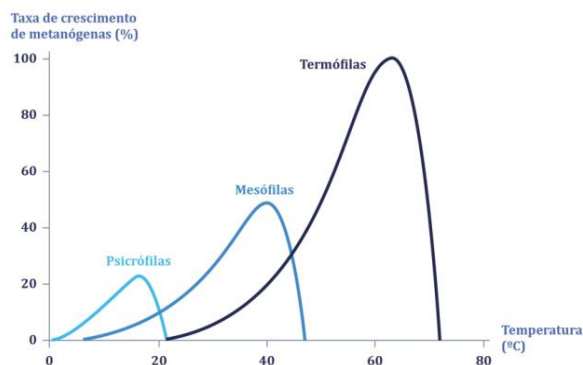
Todavia em plantas em larga escala, o valor máximo do pH pode variar, mas está associado ao tipo de técnica e ao substrato que está sendo digerido (LIU *et al.*, 2007).

3.3.1.2 Temperatura

Segundo Adekunle e Okolie (2012) explicam que a temperatura é um fator importante na produção de biogás, devido a formação de micro-organismos formadores de metano. Nesse contexto, a temperatura é um fator essencial à degradação da matéria

orgânica, como mostra a Figura 5. A variação de temperatura pode influenciar diretamente no incremento da produção do biometano.

Figura 5 - Efeito da temperatura na atividade anaeróbia



Fonte: Van Lier (1993) apud Carreas (2013)

Na realidade, a opção mais adotada têm sido os digestores com funcionamento em regime mesofílico, devido a abrangência de valores de temperatura que consegue assegurar as condições mais favoráveis de crescimento dos micro-organismos e garantir a melhor eficiência e estabilidade do processo (FERNANDES, 2013).

Igualmente, Metcalf e Eddy (1991) reforçam que na digestão anaeróbia a temperatura é um fator limitante, uma vez que os processos metanogênicos dependem do calor. Desta forma, a maior parte do processo de fermentação deve ser operado na faixa de temperatura mesofílica (30°C a 35°C). O Quadro 1 mostra que ao escolher uma temperatura de funcionamento de um reator, deve-se também correlacionar a condição de temperatura com o tempo de detenção hidráulica, de modo a assegurar a degradação da matéria orgânica.

Quadro 1- Intervalo de temperatura e tempo de detenção hidráulica da digestão anaeróbia

Temperatura	TDH
Psicrofíla (< 25 °C)	~40-60 dias
Mesofíla (35 - 40°C)	~25-35 dias
Termofílica (50 - 60°C)	~15-25 dias

Fonte: Jacinto (2014).

Pode-se constatar, através do Quadro 1, que quanto mais alta for a temperatura, menor será o TDH, uma vez que a atividade metanogênica será maior.

3.3.1.3 Tempo de detenção hidráulica (TDH)

Conforme o Quadro 1, existe uma relação entre o TDH e a temperatura. Além disso, para Mao (2015) o tempo de retenção é o tempo necessário para concluir a degradação da matéria orgânica. Ele está associado com taxa de crescimento do micro-organismo, dependente da temperatura do processo e composição do substrato.

Nesse contexto, Melo (2010) indica que as amostras poderão ficar incubadas por um período de 30 dias, para substrato simples, e de 120 dias para materiais lignocelulósicos.

3.3.1.4 Relação C/N

A relação do carbono/nitrogênio (C/N) reflete diretamente na digestão anaeróbia, visto que tais são nutrientes extremamente importantes para o processo de biodigestão. Quando essa relação está elevada, ocasiona uma baixa solubilização de proteína no sistema, já quando tem-se relações baixas, aumenta a chance de inibição por amônia (MAO *et al.*, 2015). Como já citado, Yadvika *et al.* (2004) estabelecem como relação de C/N, valores entre 25 e 30.

Segundo Zhang *et al.* (2013), essa relação é influenciada diretamente pela relação substrato/inóculo, bem como a composição dos mesmos. Na Tabela 11, pode-se verificar a relação C/N de alguns substratos, caracterizados por diversos autores.

Tabela 11 - Relação C/N de alguns substratos e inóculos

Materiais Naturais	Relação C/N
Excremento humano ¹	8
Excremento de cabra ¹	12
Excremento de Carneiro ¹	19
Líquido Ruminal Bovino ⁴	17
Resíduos sólidos Municipais ¹	40
Fração orgânica (Frutas e verduras) ²	16,45
Fração orgânica (Frutas e verduras) ³	36,79

Fonte: Energy for developmet (1997) ¹; Cabbai *et al.* (2013)²; Di Maria *et al.* (2014) ³; Oliveira *et al.* (2017) ⁴; adaptado de Santos Filho (2017).

3.4 RECOMENDAÇÃO VDI 4630 – ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES

O guia VDI 4630 dispõe sobre a fermentação de materiais orgânicos (caracterização do substrato, amostragem, coleta de dados de material e testes de fermentação) e foi criada pela Associação de Engenheiros Alemães. Ela estabelece a execução de experimentos cinéticos em batelada, semi-contínuo e contínuo para mensuração de biogás e/ou metano de substratos orgânicos diversos.

Segundo Steinmetz (2016), o procedimento pode ser usado como referência para simulação de processos em escala de bancada e assim auxiliar a operação de plantas de produção de biogás em grande escala. Essa norma visa abranger substratos de origem renovável, ou seja, substratos agropecuários (resíduos e culturas energéticas) e outros resíduos provenientes dos processos industriais ou urbanos.

3.5 ESTIMATIVA DE POTENCIAL DE BIOGÁS

Para estimar o potencial de biogás é de extrema necessidade realizar a caracterização da biomassa utilizada para gerar biogás, poder calorífico que informariam a qualidade do biogás e seu poder energético, quantificação da média mensal de produção, concentrações de metano e de sulfeto de hidrogênio no biogás e fatores econômicos (MALAGGI E SOUZA, 2014).

Para que ocorra uma otimização de produção de biometano deverá ocorrer uma sinergia entre o substrato e inóculo, visando, com isso, proporcionar condições ideais aos micro-organismos, que vão degradar a matéria orgânica. Diante disso, para avaliar essas condições ideais e máximas, tem-se como referencial na literatura o ensaio do Potencial Bioquímico de Metano (*Biochemical Methane Potential* - BMP).

O referido ensaio vem sendo bastante utilizado, nos últimos anos, como mostra a multiplicidade de trabalhos de pesquisa relacionados com essa metodologia, tais como: Harries *et al.* (2001), Melo (2010), Holanda *et al.* (2013), Santos *et al.* (2014) e Alves *et al.* (2016).

Silva *et al.* (2017), por exemplo, avaliaram a produção de hidrogênio a partir da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e glicerol residual (produção de biodiesel) em reatores laboratoriais (pequena escala).

Além deste, Steinmetz (2016) cita que existe uma gama de métodos de estimativa de metano, podendo ser de forma volumétrica, manométrica, ou até mesmo utilizando-se uma seringa graduada.

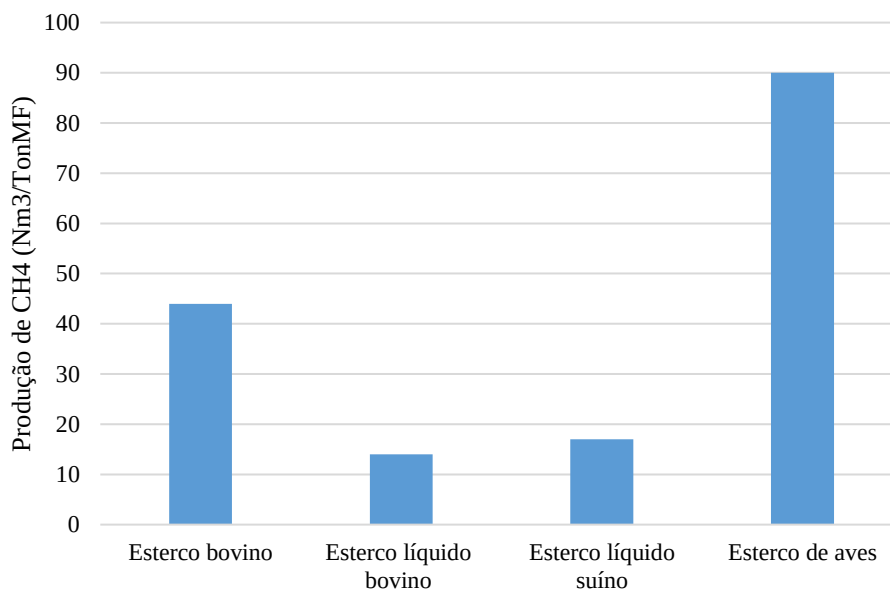
Para Esposito *et al.* (2012), nos protocolos para testes BMP, os principais parâmetros que afetam os resultados dos experimentos são temperatura e pH, bem como características físicas e químicas dos substratos, a intensidade de agitação e a razão inóculo/substrato (I/S). Esta última é também citada na literatura de projetos de reator, de forma inversa, como alimento/microorganismo (Food to Microorganism – F/M).

3.6 INÓCULO

A literatura indica que os resíduos orgânicos agropecuários, agroindustriais e os hortigranjeiros têm determinado potencial energético, por exemplo, como matéria-prima para produção de biometano. Nesse sentido, segundo o inventário da Biomassa Estadual, elaborado por Silva e Palha (2016) (que relaciona a produção de biogás ao tipo de dejetos de animal), relata que o estado de Pernambuco tem o potencial de geração de 625.706.882 m³ de biometano por ano, sendo o agreste a principal mesorregião geradora com aproximadamente 55% do potencial, seguido do sertão com 23%.

A Figura 6 apresenta a quantidade de metano produzido por tonelada em massa fresca (MF) para diferentes esterco.

Figura 6 - Geração de metano por tonelada de esterco em massa fresca



Fonte: FNR (2010).

Mas, para ser um bom inóculo, segundo um guia Alemã (VDI 4630), os resíduos (que servirão de inóculo) têm de possuir algumas características, tais como: baixa produção de biogás, um baixo valor de SV e ST inferior a 10%.

No Brasil não existe nenhuma padronização com relação ao tipo de inóculo a ser utilizado. Entretanto, o guia alemão VDI 4630 (2006) indica a quantidade conhecida de substrato (amostra do resíduo) em uma grande quantidade de inóculo mesofílico anaeróbico, seguida da incubação na ausência de oxigênio em temperatura controlada e pressão monitorada.

Diante do exposto, o inóculo pode ser definido como a biomassa microbiana que é adicionada no início de um teste biológico ou durante o processo para acelerá-lo e que o inóculo esteja adaptado às condições do substrato (VDI 4630, 2006). O guia cita que um inóculo de boa qualidade, para testes de produção de biogás, deve conter micro-organismos capazes de digerir diferentes tipos de biomassas e ter um rendimento de biogás menor do que 2% da produção de biogás da amostra.

Bona *et al.* (2015) produziram um inóculo mesofílico composto, inicialmente, por efluentes de dejetos de suínos e bovinos (1:1, v/v) durante um período de 6 meses, sendo o mesmo alimentado diariamente com 0,3 g de sólidos voláteis/litro (SV/L), após esse período obteve-se uma produção acima de 80% de biogás.

Nesse sentido Leite (1997) indicou, que a inoculação em digestores tem como finalidade de reduzir o tempo de estabilização anaeróbia desses substratos.

3.7 CODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A degradação, no mesmo momento, de uma mistura de dois ou mais substratos é conhecido como codigestão, seja com mesma proporção ou não (BRAUN; WELLINGER, 2002).

Liu *et al.* (2015) avaliaram a codigestão da palha de trigo, estrume de ovelha e estrume de frango, visando elevar a produção de biogás e identificar novos materiais aditivos. Os autores puderam observar a influência da variedade de proporções de esterco/palha, com isso, indicou que a co-digestão tem mais benefícios do que a digestão de um único material, obtendo um incremento de aproximadamente em 52% de metano na co-digestão.

Zhang *et al.* (2013) realizaram o processo de codigestão, sendo que com esterco de cabra, palha de trigo, caules de milho e palha de arroz. Segundo os referidos autores, a codigestão desses substratos pode majorar o rendimento de metano atribuído a uma proporção de C/N e também reduzir relação entre AGV Total/Alcalinidade Total. Nesse sentido, como encontrado no estudo anterior a co-digestão proporcionou um aumento de até 2 vezes a mais na produção de biogás.

3.8 ADIÇÃO DE GLICERINA

Minho *et al.* (2012) estudaram o efeito da glicerina (6% do volume do reacional nos biorreatores) na produção de biogás a partir digestão anaeróbia com lodo de ETE, resíduos agroindustriais e dejetos de aves poedeiras. Eles obtiveram uma produção cerca de três vezes maior que a codigestão sem adição de glicerina, com um TDH de 44 dias.

Do mesmo modo, Konrad *et al.* (2014) avaliaram a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de dejetos suínos e glicerina residual (em reatores com temperatura mesofílica - 35°C). Os autores observaram um incremento maior na geração de biogás, com a adição 9% do volume reacional de glicerina residual. No entanto, os autores recomendam a utilização de apenas 6%, visto que o aumento de carga orgânica pode levar a inibição da produção de biogás.

Similarmente, o Holanda *et al.* (2013) analisaram diferentes concentrações de glicerina (5%, 10%, 15% e 20%) na digestão anaeróbia de lodo de ETE, em reatores tipo BMP.

Nesse contexto, Castrillón *et al.* (2013) estudaram a adição de glicerina na codigestão de resíduo da agroindústria com esterco bovino, em uma proporção de 6% v/v de glicerina em dois reatores diferentes: no CSTR e em cama Induzida com agitação contínua, com isso, os autores obtiveram o melhor resultado no reator com operação no reator com cama induzida, obtendo uma produção 56,5 m³ / t de resíduos húmidos.

Já o estudo realizado por Fountoulakis *et al.* (2010) indica que valores superiores a 3% de glicerina podem sobrecarregar o sistema reacional, sendo, com isso, um fator limitante à biodigestão.

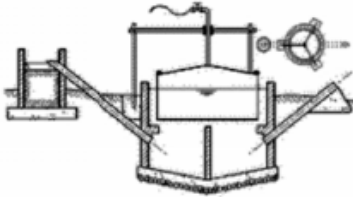
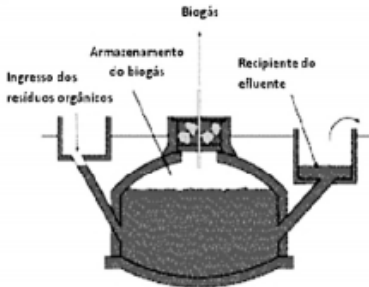
3.9 DIGESTORES

A digestão anaeróbica ou biodigestão é uma tecnologia que permite o aproveitamento energético da biomassa residual, tanto do ponto de vista ambiental, quanto social e econômico. Com isso, a utilização de digestores agrícolas de pequena escala, que são baratos e fáceis de construir, é uma tecnologia sustentável adaptada às condições de trabalho na área rural (CARREAS, 2013).

3.9.1 Tipos de reatores

Em relação ao fluxo do sistema, os reatores podem ser de dois tipos: (a) de fluxo contínuo: quando o material orgânico é carregado e ao mesmo tempo o efluente digerido é descarregado parcialmente todos os dias, de forma periódica e permanente; (b) reatores em batelada: carregados completamente, ocupando todo o volume disposto para biomassa residual, sendo assim a entrada de matéria orgânica é intermitente (MAMANI, 2015). A Figura 6 traz alguns tipos de reatores que possuem as diferentes formas de alimentação.

Figura 7- Reatores para produção de metano a partir de biomassa residual

Reator	Desenho	Características
De cúpula flutuante (Batelada)		- Alimentação contínua. - Armazena o biogás numa cúpula flutuante metálica. - É de fácil construção mantendo a pressão do biogás uniforme. - Pode digerir esterco animal e resíduos vegetais. - Para evitar a oxidação da cúpula, essa deve ser pintada regularmente.
De balão (Fluxo contínuo)		- Alimentação contínua. - Armazena o biogás num balão de plástico. - É de fácil construção e controle da pressão do biogás. - Recomendável para digerir esterco de animal. - Produção em pequena e média escala.
De cúpula fixa (Batelada)		- Alimentação contínua, podendo armazenar o efluente. - Armazena o biogás numa cúpula de material fixo. - Sua construção é numa fossa escavada que apresenta um bom isolamento. - Pode digerir esterco animal e dejetos vegetais. - Produz quantidades de biogás, em média e grande escala. - A pressão do biogás é variável no tempo. - Não tem um sistema de mistura do material orgânico dentro do reator.

Fonte: MAMANI (2015).

Segundo Brummeler (1991), os sistemas em batelada possuem uma estrutura mais simples e consequentemente, um custo mais baixo em relação ao de alimentação contínua. Desta forma, a maior parte dos estudos encontrado na literatura são conduzidos em batelada.

Leite *et al.* (2014) realizaram um experimento com reator batelada (capacidade de 2200 L), preenchido com resíduos de frutas e verduras, e lodo ETE (relação substrato/inóculo foi de 80/20), com TDH de 270 dias, mas obteve-se uma produção de biogás de 33,01 m³ com aproximadamente 64% de metano.

Pavi *et al.* (2017) conduziram um estudo em reatores de 2 L, preenchidos com lodo de um digestor anaeróbio (já adaptado as condições do substrato) e diferentes proporções de resíduo doméstico misturado (RDM) e resíduos de frutas e verduras (FV). Eles observaram uma maior produção acumulada biogás (493,8 NmL/gSV) e um teor de metano de 79,7%, para a proporção de substrato (RDM/FV) de 1/3 em base de SV, com um TDH de 18 dias.

Andrade *et al.* (2015) avaliaram, no BMP, a otimização da produção de biogás a partir da adição glicose na codigestão de resíduo sólido orgânico e lodo anaeróbio. Os autores obtiveram um volume de produção de biogás de aproximadamente de 145 NmL, com um TDH de 92 dias à 35°C

Zhang *et al.* (2013) analisaram a digestão anaeróbia de esterco de cabra com palha de trigo, caules de milho e palha de arroz (em diferentes proporções), em reatores de escala de laboratório (fabricados a partir de frascos Erlenmeyer de 1 L), em batelada. Eles constataram que a mistura que produz mais biogás foi a com esterco de cabra e caule de milho na proporção de 70/30 (respectivamente), produzindo 16.0 NmL, em 55 dias (em condições mesofílicas).

Todos os estudos são de extrema importância para a sociedade, principalmente quando se trata de uma tecnologia que pode ser adaptada para a população, onde cada cidadão será capaz de produzir sua própria fonte de energia (biogás), bem como potencializar o aproveitamento dos seus resíduos orgânicos. O quadro 2 traz um resumo de reatores confeccionado por alguns autores para biodigestão anaeróbia com produção de biogás.

Quadro 2 - Dados obtidos na literatura que informam sobre material e capacidade de armazenamento dos reatores

Composição do reator	Capacidade do reator	Referência
Tubo de PVC (diâmetro interno de 0,2 m)	100L	Borges <i>et al.</i> (2009)
Tubo de PVC (diâmetro de 200 cm)	16,1 L	Kuczman <i>et al.</i> (2011)
Tubos de PVC (3 m de comprimento e diâmetro interno de 0,145 m)	49,5 L	Santos <i>et al.</i> (2011)
Tubo de PVC (diâmetro de 400 mm)	47,78 L	Duda <i>et al.</i> (2013)
Tubo de PVC -(4,5 cm de diâmetro cada)	R1: 1,2 L R2: 1,2L R3: 1,2 L	Oliveira e Bruno (2013)

Tubo de PVC (diâmetro de 6 m)	R1: 39 L R2: 86,5 L R3: 128,9 L	Mazareli <i>et al.</i> (2016)
Aço Inoxidável (Vertical)	75 L	Valença (2017)

Fonte: Autor (2018).

