



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**ANÁLISE DA SINERGIA DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
SUBMETIDOS À BIODIGESTÃO ANAERÓBIA VISANDO
GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO**

Camila Hasan

Lajeado, julho de 2016

Camila Hasan

**ANÁLISE DA SINERGIA DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
SUBMETIDOS À BIODIGESTÃO ANAERÓBIA VISANDO
GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Odorico Konrad

Lajeado, julho de 2016

Camila Hasan

**ANÁLISE DA SINERGIA DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS
SUBMETIDOS À BIODIGESTÃO ANAERÓBIA VISANDO
GERAÇÃO DE BIOGÁS PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Ambiental:

Prof. Dr. Odorico Konrad (Orientador)
UNIVATES

Prof. Ma. Maria Cristina de Almeida
UNIVATES

Prof. Dra. Lucélia Hoehne
UNIVATES

Lajeado, julho de 2016

Aos meus pais, meus incentivadores, minha razão para seguir sempre em frente:

Nasser Elias Hasan e Maria Madalena Horn

AGRADECIMENTOS

Agradecer é admitir que houve momentos em que se precisou de alguém, é reconhecer que jamais poderemos lograr para si a capacidade de autossuficiência, é contemplar o que há de mais precioso nas relações humanas: a convivência, a cooperação e a ajuda mútua.

O coração bate mais forte e as lembranças vêm à tona... A gratidão com certeza é o sentimento mais emocionante de toda esta caminhada, aliás, uma longa jornada que a sola do pé bem conhece cada passo dado na estrada.

Durante estes oito anos e meio de graduação, muitas foram as pessoas que por mim passaram e deixaram alguma contribuição para a minha vida pessoal e profissional, fica difícil citar nomes, pois muitos seriam.

Agradeço, de forma muito especial e carinhosa, à minha família: meus pais, irmãos, cunhado e sobrinha pelo carinho, paciência, e pelo apoio, fundamentais durante toda a graduação e essencial nesta fase final. Em especial ao meu pai, Nasser Elias Hasan por me inspirar, me impulsionar, me financiar e sempre acreditar no meu potencial, abdicando da realização dos seus próprios sonhos para a concretização dos meus. À minha mãe, Maria Madalena Horn pela serenidade, por tamanha compreensão, pelos ensinamentos de vida, pela sua força e garra que sempre me motivam.

À Força Superior que me move, me inspira, me mantém firme e me orienta: sou grata pela oportunidade de viver, respirar, trabalhar e não desanimar diante das dificuldades e desafios impostos.

Àqueles que ensinaram muito mais que teorias, que me prepararam também para a vida, todo meu carinho e gratidão ao grupo de docentes do Curso de Engenharia Ambiental da Univates, que me acompanhou e muito contribuiu para o meu aprendizado durante todos esses anos de convivência. Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Odorico Konrad, um dos idealizadores deste estudo e que contribuiu em vários momentos para a realização deste

trabalho, por acreditar na minha capacidade, pelo incentivo e apoio dispensados a mim nos momentos mais precisos.

Agradeço à Univates, pela constante busca da qualidade no ensino e também pela oportunidade de trabalho como funcionária do Laboratório de Biorreatores, experiência muito válida à minha vida profissional.

Às colegas das Instituições de Educação Infantil onde trabalhei durante os primeiros 5 anos da graduação e que sempre me motivaram a ir além.

Em nome da professora, amiga e líder Ângela Maria Schossler, agradeço aos colegas da Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Saneamento Básico de Estrela, do período de 2009 a 2012, quando trabalhei como estagiária na Sala Verde (Educação Ambiental), por dividirem comigo suas melhores e piores experiências na área de gestão ambiental que compete a este setor, bem como, por me permitirem integrar da melhor equipe de trabalho de todos os tempos.

Aos colegas do Escritório Municipal da EMATER de Santa Cruz do Sul, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas, pela possibilidade de trabalhar tão próxima dos agricultores familiares sentindo suas dificuldades e anseios, o que proporcionou a mim uma compreensão das políticas ambientais sob outra perspectiva.

Meus também sinceros agradecimentos a todos os colegas do Laboratório de Biorreatores pelo companheirismo, amizade, parceria, pelas diversas discussões sobre temas científicos, sobre a carreira ou sobre a vida e pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

À Cooperativa Languiru, em nome do Engenheiro Ambiental Tiago Feldkircher, pela oportunidade de aproximação e conhecimento das demandas ambientais resultantes de suas atividades industriais.

Aos meus amigos e amigas que sempre estiveram me apoiando durante toda essa jornada, em especial ao amigo Bernardo Purper (e sua família) que me auxiliou, me apoiou e muito contribuiu para a realização desta conquista, desde o início da graduação. Obrigada!

Finalmente, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse concretizado, em especial aos colegas, professores e amigos da UNIVATES.

*“Três eixos sustentam a existência e a sobrevivência
da vida humana: os alimentos, a água e a energia.
Eles se movem sempre articulados; quando um é afetado, os outros são
atingidos, e a vida vê-se ameaçada.
Dos três, a energia é determinante. É ela que move tudo”.*
Leonardo Boff

RESUMO

A necessidade de diversificar as fontes de energia, como alternativa à dependência do consumo de combustíveis não renováveis, vem ampliando a participação das energias renováveis no suprimento da crescente demanda energética mundial. Além disso, o tratamento de resíduos orgânicos gerados pelas atividades produtivas impõe desafios a serem superados. Diante deste cenário, a avaliação da sinergia de resíduos agroindustriais que, combinados, possam gerar biogás de qualidade para utilização como fonte energética, se apresenta como uma proposta para a viabilização da implantação de um biodigestor. Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento de resíduos agroindustriais, oriundos de uma Cooperativa do Vale do Taquari, submetidos ao processo de biodigestão anaeróbia visando à obtenção de biogás para fins energéticos, bem como, a redução de cargas orgânicas das biomassas submetidas ao tratamento. O experimento foi focado na variação do percentual de dejetos suíno em uma mistura de lodos de estações de tratamento da indústria alimentícia, possibilitando a avaliação de sua interferência ou contribuição na quantidade e qualidade do biogás gerado, uma vez que este resíduo é produzido em maior volume e possui grande aplicabilidade em processos de digestão anaeróbia. Para tanto, foram avaliadas 11 triplicatas de experimentos em escala laboratorial, variando o percentual de participação do dejetos suíno em uma escala de 0 a 100%, respeitando intervalos de 10%. Os resultados obtidos indicaram variação no tempo de detenção hidráulica (TDH) necessário para a completa degradação das misturas, sendo que, quanto maior a participação do dejetos suíno, menor foi TDH. Os volumes médios de biogás obtidos pelas triplicatas avaliadas variaram de 3.374mL a 17.395mL, com percentuais de metano que oscilaram entre 57,9% e 71,1%. De modo geral, os maiores valores de biogás resultaram das misturas com menor percentual de dejetos suíno, no entanto, a melhor eficiência na produção de biogás e metano considerando o TDH foi obtida pela mistura de 60% de dejetos suíno. A sinergia entre os substratos combinados foi positiva, superando a eficiência da geração de biogás, quando comparada ao desempenho do dejetos suíno, por exemplo, que é uma biomassa tipicamente empregada para a geração de biogás, sendo também produzida em maior volume pela cooperativa. Além disso, as biomassas, quando submetidas ao tratamento anaeróbio apresentaram redução significativa nas cargas de Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio em relação aos lodos avaliados de forma isolada, da maneira como comumente são dispostos em solo. Em função disso, além da recuperação energética obtida pelo aproveitamento do biogás, a implantação de um biodigestor acarretaria benefícios ambientais decorrentes da redução das cargas poluidoras, que acabam sendo depuradas no tratamento e não diretamente no ambiente.