3.9.2 Reatores horizontais

Com a necessidade de atender a demanda energética, sobretudo por energia limpa, surge a necessidade de desenvolvimento de novas rotas tecnológicas. Nesse sentido, inúmeros são os trabalhos em que a técnica da digestão anaeróbia é empregada com diferentes substratos. O quadro 3 apresenta estudos realizados com reatores horizontais

Quadro 3 - Dados da literatura produção de biogás em reatores horizontal

Substrato	Volume (L)	Produção de biogás (m³)	TDH (dias)	Referência
Resíduo orgânico putrescível dos resíduos sólidos urbanos e líquido ruminal bovino	25	0,6	350	Leite <i>et al.</i> (2002)
Esterco de cabra, palha de trigo, caules de milho e palha de arroz	2	0,016	-	Zhang <i>et al.</i> (2013)
Resíduo frutas e verduras	2200	33,01	270	Leite <i>et al.</i> (2014)
Biomassa - Esterco	-	-	30	US 20160369219 A1 (2016)

Fonte: Autor (2018).

Pode-se constatar, através do Quadro 3 que o trabalho de Leite *et al.* (2002) foi o que produziu maior volume de biogás por volume de reator. A utilização do líquido ruminal bovino pode ter contribuído para este diferencial contribuindo com aporte de umidade e micro-organismos. No entanto, o TDH foi muito alto.

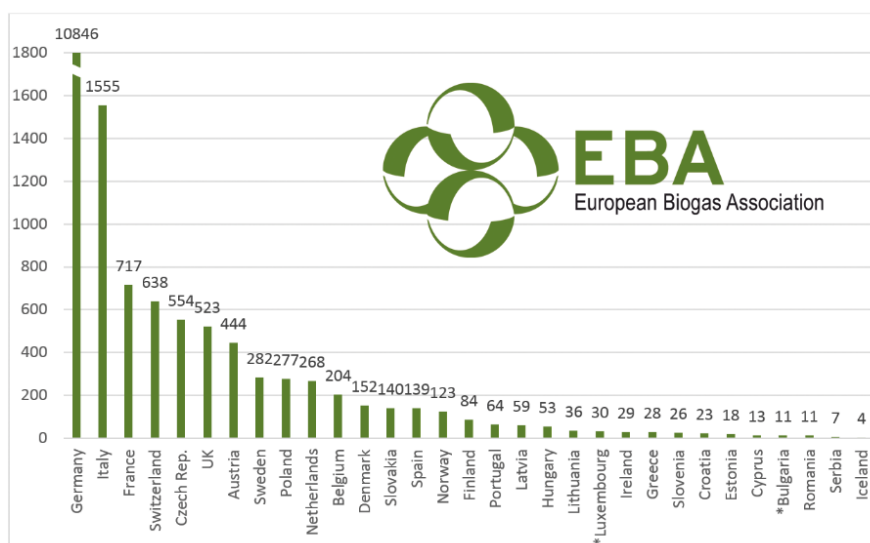
Zaiat *et al.* (1994), Benis *et al.* (2009) e Santos *et al.* (2011), utilizaram em seus estudos, reatores horizontais com biomassa imobilizada (ou seja, biomassa aderida em alguma superfície/componente). Todos concluíram que essa tecnologia trata-se de reatores biológicos de alta taxa. No entanto, segundo Amorim *et al.* (2000), faz-se necessário uma avaliação da aplicação de cargas orgânicas e volumétricas, para o melhor aproveitamento do volume útil dos reatores horizontais, tornando-os mais econômicos.

Nesse contexto, em uma publicação de Patente dos Estados Unidos (US) de nº US 20160369219 A1 (2016) revela um sistema para produção de biogás a partir de biomassa, sendo um reator horizontal de base retangular compreendendo um reservatório com múltiplas passagens e misturadores em seu interior. No entanto, o documento em questão não prevê a utilização de um sistema de agitação do tipo de paletas.

3.10 PANORAMA DE GERAÇÃO DE BIOMETANO NA EUROPA E NO BRASIL

Para a Associação Europeia de Biogás (EBA, 2015) existem diversos reatores para produção de biogás com aplicações diversas. Nesse sentido, a Figura 8 mostra o panorama europeu para geração de biogás, que possuía 17.358 plantas de biogás em 2015, sendo mais de 50% das plantas com capacidade elétrica instalada.

Figura 8 - Número de plantas de biogás por país da Europa



Fonte: EBA, 2015.

Através da Figura 8 pode-se constatar a grande aplicação desta tecnologia. Todavia constata-se uma supremacia da Alemanha, com quase 7 vezes o número de plantas do segundo colocado (Itália). De uma forma geral, observa-se que os países mais desenvolvidos possuem maior número de plantas.

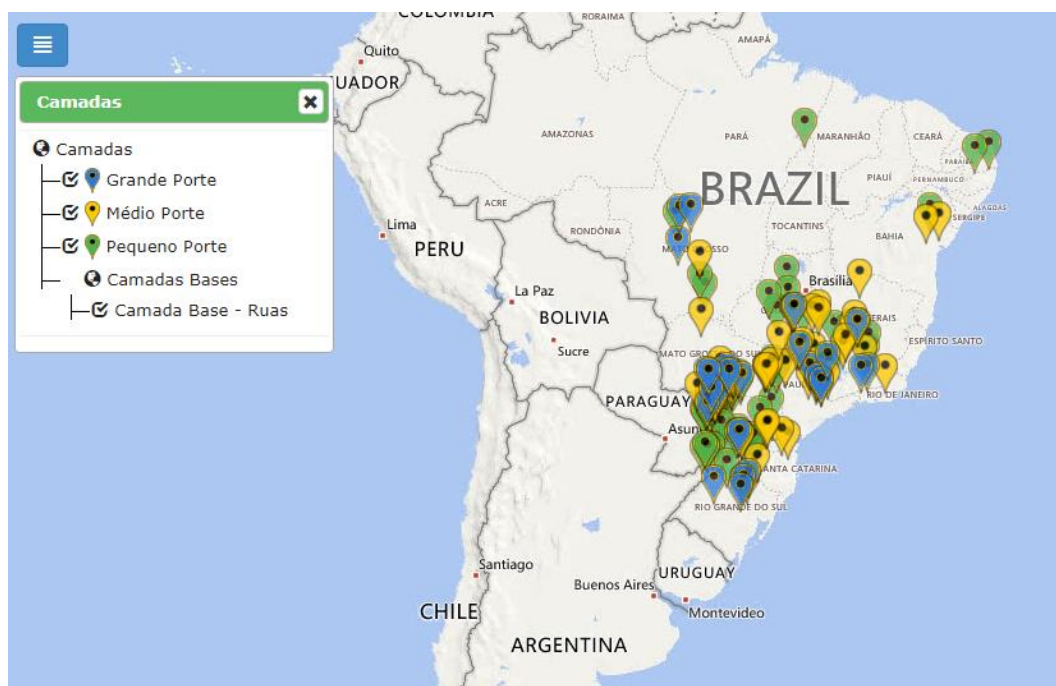
No Brasil, segundo a plataforma desenvolvida pela Cbiogás existem diversos reatores para produção de metano e biogás com fins de aplicação para energia elétrica, térmica, mecânica e GNR/biometano, conforme traz a Figura 9.

Assim como na Europa, para o Brasil (Figura 10), há também uma heterogeneidade, com um grande número de plantas nas regiões sul e sudeste, onde há um maior PIB.

Observar-se na Figura 8, os reatores são classificados como de grande, médio e pequeno porte (a Figura 9 mostra a distribuição de tamanho destes reatores), os mesmos também são preenchidos com diversos tipos de substrato, tais como lodo de esgoto, esterco diversos e resíduos sólidos (CIBIOGAS, 2018).

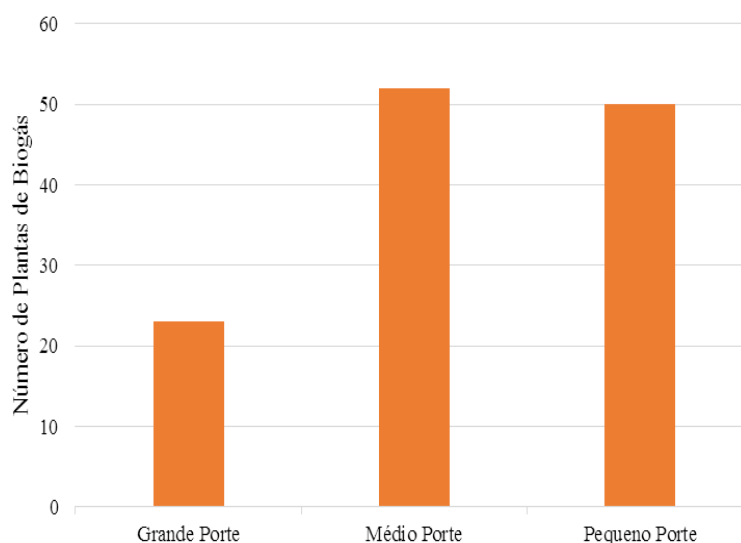
Como se pode verificar pela Figura 10, a grande maioria das instalações de reatores no Brasil são de pequeno e médio porte.

Figura 9 - Plantas de biogás no Brasil



Fonte: Cbiogás (2018).

Figura 10 - Número de reatores brasileiros por porte



Fonte: Cbiogás (2018).

Pernambuco, especificamente, possui duas plantas de pequeno porte (em construção) para geração de energia elétrica. O substrato utilizado em ambas será esgoto doméstico, oriundo das Estações de Tratamento de Esgoto dos municípios de Caruaru e Camaragibe, a capacidade de geração da primeira são de 1.713,00 m³/dia, já a segunda tem uma capacidade de 2.226,00 m³/dia de biogás (CIBIOGAS, 2018).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo está dividido em cinco partes. A primeira consiste na descrição da área de estudo com a apresentação do Centro de Abastecimento de Pernambuco, do seu volume de venda e geração de resíduos, bem como o local onde foram realizadas as coletas dos substratos e inóculos. Já a segunda parte descreve a metodologia de coleta empregada, a preservação até a chegada ao laboratório e bem como a caracterização dos resíduos orgânicos. Com isso, a terceira parte da metodologia foi demonstrar o uso do ensaio da avaliação do potencial de produção do biometano que foram realizados através do ensaio BMP (Biochemical Methane Potential). Nesse contexto, a quarta parte foi realizado a concepção do Reator Horizontal e toda a metodologia de preenchimento. E por fim, a quinta parte foi descrito a metodologia da estimativa da produção de energia

elétrica a partir do biometano oriundo da biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.

4.1 LOCAL DO ESTUDO

O local de estudo foi na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no centro de tecnologia e Geociência (CTG). No entanto, a coleta de material para referido estudo foram disponibilizados parte dele pelo Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco - CEASA/PE.

4.1.1 CEASA-PE

O Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco (CEASA-PE) é a maior central de abastecimento do Norte/Nordeste em volume de vendas, comercializando em torno de 90.000 t/mês em 48 galpões de comercialização. A CEASA-PE gera, em média (dados de 2017), 1.100 t/mês de resíduos sólidos, dos quais 90% são orgânicos (CEASA-PE, 2017a).

A Tabela 12 também mostra que a maior parte (de 55,6% a 80,6%, no ano de 2017) dos resíduos sólidos é direcionada para um aterro sanitário.

Tabela 12 Quantidade de resíduos sólidos gerados por mês, no ano de 2017, e tratamento/destinação final dos mesmos

Mês	Destinado em aterro sanitário		Destinado a Compostagem		Total (t/mês)
	Quantidade (t/mês)	Porcentagem (%)	Quantidade (t/mês)	Porcentagem (%)	
Janeiro	597,37	74,6	203,930	25,4	801,30
Fevereiro	573,70	80,6	138,494	19,4	712,19
Março	631,49	74,7	214,260	25,3	845,75
Abril	554,78	62,9	326,699	37,1	881,48
Maio	585,21	55,6	467,830	44,4	1.053,04
Junho	641,08	59,6	434,760	40,4	1.075,84
Julho	582,48	57,7	427,670	42,3	1.010,15
Agosto	620,28	62,4	373,160	37,6	993,44
Setembro	643,68	66,7	321,020	33,3	964,70

Outubro	611,01	62,6	364,490	37,4	975,50
Novembro	625,10	68,1	292,760	31,9	917,86
Dezembro	837,76	77,2	247,880	22,8	1.085,64
Total	7503,94	66,3	3812,95	33,7	11316,89

Fonte: CEASA-PE, 2017b.

4.1.2 Abatedouro de Paudalho

O Abatedouro Regional da Paudalho/PE é de competência da Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária (SARA) do estado de Pernambuco, sendo administrado pelo CEASA-PE. O mesmo realiza abate industrial de bovinos, suínos, caprinos e ovinhos (A Tabela 13 apresenta o número de abates) e produziu em torno de 30 t/mês (dados de 2017) de estercos (Caprinos e Ovinos) e líquido ruminal, que atualmente são tratados via compostagem (CEASA-PE, 2017c).

Tabela 13 Quantidade de abates por animal no Abatedouro de Paudalho/PE, nos período de 2011 a 2016

Abates	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Bovino	10.490	18.137	19.964	17.554	14.897	14.619	95.661
Suíno	2.765	2.765	3.268	4.553	5.123	5.720	24.194
Ovino/caprino	7.592	7.592	10.026	8.505	7.236	7.008	47.959

Fonte: CEASA-PE, 2011; CEASA-PE, 2012; CEASA-PE, 2013; CEASA-PE, 2014; CEASA-PE, 2015; CEASA-PE, 2016. Fonte: Autor (2018).

4.1.3 Estação de Tratamento de Esgoto Dancing Days

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Dancing Days, localizada no bairro da Imbiribeira, Recife/PE, é gerida pela BRK Ambiental (parceria público-privada com a Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA). Esta ETE tem como pré – tratamento uma caixa de areia, quatro reatores anaeróbios, quatro filtros, dois decantadores e uma unidade de desinfecção com cloro. Ela tem capacidade de tratar 300 L/s, sendo o esgoto oriundo dos bairros da Imbiribeira e Ipsep (TV COMPESA, 2014).

4.1.4 Usina Experimental de Biodiesel

A Usina Experimental de Biodiesel do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE) está localizada em Caetés/PE tendo sido inaugurada em 2007. Ela foi credenciada e autorizada pela ANP para produzir diariamente 1.000 litros, sendo exclusivamente para fins de pesquisa. Desta forma, todo o biodiesel é enviado para empresas parceiras para uso de forma experimental com diferentes proporções de diesel/biodiesel, sendo a avaliação final feita pelo SENAI, quanto ao desempenho dos motores e emissão de poluentes (CETENE, 2018).

4.2 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO, DOS INÓCULOS E DA GLICERINA

Os Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) utilizado como substrato nesse estudo foi oriundo do CEASA-PE, mais especificamente dos galpões do CECAF (Centro de Comercialização da Agricultura Familiar), LP2 (Atacado das Frutas) e LP3 (Atacado das Abóboras), sendo constituído de frutas, verduras e legumes impróprios para consumo humano (Figura 11).

Como inóculos, foram utilizados o líquido ruminal bovino (LRB) e o esterco caprino (EC), coletados no Abatedouro Regional da Paudalho/PE, e o lodo de reator (LE) tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* ou Reator anaeróbio de manta de lodo) que trata o esgoto doméstico na ETE Dancing Days.

A glicerina bruta (GL) foi oriunda da Usina de Biodiesel do CETENE.

Figura 11 - Coleta do resíduo sólido orgânico no CEASA-PE



Fonte: Autor (2018).

Todos os resíduos supracitados foram acondicionados em sacos e recipientes plásticos, sendo o RSO e o LE mantidos no freezer, à uma temperatura aproximada de 4° C, conforme recomendado pela técnica de coleta de amostras da CETESB (2011). O LRB foi acondicionado em temperatura ambiente, visto que temperatura do ambiente ruminal está, em média, entre 38° a 42° C (RUIZ, 1992). O EC e a glicerina também não foram resfriados.

Em seguida, o RSO foi cortado com auxílio de facas e tesouras com 2 ou 3 cm, (visando promover a redução do tamanho das partículas da amostra) e quarteado (Figura 11), segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004). Na sequência foi obtido o extrato solubilizado dos resíduos por Lange *et al.* (2002), permitindo obter os parâmetros pH e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A medição do pH também foi realizada para os inóculos e para a glicerina, com a amostra *in natura*, utilizando sempre o método eletrométrico - SMEWW 4500B. Vale salientar que parte do LRB passou por um pré-tratamento (peneiramento - peneira de solos) para remoção de sólidos mais grosseiros (maior que 1,19 mm), resultando no inóculo LRBp.

Figura 12 Quarteamento do resíduo sólido orgânico



Resíduo coletado



Resíduos após processo de corte e posterior quarteamento

Fonte: Autor (2018).

Para a determinação da umidade e do teor de Sólidos Totais (ST) e para a preparação de amostras para ensaios em base seca (inclusive o ensaio BMP - Biochemical Methane Potential), parte de RSO e dos inóculos foram submetidos à secagem em estufa, a temperatura de 105°C, até a constância da massa, conforme (WHO, 1979). Posteriormente, o RSO seco foi processado em um moinho de facas e os inóculos foram destorroados com o auxílio de um almofariz de porcelana. De posse das amostras secas e destorroadas, foram realizadas as determinações dos seguintes parâmetros:

Sólidos Voláteis (SV) de acordo com a NBR 13.999 (ABNT, 2003); análise elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre) pelo método de Pregl-Dumas (PATTERSON, 1973); análise de metais (cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês e zinco) por APHA (1998); e análise bioquímica seguindo os métodos (VAN SOEST, 1967) para carboidratos e lignina, e de Soxhlet para extração direta para lipídeos (sem contato direto com o solvente em ebulição), conforme (LUTZ, 2008).

4.3 ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A devida aferição da produção de biogás serão de duas formas:

- Na parte inicial será realizado a partir dos teste de BMP (Biochemical Methane Potential ou Potencial Bioquímico de Metano), que está sendo configurado como uma ferramenta experimental para o estudo da codigestão;
- A segunda parte é composta da configuração da Patente e a produção de biogás no reator de bancada Horizontal.

4.3.1 Ensaios do Potencial Bioquímico de Metano

A avaliação do potencial de produção do biometano foi realizada através do ensaio BMP visto que o mesmo fornece condições similares ao processo de biodigestão anaeróbia, tais como: anaerobiose (circulação do gás nitrogênio no início do experimento) e condições mesofílicas (os reatores foram acondicionados em estufas a aproximadamente 37° C).

Os reatores utilizados no ensaio BMP foram recipientes de vidro de 250 mL com tampa rosqueada e com um manômetro (de 1 kgf.cm⁻²) acoplado na tampa, com escala de 0,02 e 0,01 kgf.cm⁻², como mostra a Figura 12. Todos os ensaios foram realizados em triplicatas, com as configurações experimentais apresentadas no Quadro 4. Conforme pode ser observado no citado quadro, foram avaliados os efeitos do agente alcalinizante e da aclimação do inóculo, bem como da glicerina, na otimização da produção de biogás e metano.

Figura 13 - Reator utilizado no ensaio BMP



Quadro 4 - Composição das configurações avaliadas para biodigestão anaeróbia

Configurações avaliadas	Massa de RSO (g)	Volume de inóculo (mL)	Volume de água destilada (mL)	Volume de glicerina (mL)	Massa de NaHCO₃ (g)
LRB	-	50	-	-	-
LRBp	-	50	-	-	-
LD	-	50	-	-	-
LRB + LD	-	50 ¹	-	-	-
EC	-	10 ²	40	-	-
LRB + LD + EC	-	50 ³	-	-	-
AC	-	50	-	-	-
RSO	5	-	50	-	-
LRB + RSO	5	50	-	-	1,68
LRBp + RSO	5	50	-	-	1,68
LD + RSO	5	50	-	-	1,68
LRB + LD + RSO	5	50 ¹	-	-	1,68
EC + RSO	5	10 ²	40	-	1,68
LRB + LD + EC + RSO	5	50 ³	-	-	1,68
AC + RSO 1	5	50	-	-	0,56 ⁴
AC + RSO 2	5	50	-	-	1,68
LRB + RSO + GL	5	50	-	2,5	1,68
LD + RSO + GL	5	50	-	2,5	1,68

LRB + LD + RSO + GL	5	50 ¹	-	2,5	1,68
EC + RSO + GL	5	10 ²	40	2,5	1,68

Legenda: RSO: resíduo sólido orgânico; LRB: líquido ruminal bovino; LRBp: líquido ruminal bovino peneirado; LE: lodo de esgoto doméstico; EC: esterco caprino; AC: inóculo aclimatado; NaHCO₃: bicarbonato de sódio; GL: glicerina. **Observações:** ¹25 mL de LRB e 25 mL de LD; ²valor dado em gramas; ³20 mL de LRB, 25 mL de LD e 5g de EC; ⁴Adicionado após 20 dias de codigestão. Fonte: Autor (2018).