Palavras-chave: Dejetos Suíno; Energia Renovável; Tratamento Anaeróbio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia no Brasil – 2014	23
Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica (OIEE) – 2014.....	23
Figura 3 – Processos de conversão energética da biomassa.....	26
Figura 4 - Etapas da biodigestão anaeróbia	28
Figura 5 – Taxa de crescimento relativo de microrganismos metanogênicos.....	30
Figura 6 – Localização dos Municípios onde estão situadas as Unidades Produtivas geradoras das biomassas	43
Figura 7 – Substratos que integraram a mistura submetida à biodigestão anaeróbia	44
Figura 8 – Coleta de substratos.....	47
Figura 9 - Sistema automatizado de medição de biogás	48
Figura 10 – Reatores incubados.....	48
Figura 11 – Dados brutos disponibilizados pelo sistema	49
Figura 12 - Sensor específico para a medição de CH ₄	49
Figura 13 – Preparo do inóculo	50
Figura 14 – Etapas da preparação do experimento	52
Figura 15 – Determinação de pH com uso de pHmetro.....	53
Figura 16 - Estufa utilizada na determinação de sólidos totais	54
Figura 17 - Dessecador utilizado para acondicionar as cápsulas de porcelana	54
Figura 18 - Forno do tipo mufla utilizado na análise de sólidos voláteis	55
Figura 19 – Bloco Digestor utilizado na determinação da DQO.....	56
Figura 20 – Análise de DBO ₅ através de oxitop	57
Figura 21 – Amostras em processo de digestão em chapa aquecedora	59
Figura 22 – Bloco Digestor utilizado na digestão das amostras.....	61
Figura 23 – Destilador utilizado na destilação das amostras.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equivalência entre 1m ³ de biogás e outras fontes energéticas	34
Tabela 2 - Característica química de dejetos suínos em função de seu teor de sólidos.....	40
Tabela 3 – Quantificação de biomassas geradas pela Cooperativa	44
Tabela 4 – Percentual de participação dos substratos na composição das misturas	45
Tabela 5 – Resultados dos Ensaio de Biogás nas Triplicatas avaliadas	63
Tabela 6 – Correlação de <i>Pearson</i> para as variáveis envolvidas nos Ensaio de Biogás	64
Tabela 7 – Eficiência média diária da geração de biogás e metano considerando um TDH de 27 dias	69
Tabela 8 – Eficiência média diária da geração de biogás e metano considerando o TDH real de cada triplicata avaliada	69
Tabela 9 – Análise de pH dos substratos	70
Tabela 10 – Análise do pH nas misturas incubadas.....	71
Tabela 11 – Avaliação dos Sólidos Totais, Voláteis e Fixos no início e no fim dos experimentos.....	72
Tabela 12 - Eficiência da geração de biogás e metano por gSV presente nas misturas	74
Tabela 13 – Caracterização dos lodos que integraram o mix.....	76
Tabela 14 – Caracterização das misturas submetidas ao tratamento anaeróbio	77
Tabela 15 – Valores de carbono e nitrogênio presentes nas amostras.....	80
Tabela 16 – Estimativa do volume útil de reatores considerando o TDH real obtido nos experimentos.....	84
Tabela 17 - Estimativa do volume útil de reatores considerando o TDH de 27 dias.....	85
Tabela 18 – Avaliação da mistura mais eficiente por m ³ de volume útil.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação percentual do dejetos suíno, lodos e sangue nas triplicatas avaliadas	51
Gráfico 2 – Série de gráficos ilustrando o comportamento diário das amostras em relação às produções de biogás e metano	65
Gráfico 3 – Comparativo da geração acumulada de biogás e metano nas triplicatas avaliadas	67
Gráfico 4 - Comparativo da geração acumulada de biogás e metano nas triplicatas avaliadas considerando o mesmo TDH (27 dias)	68
Gráfico 5 – Comparativo dos Sólidos Totais na entrada e saída do experimento	72
Gráfico 6 – Comparativo dos Sólidos Voláteis na entrada e saída do experimento.....	73
Gráfico 7 - Comparativo dos Sólidos Fixos na entrada e saída do experimento.....	74
Gráfico 8 – Avaliação da remoção de DQO nas amostras testadas.....	77
Gráfico 9 – Avaliação da remoção de DBO ₅ nas amostras testadas.....	78
Gráfico 10 – Avaliação da biodegradabilidade das misturas no início do experimento.....	79
Gráfico 11 – Avaliação da biodegradabilidade das misturas no final do experimento	79
Gráfico 12 – Avaliação da relação C/N nas amostras no início do experimento	81
Gráfico 13 - Avaliação da relação C/N nas amostras no final do experimento	81
Gráfico 14 – Relação entre o carbono degradado e a tendência estabelecida na geração de biogás e metano	82
Gráfico 15 – Identificação de amônia nas amostras relacionada à tendência estabelecida na geração de biogás e metano.....	83

LISTA DE SIGLAS

ANA:	Agência Nacional das Águas
ABPA:	Associação Brasileira de Proteína Animal
ANNEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN:	Balanco Energético Nacional
C/N:	Carbono/Nitrogênio
COT:	Carbono Orgânico Total
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO:	Demanda Química de Oxigênio
DS:	Dejeto Suíno
EPE:	Empresa de Pesquisa Energética
ETE:	Estação de Tratamento de Efluentes
FAS:	Sulfato Ferroso Amoniacal
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA:	<i>Internacional Energy Agency</i>
MS:	Matéria Seca
NTK:	Nitrogênio Total Kjeldahl
OCDE:	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIEE:	Oferta Interna de Energia Elétrica
pH:	Potencial Hidrogeniônico
PIB:	Produto Interno Bruto
SF:	Sólidos Fixos
SPAC:	Sistema de Produção de Animais Confinados
ST:	Sólidos Totais
SV:	Sólidos Voláteis
TDH:	Tempo de Detenção Hidráulica
UPL:	Unidade Produtora de Leitões
VDI:	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	Cenário Energético Mundial.....	20
3.2	Matriz Energética Brasileira.....	21
3.3	Energias Renováveis.....	24
3.3.1	Energia das Biomassas	25
3.4	Biodigestão Anaeróbia	26
3.4.1	Fatores que influenciam no processo de biodigestão anaeróbia	29
3.5	O Biogás.....	33
3.5.1	Biodigestores.....	35
3.5.2	Aproveitamento do Biogás	35
3.5.3	O Biofertilizante	36
3.6	Potenciais Biomassas para utilização na produção de biogás.....	37
3.6.1	Dejetos Suínos.....	38
3.6.2	Lodos de Estação de Tratamento.....	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Composição da mistura de substratos orgânicos avaliados	42
4.2	Procedimentos de Coleta	46
4.3	Procedimentos de Experimentação.....	47
4.3.1	Preparo do Inóculo	49
4.3.2	Composição das Triplicatas Teste.....	50
4.4	Análises Físico-químicas	52
4.4.1	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	52
4.4.2	Sólidos Totais, Voláteis e Fixos	53
4.4.3	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	55
4.4.4	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	56
4.4.5	Carbono Orgânico Total (COT)	58
4.4.6	Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	60
4.4.7	Amônia.....	61

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	Ensaaios de Biogás	63
5.2	Análises físico-químicas.....	70
5.2.1	Análise de pH.....	70
5.2.2	Análise de Sólidos	71
5.3	Simulações com base nos resultados obtidos	84
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional ocorrido nos últimos anos provocou uma crescente demanda por alimentos e consequentes pressões sobre os setores industrial e agropecuário, responsáveis pela produção destes. Resultantes deste processo de desenvolvimento, problemas ambientais são gerados em virtude das grandes quantidades de resíduos orgânicos produzidos que, muitas vezes, são direcionados de forma equivocada no ambiente, ocasionando poluição na água, no solo e na atmosfera (ROSA et al., 2011).

A agropecuária intensiva e a acelerada agroindustrialização agregam valor à produção, mas por outro lado, geram um volume significativo de biomassas residuais. O sistema de produção de animais confinados (SPAC's) surgiu como uma alternativa para a redução dos custos de produção e aumento na eficiência do processo. Consequentemente, problemas ambientais também se intensificaram em função da alta concentração de animais e seus dejetos em uma mesma área, criando-se a necessidade de alternativas que permitam minimizar este problema e, na medida do possível, possam agregar algum valor aos resíduos. Nesse sentido, a geração e utilização de biogás apresentam-se como alternativas interessantes para contribuir na mitigação dos problemas ambientais decorrentes das atividades agroindustriais (KUNZ; OLIVEIRA, 2006) e por isso vem se difundindo como uma forma de tratamento de resíduos em vários países (PRATI, 2010).

Os resíduos e subprodutos agrícolas, agroindustriais e florestais são extremamente abundantes em um país como o Brasil. Estes resíduos apresentam em suas composições diferentes constituintes, que oportunizam a agregação de valor pela aplicação do conceito de biorrefinaria, definido por integrar processos de conversão de biomassa na produção de combustíveis, eletricidade e calor (ROSA et al., 2011). A conversão dessa biomassa disponível em produtos de valor comercial poderá, além de contribuir para a remoção de poluentes ambientais, trazer grandes dividendos à economia (PIROTA et al., 2015).

A situação de crise energética e a alta no preço do petróleo induzem à busca por novas fontes de energia. Diante deste cenário, processos de biodigestão anaeróbia têm se destacado como alternativa ao complemento de energia através do aproveitamento do biogás e redução de impactos ambientais por meio da minimização do potencial poluidor (altas cargas orgânicas) das biomassas empregadas no processo (GOMES; CAPPI, 2011).

A viabilização do biogás e da agroenergia, como um todo, tem relação direta com a adoção de tecnologias, pesquisas e desenvolvimento. Nos países desenvolvidos, a geração e o aproveitamento de energia por meio de biogás já é uma realidade porém, no Brasil, a aplicação desta alternativa é ainda recente e requer estudos e análises dos pontos de vista técnico e econômico (GOMES et al., 2014).

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de microorganismos. O poder calorífico do biogás está intimamente ligado à proporção de metano presente, sendo possível estabelecer uma relação linear entre a concentração de metano e o poder calorífico inferior do biogás (MOURA, 2011). Por este motivo, a recuperação de energia a partir de processos anaeróbios teve grande impulso com a crise do petróleo, onde diversos países buscaram alternativas para a sua substituição (NOGUEIRA, 1986).

A Região Sul do Brasil tem se mostrado relevante nas atividades do ramo da produção de alimentos, com ênfase na criação de animais para abate e processamento (DAL SOLER, 2012). O Vale do Taquari é o principal produtor de suínos do Estado, concentrando a criação e o abate, que chega a um milhão de cabeças por ano. A atividade, fundamentada no sistema de integração, tem grande importância econômica, mas exige o manejo adequado dos dejetos. A produção de suínos evoluiu nas questões de nutrição, genética, manejo e climatização de instalações, no entanto, carece de definições em relação às questões ambientais que envolvem, principalmente, o manejo dos dejetos (DAL SOLER, 2012).