A dosagem do agente alcalinizante (bicarbonato de sódio), foi determinada seguindo a proporção de 0,2 g de HCO₃⁻.gDQO⁻¹, a partir do melhor desempenho no reator mesofílico estudado por Doll e Foresti (2010).

Após o preenchimento, os BMPs foram fechados e submetidos à circulação do gás nitrogênio (por cerca de dois minutos), objetivando fornecer condições iniciais de anaerobiose. Em seguida, os biorreatores foram envolvidos com papel alumínio, para evitar a influência da luz artificial no processo, e acondicionados em estufa a uma temperatura de 37°C – condição mesofílica (Figura 14), por um período que variou de 80 dias, tempo necessário para a estabilização da produção de biogás.

Figura 14 - Reatores do ensaio BMP acondicionados em estufa



Fonte: Autor (2018).

O cálculo do volume diário de biogás produzido foi realizado através das leituras diárias da pressão do manômetro de cada reator, bem como pressão atmosférica e a temperatura do experimento, utilizando a metodologia de Harries *et al.* (2001). Vale

salientar que os valores de pressão atmosférica são oriundos do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, seguindo a sequência:

- Acessar o site do INMET (<http://www.inmet.gov.br/portal/>);
- Clicar em Estações e Dados, e escolher a opção Dados meteorológicos - Estações automáticas;
- Selecionar PE - Recife (Estação Recife-A301), e clicar no ícone Dados;
- Inserir a data da leitura da pressão dos manômetros dos reatores;
- Localizar a pressão atmosférica medida para o horário aproximado de leitura da pressão dos manômetros dos reatores.

A produção acumulada de biogás é o somatório do volume de biogás gerado durante todo o período do experimento. E a taxa diária de produção de biogás é o volume produzido diariamente.

A produção de biogás líquida e acumulada do resíduo sólido urbano foi obtida pela subtração da produção acumulada de biogás da codigestão e da produção acumulada de biogás do inóculo separadamente. E potencial máximo de produção do resíduo orgânico, divide a maior produção líquida do biogás pela massa de RSO inserido no reator BMP, que nesse trabalho foi de 5 gramas.

As concentrações de metano e de dióxido de carbono produzidos foram determinadas por meio do cromatógrafo gasoso APPA Gold, o qual utilizou o hidrogênio como gás de arraste, o detector de condutividade térmica (DCT) e o N2000 Chromatostation como sistema de aquisição de dados. A temperatura utilizada no detector foi de 150°C, já do injetor de 140°C, e a do forno de 60°C. A periodicidade desta análise foi quinzenal, nos primeiros 45 dias, e depois desse período, a quantidade de biogás produzido foi insuficiente, para tal análise, sendo realizado apenas no final do experimento, ou seja, com 80 dias. Vale salientar que, algumas configurações estudadas, houve a estabilização com 40 dias, sendo essa a última análise cromatográfica. Ressalta-se ainda que o biogás foi coletado diretamente dos reatores BMP por meio de uma seringa, e imediatamente após, o mesmo foi injetado no equipamento supracitado. Após a análise

da composição do biogás, a pressão do reator foi reduzida para valores em torno de 0,20 a 0,10 kgf.cm⁻² dependendo do volume de biogás inicial do reator.

4.3.2 Desenvolvimento do Reator horizontal em escala de laboratório

Com o objetivo de avaliar produção de biogás mais próxima das condições reais de operação de um biodigestor, tais como: resíduo sólido orgânico *in natura*, condições iniciais anaeróbia, variação da temperatura ambiente e sistema de agitação; foi desenvolvido um reator horizontal (Figura 15) com tais características de operação.

O reator horizontal foi totalmente fabricado em aço inox 304, com sistema de vedação que não permite entrada de oxigênio, nem de feixes de luz, que pode afetar a atividade microbiana existente no processo de biodigestão anaeróbia. Este reator está sendo patenteado e o número do processo: BR102018 0073486, certificação de adição de invenção, Instituto Nacional de Propriedade industrial (INPI).

Figura 15 - Fotografia do reator horizontal



Fonte: Autor (2018).

O referido reator tem uma capacidade total de aproximadamente 42,86 litros, sendo cerca de 25,92 litros para a disposição da biomassa residual (inóculo mais substrato), onde ocorrem as reações bioquímicas, resultando na decomposição de materiais orgânicos, e consequente, geração de biogás e biometano. Os demais 16,94

litros (headspaces) são destinado para o armazenamento do biogás, quando o mesmo não estiver conectado a um gasômetro.

A junção desses dois compartimentos é feita por meio de parafusos e porcas de 1/4", além de uma fita de borracha (semelhante à um o-ring) de 5 mm, que visa assegurar a estanqueidade do equipamento, garantindo o armazenamento de todo biogás produzido pela decomposição anaeróbia da biomassa residual.

Para estimar a produção de biogás e coleta-lo para análise, no topo do corpo do reator há dois segmentos de dutos, para o encaixe do manômetro de 0 a 1 bar (escala de 0,2), da válvula de esfera monobloco latão forjado com conexões de 1/8" e do nipe para redução de 1/4" para 1/8".

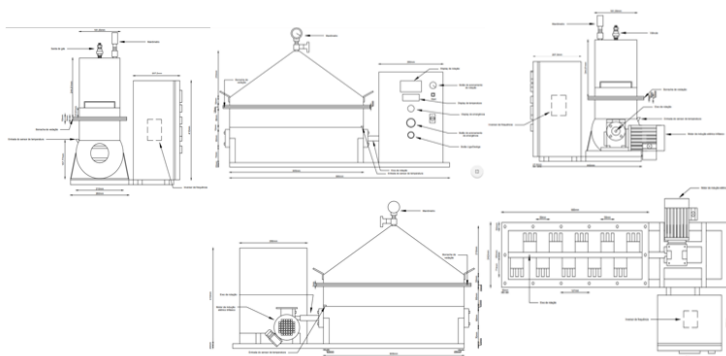
Como mostram as Figuras 16 e 17, o equipamento também conta com um sistema de agitação do tipo de paletas (com distância de entre elas de 5,85 cm), que varia de 0 rpm até 1670 rpm, acionado por motor elétrico de indução trifásico de marca Eberle, de 1/3 de CV, com 60 Hz de frequência, com uma tensão de 220 volts e uma corrente 1,45 ampères, com um inversor de frequência (transformar corrente alternada em contínua) de marca MEQ, modelo CFW08, com variação de velocidade de rotação, além de um medidor de temperatura do sistema reacional.

Figura 16 - Fotografia do interior do reator horizontal



Fonte: Autor (2018).

Figura 17 - Vistas posterior, lateral esquerda, superior, lateral direita e frontal do reator horizontal



Fonte: Autor (2018).

4.3.3 Aclimação no reator de laboratório horizontal

Para o processo de aclimação do referido estudo foi adaptado pelo o guia VDI 4630 dispõe sobre a fermentação de materiais orgânicos para a caracterização do substrato, amostragem, coleta de dados de material em testes de fermentação.

Nesse contexto, Steinmetz (2016) produziu um inóculo mesofílico, baseado na recomendação alemã VDI 4630.

Na produção do inóculo utilizado neste trabalho foi preparado misturando-se volumes de lodo anaeróbio de um reator UASB, Líquido Ruminal Bovino e Esterco de Carneiro seco. O lodo anaeróbico foi obtido de um reator UASB em escala de campo (operando sob condições mesofílicas). Já os demais inóculos foram coletados no Abatedouro Regional da Paudalho/PE.

4.3.4 Produção de biogás e metano do inóculo aclimatado no reator de laboratório horizontal

Para a produção de biogás e metano foi utilizado como inóculo o digestato de um reator anaeróbio mesofílico produzido inicialmente (inóculo aclimatado), com as proporções de 7,5 kg de LD, 6 kg de LRB e 1,5 kg de EC. O mesmo teve um TDH de 120 dias, seguindo as recomendações da norma alemã VDI 4630 (com algumas adaptações). Dessa forma, o inóculo foi alimentado a cada 3 dias com 12,81g de RSO seco e triturado (0,3 g de SV.dia/L) diluído em aproximadamente 40 mL de água destilada. Segundo Goux *et al.*, 2017 a inoculação método é comum quando não há lodo anaeróbio disponível.

4.3.5 Produção de biogás e metano da Co-digestão no reator de laboratório horizontal

Uma semana antes de completar os 120 dias, a alimentação não foi realizada, visto que, posteriormente (dia 121), foi adicionada uma elevada carga orgânica (cerca de 7,5 kg de RSO *in natura*). O referido resíduo teve, apenas, uma redução de suas partículas promovida pela trituração do mesmo em um liquidificador industrial (marca Spolu, modelo SPL-052). De acordo com Souza (1984), este processo aumenta a superfície de

contato com massa microbiana, gerando um acréscimo considerável na eficiência do processo de digestão.

Vale salientar que a codigestão com o RSO foi realizada com cerca de 15 litros de inóculo aclimatado, já que, apesar da adição de RSO mais água destilada durante o período de aclimação, foi coletada uma amostra para determinação dos parâmetros pH, umidade, sólidos totais e voláteis, e realização de ensaios BMP do inóculo aclimatado, além da parcela transformada em biogás.

Além disso, a quantidade de RSO inserido na codigestão no reator horizontal foi, aproximadamente, metade da proporção (cerca de 20:1) do ensaio BMP (configuração AC + RSO 2). Esta alteração foi feita visto que se pode observar no referido ensaio, uma sobrecarga orgânica, que culminou na acidificação do meio e consequente baixa produção de metano, só aumentando após a adição de um agente alcalinizante.

Durante o período de aclimação (dia 1 a 120) e de codigestão (dia 121 a 240) foi realizado o monitoramento apresentado no Quadro 5, com suas respectivas periodicidades.

O Quadro 6 traz características do analisador de biogás analisador de gases Dräger (Modelo X-am 7000), utilizado na determinação da porcentagem de metano.

Quadro 5 - Monitoramento do reator horizontal

Monitoramento	Atividade	Periodicidade
Volume de biogás	Leitura da pressão do manômetro	Diária
Temperatura ambiente	Leitura da temperatura ambiente	Diária
Pressão atmosférica	Obtenção do dado no site do INMET	Diária
Porcentagem de metano do biogás	Análise no analisador de gases	Bissemenal
	Análise cromatográfica do biogás	Quinzenal

Fonte: Autor (2018).

Quadro 6 - Características do analisador de biogás Dräger

Parâmetro	Faixa de medição	Limite de quantificação	Faixa de erro
CH ₄	0 a 100%	0,1%	± 5,0 %
CO ₂	0 a 100%	0,1%	± 2,0 %
H ₂ S	0 a 500 ppm	1 ppm	± 1,0 ppm

Fonte: Manual Dräger (Modelo X-am 7000). Fonte: Autor (2018).

4.4 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS ANTES E DEPOIS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Visando analisar a variação e a influência de condições ambientais, bem como a degradação da matéria orgânica após o processo de biodigestão anaeróbia, foi realizado a determinação da umidade, do pH e do teor de SV de todas as configurações antes e depois do ensaio BMP e do reator horizontal, seguindo as mesmas metodologias supracitadas no tópico 5.2.

4.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOMETANO ORIUNDO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

A estimativa da produção energia elétrica foi realizada a partir das características de produção de biogás e concentração de metano oriundo da codigestão do inóculo aclimatado e do RSO, realizado no reator horizontal, visto que as condições de operação foram mais próximas das condições reais de operação de um biodigestor (resíduo sólido orgânico *in natura*, condições iniciais aeróbias, variação da temperatura ambiente e sistema de agitação).

Nesse sentido, foi considerado apenas a produção de biogás proveniente da codigestão, ou seja, após a adição do RSO (711,20 NL) e a porcentagem média de metano do período da codigestão (que foi cerca de 50%). Vale salientar que a produção de biogás do inóculo aclimatado foi muito baixa (Figura 5.1), representando aproximadamente 5% do volume obtido na codigestão, desta forma, a mesma foi considerada insignificante.

Em seguida, seguiu-se os procedimentos recomendado pelo Guia Prático de Biogás (FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2010) e Lobato (2011):

- Dividiu-se o volume acumulado de biogás da codigestão pela a quantidade de substrato (RSO) adicionando (em massa fresca – MF), com isso, obteve-se a produção de biogás (NL) por kg de MF (NL/KgMF);
- Transformou-se a unidade do potencial de biogás para unidade de metano, multiplicando a produção acumulada pela quantidade média de metano, culminando no valor em $\text{NLCH}_4/\text{KgMF}$, que é equivalente a $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{tonMF}$;

- Para o cálculo de produção energética, transformou-se $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{ton}$ em kWh, considerando que o poder calorífico do metano é de $35,9 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$, e que um kWh equivale a 3,6 MJ, correspondendo a $9,97\text{kWh}/\text{Nm}^3$, a partir disso, multiplicou-se o valor da produção de metano ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{ton}$) pelo poder calorífico do metano (kWh/Nm^3), chegando ao produto em kWh/ton;
- Multiplicou-se a produção em kWh/ton por 37%, que é o rendimento do processo, obtendo, com isso, um valor em kWh/ton;
- Multiplicou-se a produção energética do RSO codigerido no reator horizontal (kWh/ton) pela quantidade de resíduo orgânico produzido pelo CEASA-PE, ton/mês (oriundo o PGRS – tópico 4.1.1), obtendo-se, com isso, o potencial energético do mesmo, kWh/mês.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo das condições do substrato e dos inóculos é essencial para o processo da digestão anaeróbia. É bom destacar, ao produzir e manter um inóculo ativo em condições de escala de laboratório ou em campo pode reduzir possível oscilação dos parâmetros visando uma melhor eficiência na produção de metano.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E DOS INÓCULOS

Nesse resultado, a caracterização físico-química dos resíduos sólidos orgânicos – RSO, utilizado como substrato, bem como, os inóculos avaliados nessa pesquisa (líquido ruminal bovino – LRB, líquido ruminal bovino peneirado – LRBp, lodo de esgoto doméstico – LD e esterco caprino – EC) estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Caracterização físico-química do substrato e dos inóculos

Parâmetros	RSO	LRB	LRBp	LD	LD+LRB	EC	LD+LRB+EC	AC
pH	4,88	7,13	7,01	6,85	7,28	7,61	8,36	8,50
Umidade (%)	89,22	96,00	98,18	90,63	93,70	27,42	84,75	88,95
ST (%)	10,78	4,00	1,82	9,37	6,12	72,58	15,25	11,05
SV (% ST)	98,03	80,88	65,95	45,05	52,41	82,48	63,65	59,50
DQO (g/L)	168,01	-	-	-	-	-	-	-
C (%)	37,95	37,94	30,58	23,25	26,59	31,95	-	-

H (%)	6,31	5,20	4,16	3,27	3,80	5,28	-	-
N (%)	1,68	1,53	2,18	2,56	2,01	2,79	-	-
S (%)	0,42	0,42	0,44	2,38	1,88	0,67	-	-
Relação C/N	22,59	24,80	14,03	9,08	13,23	11,45	-	-
Lignina (%)	21,65	26,91	23,87	54,06	-	-	-	-
Relação de biodegradabilidade	2,04	1,60	1,45	0,49	-	-	-	-

Legenda: ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; DQO - demanda química de oxigênio; C - carbono; H - Hidrogênio; N - nitrogênio; S - enxofre; Relação de biodegradabilidade - (C+H)/lignina.

Fonte: Autor (2018).

Esse capítulo visou indentificar a composição destes inóculos e substratos, comparando-os com dados obtidos da literatura, e avaliando suas potencialidades para produção do biogás, assim como fatores ambientais que possam potencializar ou inibir a sua produção, por meio da biodigestão anaeróbia em escala laboratorial (reatores BMP e piloto).

Em relação ao pH do meio reacional, de acordo Chernicharo (1997), o intervalo de pH favorável para o crescimento ótimo dos micro-organismos produtores de metano é entre 6,6 e 7,4. Desta forma, pode-se observar que a maioria dos inóculos utilizados na biodigestão estão dentro da faixa supracitada, exceto, os inóculos EC, LD+LRB+EC e AC, apresentaram valores de até 8,50. Igualmente, Bona *et al.* (2015), encontrou valor de pH de 8,28 para o inóculo aclimatado, valor bem semelhante a esse estudo.

Já o RSO apresentou um pH ácido, que pode gerar uma inibição da atividade das metanogênicas. Entretanto, o pH obtido para o substrato, em estudo, é bem semelhante ao apresentado por (LEITE *et al.* 2002), na caracterização de resíduos de frutas e verduras (pH = 5,2).

A umidade do substrato e dos inóculos variaram cerca de 70%, tendo valores menores que 90%, que segundo Rizzoni *et al.* (2012) pode ser prejudicial à biodigestão, para os inóculos EC, LD+LRB+EC e AC, e para o RSO. No entanto, de acordo com (PROSAB, 2003), valores de 80% de umidade são frequentemente encontrados.

No que diz respeito, especificamente, aos inóculos LRB e LRBp, vale salientar que a umidade variou cerca 2% devido ao peneiramento do líquido ruminal bovino, o que proporciona, conseqüentemente, uma redução de partículas sólidas e um incremento de umidade no LRBp. Os valores obtidos para o substrato e para os inóculos LRB e LD,

nesse estudo, foram muitos próximos aos encontrados por Leitão *et al.* (2011) – acima de 80%, Leite *et al.* (2002) – 92,6% e Batista (2015) – entre 92 e 98%, respectivamente.

Semelhantemente, aos valores de umidade, os teores de SV encontrados para o RSO, LRB e LD, nesse estudo, foram bem próximo ao estudo de Leitão *et al.* (2011) – com 95%, Oliveira *et al.* (2017) – 75,71% e Firmo (2013) – 45,33%, respectivamente. Já Batista (2015) e Alves (2016) obtiveram valores de SV para lodo domésticos (reator UASB) entre 60 e 80% e 54%, respectivamente.

Ainda pode-se observar um valor de SV menor para LRBp, com relação, ao LRB, devido, também, a remoção da matéria orgânica e massa microbiana presente no material em suspensão.

Yadvika *et al.* (2004) indicam como relação de C/N, valores entre 25:1 e 30:1, por ser a faixa necessária para os micro-organismos anaeróbios mesofílicos na metanogênese. Desta forma, pode-se observar que o RSO e o LRB apresentaram-se relações muito próximas de 25:1, por outro lado, os demais inóculos, possui uma relação C:N menor do que a faixa recomendada/adequada, indicando excesso de nitrogênio ou carência de carbono.

Tchobanoglous *et al.* (1994) relataram, em seus estudos, uma relação C/N de 18,46 para a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Valor este semelhante ao do presente estudo.

Nesta caracterização, os teores lignina variaram de 21,65 a 54,06%, sendo a maior porcentagem correspondente ao lodo de esgoto doméstico (reator UASB), visto que o mesmo já passou por um tratamento biológico, onde os compostos facilmente degradáveis foram consumidos, restando apenas, os medianamente e dificilmente degradáveis, como a lignina e os ácidos húmicos e fúlvicos.

Francou (2003) estudou resíduos de poda e resto de grama e obteve valores de lignina que variou de 29 a 32%. Já Melo (2010) e Firmo (2013) obtiveram um teor de lignina de 22,98 e 21,69%, respectivamente, para resíduo orgânico e resíduo de comida estudados, valores bem semelhantes ao do presente estudo.

De acordo com Kim *et al.* (2009), na presença da lignina, aproximadamente 40% da celulose (proveniente do resíduo orgânico) pode ser biodegradada. Por outro lado, na ausência da mesma, a taxa de degradação pode chegar a 90%.

Nota-se, por fim, que o RSO possui um potencial de biodegradabilidade maior que os inóculos, visto que, os mesmos passam por um tratamento biológico, onde grande parte da matéria orgânica já foi degradada ou foi consumida pelo metabolismo do animal.