Rizzoni et al. (2012) citam que a suinocultura é considerada pelos órgãos de controle e fiscalização, a atividade agropecuária de maior impacto ambiental, sendo desafiador encontrar um sistema capaz de harmonizar a continuidade das atividades desta importante cadeia produtiva com o uso racional dos recursos naturais e a preservação do ambiente.

A estabilização dos dejetos de suínos através de biodigestores tem se destacado em função dos aspectos sanitários e como potenciais na geração de energia renovável, além de oferecer condições econômicas de reciclagem orgânica e de nutrientes (KONZEN, 2005).

O aproveitamento dos dejetos sob a forma de biogás é apenas uma das vantagens da biodigestão anaeróbia, podendo ser citados também a redução de odores, eliminação de patógenos, redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), produção de biofertilizante, baixa produção de lodo, baixos custos operacionais e de investimento e possibilidade de sistemas descentralizados de tratamento de dejetos (OLIVEIRA, 2004). Além disso, diante do aumento da demanda de energia e da escassez dos recursos naturais, é necessário o investimento em novas fontes energéticas alternativas para auxiliar no desenvolvimento sustentável, podendo o biogás ser uma delas.

Investimentos que antes não eram considerados estão começando a serem priorizados pelas empresas de todos os setores econômicos, mesmo que o retorno não seja elevado a curto prazo, como é o caso dos investimentos ambientais (PEREIRA et al., 2015).

Com base nisto, o presente trabalho consistiu em uma análise técnica da possibilidade de codigestão, empregada como tratamento de resíduos orgânicos e como fonte de produção do biogás, sendo este sintetizado a partir da degradação de substratos orgânicos provenientes de atividades agroindustriais de uma Cooperativa, incluindo resíduos de laticínios, de frigoríficos de suínos e de aves e da criação de suínos pelo sistema integrado. Um dos objetivos foi de quantificar o potencial energético de resíduos, avaliando a melhor variação da mistura dos mesmos que pudesse proporcionar tratamento e geração de biogás em quantidade e qualidade suficientes para justificar os investimentos nesta área pela cooperativa.

Diante da necessidade de proporcionar um aumento na produção de energia baseada em fontes renováveis a partir do tratamento de resíduos, o presente estudo torna-se relevante por contemplar a avaliação da geração de biogás por meio de resíduos agroindustriais identificando as condições de misturas e proporções ideais destes resíduos que combinados possam oferecer a melhor eficiência no aproveitamento energético.

Este trabalho está organizado em capítulos, sendo que o Capítulo 2 deste documento aborda os objetivos principais e específicos do trabalho. O Capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica sobre questões inerentes ao tema proposto. O Capítulo 4 descreve as

metodologias adotadas na execução do trabalho. Resultados e discussão estão dispostos no Capítulo 5, enquanto que o Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a codigestão de resíduos agroindustriais (dejetos suíno, sangue e lodos de estação de tratamento de efluentes) submetidos ao processo de biodigestão anaeróbia que, combinados em diferentes proporções, possam ofertar a melhor opção de geração de biogás para aproveitamento energético e tratamento por meio da redução de carga orgânica da biomassa.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Comparar quantitativamente a geração de biogás de 11 triplicatas de experimento (escala laboratorial) com distintas combinações de resíduos agroindustriais;
- ✓ Comparar qualitativamente o biogás produzido em 11 triplicatas de experimento, de acordo com as proporções de metano identificadas em cada triplicata;
- ✓ Analisar parâmetros físico-químicos (pH, DBO₅, DQO, Carbono, Nitrogênio, Sólidos Totais, Sólidos Voláteis e Sólidos Fixos) das amostras pré e pós biodigestão anaeróbia, relacionando-os às condições ideais sugeridas em literatura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cenário Energético Mundial

A energia sempre foi indispensável às atividades humanas, desde os tempos antigos já era utilizada para cocção de alimentos, aquecimento de ambientes, operação de moinhos, tendo um expressivo aumento em seu consumo com a Revolução Industrial. Caracteriza-se como base para toda ciência e tecnologia sendo, ao lado de outros elementos componentes da infraestrutura necessária ao modelo de desenvolvimento vigente (LOPEZ, 2012).

O início do século XX marcou uma época de transformações, com a Revolução Industrial e a expansão da produção agrícola se gerou uma crescente demanda por energia (LOPEZ, 2012). Desde então, esta exerce um importante papel na sociedade (CRUZ-ARDILA et al., 2013) por meio de suas inúmeras utilizações, tornando-se indispensável ao crescimento econômico e social (BORGES NETO; CARVALHO, 2012).

É provável que o aumento da produção de petróleo e gás, que são energias de fácil acesso, não conseguirá atender a população nos próximos anos, uma vez que o nível da demanda de petróleo tende a aumentar desproporcionalmente (BAEYENS et al., 2015). O esgotamento previsível das fontes de energia atualmente disponíveis, somado à instabilidade no preço do petróleo, à poluição ambiental e ao crescimento na demanda de energia tornaram-se questões importantes e de urgente resolução (MIYAWAKI, 2014).

Aproximadamente 80% da energia consumida mundialmente tem origem na queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral (LOPEZ, 2012). Este tipo de produção de energia, considerada não renovável, reduz as reservas naturais que levaram milhões de anos para se constituir. Sendo assim, não há tempo para que se reestabeleçam e continuem abastecendo o consumo, tornando-se necessária a exploração de outras fontes energéticas (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Além da exaustão das reservas, o consumo de energia resulta na emissão de gases tóxicos para a atmosfera, caracterizando-se como um problema ambiental (ANDRADE, 2012). Isso indica que o consumo dos combustíveis fósseis não poderá seguir como principal fonte de energia utilizada pelo homem (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012). A incerteza sobre as reservas globais de energia impulsionam para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia consideradas limpas e renováveis (BILGEN, 2014).

Os combustíveis fósseis ainda são os principais responsáveis pelas demandas globais de energia, mesmo sabendo-se que as reservas de combustíveis são limitadas e sua utilização em larga escala segue associada com a degradação ambiental. O uso indiscriminado das fontes fósseis de energia contribuiu para o crescimento no nível de emissões de gases poluentes na atmosfera e o aumento dos preços dos combustíveis, sendo estas as duas principais condicionantes por trás dos esforços para utilizar fontes de energias renováveis (BANOS et al., 2011).

Frente ao cenário de escassez do petróleo, marcado também pelas mudanças climáticas, que muito se relacionam com a queima dos combustíveis fósseis, a promoção e o desenvolvimento de tecnologias na área de energias renováveis para incremento da matriz energética vêm ganhando destaque (REFOSCO, 2011).

Miyawaki (2014) descreve as energias renováveis como sendo as originadas por fluxos naturais, como a energia solar, a energia hidráulica, eólica, a energia gerada pelas ondas do mar e a energia da biomassa como, por exemplo, o biodiesel e o biogás.

O uso de energias renováveis favorece o aumento na diversidade de opções de fornecimento de energia, incidindo em uma menor dependência de combustíveis fósseis, resultando no aumento de empregos, na criação de mercados de exportação e na redução nas emissões poluentes na atmosfera (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011).

3.2 Matriz Energética Brasileira

Os recursos energéticos são os recursos ou fluxos de energia armazenados na natureza, que podem ser utilizados para atender as necessidades humanas, podendo estar disponíveis como recursos fósseis ou recursos renováveis (FACCO; VIEIRA, 2012). O conjunto que envolve todos os tipos de energias geradas e consumidas por um país pode ser compreendido como a sua matriz energética (SEGURA, 2011).

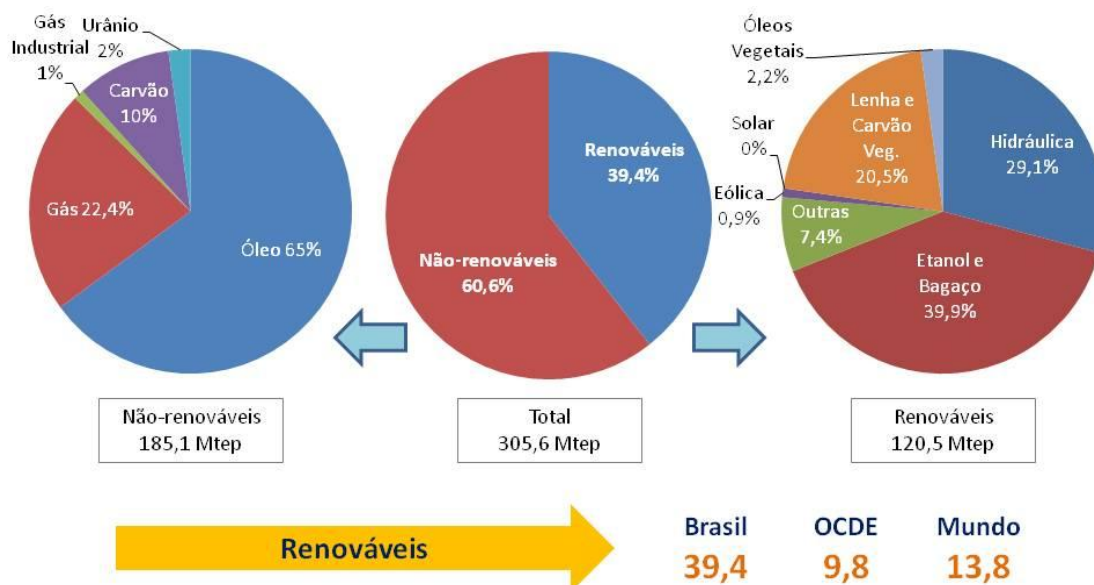
O período de industrialização vivenciado no Brasil e nos demais países, nos últimos anos, se deve principalmente ao aumento da capacidade de fornecimento de energia, sendo que o atendimento a esta demanda pode ser considerado um excelente termômetro da atividade econômica de um país (SEGURA, 2011).