Segundo Wang *et al.* (1994), em termos das relações de biodegradabilidade, utilizando os parâmetros bioquímicos, os valores superiores a 0,24, indicam para resíduos que ainda podem ser degradados. E os valores de relação de biodegradabilidade, obtidos nesse estudo, variaram de 0,49 a 2,04, indicando o potencial de degradação e, consequentemente, produção de biogás dos mesmos. Firmo (2013) encontrou relações de biodegradabilidade de 2,47 e 2,94 para a mistura resíduo de alimentar e lodo de ETE (reator UASB).

É importante destacar, que as faixas estabelecidas pelos autores supracitados são orientativos, visto que os micro-organismos têm a capacidade de adaptar-se à condições que, em princípio, as afetavam notavelmente (CARREAS, 2013).

5.2 ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Os resultados da geração de biogás e metano (CH_4) obtidos nos tratamentos com os inóculos e da codigestão com os resíduos estão descritos nas Figuras 5.1, 5.4 e 5.7 através do volume acumulado de biogás (NmL). Vale salientar, que para todos os tratamentos foram realizados a verificação da concentração de mentano.

5.2.1 Ensaios Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

Para a verificação de potencial de Biogás foram utilizados os teste de BMP. Nesse sentido, Silva et al. (2017) fez uso dessa metodologia para a produção de H_2 através de codigestão de resíduos. Diante disso, Alves, (2016) utilizou a supracitado ensaio que os testes têm mostrado como uma ferramenta experimental, para o estudo da utilização na codigestão de diferentes substratos, apresentando indicativo satisfatório da produção de biogás.

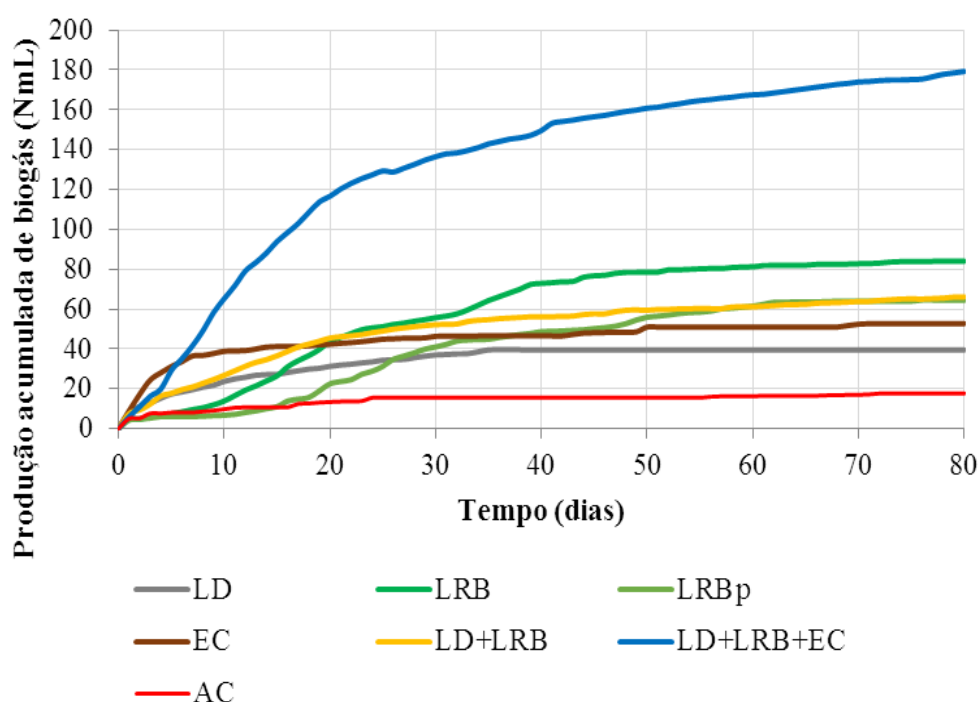
5.2.1.1 Produção de biogás dos inóculos

Inicialmente será apresentado o potencial de produção de biogás dos inóculos separadamente, visando avaliar a degradação da matéria orgânica inerente aos mesmos (Figura 5.1).

Pode-se observar que a maior produção acumulada foi do LD+LRB+EC (cerca de 179,25 NmL de biogás), seguido das configurações LRB, LD+LRB, LRBp, EC, LD e

AC, que obtiveram aproximadamente 80,06; 66,42; 64,42; 52,74, 39,50 e 17,69 NmL de biogás, respectivamente. Vale salientar que os inóculos LRB, LRBp e LD+LRB demoraram mais tempo para atingir a estabilização, com relação ao LD e AC, devido, provavelmente, a maior carga orgânica – apontado pelo teor de SV (Tabela 18).

Figura 18 Produção média acumulada de biogás dos diferentes inóculos avaliados



Fonte: Autor (2018).

Ressalta-se que, para Bona *et al.* (2015), um inóculo de boa qualidade para teste de potencial de biometano, deverá oferecer condições ideais para o processo de digestão. Nesse contexto, a recomendação da VDI 4630 (2006) para o ensaio de produção de metano, o inóculo deverá ter uma baixa produção de biogás, em torno de 2% em termo de produção.

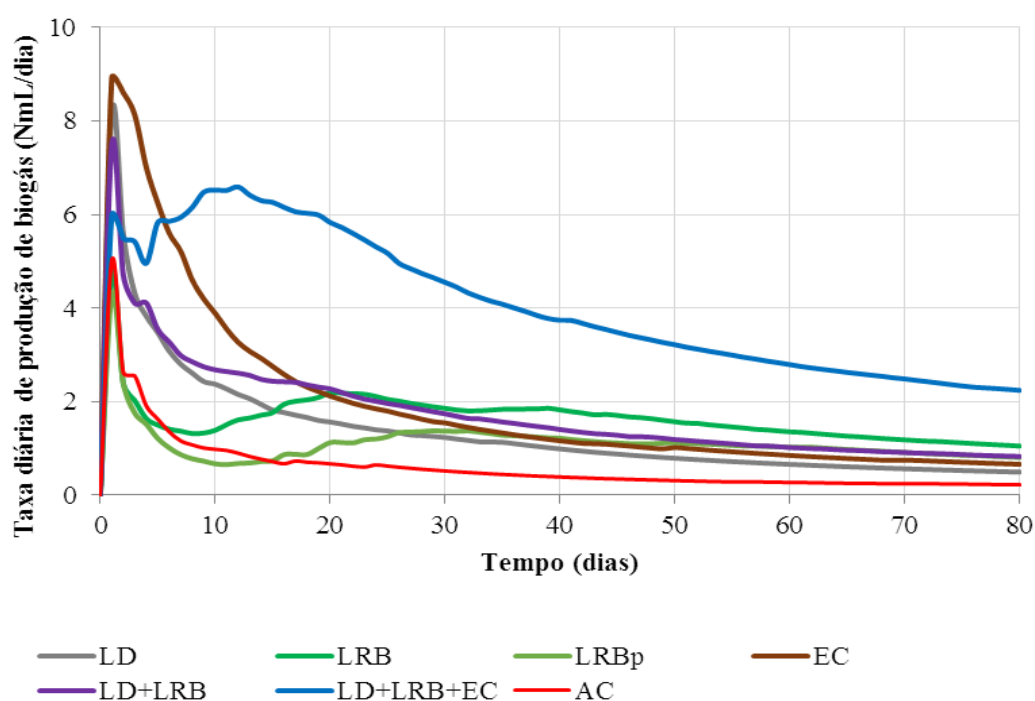
Nesse contexto, o AC foi, dentre dos inóculos, o que produziu um menor volume de biogás, representando aproximadamente 5% do volume obtido na codigestão do mesmo com o RSO (Figura 18). Tal valor foi o que mais se aproximou da norma alemã VDI 4630. Os demais inóculos separadamente, corresponderam a 44,88; 44,37; 37,06; 31,26; 24,93 e 17%, para as configurações LD+LRB+EC, LRB, LRBp, LD+LRB, EC e LD, da produção de biogás das suas respectivas codigestões, se comportando, desta forma, como substrato (fonte de carga orgânica) e não como inóculo.

Alves (2008) também avaliou o potencial de produção de biogás de lodo de esgoto doméstico (reator UASB) e obteve uma produção média de 101,4 NmL (em um período de 60 dias), valor bem superior ao obtido neste estudo. No entanto, o teor de

(que está associado à concentração de micro-organismos) do lodo estudado pela referida autora, também foi muito maior ao deste estudo (83,2%).

Considerando a taxa diária de produção de biogás (Figura 18), pode-se observar, que para todos os inóculos, a mesma é maior nos primeiros dias da biodigestão anaeróbia, onde os compostos facilmente degradáveis são rapidamente transformados em biogás. Com o passar do tempo essa taxa diária decai, visto que se faz necessário mais tempo para degradação de compostos medianamente e dificilmente degradáveis. Este fato sugere que a etapa da hidrólise seja a limitante deste processo.

Figura 19 Taxa diária média de produção de biogás dos diferentes inóculos avaliados



Fonte: Autor (2018).

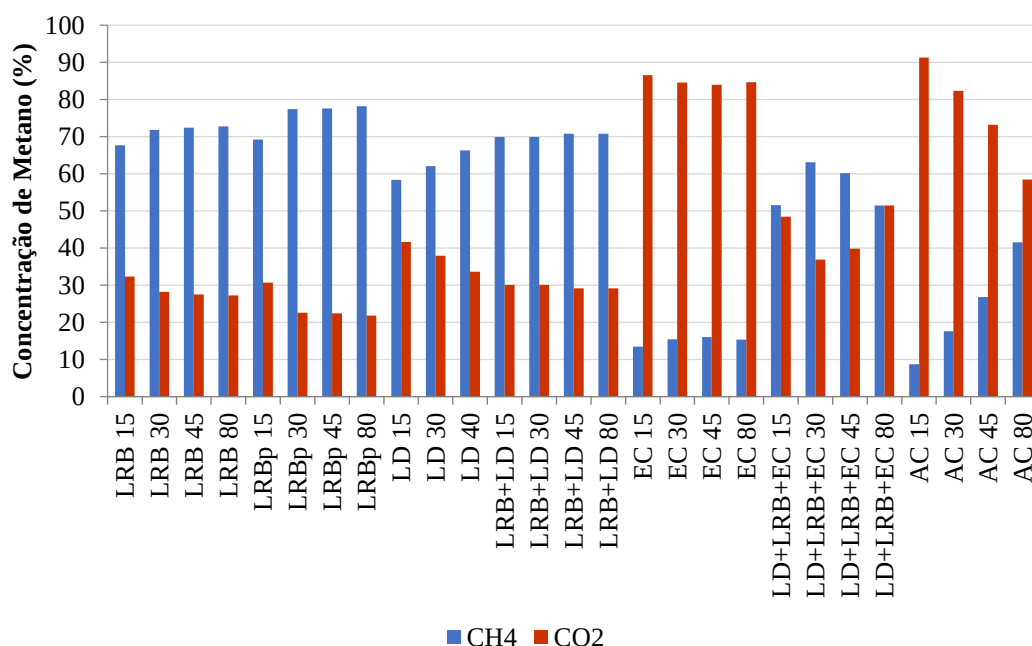
Este fenômeno pode estar associado a composição dos inóculos, muitos deles elevado teor de lignina. Pode-se evidenciar esse comportamento ao analisar o LD, que, com cerca de 54% de lignina, possui um pico e em seguida há uma queda significativa da taxa de produção. Já para o EC esta queda é mais suave, pois seu teor de lignina, de acordo com Zhang *et al.* (2013) deve ser de aproximadamente 24%.

Dentre os inóculos, o que teve maior taxa de biogás foi o EC com o valor máximo de 8,92 NmL/dia. Já as demais configurações tiveram como maiores taxas: 8,17; 7,49; 6,59; 5,02, 4,78 e 4,30, com respectivas configurações: LD, LD+LRB, LD+LRB+EC, AC, LRB e LRBp.

Apesar da configuração LD+LRB+EC não ter tido a maior taxa, mas ela foi a que manteve maiores valores de taxa diária de produção de biogás ao longo dos dias.

Com relação à composição do biogás gerado pelos inóculos no BMP, a Figura 20 mostra que em todas configurações (valores médios da triplicata) a porcentagem de metano (CH_4) aumentou, e consequentemente, a de dióxido de carbono (CO_2) reduziu ao longo do tempo, tal comportamento pode estar associado à adaptação dos inóculos, com variações do pH no interior do reator e adaptação e crescimento das *Arqueas* metanogênicas.

Figura 20 Análise cromatográfica do biogás produzido pelos diferentes inóculos avaliados, ao longo do tempo



Fonte: Autor (2018).

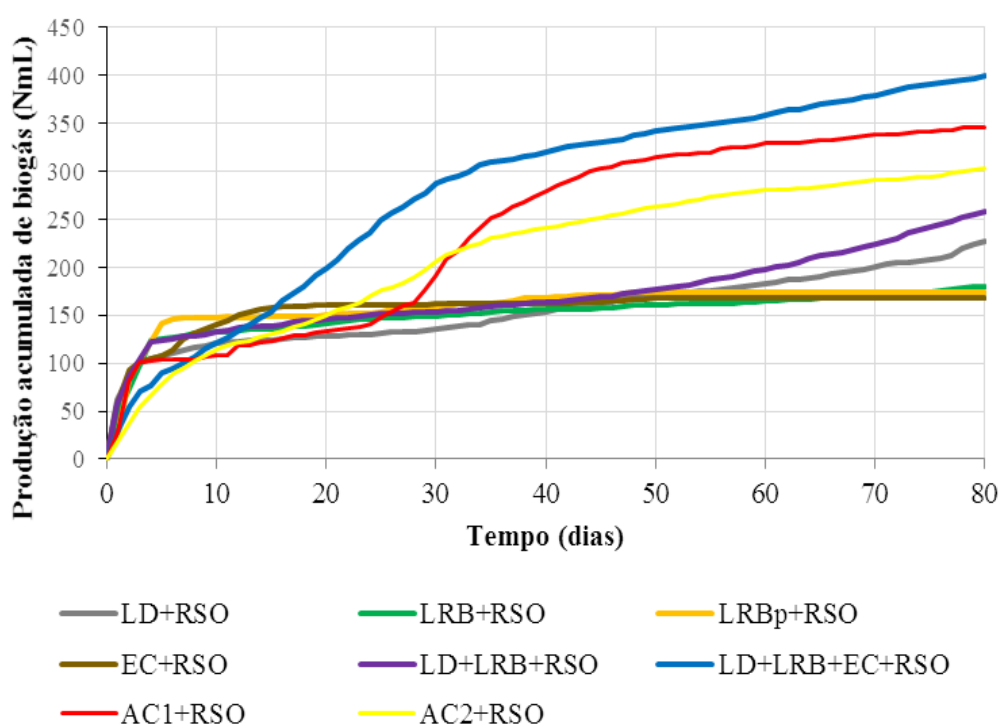
Dentre os inóculos, o que apresentou maior média de porcentagem de metano no período avaliado foi o LRBp com 75,60%, seguido pelo LRB, LRB+LD, LD, LRB+LD+EC, AC e EC, com as seguintes médias, respectivamente: 71,17; 70,36; 62,23; 56,59; 23,69 e 14,44%. Ou seja, com exceção dos inóculos, EC e AC que produziram

41,26 e 15,35% de metano, todos os inóculos estudados produziram mais de 60% de metano no TDH de 80 dias.

5.2.1.2 Produção de biogás da codigestão do substrato com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante no BMP

Concomitantemente às avaliações de geração de biogás dos inóculos (individuais e combinados) separadamente, também foi analisado a codigestão de RSO com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante (bicarbonato de sódio). Os resultados de produção de biogás estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 Produção média acumulada de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP



Fonte: Autor (2018).

Pode-se observar que a mistura LD+LRB+EC+RSO apresentou o maior valor acumulado de produção de biogás (399,37 NmL), seguido pelas composições AC1+RSO, AC2+RSO, LD+LRB+RSO, LD+RSO, LRB+RSO, LRBp+RSO e EC+ RSO, com médias de produção de biogás de 346,31, 302,84, 258,41, 227,22; 180,45; 173,83 e 168,73NmL, respectivamente.

O resultado obtido para a mistura LD+LRB+EC+RSO está de acordo com os valores das taxas de produção da Figura 21, pois esta composição de inóculos foi a que apresentou uma maior taxa ao longo do tempo.

Nota-se, desta forma, que o inóculo utilizado tem uma grande influência no incremento de produção de biogás na codigestão de resíduos sólidos orgânicos, devido às espécies de micro-organismos presentes e ao fornecimento de condições para a biodigestão anaeróbia, tais como: pH, umidade, nutrientes, massa microbiana, etc.

Outro ponto importante é o tempo de estabilização (que influencia diretamente no tamanho do reator), nesse sentido pode-se observar que as configurações que menos produziram (LRB+RSO, LRBp+RSO e EC+ RSO) e também foram as que tiveram estabilizações mais rápido. As demais mesmo após 80 dias, ainda possuíam um leve incremento.

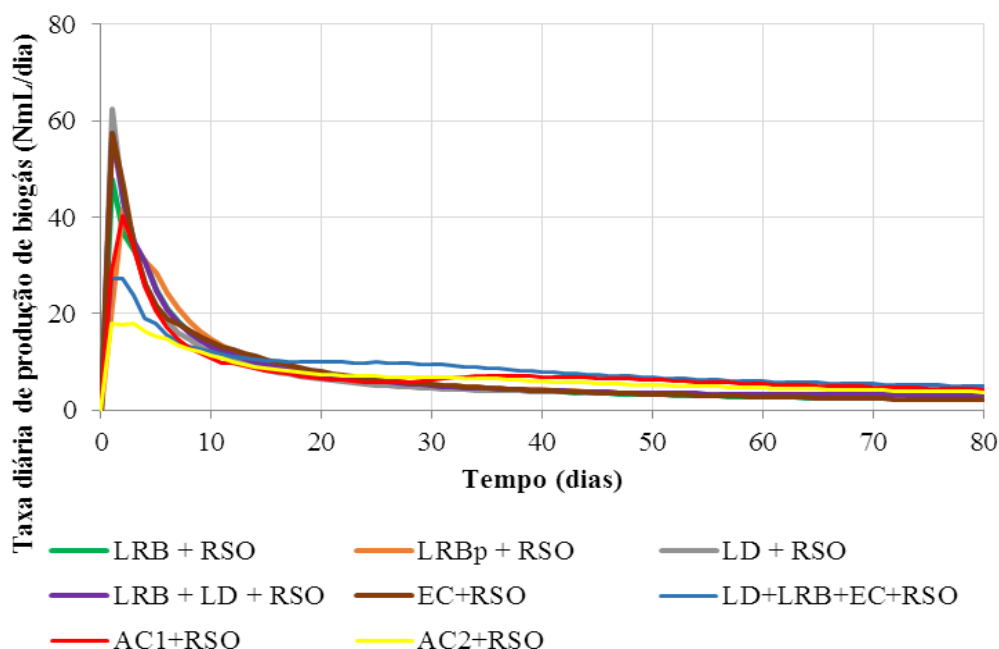
Oliveira *et al.* (2017) avaliaram o potencial de metanização da codigestão anaeróbia resíduos orgânicos, usando como inóculos o esterco bovino e resíduo ruminal bovino e como substrato resíduos alimentares, com isso, verificaram-se que o reatores inoculados com esterco bovino produziu 12 vezes mais metano que com o resíduo ruminal. No entanto, o líquido ruminal pode propiciar condições umidade e aporte de micro-organismo para o meio reacional.

Com relação a taxa diária máxima de biogás (Figura 21), as configurações LD+RSO, LRB+LD+RSO, EC+RSO, LRB+RSO, LRBp+RSO, AC1+RSO, LD+LRB+EC+RSO e AC2+RSO apresentaram os seguintes valores, em ordem decrescente: 62,44; 57,36; 57,36; 47,80; 42,10; 40,27; 27,37; 18,01 NmL/dia, respectivamente. Aqui, também, tem-se o mesmo comportamento de redução da taxa diária de produção de biogás com o passar dos dias. Pode-se também mais uma vez observar que a mistura LD+LRB+EC+RSO é a que apresenta os valores de taxa mais elevados com tempo, exceto para o início, onde se tem os picos de taxas para os diversos inóculos, como o LD que mais uma vez apresenta o maior pico, estando de acordo com os resultados da Figura 21.