A energia é um elemento essencial para atingir o desenvolvimento e a autonomia de um país. Um dos fundamentos de sustentabilidade econômica de uma nação está atrelado à sua condição de garantir logística e energia necessárias ao desenvolvimento, de forma ecologicamente correta e segura. O Brasil é citado como referência na produção de etanol, de energia hidrelétrica e especialmente, na renovabilidade de sua matriz energética (TOLMASQUIM, 2012).

Com a eminência de uma crise energética, a necessidade de ampliação e diversificação das fontes de energia renováveis no Brasil fica evidente. Mesmo com a matriz energética brasileira alicerçada 39,4% no uso de energias renováveis, enquanto que a média mundial é de 13,8%, de acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), a dependência da energia hidráulica em períodos de estresse hídrico coloca o país em difícil situação de abastecimento. As alterações no regime de chuvas demonstram a vulnerabilidade dos reservatórios do setor elétrico e a necessidade de se agregar outras fontes de energia ao sistema, hoje a cargo das termelétricas a combustíveis fósseis, elevando em muito o custo da energia (BLEY JR., 2015).

Dados do Balanço Energético Nacional (BEN), referentes a 2014, mostraram que neste ano (Figura 1), a oferta interna de energia (total de energia demandada no país) atingiu 305,6 Mtep, registrando uma taxa de crescimento de 3,1% perante a evolução do PIB nacional de 0,1%, segundo o último dado divulgado pelo IBGE. Os responsáveis em 80% pelo atendimento deste incremento foram gás natural, petróleo e derivados, basicamente em função da redução na oferta interna de hidroeletricidade com consequente aumento de geração térmica (EPE, 2015).

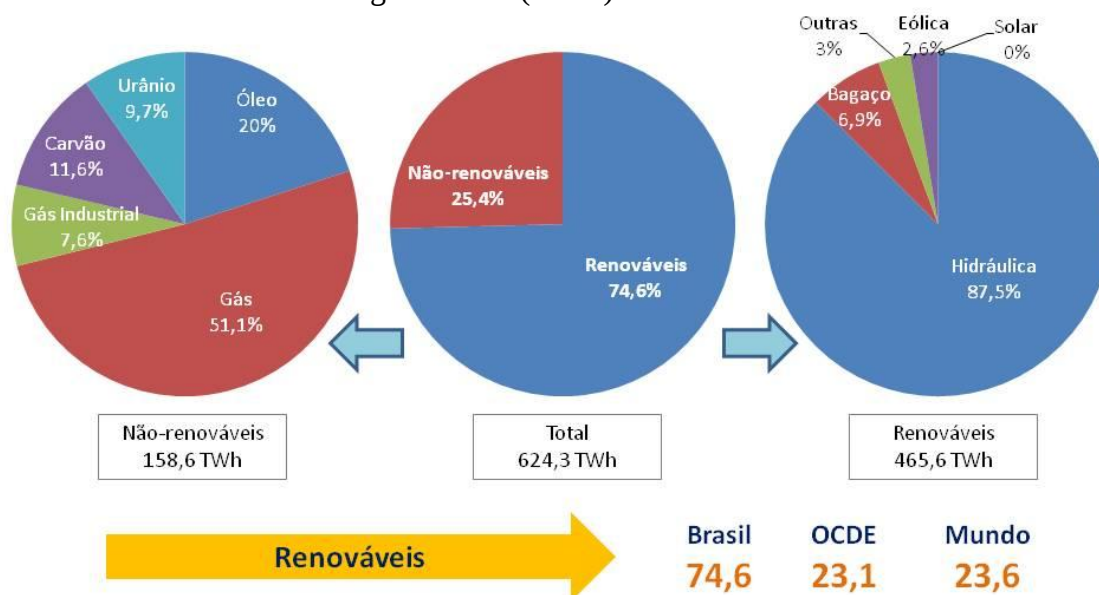
Figura 1 - Oferta interna de energia no Brasil – 2014



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (EPE, 2015).

Ainda em análise aos dados de oferta interna de energia, cabe mencionar a oferta interna de energia elétrica, que em 2014 obteve vantagens comparativas de 74,6% de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, contra apenas 23,6% na média mundial, e 23,1% no bloco dos países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), conforme ilustrado na Figura 2 (EPE, 2015).

Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica (OIEE) – 2014



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional (EPE, 2015).

Estudos desenvolvidos pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2010) indicam que a diversificação da matriz energética com ampla participação de tecnologias de energia

renovável será indispensável para enfrentar os desafios do desenvolvimento energético sustentável. Neste sentido, energias renováveis, como a solar, a eólica, a hídrica e o biogás, são relevantes para atender as necessidades globais de forma sustentável (MUNEER; MAUBLEU; ASIF, 2006). Enquanto fonte renovável, o biogás é a que mais se assemelha à hidráulica, pois pode ser armazenado e a energia gerada pode ser despachada de forma constante, não produzindo impactos nas redes de distribuição (BLEY JR., 2015).

3.3 Energias Renováveis

O desenvolvimento sustentável exige que a sociedade se aprofunde nas reflexões sobre a utilização, de maneira mais coerente, dos seus recursos naturais. No âmbito das questões energéticas, observa-se o esforço na prospecção e consolidação de energias a partir de fontes renováveis (CHING; RODRIGUES, 2013), através de ações que vários países estão desenvolvendo para ampliar a geração de energia a partir de fontes renováveis como incremento à participação das mesmas na matriz energética mundial (FREITAS; DATHEIN, 2013).

Villalva e Gazoli (2012) definem as energias renováveis como sendo as que podem ser utilizadas continuamente e por longos períodos de tempo, visto que não se esgotam por estarem em constante renovação, ou seja, a taxa de utilização é inferior, a de renovação (MONTEIRO, 2012). Alguns exemplos desta energia são a hidráulica, a eólica, a oceânica, a geotérmica, a das biomassas, a solar fototérmica e fotovoltaica. Pode-se dizer das fontes renováveis que são as que não se apoiam no consumo de recursos que são reconhecidamente limitados e cujo uso não resulta no seu esgotamento (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Embora as energias renováveis sejam alternativas que podem e devem atender a uma parcela do consumo, com redução dos índices de poluição, Benito (2011) afirma que ainda são incapazes de atender aos elevados índices de consumo exigidos pelas sociedades modernas. Mesmo como forma complementar do suprimento de energia, um cenário interessante para as energias renováveis vem se consolidando, indicando que o aumento na demanda mundial por energia nos próximos 50 anos deverá ser suprida pelas energias renováveis (LOPEZ, 2012).

3.3.1 Energia das Biomassas

De acordo com Neto et al. (2010) do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. O uso da biomassa como insumo energético tem sido crescente, principalmente para usos finais como energia térmica, mas de forma já considerável como geradora de energia elétrica e como origem de biocombustíveis (etanol, biodiesel e biometano).

Tendo sua origem na formação pela combinação de dióxido de carbono da atmosfera e água na fotossíntese, que produz os hidratos de carbono, a biomassa armazena a energia solar nas ligações químicas dos seus componentes estruturais. Se a biomassa for queimada de modo eficiente, há produção de dióxido de carbono e água. Portanto, o processo é cíclico e pode-se dizer que a biomassa é um recurso renovável (NETO et al., 2010).

A biomassa está entre as fontes para a produção de energia com maior potencial para os próximos anos, sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, proporcionando a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis (NETO et al., 2010).