Silva *et al.* (2009) avaliou codigestão de diferentes resíduos de abatedouro (sangue, rúmen e esterco bovino) e obteve produções entre 16,47 e 25,93 NmL (em 7 dias), para os diferentes tratamentos, resultando, com isso, em uma taxa diária média entre 2,35 e 3,70 NmL/dia. No entanto, para esse estudo, foram obtidos valores superiores, entre 4,99 e 3,79 NmL/dia para as configurações LD+LRB+EC+RSO, AC1+RSO e

AC2+RSO, já as demais configurações tiveram valores bem próximos ao estudo supracitado.

Figura 22 Taxa diária média de produção de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP



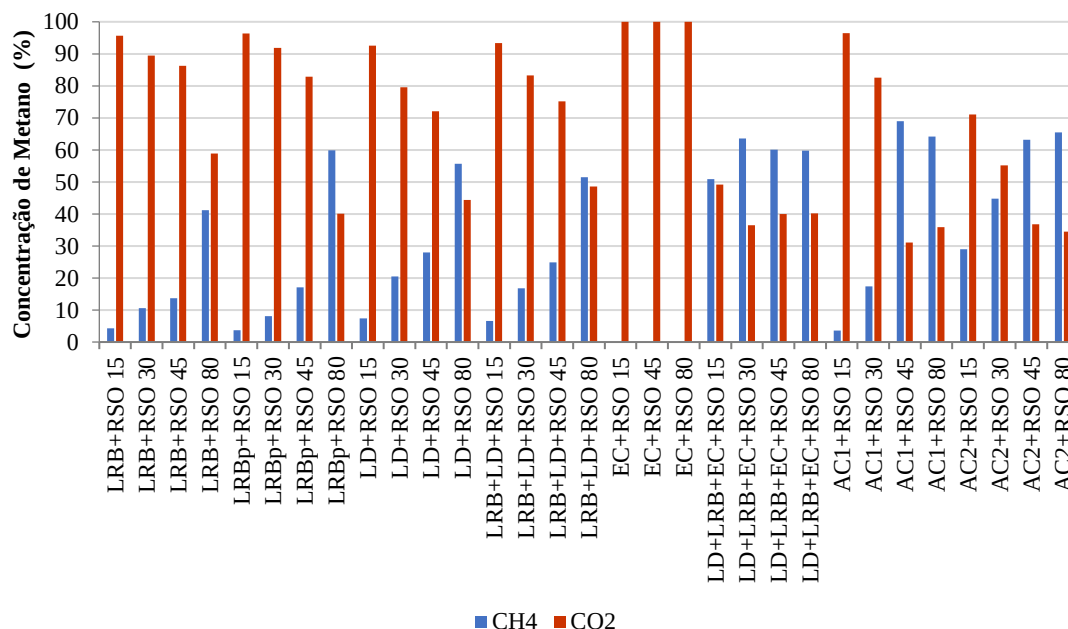
Fonte: Autor (2018).

Analisando qualitativamente o biogás gerado pela codigestão com adição do agente alcalinizante (Figura 23), pode-se observar um comportamento semelhante ao dos inóculos, aumento da porcentagem CH_4 e redução da de CO_2 com o passar dos dias do experimento.

No entanto, o teor de metano no biogás produzido pela codigestão foi consideravelmente menor, com médias de porcentagem de metano no período estudo de 50,61; 38,13; 27,87; 24,91; 22,20; 17,44 e 0,00%, para as seguintes configurações, respectivamente, AC2+RSO, AC1+RSO, LD+RSO, LRB+LD+RSO, LRBp+RSO, LRB+RSO e EC+RSO.

Nas configurações com o inóculo aclimatado com um TDH de 45 dias, foram superiores a 65%, desta forma, pode-se inferir que o mesmo influenciou no aumento da concentração de metano e na redução do uso de alcalinizante. Isso porque, segundo Bona *et al.* (2015) é adicionada uma biomassa microbiana para melhorar o processo de digestão anaeróbia.

Figura 23 Análise cromatográfica do biogás produzido pela codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante, ao longo do tempo no BMP



Fonte: Autor (2018).

Com um TDH de 80 dias, todas as configurações, exceto o LRB+RSO e LRB+LD+RSO, teve uma concentração de metano superior a 55%. Nesse sentido, esse estudo está de acordo com outros experimentos disponíveis na literatura e com diferentes substratos, conforme mostra o Quadro 7.

Quadro 7 - Valores de concentração de Metano para diferentes substratos

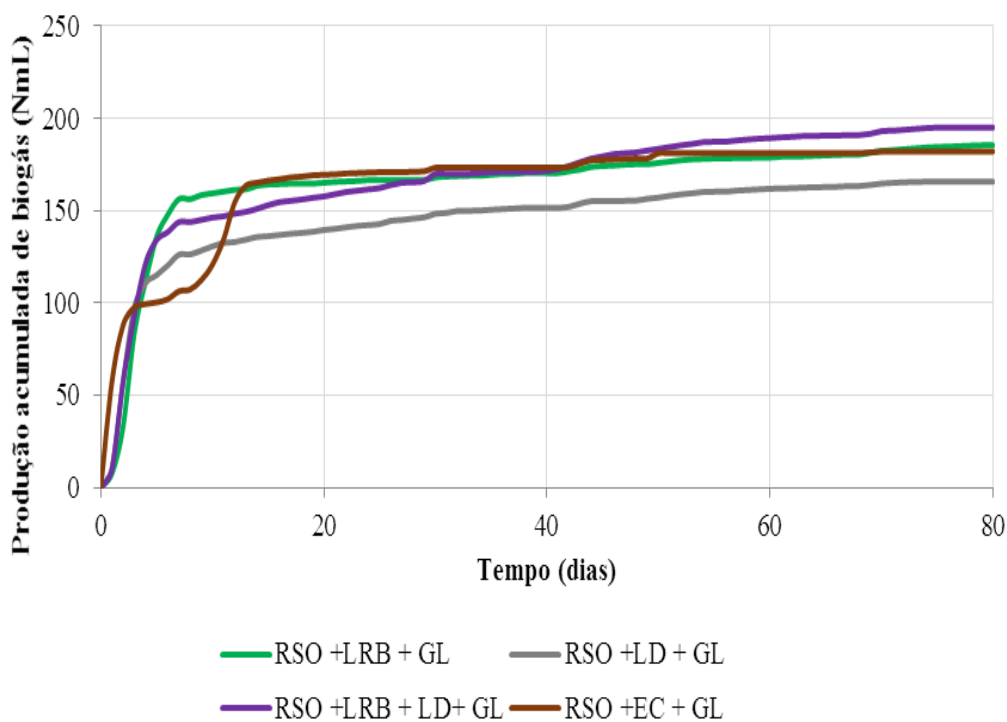
Substrato	Concentração de CH ₄ (%)	Referência
Frutas e verduras	50,0	Luna <i>et al.</i> (2009)
	64,0	Leite <i>et al.</i> (2014)
Esterco Caprino	70,0	Konrad <i>et al.</i> (2014)
Beterraba	53,0	Das e Mondal (2016)
Resíduo alimentar	63,0	Kuo e Dow (2017)

Fonte: Autor (2018).

5.2.1.3 Produção de biogás da codigestão do substrato com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante e glicerina

Paralelamente às avaliações de geração de biogás anteriormente citados, também foi analisado a codigestão de RSO com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante (bicarbonato de sódio) e glicerina (5% do volume do biorreator). O comportamento, em termos de produção de biogás, das diferentes configurações pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 Produção média acumulada de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina no BMP



Fonte: Autor (2018).

Nota-se que a configuração LRB+LD+RSO+GL foi a que apresentou a maior média de volume acumulado de biogás (195,02 NmL), seguida pelas composições LRB+RSO+GL, EC+RSO+GL e LD+RSO+GL, com os seguintes valores, respectivamente: 185,46; 182,12; e 165,71 NmL.

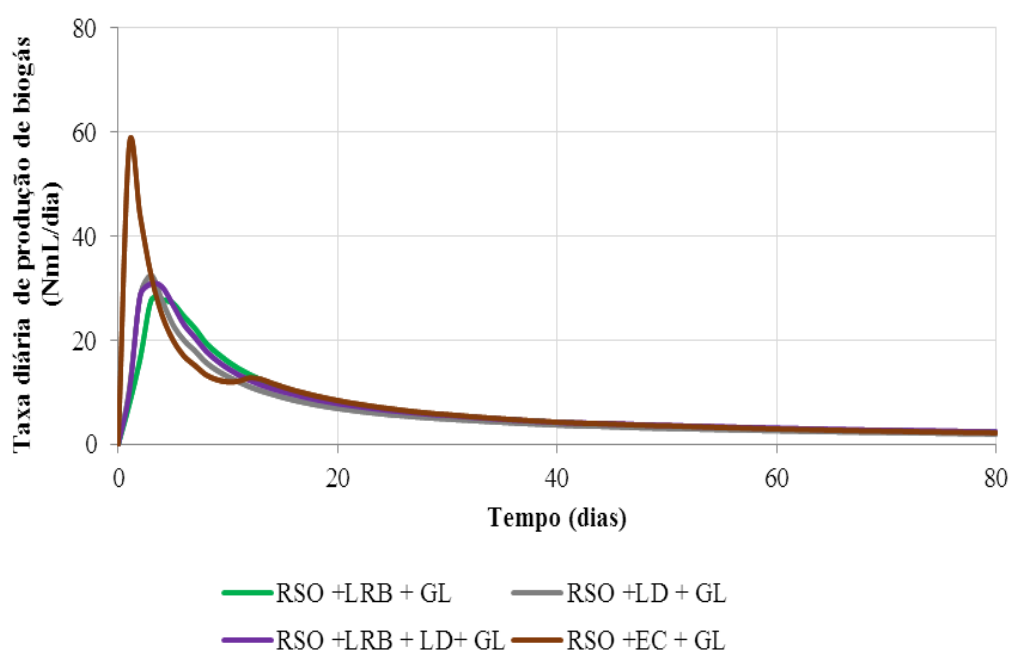
Alves (2016) avaliou, em escala BMP, a adição de glicerina (1 e 3% do volume total da amostra) na codigestão de resíduos alimentares e lodo primário de ETE (Estação de Tratamento de Esgotos). Ele obteve uma produção acumulada de biogás de 224,05

NmL em 20 dias (reatores preenchidos com 150 mL de amostra), valor inferior (cerca de 1,5 vez) ao obtido nesse estudo, considerando a mesma quantidade de resíduo a ser biodigerido e o mesmo inóculo (lodo de esgoto doméstico - reator UASB).

Já Robra (2006) alcançou uma produção acumulada de biogás de aproximadamente 25.000 NmL de biogás, valor cerca de 2,5 vezes maior que a produção máxima encontrada nesse estudo (EC+RSO+GL), a partir da biodigestão anaeróbia de estrume de gado e 5% de glicerina, sendo os reatores alimentados a cada 10 dias com um TDH de 20 dias. Tal diferença pode ser justificada pela elevada carga orgânica do esterco de gado e consequentemente, grande potencial de produção de biogás, além das alimentações sequenciais.

Já a taxa diária máxima de biogás (Figura 25) foi de 57,36; 32,50; 30,91 e 25,96 NmL/dia, respectivamente para as seguintes configurações: EC+RSO+ GL, LD+ RSO+GL, LRB+LD+RSO+GL e LRB+RSO+GL. Tais valores foram obtidos nos primeiros 3 dias, após isso, nota-se um comportamento de decaimento, comum a todas as avaliações desse estudo e na literatura.

Figura 25 Taxa diária média de produção de biogás da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina no BMP



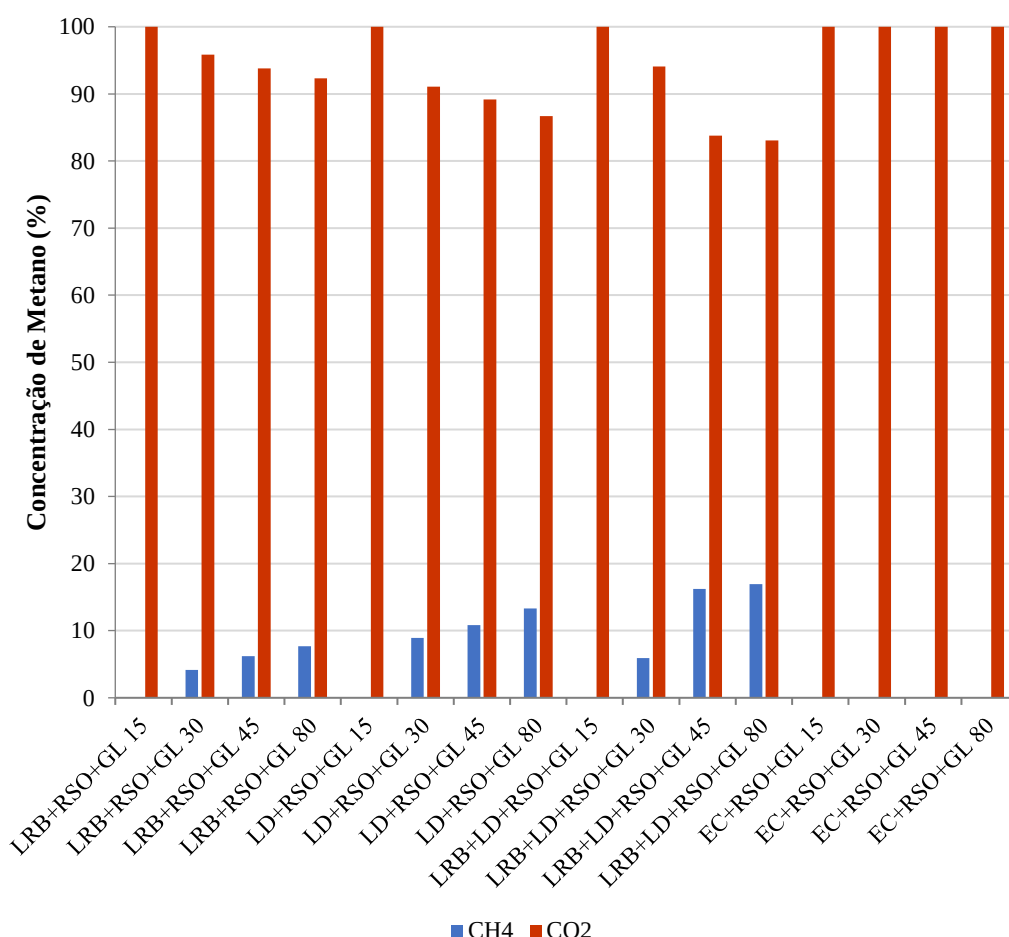
Fonte: Autor (2018).

Silva (2009) avaliou a codigestão de sangue, esterco e rúmen bovino e glicerina, e obtiveram valores de produção de biogás entre 7,8 e 41,77 NmL (em 7 dias), o que

corresponde a uma taxa diária média entre 1,11 e 5,98 NmL/dia. Entretanto, no estudo atual, foram encontrados taxas diárias médias de 2,44 a 2,07 NmL/dia, ou seja, inferior ao do estudo já citado. Vale salientar que o presente estudo utilizou apenas 5% de glicerina e que a pesquisa de Silva (2009) relatou que o melhor resultado foi para o valor de 20% de glicerina.

Como mostra a Figura 26, a produção de metano da codigestão com adição de glicerina foi muito pequena, em comparação a codigestão sem a mesma (vide Figura 25). Para essas configurações, as médias de porcentagem de metano, no período avaliado, foi de 9,77, 8,36, 4,51 e 0,00% para LRB+LD+RSO+GL; LD+RSO+GL, LRB+RSO+GL, LRB e EC + RSO + GL com TDH de 80 dias.

Figura 26 Análise cromatográfica do biogás produzido pela codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina, ao longo do tempo



Fonte: Autor (2018).

Nota-se que o efeito da glicerina não foi satisfatório nesse estudo, provavelmente devido ao aumento da carga orgânica oriunda da mesma, ocasionando, com isso, uma sobrecarga no meio reacional, podendo, inclusive, ter inibido a produção de metano.

Viana (2011) indicou no seu estudo que é provável que ocorra o colapso no meio reacional, devido ao curto espaço de tempo entre a carga aplicada (oriunda da glicerina) e o tempo de adaptação da massa microbiana. O referido autor fala que a adição de 2 a 7g de glicerina já é suficiente para causar inibição no sistema.

Já Fountoulakis *et al.* (2010) cita que valores superiores a 4% de glicerina podem apresentar sobrecarga e ser um fator limitante na biodigestão (em condições mesofílicas e utilizando lodo de esgoto como inóculo).

Uma possível solução seria a adição escalonada em baixas concentrações (abaixo de 4%) de glicerina.

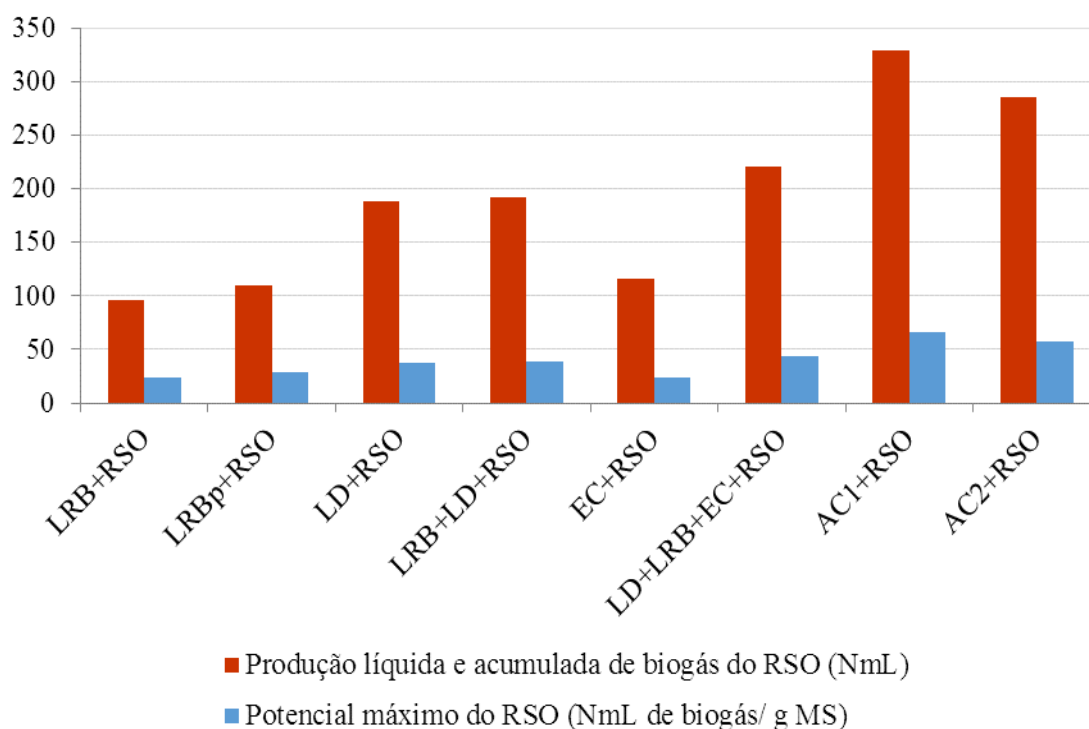
5.2.1.4 Produção líquida de biogás e Potencial máximo do resíduo sólido orgânico

Nesse tópico serão apresentados as produções líquida de biogás acumulada do resíduo sólido, ou seja, a produção acumulada de biogás da codigestão menos a produção acumulada de biogás do inóculo, bem como, o potencial máximo do resíduo orgânico, que leva em consideração a maior produção líquida do RSO e a quantidade de RSO inserido no reator BMP.

Diante do referenciado, as Figuras 27 e 28 apresentam produções líquidas e potencial máximo do resíduo orgânico positivas, resultantes da codigestão com diferentes inóculos, sem e com adição de glicerina, respectivamente.