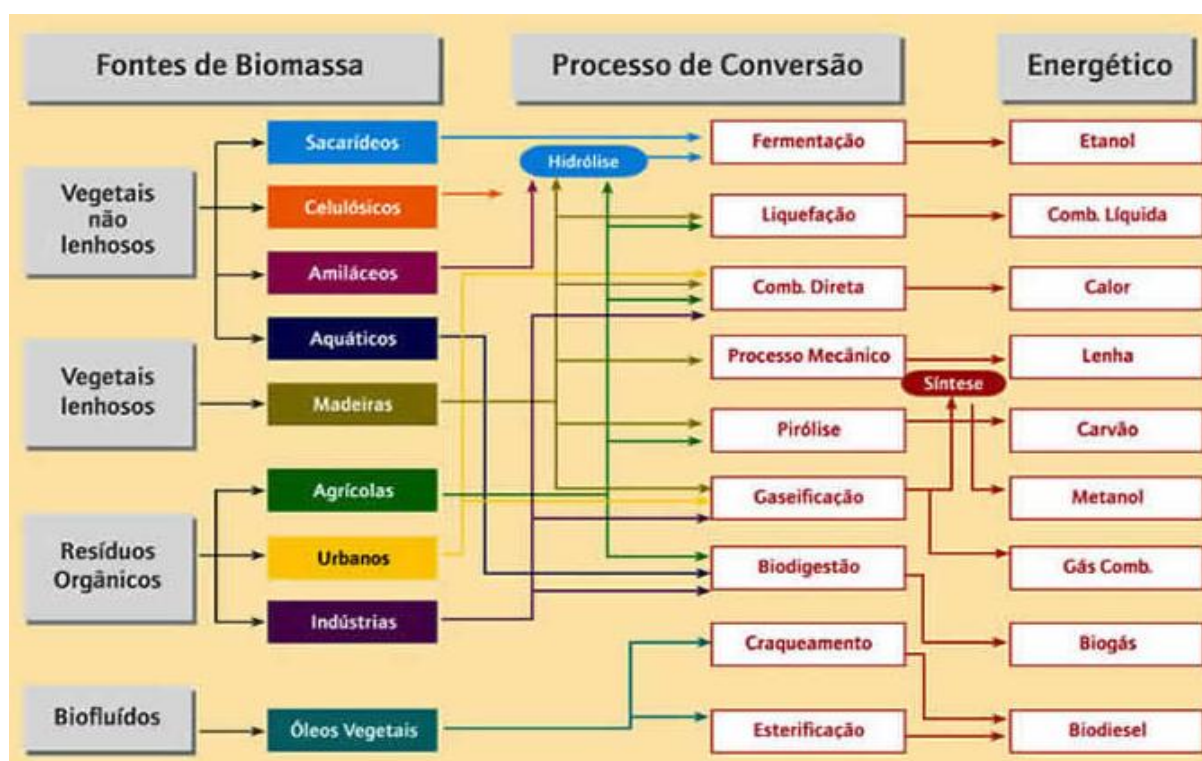
Embora escassas as informações sobre os tipos e volumes de resíduos gerados pelo agronegócio mundial sem valor agregado, Rosa et al. (2011) afirmam que geração dos mesmos está associada ao desperdício no uso de insumos, às perdas entre a produção e o consumo, e aos materiais que, gerados ao longo da cadeia, não possuem valor econômico evidente.

Resíduos podem representar perda de biomassa e de nutrientes, além de aumentar o potencial poluidor associado à disposição inadequada. Além disso, o elevado custo associado ao tratamento, ao transporte e à disposição final dos resíduos gerados tem efeito direto sobre o preço do produto final. Neste contexto, o aproveitamento de resíduos e o estabelecimento de novos usos de produtos e subprodutos agropecuários em substituição aos recursos não renováveis têm sido impulsionados (ROSA et al., 2011).

O Brasil dispõe de condições climáticas favoráveis para explorar a imensa energia derivada das biomassas, proporcionando com isso a redução de uma significativa parcela de importação de derivados do petróleo (NETO et al., 2010).

O estudo que resultou no Atlas de Energia Elétrica da ANNEL, realizado em 2002, descreve que o aproveitamento da biomassa pode ser feito através da combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). A Figura 3 apresenta os principais processos de conversão energética da biomassa, com destaque para o biogás.

Figura 3 – Processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil – ANEEL, 2002.

3.4 Biodigestão Anaeróbia

Dentre as alternativas de processamento de resíduos, a biodigestão anaeróbia apresenta-se como uma rota atrativa por produzir subprodutos que podem agregar valor e tratar parcialmente os resíduos, mitigando impactos ambientais (GLATZ; MIAO; RODDA, 2011).

A biodigestão anaeróbia é uma das técnicas de conversão energética da biomassa que ocorre por meio de processos naturais de fermentação. Estes processos decorrem da ação de microorganismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica, e produzem o biogás, sendo

este passível de utilização como fonte de energia diretamente em queimadores, em motores geradores ou ainda como biocombustível veicular (XAVIER; LUCAS JÚNIOR, 2010).

O interesse na biodigestão anaeróbia como um processo de tratamento de materiais orgânicos e uma opção energética com reconhecida vantagem ambiental, reside na conversão da maior parte da carga poluente do efluente em uma fonte de energia: o biogás, sendo este um dos benefícios do processo, que o consolida como uma tecnologia disponível para aplicação (OLIVEIRA, 2011). O tratamento biológico de resíduos empregando biodigestão anaeróbia gera o biogás como um dos seus subprodutos (CHERNICHARO, 2008), e esta pode ser uma forma de utilizar diferentes fontes de biomassa para satisfazer as necessidades energéticas atuais.

Por meio da biodigestão que ocorre na ausência de oxigênio molecular, há consórcios de diferentes tipos de microorganismos interagindo estreitamente para promover a transformação de compostos orgânicos complexos, em simples (MIN et al., 2013; PENG et al., 2013). Gomes e Cappi (2011) afirmam que o emprego da biodigestão anaeróbia como tratamento primário na estabilização de efluentes com altas cargas orgânicas tem como função principal a degradação da matéria orgânica (DBO, DQO e SSV), sendo que esta ocorre em quatro etapas distintas (KUNZ; PERDOMO; OLIVEIRA, 2004), conforme ilustrado na Figura 4 e descrito abaixo.

Hidrólise: nesta primeira etapa, a matéria orgânica, formada por moléculas complexas, é degradada em compostos mais simples pela ação de bactérias hidrolíticas que transformam proteínas em peptídeos e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos, gorduras em ácidos graxos, pela ação de enzimas extracelulares, como a protease, a amilase e a lipase.

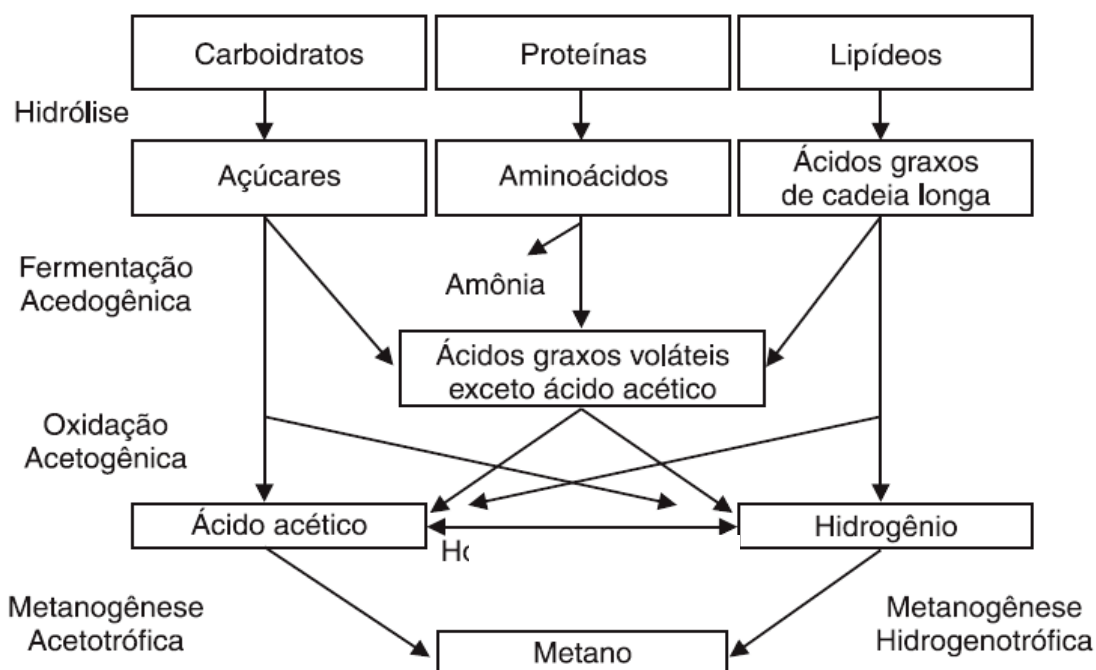
Acidogênese: as bactérias fermentativas acidogênicas atuam na segunda fase, em que os compostos já reduzidos são novamente simplificados a ácidos solúveis como os ácidos propiônico e butírico, alcoóis, além de dióxido de carbono e hidrogênio.

Acetogênese: na terceira fase, com a atuação das bactérias acetogênicas, os produtos obtidos na primeira etapa são transformados em ácido acético (CH_3COOH), hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). Essas bactérias são facultativas, podendo atuar tanto em meio aeróbio como anaeróbio. O oxigênio do material orgânico não aproveitado no processo

aeróbio do sistema é utilizado para efetuar essas transformações (SOSA; CHAO; RÍO, 2004; PROBIOGÁS, 2010).

Metenogênese: o metano, gás de alto poder calorífico responsável pela característica energética do biogás, é formado na última etapa, a partir da ação de dois grupos de bactérias metanogênicas, um que produz metano pela conversão do ácido acético (bactérias acetotróficas) e outro que o produz a partir da conversão de hidrogênio e dióxido de carbono (bactérias hidrogenotróficas) (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2012). Este grupo de bactérias anaeróbias é extremamente sensível a mudanças no meio, como temperatura e pH.

Figura 4 - Etapas da biodigestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Mendes et al., 2005.

A última etapa é a mais demorada do processo, pois com o decorrer das reações químicas ocorre a formação de microbolhas de metano e dióxido de carbono em torno das bactérias metanogênicas, isolando-as de um contato direto com a mistura. Por este motivo, é aconselhada a agitação no biodigestor, com o objetivo de estourar essas microbolhas, facilitando a ação dos microrganismos com maior parcela do substrato. Deve-se considerar o tempo de transição destes processos, que se dá geralmente de 15 dias até a fase metanogênica, e conseqüentemente o início da produção do biogás (NETO et al., 2010).

Além das quatro etapas anteriormente descritas, o processo de digestão anaeróbia pode incluir ainda, uma quinta fase, dependendo da composição química do substrato submetido a

este processo: a sulfetogênese. Neste processo, os compostos de enxofre presentes na biomassa são utilizados para a oxidação dos compostos orgânicos, reduzindo-os a sulfetos e podendo interferir na geração de metano, visto que as bactérias redutoras de sulfato passam a competir com as bactérias fermentativas, acetogênicas e metanogênicas, pelos substratos disponíveis (RIZZONI, 2012). O mesmo autor afirma que o enxofre é um nutriente básico e sua ausência pode inibir todo o processo, porém em teores muito elevados há produção de sulfeto de hidrogênio, tipicamente conhecido como gás sulfídrico, um gás venenoso, corrosivo, e que interfere na queima do metano presente no biogás.

3.4.1 Fatores que influenciam no processo de biodigestão anaeróbia

Devido aos avanços que têm tornado possível o aproveitamento energético do metano existente no biogás, diversos estudos têm sido desenvolvidos buscando compreender esse processo, sua viabilidade, possibilidades e limitações (SCHUCH, 2012).

O processo de digestão anaeróbia envolve a ação simultânea de vários microorganismos que convivem em um ambiente em que o produto metabólico de um é o substrato do outro, devendo isso funcionar em harmonia (NETO et al., 2010; TORRES; PEDROSA; MOURA, 2012).

Para a otimização do processo, fatores ambientais devem ser apropriados às espécies participantes, sendo as *Arqueas* metanogênicas as de maior exigência. Dentre os fatores de maior relevância mencionam-se os abaixo relacionados.

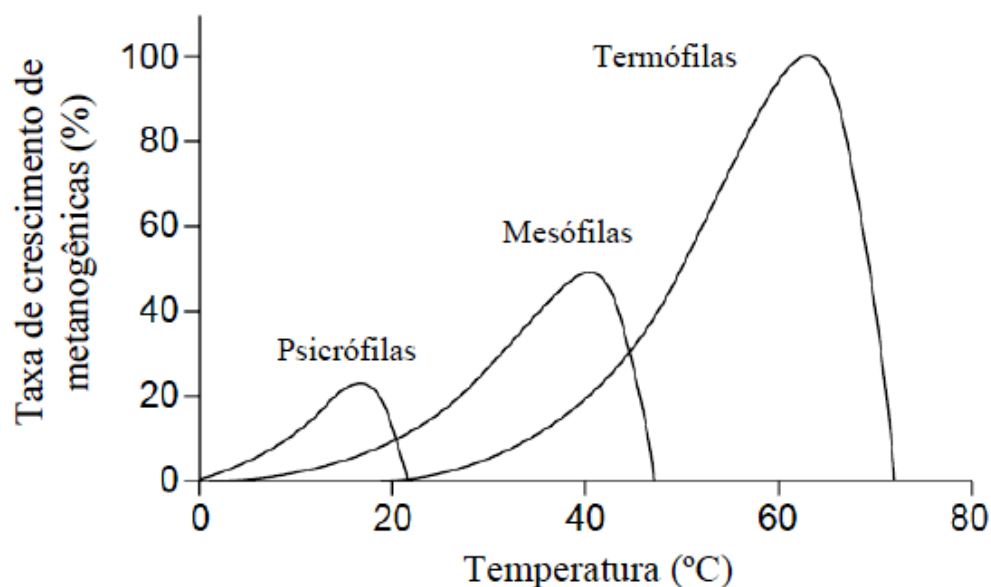
3.4.1.1 Inexistência de Oxigênio (O_2)

A ausência de oxigênio no reator é condicionante no desempenho dos microorganismos produtores de biogás, visto que estes são anaeróbicos e o oxigênio paralisa seu metabolismo. As bactérias aeróbicas produzem dióxido de carbono (CO_2) como produto final de sua respiração. As archaeas metanogênicas produzem metano (CH_4). Enquanto que o CH_4 é um gás rico em energia química e, a isso se atribui sua utilização como combustível, o CO_2 já está totalmente oxidado e não pode ser aproveitado como combustível. Se o biodigestor não estiver hermeticamente vedado, a produção de metano não ocorre (NETO et al., 2010).

3.4.1.2 Temperatura

A digestão anaeróbia de biomassa residual é possível em temperaturas psicrófilas (0 a 20 °C), mesófilas (20 a 45 °C), termófilas (45 a 60 °C). No entanto, as reações biológicas são mais eficientes e rápidas em temperaturas termófilas. A faixa psicrófila, segundo estudo de Collins et al. (2003) é mais interessante para efluentes produzidos em baixas temperaturas, logo, não se mostra adequada ao caso da biomassa residual produzida no Brasil (LEITE et al., 2003). A Figura 5 ilustra a taxa de crescimento relativo de microrganismos metanogênicos em função da temperatura.

Figura 5 – Taxa de crescimento relativo de microrganismos metanogênicos



Fonte: Lettinga, 2001.

Variações bruscas de temperatura inibem as bactérias metanogênicas, o que acarreta diminuição considerável da produção de biogás (NETO et al., 2010; SOSA; CHAO; RÍO, 2004).

3.4.1.3 Acidez, Alcalinidade e pH

Um fator considerável é a acidez, uma vez que as bactérias produtoras do metano requerem uma faixa variável de pH entre 6,5 e 8,0. Enquanto as bactérias hidrolíticas, fermentativas e acetogênicas produzem ácidos e trabalham em faixas de pH inferiores, as bactérias metanogênicas consomem esses ácidos, mantendo o meio neutro. Se a formação de ácidos for superior à capacidade de assimilação das metanogênicas, o meio acidifica-se e o

processo de geração de metano é inibido (SOSA; CHAO; RÍO, 2004). Moura (2012) afirma que em meios ácidos, a atividade enzimática das bactérias é anulada e em meios significativamente alcalinos a fermentação produz anidro sulfuroso e hidrogênio. Em função disso, consideram-se os valores de pH próximos a neutralidade como sendo os mais indicados para este tipo de processo.

3.4.1.4 Nutrientes

Os principais nutrientes requeridos pelos microrganismos são o carbono, o nitrogênio e sais minerais, salvo que todos os organismos vivos precisam de nitrogênio na síntese de proteínas. Como exemplo de fontes ricas em nitrogênio incluem-se os dejetos e como fontes ricas em carbono citam-se os restos de culturas vegetais. Os sais minerais presentes nos dejetos animais e resíduos vegetais são suficientes para a nutrição mineral das bactérias. No entanto, se não houver um adequado equilíbrio de compostos de carbono (que fornecem a energia) e de compostos nitrogenados (que fornecem o nitrogênio) não ocorrerá uma eficiente produção de biogás (NETO et al., 2010).

Esta proporção, portanto deve ser a mais próxima da ideal, caso contrário, as bactérias não serão capazes de consumir todo carbono presente no meio e o desempenho do processo será baixo. A relação ótima de C/N situa-se entre 20-30/1 para o início do tratamento e entre 13-10/1 para que o resíduo seja considerado estabilizado (SGORLON et al. 2011). Ou seja, a cada 20% de carbono 1% deve ser nitrogênio no início do processo e a cada 10% de carbono 1% deve ser de nitrogênio ao final do processo (PROBIOGÁS, 2010).

3.4.1.5 Teor de Umidade e Concentração de Sólidos Totais

Outro fator a considerar é o teor de água presente na biomassa a ser digerida. Estudos indicam que o material a ser fermentado deve possuir em torno de 90 a 95% de umidade em relação ao peso, pois valores muito acima ou muito abaixo destes limites podem prejudicar a produção de biogás (NETO et al., 2010). Inversamente proporcional ao teor de umidade está a concentração de Sólidos Totais (ST), sendo considerada ideal na faixa de 8% a 10%, de acordo com Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros (VDI 4630, 2006). Não são recomendadas concentrações maiores que 10%, em função da diminuição da eficiência do biodigestor e do aumento da probabilidade da criação de crostas.

3.4.1.6 Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)

Em relação ao tempo de retenção hidráulica, Gomes e Cappi (2011), afirmam que este é variável de acordo com o teor de sólidos totais do substrato, se referindo ao tempo necessário para que o material seja degradado dentro do biodigestor. Usualmente, em reatores de escala real o TDH varia de 20 a 40 dias.

3.4.1.7 Substâncias Inibidoras

Processos de inibição da geração de biogás ou metano podem desenvolver-se a partir da entrada de algumas substâncias no reator que afetem o crescimento bacteriano ou causem uma alteração adversa. Isso resulta no desequilíbrio da população de microorganismos e na morte ou inativação das bactérias metanogênicas, comprometendo assim a produção de metano (OLIVEIRA, 2012).

Amônia, sulfatos, antibióticos, detergentes, desinfetantes e elementos traços constituem os principais inibidores da produção de biogás a partir de dejetos suínos (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

Liu e Sung (2002) apontam a amônia, resultante da decomposição de proteínas e ureia, como principal substância inibidora em processos de digestão anaeróbia envolvendo dejetos suínos, visto que se apresentam em altas concentrações, representando o principal fator de instabilidade. Os autores destacam que em concentrações abaixo de 200 mg/L, a amônia pode ser benéfica ao processo anaeróbio, uma vez que o nitrogênio é um nutriente essencial aos microrganismos anaeróbios.