Na Figura 5.10 os maiores valores, tanto de produção líquida, quanto de potencial máximo, foram da codigestão do RSO com AC1 (328,62 NmL e 65,72 NmL/gMS) e AC2 apenas (285,16 NmL e 57,03 NmL/gMS). Em seguida tem-se as configuração com RSO e os inóculos LD+LRB+EC, LRB+LD, LD, LRBp, LRB e EC, com os seguintes valores de produção líquida e potencial máximo de biogás do RSO: 220,12 NmL e 44,02 NmL/gMS; 192,30 NmL e 38,46 NmL/gMS; 187,71 NmL e 37,54 NmL/gMS e 141,31 e 28,26 NmL/gMS e 120,63 NmL e 24,13 NmL/gMS.

Figura 27 Produção de biogás líquida e Potencial máximo do RSO da codigestão do RSO com diferentes inóculos e agente alcalinizante no BMP



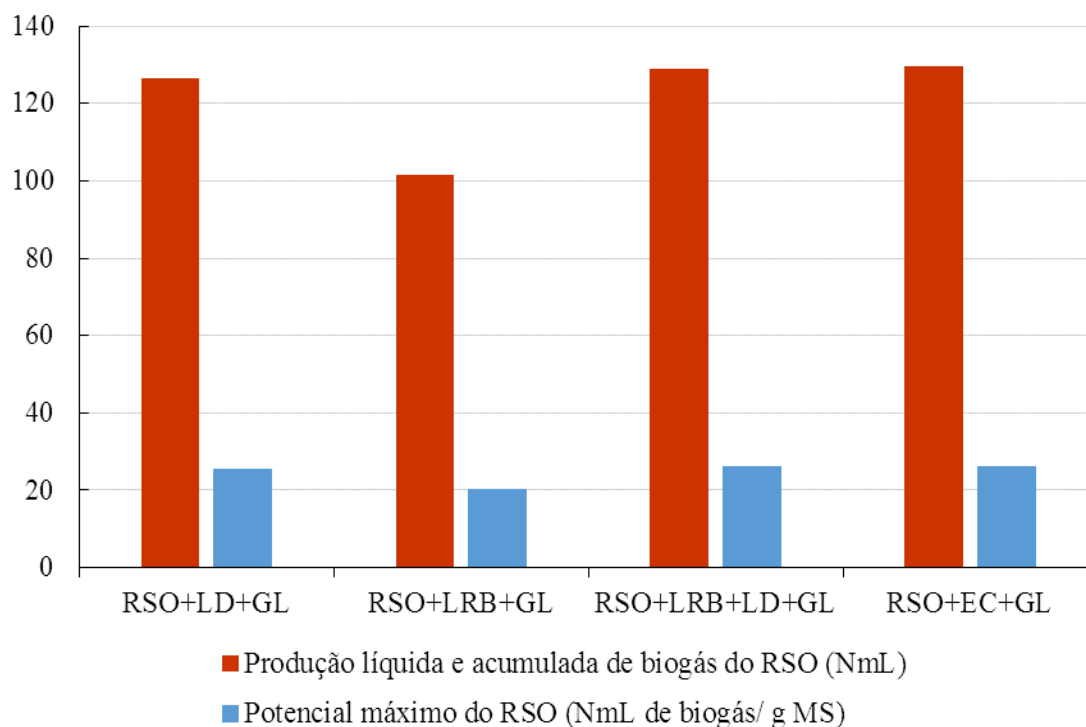
Fonte: Autor (2018).

Para a codigestão com glicerina (Figura 27), a maior produção líquida foi para o inóculo EC (129,38 NmL), seguida dos LRB+LD, LD e LRB, respectivamente, 128,91; 126,20 e 101,40 NmL. Levando em consideração o potencial máximo, a variação entre os inóculos foi muito pequena, ficando em torno de 26 NmL/gMS de biogás para LRB+LD, EC e LD, e menor valor foi de 20,28 NmL/gMS para LRB.

Neste sentido, Alves (2008) demonstrou, em seu estudo, que o potencial de biogás do inóculo e do substrato separadamente não chegam à metade da produção da codigestão, devido a sinergia que ocorre entre o sistema reacional do inóculo e o substrato.

Portanto, foi verificado no estudo atual que a melhor adequação dos nutrientes aos micro-organismo. Nesse sentido, os inóculos aclimatados, foram que tiveram maiores produções líquidas acumuladas como também com os potenciais máximo de biogás.

Figura 28 Produção de biogás líquida e Potencial máximo do RSO da codigestão do RSO com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina



Fonte: Autor (2018).

Entretanto, para a interação entre a codigestão e a glicerina, praticamente não houve diferença entre as configurações. Somente a configuração RSO+LRB+GL, obteve um potencial máximo e a produção líquida acumulada de biogás, um pouco menor que as demais configurações.

Nesse contexto, Schirmer *et al.* (2016) no seu estudo com a codigestão resíduos sólidos municipais com dejetos suínos na proporção 3:1 e 1:1, substrato mais inóculo, obtiveram a melhor eficiência da mistura resíduo:inóculo na proporção 3:1. Esta relação foi superior à proporção 1:1, pelo volume líquido de biogás produzido durante o período de incubação (70 mL contra 49 mL da proporção 1:1).

Por fim, em todas as configurações nesse estudo atual foram superiores ao estudo de Schirmer *et al.* (2016) com a relação à produção líquida de biogás.

5.2.1.5 Análise das condições ambientais antes e depois da biodigestão anaeróbia

Nessa seção será avaliada a variação de alguns parâmetros físico-químicos analisados antes e após o processo de biodigestão anaeróbia nos ensaios BMP, visando analisar a influência dos mesmos na produção de biogás e metano. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os resultados dos parâmetros monitorados para a biodigestão dos inóculos separadamente e da codigestão com diferentes inóculos, agente alcalinizante e glicerina, e por fim, da codigestão com diferentes inóculos e agente alcalinizante, apenas.

Nota-se, na Tabela 15, um pequeno acréscimo no teor de água (ou umidade) – nas configurações estudadas, variando entre 0,81 a 5,87, com uma média de 1,71%. Este fato ocorreu, visto que durante a degradação da matéria orgânica há formação de água (via hidrogenotrófica), conforme relata Schmitt (2006). Também pode-se observar um aumento médio em torno de 10,40% do pH para os inóculos LRB, LRBp, LD e LD+LRB e uma redução média de 12,76% para os demais inóculos, devido aos processos metabólicos oriundos da biodigestão anaeróbia. Por outro lado, o teor de SV foi reduzido, em todas configurações estudadas (variando de -0,78 a -14,60%), devido a redução da carga orgânica promovida pela biodigestão anaeróbia.

Já na Tabela 16, da mesma maneira, alcançou-se um leve acréscimo na umidade nas supracitadas configurações (variando de 0,70 a 1,48). Para o pH obtiveram, em todas as configurações, um decréscimo nos valores do pH nos reatores (variando de 8,23 a 14,30). Nesse sentido, tal variação do pH pode ter interferido e ocasionando a inibição da fase metanogênica. Por fim, em termo de SV, como é esperado, teve uma redução em todas as configurações.

Tabela 15 - Caracterização físico-química dos inóculos antes e depois da biodigestão anaeróbia, e variação dos mesmos

Parâmetros	LRB			LRBp			LD			LD+LRB		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Umidade (%)	96,00	96,78	0,81	98,18	98,24	0,06	90,63	92,16	1,66	93,70	93,88	0,19
pH	7,13	8,03	11,21	6,93	8,05	13,91	6,75	7,43	9,15	7,10	7,66	7,31
SV (%)	80,88	74,66	-7,69	65,95	56,32	-14,60	45,05	44,67	-0,84	52,41	47,30	-9,75

Parâmetros	EC			LD+LRB+EC			AC		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Umidade (%)	86,04	91,41	5,87	84,75	85,88	1,33	88,95	90,84	2,08
pH	7,59	6,00	-20,95	8,36	7,61	-8,97	8,50	7,79	-8,35
SV (%)	82,48	80,09	-2,90	63,65	55,82	-12,20	59,50	59,03	-0,78

Fonte: Autor (2018).

Tabela 16 - Caracterização físico-química antes e depois da biodigestão anaeróbia da codigestão do RSO com diferentes inóculos e adição de agente alcalinizante com glicerina, e variação dos mesmos

Parâmetros	RSO+LD+GL			RSO+LRB+GL			RSO+LD+LRB+GL			RSO+EC+GL		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Umidade (%)	81,75	82,98	1,48	87,90	88,66	0,86	84,80	85,40	0,70	81,85	82,76	1,10
pH	7,41	6,80	-8,23	7,70	6,75	-12,34	7,65	6,25	-18,30	7,43	6,35	-14,54
SV (%)	59,75	56,94	-4,70	79,90	75,32	-5,73	70,50	66,21	-6,08	69,45	65,71	-5,39

Fonte: Autor (2018)

Tabela 17 - Caracterização físico-química antes e depois da biodigestão anaeróbia da codigestão do RSO com diferentes inóculos e adição de agente tamponante, e variação dos mesmos

Parâmetros	LRB + RSO			LRBp + RSO			LD + RSO			LRB + LD + RSO		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Umidade (%)	87,99	89,00	1,15	89,70	90,51	0,90	84,41	85,73	1,56	85,95	86,31	0,42
pH	7,07	7,54	6,70	7,27	7,56	3,99	7,22	7,60	5,31	7,32	7,34	0,27
SV (%)	63,43	60,13	-5,20	62,90	57,76	-8,17	67,76	56,70	-16,32	66,70	61,28	-8,13

Parâmetros	EC + RSO			LD+LRB+EC+RSO			AC1+RSO			AC2+RSO		
	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)	Antes	Depois	Variação (%)
Umidade (%)	79,16	83,02	4,88	78,46	79,23	0,98	84,07	87,23	3,76	80,56	83,51	3,66
pH	7,69	6,40	-16,78	7,52	8,17	8,64	7,60	7,54	-0,79	8,40	7,74	-7,86
SV (%)	68,21	63,78	-6,49	66,17	60,40	-8,72	65,76	60,30	-8,30	64,90	59,65	-8,10

Fonte: Autor (2018).

A Tabela 17 apresenta um comportamento muito semelhante as configurações preenchidas apenas com os inóculos: de sutil acréscimo da umidade nas configurações estudadas (variando de 0,90 a 4,88) e uma de média 2,16%. Já para o pH, as configurações LRB + RSO, LRBp + RSO, LD + RSO, LRB + LD + RSO e LD+LRB+EC+RSO alcançaram um incremento do pH no meio reacional. No entanto, para as demais configurações obtiveram decréscimo do pH. Do mesmo modo, a carga poluidora, em termos de SV, variou de -5,20 a 16,32%. Além disso, vale salientar que a codigestão que teve uma maior redução do teor de SV (LD+RSO). Entretanto, os que apresentaram maiores produção líquida acumulada de biogás e a maior concentração média de metano foram com a codigestão com o inóculo aclimatado.

5.2.2 Reator de laboratório horizontal

O reator horizontal é um dispositivo para biodigestão anaeróbia, que possui a função de estabelecer um ambiente anaeróbio livre de oxigênio, para o aproveitamento máximo do biogás gerado. Destacado por possuir um formato retangular, por compreender um sistema de vedação, e por utilizar de um misturador composto por paletas e motor, que promove o contato entre a biomassa residual e os microrganismos, e conseqüentemente, culmina em um aumento na rapidez da decomposição de biomassa. Na literatura há diversos tipos de reatores para a produção de metano, que apresentam diferentes conformações, sendo o formato podendo ser um influenciador no desempenho de reatores. Nesse sentido, visa demonstrar aplicabilidade do reator.

5.2.2.1 Aclimação e produção de inóculo mesófilo anaeróbio

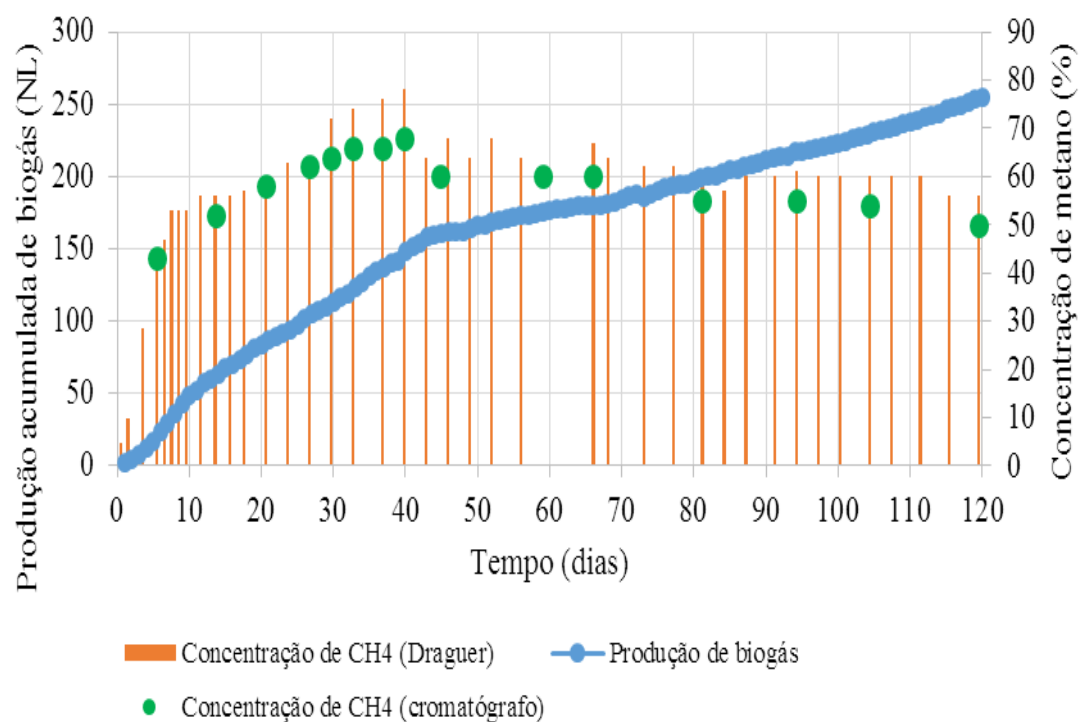
A Figura 28 apresenta a produção acumulada de biogás do inóculo (LD+LRB+EC na proporção de 5:4:1) durante o período de aclimação e produção do mesmo (120 dias) no reator horizontal, que foi de 254,35 NL (taxa diária média de 2,12 NL/dia). Vale salientar, que a concentração máxima de metano foi de 78% (com 41 dias) e ao final do experimento chegou a aproximadamente 56%.

Steinmetz (2016) também produziu um inóculo mesofílicos, baseado na recomendação alemã VDI 4630, constituído por lodo UASB de dejetos suínos e de uma indústria de gelatina e dejetos bovino fresco (na proporção 1:1:1). Durante o período de aclimação, que foi de 875 dias, o inóculo passou por diversos peneiramentos para redução STe SV e o pH variou de 7,2 a 8,0.

Bona *et al.* (2015) também aclimataram um inóculo preparado a partir de mistura de dejetos de suínos e bovinos (na proporção de 1:1), e teve uma variação de pH de 7,32 a 8,28, e de 4,8% de SV, com um TDH de 6 meses.

Semelhantemente, aos estudos supracitados esse estudo teve uma variação de pH de 8,0 a 8,5, contudo, os valores de ST e SV, respectivamente, foram de 13,15 e 58,59%. Valores bem superiores, aos dois trabalhos citados.

Figura 29 - Relação da Produção acumulada e concentração de metano no período de aclimação no Biodigestor Horizontal



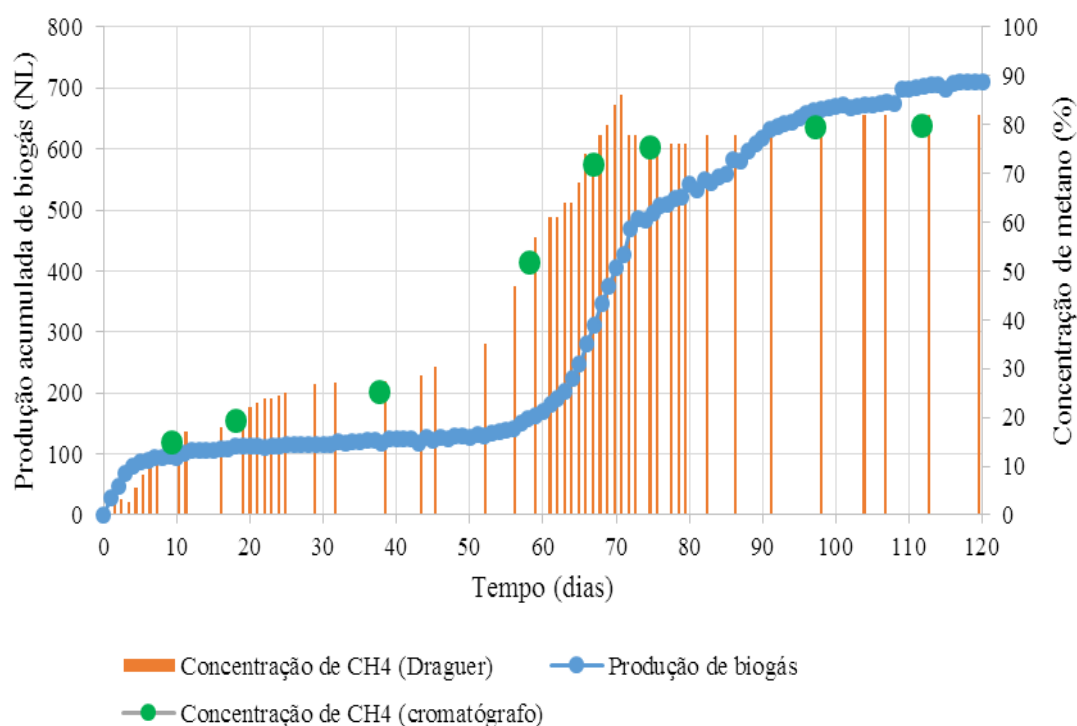
Fonte: Autor (2018).

5.2.2.2 Produção acumulada de biogás e metano

A Figura 29 mostra a produção acumulada de biogás e a concentração de metano após a adição do RSO (7,5 kg, *in natura*), no reator horizontal, o qual, obteve uma produção acumulada de 711,20 NL de biogás, no tempo de detenção hidráulica de 120 dias, ou seja, a taxa diária média foi de 5,9 NL/dia. A concentração máxima de metano foi de 86% (com 73 dias) e o valor ao final do experimento foi de 82%.

A produção de biogás corresponde a 94,83 NL/kgMF ou 94,83 Nm³/tonMF. Para o metano apenas, considerando a concentração média do período (50%), a produção foi de 47,42 Nm³CH₄/tonMF. Tal valor vai ser usado para valorização energética.

Figura 30 - Relação da Produção acumulada e concentração de metano na codigestão do RSO com inóculos aclimatado no Biodigestor Horizontal



Fonte: Autor (2018).

FNR (2010) avaliou o potencial de produção de biogás de diversos substratos, e o volume de metano por tonelada de resíduos de: casca de batata, de batata refugo, de hortaliças e de frutas. Os valores obtidos foram de, respectivamente, 68, 95, 27 e 51 Nm^3/ton . Estes valores estão bem próximo do encontrado no presente estudo, principalmente para o substrato frutas, que foi um dos materiais que compunham a amostra utilizada (além de verduras, hortaliças e raízes).