O desenvolvimento de um processo de inibição depende da concentração das substâncias inibidoras, da composição do substrato e da adaptação dos microorganismos aos inibidores. Danos irreversíveis ao processo de digestão anaeróbia em um reator normalmente se desencadeiam quando o tempo de exposição ou a concentração das substâncias inibidoras são muito altas (DEUBLIN; STEINHOUSER, 2008).

3.5 O Biogás

O acelerado desenvolvimento econômico dos últimos anos e a alta acentuada do preço dos combustíveis convencionais têm encorajado as investigações na produção de energia a partir de novas fontes renováveis e economicamente atrativas, como o biogás (VILLELA; SILVEIRA, 2005).

Tendo sua origem relacionada ao processo de biodegradação anaeróbia da matéria orgânica, sem a presença de oxigênio, o biogás é parte importante do ciclo do carbono (MIYAWAKI, 2014), constituindo-se como fonte alternativa de energia, de fácil utilização, com simultânea remoção e estabilização das cargas poluentes de efluentes orgânicos (NETO et al., 2010).

Prati (2010) descreve o biogás como sendo uma mistura de gases, cujo tipo e percentagem variam de acordo com as características dos substratos e das condições de funcionamento do processo de biodigestão destes. Os principais constituintes do biogás são o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o sulfeto de hidrogênio (H_2S), a amônia (NH_3) e água, sendo os dois primeiros predominantes (KONRAD et al., 2013). Outros gases, como sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono também compõe o biogás em menores concentrações (PRATI, 2010).

O biogás destaca-se como um potencial combustível para geração de energia e pode ser utilizado com os mesmos padrões do gás natural fóssil, quando purificado (MIYAWAKI, 2014). É considerado uma fonte renovável de energia com custo relativamente baixo, podendo ser produzido em unidades de acúmulo de rejeitos urbanos, esgoto e resíduos agroindustriais, apresentando-se como uma importante alternativa energética, em condições de desempenhar expressivo papel na substituição do petróleo e de seus derivados (FERRAREZ; FILHO; TEIXEIRA, 2010).

Dentre os gases que compõem o biogás, o metano é o que desperta maior interesse, pois ele determina o poder calorífico e o potencial energético do biogás. Sendo assim, o poder calorífico do biogás é proporcional à porcentagem de gás metano na mistura e esta varia entre 40% e 75% (MARI, 2014). A Tabela 1 compara a equivalência energética do biogás com composição média de 65% de metano, em comparação com algumas fontes convencionais, segundo resultados obtidos por diferentes autores.

Tabela 1 – Equivalência entre 1m³ de biogás e outras fontes energéticas

Fonte	Oliver et al. (2008)	Oliveira (2011)
Gasolina (L)	0,61	-
Óleo Diesel (L)	0,55	0,61
Madeira (kg)	1,54	3,57
Eletricidade (kWh)	1,43	1,25

Fonte: Adaptado de Oliver et al. (2008) e Oliveira (2011).

O metano é produzido por fontes antropogênicas e naturais, sendo encontrado em depósitos geológicos, que são conhecidos como campos de gás natural, geleiras, em pântanos e em lugares que possuem baixa concentração de oxigênio (NETO et al., 2010). O CH₄ é um gás incolor, inodoro, de baixa solubilidade em água e rico em energia química e, por isso, pode ser utilizado como combustível (NETO et al., 2010). Este gás pertence ao grupo dos hidrocarbonetos (HC), que são compostos formados por carbono e hidrogênio, e podem se apresentar na forma de gases, partículas finas ou gotas (ECYCLE, 2013).

Estudos têm sido realizados com o objetivo de maximizar a produção de biogás, por meio da combinação entre substratos orgânicos e pela adição de inóculo, utilizando parte do material que já passou pelo processo de biodigestão. Este é capaz de fornecer ao novo substrato uma população adicional de microorganismos típicos da biodigestão anaeróbia (XAVIER; LUCAS JÚNIOR, 2010).

O bom funcionamento dos sistemas de produção de biogás pode proporcionar vários benefícios aos usuários e à comunidade, resultando na proteção dos recursos naturais e na conservação ambiental (SANTOSH et al., 2004). Ao contrário de outras formas de energia renovável, o biogás não apresenta qualquer limitação geográfica, e a tecnologia necessária para a produção de energia é relativamente simples e de fácil operação (TALEGHANI; KIA, 2005).

Uma iniciativa conjunta entre Brasil e Alemanha, através do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), pretende ampliar o abastecimento energético a partir do biogás, principalmente no que se refere ao saneamento básico e as atividades agropecuárias. Este projeto tem vigência de cinco anos (2012-2017) e os principais desafios a serem enfrentados são o conhecimento insuficiente sobre projetos de biogás e viabilidade técnica, ausência de profissionais qualificados, o fato dos equipamentos não serem produzidos localmente, o que muitas vezes inviabiliza

economicamente os projetos, e ainda a falta de credibilidade no biogás resultante de experiências negativas em décadas passadas, no Brasil (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014).

3.5.1 Biodigestores

Um biodigestor constitui-se de uma câmara/reator hermeticamente fechado onde é adicionado o substrato (biomassa) a fim de que ocorra a degradação dos materiais orgânicos complexos, por meio da biodigestão anaeróbia, produzindo o biogás e o biofertilizante (TARRENTO; MARTINEZ, 2006; SCHUCH, 2012).

O biodigestor, quando bem projetado, funciona como um equipamento em que a fermentação da matéria orgânica ocorre de forma controlada, proporcionando a redução das cargas orgânicas da biomassa e, conseqüentemente, menor impacto ambiental na disposição das mesmas, além da geração de combustível de baixo custo (BARICHELO et al., 2015).

Os biodigestores têm como característica produzir o biogás, amenizar os odores dos dejetos, diminuir a proliferação de insetos e roedores, e contribuir para uma aparência mais limpa de sistemas de produção animal ou processos que envolvem a geração de outros tipos de resíduos orgânicos (XAVIER; LUCAS JUNIOR, 2010). A utilização de biodigestores pode ser destacada devido aos aspectos de saneamento e energia, além de estimular a reciclagem de nutrientes (BARICHELO et al., 2015).

Há modelos de biodigestores diferenciados no mundo, cada um adaptado a uma realidade e necessidade de biogás, os mais utilizados são os rurais, por exemplo, o Indiano, Chinês, o de Batelada e o Canadense (DEGANUTTI et al., 2002).

3.5.2 Aproveitamento do Biogás

A crise do petróleo na década de 70 impulsionou iniciativas visando recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio, quando diversos países buscaram alternativas para a substituição deste combustível fóssil. No entanto, o impulso recebido no período de crise não chegou a constituir um sólido movimento de substituição dos recursos não renováveis por outras fontes renováveis (NOGUEIRA, 1986).

A discussão e o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis colocou em pauta o aproveitamento energético do biogás produzido a partir do tratamento de resíduos orgânicos. O objetivo de reduzir o impacto ambiental da atividade industrial é amplamente aceito quando também resulta em benefícios econômicos. Muitas empresas se exibem através de seus produtos ou práticas de negócios “sustentáveis”. Essas práticas de negócios podem variar, desde a substituição de materiais, à reciclagem de produtos, ou redução do consumo de energia e das emissões atmosféricas (HODGE; OCHSENDORF; FERNÁNDEZ, 2010).

Os usos do biogás como forma de combustível permeiam várias utilizações, desde motores a combustão interna, ao aquecimento de caldeiras e fornos ou ainda podendo ser introduzido em turbinas a gás ou em microturbinas. Mas para que haja eficiência na conversão energética do biogás, é necessário identificar a sua vazão, composição e poder calorífico do mesmo, sendo esses os parâmetros que determinam o potencial de geração de energia, tanto na forma de energia elétrica, calor ou trabalho (PRATI, 2010).

3.5.3 O Biofertilizante

Além do biogás, a biomassa depois de fermentada, produz o denominado biofertilizante, subproduto do processo de biodigestão anaeróbia. Seu uso é indicado para a fertilização, pois sua aplicação em solo melhora as qualidades biológicas, químicas e físicas do mesmo (BARRICHELO, et al., 2015).

A geração e utilização de biofertilizante em solos agrícolas promove a devolução de produtos ao solo e aumenta o volume e a qualidade de adubo orgânico. Os excrementos fermentados aumentam o rendimento agrícola (NETO et al., 2010).

Raslavičius, Grzybek e Dubrovin (2011) salientam que, como consequência da digestão anaeróbia, o teor de carbono na biomassa é reduzido e o teor de nitrogênio se concentra, podendo este servir de nutriente em solos que requerem este componente.

O biofertilizante proporciona a multiplicação das bactérias, ampliando a microbiota do solo e ocasionando aumento significativo na produtividade das lavouras. A composição do biofertilizante pode variar de acordo com o tipo de biomassa utilizada no biodigestor. No caso dos dejetos de suínos, a composição do biofertilizante possui, em média, concentrações de 0,5

a 4,0% de nitrogênio; de 0,5 a 5,0% de fósforo; 0,5 a 3,0% de potássio e cerca de 90 a 95% de água (OLIVEIRA, 2011).