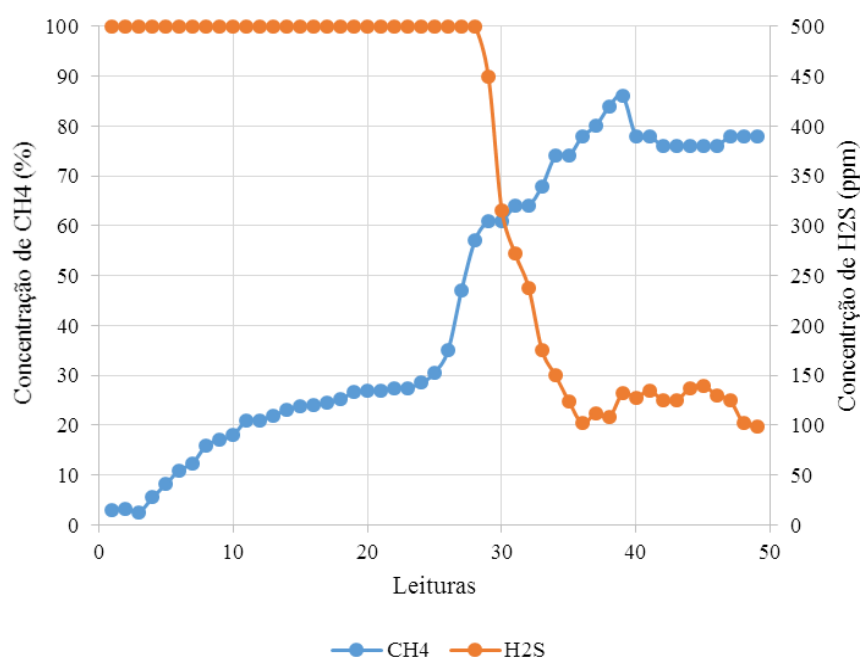
Kuo e Dow (2017) obtiveram valores de concentração de 62,6 e 36,1% de CH_4 e CO_2 , respectivamente, codigerindo resíduo alimentar e lodo de esgoto, a concentração de metano do estudo supracitado ficou um pouco abaixo do encontrado nesse estudo.

Leite *et al.* (2014) realizaram a codigestão de 1670 kg de resíduo de vegetais e 418 L de esgoto, que gerou um volume de biogás de 33,1 m^3 (0,12 m^3/dia) com uma concentração média de metano de 64%. Tal estudo teve uma taxa diária e concentração de metano média superior à deste trabalho. No entanto, a quantidade de substrato empregada também foi superior.

Valença (2017) também desenvolveu um experimento para avaliar a produção de biogás a partir da codigestão de resíduos orgânicos (resíduo alimentar e lodo industrial). Ele obteve um volume de aproximadamente 2 m³ de metano, durante 98 dias de experimento, resultando numa taxa diária média de 20,41 L de CH₄/dia. Tal valor também é maior do que o obtido nesse estudo, visto que também foi utilizado mais biomassa (26 kg, 13 L e 15,58 L de resíduo alimentar, lodo industrial e água respectivamente). Com relação a concentração de metano, a autora chegou a obter 86% de CH₄, valor igual ao presente estudo, porém a mesma fez uso de bicarbonato de sódio, para controle de alcalinidade.

Ainda falando sobre a composição do biogás produzido, sabe-se que na etapa final da digestão anaeróbia ocorre a produção de, basicamente, metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico. Nesse sentido, a Figura 31 traz a evolução das concentrações de CH₄ e gás sulfídrico (H₂S) no biodigestor horizontal, onde pôde-se verificar uma redução na concentração do H₂S quando a concentração de metano atingiu cerca de 65%. Vale salientar que o valor de H₂S pode ter sido bem superior a 500 ppm, mas a faixa de leitura do equipamento utilizado não consegue aferir (conforme mencionado no tópico Materiais e Métodos).

Figura 31 - Relação de concentração de metano e ácido sulfídrico na codigestão do RSO com inóculos aclimatado no Biodigestor Horizontal



Fonte: Autor (2018).

De acordo com Li *et al.* (2017) avaliaram o estudo cinético da decomposição de H_2S e CH_4 para produção de H_2 . No estudo citado, em um dos tratamentos indicou a redução da concentração do H_2S quando a concentração de metano chegou próximo de 50%.

Semelhante a referência acima, conforme visualizado na Figura 5.14. Desta forma, pode inferir que tal redução na concentração de H_2S em reatores anaeróbios está associada a redução do H_2 , que pode ter sido utilizado pelas bactérias anaeróbias hidrogenotróficas. Já para Sun *et al.* (2018) relataram no seu trabalho, que foi capaz de criar um modelo e prever a coexistência e competição entre bactérias redutoras de sulfato archaea metanogênica sob condições anaeróbicas.

Salienta-se ainda que, a concentração de metano inicial foi baixa, visto que a biodigestão anaeróbia ainda estava em suas fases iniciais (nos primeiros 30 dias o pH do reator ficou em média de 5,7), favorecendo, com isso a produção do H_2S . No entanto, após o meio reacional conseguir, naturalmente, alcalinizar, foram estabelecidas as condições necessárias para as metanogênicas.

Para Schirmer *et al.* (2015), esse estudo indica que as concentrações de gás sulfídrico no biogás podem ser relevantes e, portanto, estes valores devem ser tratados como questões proeminentes para se fazer um estudo prévio visando o aproveitamento energético do biogás.

5.2.2.3 Análise das condições ambientais antes e depois da biodigestão anaeróbia

A Tabela 18 apresenta a caracterização físico-química do inóculo após o processo de aclimação, a mistura inóculo aclimatado e RSO, e biomassa resultante pós-digestão, ou seja, o digestato.

Tabela 18 - Caracterização físico-química do substrato e do inóculo.

Parâmetros	AC	AC+RSO		Digestato
Umidade (%)	86,85	86,79	-	89,85
ST (%)	13,15	13,21	-	10,15
SV (%)	58,59	68,79	-	58,53
pH	8,52	7,55	*5,7	7,60

Legenda: ST - sólidos totais; SV - sólidos voláteis; *valor encontrado com 30 dias. Fonte:

Autor (2018).

A umidade aumentou ao longo do processo de codigestão, devido à redução dos sólidos. Além disso, durante a degradação da matéria orgânica, há formação de água (via hidrogenotrófica), conforme (SCHIMITT, 2006).

Segundo Rizzoni *et al.* (2012), uma umidade abaixo de 90%, pode ser prejudicial à biodigestão, no entanto, o referido estudo teve valores bem próximos do citado autor. PROSAB (2003) relata que valores de 80% de umidade e até 20% de sólidos totais podem ser empregados em reatores.

Com relação aos teores ST e SV, ambos tiveram um incremento com a adição do RSO (AC+RSO), e uma redução após os 120 dias de biodigestão anaeróbia (digestato), o que era esperado, devido a adição de carga orgânica (oriunda do RSO) e transformação da matéria orgânica em biogás, respectivamente

De acordo com a VDI 4630 (2006), a relação entre o ST do substrato com o ST do inóculo, pode indicar a quantidade de substrato para um ensaio de biodigestão anaeróbia, para que não ocorra inibição, tal relação deve ser inferior ou igual a 0,5. Nesse caso, essa relação foi igual a 0,82, devido alto teor de ST (que deve ser inferior a 10%), mesmo após o processo de aclimação.

E por fim, o pH caiu tanto após a adição do RSO, quanto após o processo de biodigestão anaeróbia, visto que o pH do RSO é ácido (4,88) e que durante a digestão há a formação de AGVs (que tende a reduzir o pH), respectivamente. Nesse sentido, o pH ao adicionar o substrato passou de 8,5 para 7,55 e durante o processo de digestão, devido a formação AGVs o pH caiu ainda mais para 5,70, no TDH de 30 dias. No entanto, após o próprio sistema reacional tamponar, no qual, foi verificado no final do experimento o pH 7,60.

Nesse contexto, Leite *et al.* (2002), no seu estudo, os reatores foram alimentados com substrato constituído pela fração orgânica putrescível dos resíduos sólidos urbanos mais rúmen bovino nas proporções de 5, 10 e 15% (%p/p) da massa total em reatores de batelada no TDH 365 dias, obtiveram variação de pH entre 4 a 5 durante o processo de digestão.

Do mesmo modo, Qiao *et al.* (2011) verificaram lodo como substrato uma variação de pH entre 6,5 a 7,5, no período de 350 dias, no qual, relataram que não fez uso de nenhum alcalinizante, embora tenha feito inicialmente um pré tratamento físico.

Igualmente, Liu *et al.* (2015) observou-se uma tendência de redução inicial do pH durante a processo anaeróbico, os valores iniciais de pH dos diferentes tratamentos estavam acima de 7,0, que eram alcalinos. No entanto, depois cinco dias, os valores iniciais tornaram-se ácidos, devido ao processo da hidrólise e acidogênese, mas posteriormente o pH aumentou da 5 a 10 dias e depois estabilizou dentro de pH 6,6 a pH 7,4. Semelhante a esse estudo.

5.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOMETANO ORIUNDO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

Para estimar a produção de energia foi utilizada a produção do biogás do reator horizontal que apresentou uma produção de 720,20 NL e um potencial 96,03 NL/KgMF. É importante destacar que foi utilizado valor médio de metano de 50%, que corresponde a 48,02 NLCH₄/kgMF, que é equivalente a 48,08 m³/tonMF.

Desse modo, tendo que o gás metano possui poder calorífico é de 35,9 MJ/Nm³, e que 3,6 MJ equivale a 1 KWh, tem-se 9,97 kWh/m³, seriam produzidos 479,46 kWh por tonelada de RSO do CEASA-PE.

Considerando o cálculo de aproveitamento energético com um aproveitamento de 37% (FNR, 2010), seriam produzidos 177,40 kWh por tonelada de resíduo (frutas e verduras). Nesse contexto, FNR (2010) estima que seriam produzidos entre 100 e 187 kWh por tonelada de massa fresca de hortaliças e bagaço de frutas.

Segundo CEASA-PE (2017a), a mesma produziu cerca de 1100 t/mês, sendo 90% resíduos orgânicos, ou seja, 990,00 t/mês de resíduos de frutas, verduras, hortaliças e raízes. Desse modo, essa quantidade de RSO que tem um potencial de gerar, aproximadamente, 175.626,00 kWh/mês ou 5854,2 kWh/dia.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, os resultados iniciais foram as caracterizações iniciais do substrato e dos inóculos, onde pode-se observar que o resíduo sólido orgânico (RSO), esterco caprino (EC), a mistura do LD+LRB+EC (lodo de esgoto, líquido ruminal bovino e esterco caprino) e inóculo aclimatado (AC), separadamente, possuem valores de pH e umidade que podem inibir a biodigestão anaeróbia. Por outro lado, o RSO apresenta uma relação carbono/nitrogênio (C/N) muito próxima da proporção ideal. O que não ocorre com os inóculos líquido ruminal bovino peneirado (LRBp), lodo de esgoto (LD), esterco caprino e a mistura 1:1 do lodo e líquido ruminal, no que diz respeito a C/N. Mas, de uma forma geral, os resíduos estudados tem um elevado potencial de biodegradabilidade, confirmado, também pelos altos valores de teor de sólidos voláteis (superior a 45%).

Com relação ao potencial máximo de produção de biogás e a porcentagem de metano, dentre os inóculos (separadamente), obteve-se os maiores valores para inóculo LD+LRB+EC e líquido ruminal bovino (LRB). No entanto, o LD e AC produziram um baixos volumes de biogás, demonstrando um comportamento de inóculo. Na codigestão (com adição de bicarbonato de sódio), houve sinergia e, conseqüentemente, há maior geração de biogás e metano, para as configurações que continham a mistura LD+LRB+EC+RSO, AC1+RSO e AC2+RSO. A codigestão com os diferentes inóculos, aumentou, em média, quase 3,5 vezes a geração de biogás, devido a elevada carga orgânica do RSO. No entanto, para o inóculo aclimatado teve-se um incremento entre 17 e 19 vezes mais a produção de biogás dos demais tratamentos.

Quanto a influência do pré-tratamento do inóculo líquido ruminal bovino, mais especificamente, nota-se que o LRB produziu mais biogás, tanto separadamente, quanto na codigestão com RSO, do que o LRBp. Por outro lado, o teor de menor metano foi maior, em ambos os casos, para o inóculo LRBp. Devido, provavelmente, a redução da carga orgânica e massa microbiana, promovida pelo peneiramento, decrescendo a produção de biogás, mas, por outro lado, devido a remoção de compostos dificilmente degradáveis, a transformação da matéria orgânica em metano é mais eficiente.

Acerca do uso da glicerina na codigestão do RSO, nota-se valores de produção de biogás muito uniformes, mas tendo uma maior produção com a configuração LRB+LD+RSO+GL, de 195,02 NmL. No entanto, a produção de metano das configurações de glicerina, foi aproximadamente 5 vezes menor, que as sem adição do

referido resíduo, contrariando vários estudos que indicam um incremento de metano (com volumes de glicerina menor do que 5%). Isso pode ter acontecido devido ao incremento da carga orgânica, causando, com isso, uma sobrecarga do sistema (acúmulo de ácido), e consequentemente, retardo na produção do metano.

A redução do teor de sólidos voláteis, nesse estudo, foi de -0,78 a -14,60%, para os inóculos; de -4,70 a 5,39%, para as codigestões com glicerina; e de -5,20 a -16,30%, para codigestão com adição de agente alcalinizante.

Nos resultados com o inóculo anaeróbio mesofílicos no reator horizontal, obteve-se uma produção acumulada de 254,35 NL em 120 dias, com uma concentração máxima e final de 78% e 56%.

Ademais, na codigestão do RSO no reator horizontal, alcançou uma produção acumulada de 711,20 NL de biogás em mais 120 dias, no qual teve uma produção máxima e média de metano de 86% e 50%, respectivamente (sem o uso de alcalinizante). Tendo, assim, uma produção de biogás de 96,06 NL/kgMF e 48,03 NLCH₄/kgMF, de metano (considerando a concentração média).

Por fim, foi possível estimar a produção de energia elétrica oriunda do RSO do Centro de Abastecimento de Pernambuco, codigerido com o inóculo aclimatado no reator horizontal, que foi de, aproximadamente, 175.626,00 kWh/mês ou 5MWh/dia..

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar o efeito sinérgico dos resíduos sólidos e semi-sólidos que compõem o inóculos LD+LRB+EC;
- Empregar coeficientes técnicos nos diversos setores da economia da região Nordeste, e com isso, trazer subsídios nas decisões políticas sobre o uso do biometano, viabilizando os retornos econômicos;
- Utilizar ferramentas da Biologia Molecular, como a técnica de amplificação de DNA por PCR, para identificação das *Archéas* metanogênicas, ou outra espécie de interesse;
- Fazer uso da bioinformática para fazer a mineração dos dados utilizados e auxiliar os pesquisadores a analisar e entender um grande volume de dados esquecimento genético, tais como os produzidos por sequenciadores de nova geração

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007: Amostragem de Resíduos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

Abreu, E. F. **Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores uasb tratando esgoto sanitário.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

Adekunle, K.F. and Okolie, J.A. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. Advances in. **Bioscience and Biotechnology**, 6, 205-212.

Alves, I. R. F. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. 2008.

Alves, I. R. F. **Avaliação da codigestão na produção de biogás.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

Amorim, A. C. **Caracterização dos dejetos de caprinos: reciclagem energética e de nutrientes.** Dissertação (Mestrado em Produção Animal) - Universidade Estadual Paulista. 2002.

ANP – **Agência Nacional de Petróleo. Produção Nacional de Biodiesel Puro.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em: 16 de abril de 2017.

Andrade, R. W.; Bento, A. B. F.; Rocha, E. M. R.; Moraes Junior, J. A. **Avaliação do tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos e geração de biogás em células experimentais a partir do teste BMP**. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Porto Alegre, 2015.

APHA –. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and waste water**. 20ª edição. Washington, 1998.

Apolinário, F. D. B.; Pereira, G. F.; Ferreira, J. P. Biodiesel e Alternativas para utilização da glicerina resultante. **Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, n. 1, p.141-146, 2012.

Apostolakou, A. A.; Kookos, I. K.; Marazioti, C.; Angelopoulos, K. C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. **Fuel Processing Technology**, v. 90, p. 1023-1031, 2009.

Arsorva, L. **Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product**. M.S. (Degree in Earth Resources Engineering) - Department of Earth and Environmental Engineering, Fu Foundation of Engineering and Applied Science, Columbia University. 2010.

Barcelos, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos orgânicos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília. 2009.

Besen, G. R.; Freitas, L.; Jacobi P. R. **Política nacional de resíduos sólidos: implementação e monitoramento de resíduos urbanos**.:IEE USP, 2017.

Batista, L. F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no distrito federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília. 2015.

Benis, S. G.; Borja, R.; Monemian, S.; Goodarzi, V. Anaerobic treatment of Synthetic medium-strength waste water using a multistage biofilm reactor. **Bioresource Technology**, Barking, v. 100, n. 5, p. 1.741-1.745, 2009.

Bona, E. de A. M. de. Steinmetz, R. L. R; Milani, L. de M. Somer, J. G.; Menegol, T. Trindade, E. M. Kunz A. **Produção e aclimação de inóculo para ensaio PME**. IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Rio de Janeiro, 2015.

Borges, F.; Sellin, N.; Medeiros, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n. 1/2, p. 27-32, 2008.

Borges, A. C.; Pereira, P. A.; Matos, A. T. Partida de um reator anaeróbico horizontal para tratamento de efluentes do processamento dos frutos do cafeeiro. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 29, n. 4, p. 661-669, 2009.

Botini, L. A., Moraes. K. A. K. de., de Moraes, E. H. B. K., Pina, D. dos S., de Paula D. C., Hoffmann, A., Stinguel, H., Socreppa, L. M., e de Meneses, D. M. Glicerina bruta em suplementos para bovinos de corte a pasto no período seco. **Revista Pesq. agropec. Bras.**, v.50, n.3, p.242-249, 2015.

Brasil. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636/lei/112305.htm>>. Acesso em: 05 de abril de 2017.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo** Disponível em: <<http://mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 05 de julho de 2017a.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Política de Estado que objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira**. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas natural e combustiveis renovaveis/programas/renovabio/principal](http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas_natural_e_combustiveis_renovaveis/programas/renovabio/principal) >. Acesso em: 20 de dezembro de 2017b.

Braun, R.; Wellinger, A. **Potencial of Co-Digestion**. IEA – Bioenergy, Task 37 – Energy from biogas and Landfill Gas. 2002.

Brummeler, E.; Horbach, H. C. J. M.; Koster, I. W. Dry Anaerobic Batch digestion of the organic fraction of municipal solid waste. **Chemical technology & Biotechnology**. n. 50, p. 191-209, 1991.

Brulc, J. M.; Antonopoulos D. A.; Miller, M. E.; Wilson, M. K.; Yannarell, A. C.; Dinsdale, E. A; Edwards, R. E.; Frank, E. D.; Emerson, J. B.; Wacklin, P.; Coutinho, P. M.; Henrissat, B.; Nelson, K. E.; White, B. A. Gene-centric metagenomics of the fiber-adherent bovine rumen microbiome reveals forage specific glycoside hydrolases. **Proc. Natl. Acad. Sci., USA**, 2010.

Cabbai, V.; Ballico, M.; Goi, A. D. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. **Waste management**. v. 33, n. 7, p. 1626-32, 2013.

Campos, H. K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Eng Sanit Ambient**. v. 17 n. 2 , p. 171-180, 2012.

Carneiro, A. C. G. **Uma análise econômica de mudanças no uso da terra e produção de matéria-prima do etanol no Brasil: o papel da disponibilidade de água para o setor de irrigação**. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco - Recife, 2015.

Carreas, N. **O biogás**. Programa de Capacitação em energia renováveis da ONUDI Observatório de Energia Renováveis para América Latina e o Caribe, 2013.

Castrillón, L.; Fernández-Nava, Y.; Ormaechea, P.; Marañón, E. Methane production from cattle manure supplemented with crude glycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR. **Bioresource Technology**, Essex, v. 127, p. 312-317, 2013.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades**. Recife: CEASA-PE, 2011.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades**. Recife: CEASA-PE, 2012.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades**. Recife: CEASA-PE, 2013.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades**. Recife: CEASA-PE, 2014.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades desenvolvido pelo CEASA**. Recife: CEASA-PE, 2015.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de atividades**. Recife: CEASA-PE, 2016.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS)**. Recife: CEASA-PE, 2017a.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Relatório de acompanhamento do tratamento/destinação final dos resíduos sólidos gerados mensalmente no CEASA-PE**. Recife: CEASA-PE, 2017b.

CEASA-PE – Centro de Abastecimento e Logística de Pernambuco. **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS) – Abatedouro Regional de Paudalho**. Recife: CEASA-PE, 2017c.

CETENE – Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste. **Biodiesel**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018. Disponível em: <<http://www.cetene.gov.br/biodiesel/#topo>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2018.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: Água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

Chernicharo, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997.

CIBiogás – **Centro Internacional de Energias Renováveis–Biogás**. Disponível em: <<http://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2018.

Cunha, V.; Caixeta Filho, J. V. Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. **Revista Gestão e Produção**. v. 9, n. 2, p. 143-161, 2002.

De Clercq, D.; Wen Z.; Fan, F.; Caicedo, L.M. Biomethane production potential from restaurant food waste in megacities and project level-bottlenecks: A case study in Beijing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1676-1685, 2016.

Deublein, D.; Steinhauser, A. **Biogas from waste and renewable resources**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

Di Maria, F.; Sordi, A; Cirulli, G.; Gigliotti, G.; Massaccesi, L.; Cucina, M. Co-treatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. **Waste management**, v. 34, n. 9, p. 1603-1608, 2014.

Doll, M. M. R.; Foresti, E. Efeito do bicarbonato de sódio no tratamento de vinhaça em AnSBBR operado a 55 e 35°C. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 275-282, 2010.

Duda, R. M.; Oliveira, R. A.; Toledo, R. M. **Reatores anaeróbios horizontais seguidos de reator em batelada sequencial aeróbio para o tratamento de águas residuárias de suinocultura**. III Symposium on agricultural and agroindustrial waste management. 2013.

EBA-European Biogas Association. **EBA Biomethane & Biogas Report 2015**. Disponível em: <http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015/>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2017.

Espinosa Chávez, B. **Evaluación del desarrollo de la actividad sulfatoredutora en un lodo granular metanogénico de diferentes tamaños**. Tesis de Maestría - Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. 2007.

Esposito, G.; Frunzo, L.; Liotta, F.; Panico, A.; Pirozzi, F. (BMP) Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co- Digestion of Complex Organic Substrates. **The Open Environmental Engineering Journal**, v. 5, p. 1-8, 2012.

European Commission. **Renowables make the difference**. European Commission, 2011. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2011_renewable_difference_en.pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2017.

Felipetto, A.V. M. **Conceito, planejamento e oportunidades**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023847>. Acesso em: 20 de abril de 2017.

Fernandes F.; Souza, S. G. de. **Estabilização de Lodo de Esgoto**. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, 2001.

Fernandes, C. H. R. **Biodegradabilidade Termofílica dos resíduos sólidos urbanos e potencialidade em biogás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) - Universidade de Lisboa. 2013.

Ferreira, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2015.

Firmino, A. L. B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. 2013.

Food and Agriculture Organization (FAO). **Pérdida y Desperdicios de alimentos em América Latina y El Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura**. Disponível em: <<http://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/239394/>>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2016.

FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. Alemanha: FNR, 2010.

Fountoulakis, M. S.; Petousi, I.; Manios, T. Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production. **Bioresource technology**. v. 30, p. 1849-1853, 2010.

Francou, C. **Stabilisation de matière organique au compostagem de déchets urbains: influence de la nature des déchets et du procédé de compostagem – recherche d'indicateurs pertinents**. Tese (Doutorado) - Institut National Agronomique Paris-Grignon. 2003.

Galvão, R. R. A. **O biogás do agronegócio: transformando o passivo ambiental em ativo energético e aumentando a competitividade do setor**. Boletim de Conjuntura do Setor Energético. Disponível em: <http://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/boletim_conjunturamarco2017_v3_rev1_0.pdf>. Acesso em: 05 de julho de 2017.

Gênero, L. C.; Guerini, M.; Torres, Q.; Frigo, E. P. Zanon E. Produção de hidrogênio a partir de biogás. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 2, n. 1, p. 29-42, 2013.

Ge, X.; Matsumoto, T.; Keith, L.; Li, Y. Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 38-44, 2014.

Gouveia N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciênc. saúde coletiva**, v.17, n. 6, 2012.

Gunaseelan, V. N. Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcus* on dry lands. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 4, p. 589-596, 2009.

Guo, X; Wang, C; Sun, F; Zhu, W; Wu, W. A comparison of microbial characteristics between the thermophilic and mesophilic anaerobic digesters exposed to elevated food waste loadings. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 420-428, 2014.

Harries, C. R.; Cross, C. J.; Smith, R. **Development of a biochemical methane potential (BMP) test and application to testing of municipal solid waste samples**. In: Proceedings Sardinia, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium. Cagliari, Italy. Cagliari: CISA. v. 1, p. 579-588, 2001.

Holanda, S. B.; Fritz, N. A. S.; Maia, A. L.; Brito, A. R.; Jucá, J. F. T. **Avaliação da influência do glicerol sobre a geração de biogás de resíduos sólidos urbanos através do ensaio BMP**. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Goiânia, 2013.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Desperdício - Custo para todos - Alimentos apodrecem enquanto milhões de pessoas passam fome. **Revista do IPEA**. Ano 6, n. 54, 2009. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=1256>. Acesso em: 10 de Dezembro de 2016.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2012. p.82.

IPEA - **Catadores de materiais recicláveis** : um encontro nacional / Bruna Cristina Jaquette Pereira, Fernanda Lira Goes (organizadoras) – Rio de Janeiro : Ipea, 2016.

Jacinto, S. A. **Sustentabilidade urbana: Análise de viabilidade da implementação de um digestor anaeróbio de Resíduos Orgânicos na freguesia dos Olivais, Lisboa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Técnico Lisboa. 2014.

Jardim, M. A. C. **Valorização Económica do Biogás: Geração Elétrica vs. Produção de Biometano para Injeção na Rede**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Setúbal, 2013.

Kim, J. H.; Kim, M.; Bae, W. Effect of oxidized lecheat on degradation of lignin by sulfate-reducing bacteria. **Waste Management**, v. 27, n. 5, p. 520-556, 2009.

Kiran, E.U.; Trzcinski, A. P.; Ng, W. J.; Liu, Y. Bioconversion of food waste to energy: A review. **Fuel**, v. 134, p. 389-399, 2014.

Konrad, O.; Koch, F. F.; Lumi, M.; Tonetto, J. F.; Bezama, A. Potential of biogas production from swine manure supplemented with glycerine waste. **Eng. Agrícola, Jaboticabal**, v.34, n.5, p. 844-853, 2014.

Kuczman, O.; Gomes S. D.; Tavares, M. H. F.; Torres, D. G. B.; Alcântara, M. S. Produção específica de biogás a partir de manipueira em reator de fase única. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 31, n. 1, 2011.

Kuo, J.; Dow, J. Biogas production from anaerobic digestion of food waste and relevant air quality implications. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 67, p. 1000-1011, 2017.

Lange, L. C.; Simões, G. F.; Ferreira, C. F. A.; Santana, D. W. E. A.; Garcia, L. N. **Estudo comparativo de metodologias empregadas para a análise de resíduos sólidos urbanos**. In: Federación Mexicana de Ingenieria Sanitaria y Ciencias Ambientales;

AIDIS. Gestión inteligente de los recursos naturales: Desarrollo y salud. México, D.F., FEMISCA, 2002. p.1-8, Ilus.

Leite, V. D. **Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto industrial**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. 1997.

Leite, V.D.; Dantas, A.M.M.; Prasad, S.; Lopes, W.S.; Athayde Junior, G. B.; Souza, J.T. **Comportamento dos sólidos totais em reator anaeróbio tratando resíduos sólidos orgânicos**. XXVII Congresso da AIDIS. Cancun, México, 2002.

Leite, V. D.; Sousa, J.T.; Lopes, W.S.; Henrique, I.N; Barros, A. J. M. Bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos. **Revista tecnológica**, v. 18, n. 2, p. 90-96, 2014.

Lee, D. H.; Behera S.K.; Kim J.W.; Park H.S. Methane production potential of leachate generated from Korean foodwaste recycling facilities: A lab-scale study. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 876-882, 2009.

Lesteur, M. B.; Ellon-Maurel, V.; Gonzalez, C.; Latrille, E.; Roger, J. M.; Junqua, G.; Steyer, J. P. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: **A review. Process Biochemistry**, v. 45, n. 4, p. 431-440, 2010.

Lettinga, G.; Hulshoff Pol, L.W.; Zeeman, G. **Biological waster treatment. Part I: Abaerobic wastewater treatment**. Lecture notes. Wageningen Agricultural University. 1996.

Liu, L.; Zhang, T.; Wan, H.; Chen, Y.; Wang, X.; Yang, G.; Ren, G. Anaerobic co-digestion of animal manure and wheat straw for optimized biogas production by the addition of magnetite and zeolite. **Energy Conversion and Management**, v. 97, p. 132-139, 2015.

Lucas Júnior, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** Tese (Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista. 1994.

Lucena, R. M. **Identificação Molecular da Diversidade Microbiana em Reator UASB de Estação de Tratamento de Esgoto.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

Luna, M. L. D.; Leite, V. D.; Lopes, W. S.; SOUSA, J. T., Silva, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 1, p. 113-121, 2009.

Machado, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar.** Dissertação - Universidade Estadual Paulista. 2011.

Mamani, L. A. B. **Desenvolvimento de um reator para geração de biogás a partir de biomassa de microalgas como alternativa energética nas áreas rurais.** Dissertação em Engenharia Industrial - Universidade Federal da Bahia. 2015.

Manetti, A.; Ragone, F.; Albuquerque I. R. **Emissões de GEE do Setor Resíduos.** Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/FINAL-16-09-13-RelatoriosSEEG-Residuos.pdf>>. Acesso em: 20 de abril de 2017.

Mao, C.; Feng, Y.; Wang, X.; Ren G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

Mazareli, R. C. S.; Duda, R. M.; Leite, V. D.; Oliveira, R. A. Anaerobic co-digestion of vegetable waste and swine wastewater in high-rate horizontal reactors with fixed bed. **Waste Management**, v. 52, p. 112-121, 2016.

Malaggi, M.; Souza S. N. Estimativa do potencial de produção de biogás e energia na indústria de abate de frangos no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v. 3, p. 151-162, 2014.

Melo, E. S. R. L. **Análise de biodegradabilidade dos materiais que compõem os resíduos sólidos urbanos através de ensaio BMP (biochemical methane potential)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. 2010.

Menezes, J. M. C. **Influência da concentração de sólidos totais e temperatura na bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba. 2012.

Metcalf; Eddy, M. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 3a ed, Estados Unidos: McGraw-Hill, 1991. p. 1.334.

Minho, C. V.; Konrad, O.; Koch, F. F.; Kleinschmitt, A. B.; Casaril, C.; Lumi, M. Uso da glicerina residual na geração de biogás a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes e dejetos de aves poedeiras. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 41-50, 2012.

Morales, M. M.; Xavier, C. A. M.; Silva, A. A.; Lucas Jr., L. Uso da compostagem para tratamento de resíduo sólido de abatedouro de bovinos. **Rev. UNIVAP**, v. 13, p. 136-137, 2006.

Morrison, L. **Glycerol In: Encyclopedia of Chemical Technology**. New York: Wiley and Sons. 1994.

Nakamura, K.; Kishi, Y.; Ikegami, M. **Application of Waste Glycerin Liquid Produced from Biodiesel Production to Methane Fermentation**. n. October, p. 197-204, 2008.

Nakazawa, M. M. **Aproveitamento de glicerol para a produção de biogás ou 1,3 propanodiol em reator UASB**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco e Universidad Autónoma de Madrid. 2015.

Neto, W. S. **Cinética de processo fermentativo**. In: Curso fermentation technology. 1999. p. 27.

Neves, L; Gonçalo E.; Oliveira R.; Alves MM. Influence of composition on the biomethanation potential of restaurant waste at mesophilic temperatures. **Waste management**, v. 28, n. 6, p. 965-72, 2008.

Nghiem, L. D. Nguyen, T. T., Manassa, P., Fitzgerald, S. K., Dawson, M. & Vierboom, S. Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol for on-demand biogas production. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 95, p. 160-166, 2014.

Oliveira, L. R. G.; Santos Filho, D. A.; Nascimento Junior, A. F.; Santana, D. S.; Jucá, J. F. T.; Silva, S. P. R. **Uso do esterco e rumén bovino como inóculos na codigestão de resíduo alimentar**. Foz do Iguaçu: V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de resíduos Agropecuários Agroindustriais, 2017.

Oliveira, R. A.; Bruno, N. M. N. Start-up of horizontal anaerobic reactors with sludge blanket and fixed bed for wastewater treatment from coffee processing by wet method. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.33, n.2, p.353-366, 2013.

Pavi, S.; Kramer, L. E.; Gomes, L. P.; Miranda, L. A. S. Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. **Bioresource technology**, v. 228, p. 362-367, 2017.

Peiter, G. C., Alves, H. J., Sequinel, R., , Bautitz, I. R. Alternativas para o uso do glicerol produzido a partir do biodiesel. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.5, n.4, p.519-537, 2016.

Portal Brasil. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**. Disponível: <<http://www.mme.gov.br/programas/biodiesel/menu/programa/objetivos>>. Acesso em: 15 de abril de 2017.

Predroza, M. M.; Vieira, G. E. G.; Sousa, J. F.; Pickler, A. C.; Leal, E. R. M.; Milhomen, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto. **Revista Hamburgo**, v. 11, n. 16, p. 89-xx, 2010.

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Coordenador: Cassini, S. T. Rio de Janeiro, 2003.

Qiao, W.; Peng, C.; Wang, W.; Zhang, z. Biogas production from supernatant of hydrothermally treated municipal sludge by upflow anaerobic sludge blanket reactor. **Bioresource technology**, v. 102, n. 21, p. 9904-11, 2011.

Quadros, D. G.; Oliver, A. P. M.; Regis, U.; Valladares, R.; Souza, P H. F; Ferreira, E. J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.3, p.326-332, 2010.

Ratanatamskul, C.; Wattanayommanaporn, O.; Yamamoto, K. **Codigestion of food waste and sewage sludge by two stage anaerobic digester for biogas production from high rise building**. In: Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. CISA Publisher, Cagliari, Italy. 2011.

Rizzardini, C. B. Goe, D. Sustainability of Domestic Sewage Sludge Disposal. **Revista Sustainability**, n.6, p.2424-2434, 2014.

Rizzoni, C. B.; Tobias, A. C. T.; Del Bianchi, M.; Garcia, J. A. D. Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, Ano IX, n.18, 2012.

Robra, S. **Uso da glicerina bruta em biodigestão anaeróbica: Aspectos tecnológicos, ambientais e ecológicos**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) - Universidade Estadual de Santa Cruz. 2006.

Ruiz, T. L. **Microbiologia Zootécnica**. 1º Ed. São Paulo: Roca, 1992.

Santos A. O.; Silva, F. B.; Souza, S.; Sousa, M. F. R. Contabilidade Ambiental: Um Estudo sobre sua Aplicabilidade em Empresas Brasileiras. **Revista Contabilidade & Finanças**, v.16, n. 27, p. 89-99, 2001.

Santos, A. C.; Oliveira, R. A. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reatores anaeróbios horizontais seguidos de reator aeróbio em batelada sequencial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, p.781-794, 2011.

Santos, E. L. B. dos. Junior, G. de N. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Revista Tekhne e Logos**, v.4, n.2, Agosto, 2013.

Santos, D. S.; Teshima, E.; Dias, S. M. F.; Araújo R. A.; Silva. C. M. R. Efeito da secagem do lodo em leito nas características físico-químico e microbiológico de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, p. 341-349, 2017.

Santos Filho, D. A.; Oliveira, L. R. G.; Santos, A. F. M. S; Sobrinho, M. A. M.; Jucá, J.F.T. **Caracterização e avaliação do potencial de metano do rúmen bovino**. XVII SILUBESA, Florianópolis-SC, 2016.

Santos Filho, D. A.; Oliveira, L. R. G.; Sobrinho M. A. M.; Jucá, J.F.T. **Estimativa da produção de resíduos em abatedouros da mata norte e sul de Pernambuco**. 8º Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos em Universidade, Campina Grande-PB, 2017.

Saviczki, F. **Geração de Energia a partir de Resíduos de Centrais de Abastecimento**. VI Seminário sobre Tecnologias Limpas, Porto Alegre, 2015.

Siddiqui, Z.; Horan, N. J.; Kofi, A. **Optimisation of C:N Ratio for Co-Digested Processed Industrial Food Waste and Sewage Sludge Using the BMP Test**. International Journal of Chemical Reactor Engineering, n. 1, v. 1, p. 1-9, 2011.

Schimitt, F.; Weschnfelder, S.; Vidi, T. M. **Tratamento Anaeróbio de Efluentes**. Departamento de Engenharia Química/UFSC. Florianópolis-SC, p.60. 2006.

Schirmer, W. N.; Crovador, M I. C.; Stemmler, A. S.; Jucá, J. F. T. Avaliação da geração de gás sulfídrico no biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos. **Ciência & Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2015.

Schirmer, W. N.; F.; Barbosa, Jo. L.; Cabral, A. R.; Crovador, M. I. C.; Capanema, M. A. Geração de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos municipais com dejetos suíno. **Ciência & Tecnologia**, v. 8, 2016.

SEMAS – **Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco.2012.

Silva, W. R. **Estudo Cinético do processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais**. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba. 2009.

Silva, S. P. R.; Palha, M. A. P. F. **Inventário da biomassa produtora de biogás de Pernambuco**. 2016. 125 p.

Silva, F. M. S.; Oliveira, L. B.; Mahler, C. F.; Bassin, J. P. Avaliação da produção de hidrogênio a partir da codigestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e glicerol residual da produção de biodiesel. **Química. Nova**, v. XY, n. 0, p. 1-5, 2017.

Silva G.F. Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production by transesterification of soybean oil with ethanol. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 407–413, 2011.

Silvestre, G.; Fernández, B.; Bonmatí, A. Addition of crude glycerine as strategy to balance the C/N ratio on sewage sludge thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion. **Bioresource technology**, v. 193, p. 377-385, 2015.

Soares, M. R. **Coeficiente de distribuição (kd) de metais pesados em solos do estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. 2004.

Souza, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. **Revista DAE**, v. 44, p. 88-94, 1984.

Steinmetz, R. L. R. **Avaliação do efeito de drogas veterinárias na produção específica de biogás de substratos agropecuários**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

Teixeira, J. C. **Nutrição de ruminante**. Lavras: ESAL, 1991.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. A. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management**. New York: Mcgraw-Hill. 1993.

Tchobanoglous, G.; Thiesen, H.; Vigil, S. **Gestión Integral de Residuos Sólidos**. Madrid: McGraw-Hill, 1994.

Thompson, J. C.; He, B. B. Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 2, p. 261-265, 2006

TV COMPESA. **Estação de Tratamento de Esgoto Dancing Days entra em operação**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=FbQJptWI8XY>>. Acesso em: 29 de setembro de 2017.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Evaluating Ruminant Livestock Efficiency Projects and Programs**. In: Peer Review Draft. Washington D.C, 2000.

Valença, R. B. **Avaliação da geração de biometano em diferentes cenários de biodegradação de resíduos alimentares**. Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. 2017.

Valencia, E.; Valenzuela, E.; González, S.; Vargas, C. Anaerobic digestion of bovine rumen in laboratory and chemical determination pre and post treatment. **Livestock Research for Rural Development**, n. 23, v. 2, 2011.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure. **VDI 4630**: fermentation of organic materials characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Alemanha: VDI, 2006.

Yadvika, S.; Sreekrishnan, T. R.; Kohli, S.; Rana, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review. **Bioresource Technology**, v.95, p.1-10, 2004.

Zaiat, M.; Cabral, A. K. A.; Foresti, E. Reator anaeróbio horizontal de leito fixo para tratamento de águas residuárias: Concepção e avaliação preliminar de desempenho. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 11, n. 2, p. 33-42, 1994.

Zhang, T.; Liu, L.; Song, Z.; Ren, G.; Feng, Y.; Han, X.; Yang G. Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues. **Plos One**, v. 8, 2013.

Wang, Y. S., Byrd, C. S., Barlaz, A. Anaerobic biodegradability of cellulose and hemicellulose in excavated refuse sample using a biochemical methane potential assay. **Journal of Industrial Microbiology**. v.13, p. 147-153, 1994.

WHO – International reference center for wastes disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid waste and compost**. Switzerland, 1979.