Sanchez et al. (2005) descrevem que o biofertilizante pode ser utilizado como adubo orgânico na agricultura, aquicultura e/ou como fertilizante foliar. O seu uso como adubo orgânico em conjunto com fertilizantes químicos em uma variedade de culturas de vegetais, pode proporcionar um rendimento comparável ao obtido com o uso exclusivo de fertilizantes químicos, reduzindo o custo do processo de produção.

3.6 Potenciais Biomassas para utilização na produção de biogás

A possibilidade de aproveitamento energético dos resíduos agropecuários e industriais, produzindo biogás, biofertilizante e reduzindo a matéria orgânica poluente destes, através do seu tratamento por meio da digestão anaeróbia, é comprovada por estudos de avaliação já desenvolvidos. Nas regiões onde a atividade agropecuária é intensa, encontram-se subprodutos oriundos da produção agrícola e pecuária, que podem ser convertidos em fontes energéticas através do biogás (MIYAWAKI, 2014).

O reaproveitamento de resíduos como matéria-prima para a produção de biogás apresenta-se como uma alternativa energética renovável interessante. Esta ação possibilita a criação de fontes de suprimentos descentralizadas e em pequena escala, por setores ou indústrias que busquem desenvolvimento sustentável e apostem em novas tecnologias para o suprimento de sua demanda de energia (BOHN, et al., 2014).

No Vale do Taquari, sabe-se que os resíduos oriundos da produção animal, como os dejetos (fezes e urina), representam número expressivo, indicando grandes quantidades de biomassa gerada, sendo sua reciclagem relevante sob os aspectos econômicos e ambientais. O Vale do Taquari concentra grande parte da produção de suínos do Estado (DAL SOLER, 2012).

A suinocultura é uma das mais importantes cadeias produtivas da indústria alimentar existente no Brasil. O sistema produtivo passou de um sistema extensivo para intensivo, por meio de um processo industrializado, com aumento em escala e introdução da criação confinada, que gera grandes quantidades de resíduos. No primeiro trimestre de 2015, a Região Sul do Brasil respondeu por 66% do abate nacional de suínos, seguida pelas Regiões Sudeste

(18,7%), Centro-Oeste (14,1%), Nordeste (1,1%) e Norte (0,1%), sendo que neste período foram abatidas 9,170 milhões de cabeças de suínos (IBGE, 2015).

Segundo levantamentos da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2015), o Brasil produziu e exportou 3.370 e 600.000 toneladas equivalentes a carcaça e carne suína, respectivamente, em 2013. Estes números levaram o país a 4º posição de maior produtor e exportador mundial. Em setembro de 2015, as exportações registraram crescimento de 19,2% em relação ao mesmo período do ano anterior. Deve-se considerar que essa grande representatividade da atividade gera consequentemente uma maior produção de dejetos.

Além dos dejetos animais, as atividades industriais do ramo alimentício também são fontes geradoras de efluentes e resíduos orgânicos em sua linha de produção. A indústria alimentícia é um dos maiores setores industriais do mundo, gerando grandes quantidades de efluentes que necessitam de tratamento e disposição (TERA, 2014).

O processamento de alimentos compreende a geração de resíduos de ordens diversas, sendo que suas características variam de acordo com o alimento processado e com o grau de industrialização. Normalmente as águas residuárias possuem elevadas concentrações de matéria orgânica, grandes quantidades de resíduos semissólidos e alta variação sazonal (CALLADO; DE PAULA JR, 1999).

Abatedouros, matadouros e frigoríficos possuem resíduos volumosos e com alto teor de matéria orgânica, o que pode causar impactos ambientais, se não forem devidamente tratados (TERA, 2014). Neste sentido, tratamentos biológicos são utilizados na redução das cargas orgânicas destes resíduos, visando reciclagem energética e menores impactos ambientais.

3.6.1 Dejetos Suínos

O termo “dejeito de suínos” refere-se a um conjunto de elementos que conferem a este algumas características peculiares. Este dejeito é formado, basicamente, por fezes, urina, restos de ração e água, podendo ter outros elementos em menor escala como cerdas e restos de parição. Analisando-se sua constituição básica, percebe-se que muitas variáveis podem influenciar nas características do dejeito, entre as mais importantes estão: a idade e o sexo dos animais; e os ingredientes da ração (KUNZ; PALHARES, 2004).

Na composição dos dejetos suínos estão presentes vários nutrientes, dentre os quais se destacam, em maior concentração, o nitrogênio (N) e o fósforo (P), além de minerais como zinco, cádmio, chumbo, selênio, cobre e uma alta carga de microorganismos patogênicos. Estes fatores comprometem a aplicação de dejetos em quantidades excessivas ou continuadas em uma mesma área, podendo causar problemas ao solo e às águas, devido à presença de elementos ou compostos não assimiláveis pelas plantas ou microorganismos do solo, que serão lixiviados causando poluição ao meio ambiente (GOMES; CAPPI, 2011).

A crescente geração de dejetos suínos relaciona-se à adoção de sistemas confinados de produção desses animais, que acarretam aumento considerável do uso de água nas instalações e maior volume de efluentes. A utilização de processos anaeróbios para reduzir o poder poluente destes resíduos líquidos vem se destacando, pois possibilita a recuperação do potencial energético do resíduo na forma de biofertilizante e biogás (MOURA, 2012).

Quando dispostos de forma inadequada (sem tratamento) no ambiente, os dejetos animais são potenciais poluidores, em virtude dos impactos ambientais no solo, na água e no ar. Além de minimizar estes impactos, o aproveitamento dos dejetos submetidos ao tratamento anaeróbio para a geração de energia é uma maneira de agregação de valor (KUNZ; HIGARASHI; OLIVEIRA, 2005; CATAPAN; CARVALHO; CATAPAN, 2011).

A biodigestão anaeróbia é processo amplamente empregado no tratamento de dejetos suínos por tornar o produto final estável, com o adicional de produção do biogás e do biofertilizante (ORRICO JUNIOR et al., 2010; MENARDO et al., 2010). O principal benefício dessa forma de tratamento é a diminuição da carga poluidora do material que, se utilizado como biofertilizante, oferece menor risco ao ambiente do que se for lançado bruto.

Os rendimentos de biogás a partir da digestão anaeróbia destes dejetos podem variar principalmente em função da qualidade do resíduo adicionado ao biodigestor e seu grau de diluição. Outros fatores também podem contribuir para oscilações nestes rendimentos, como a adição de um substrato que complemente a composição do dejetos (HIDALGO; MARTIN-MARROQUÍN, 2014).

O grau de diluição dos dejetos e suas características físico-químicas são definidos pelo sistema de produção utilizado em cada granja (KUNZ; PALHARES, 2004). As características químicas dos dejetos de suínos em função de sua matéria seca (sólidos totais) estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Característica química de dejetos suínos em função de seu teor de sólidos

Grau de Diluição	Sólidos Totais (%)	DBO (mg/L)
Concentrado	5-6	40.000
Semiconcentrado	4-5	33.000
Semidiluído	3-4	27.000
Diluído	2-3	21.000
Muito diluído	<2	15.000

Fonte: Adaptado de Dartora; Perdomo; Tumelero, 1998.

O grau de diluição pode ser determinado pela análise da Matéria Seca (MS) ou Sólidos Totais (ST) presentes nos dejetos, sendo estes subdivididos em Sólidos Voláteis (SV) e Fixos (SF). Os SV representam a parcela orgânica do substrato, de possível assimilação pelas bactérias, e representam entre 70% a 75% dos Sólidos Totais, nos dejetos suínos. Os SV são os responsáveis diretos pela produção de biogás (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

A quantidade de dejetos gerada em granjas de suínos é muito variável e depende de fatores como o número e categoria dos animais, instalações, equipamentos e manejo de limpeza adotado em cada granja. Essas variáveis são determinantes para maior ou menor quantidade de água utilizada, que por sua vez, influencia no volume de efluentes gerados. A composição e o volume dos dejetos têm papel fundamental para o planejamento e estabelecimento de programas e técnicas de tratamento e armazenamento dos mesmos (CATAPAN; CARVALHO; CATAPAN, 2011).

Embora haja algumas iniciativas no setor da indústria, ainda são necessárias mudanças nos padrões de produção que permitam incorporar às rotinas e aos seus custos de produção uma gestão ambientalmente correta, viabilizando um manejo eficaz dos dejetos e seus efluentes, incluindo procedimentos de gestão ambiental, cujo objetivo é de proteger, restaurar, conservar e utilizar o meio ambiente de maneira sustentável (SEGANFREDO, 2008).

3.6.2 Lodos de Estação de Tratamento

Durante a etapa de tratamento, os efluentes são submetidos a diversos processos, físicos, químicos e biológicos, que geram lodos como subprodutos. O lodo caracteriza-se como uma mistura de substâncias que contém minerais, coloides e matéria orgânica em decomposição. Seu tratamento adequado depende de fatores como tecnologia, disposição

final e espaço físico disponível, uma vez que cada uma dessas variáveis pode alterar as características físicas, químicas e biológicas do lodo (LEE; SANTOS, 2011).

Os efluentes oriundos das indústrias de papel e celulose, açúcar e álcool, abatedouros, laticínios, cervejas, óleos vegetais e as demais indústrias de alimentos e bebidas apresentam significativo potencial de produção de biogás. Este se dá em função da elevada concentração de matéria orgânica biodegradável, do volume de efluentes gerados e da propensão do setor industrial em tratar os efluentes através de processos anaeróbicos (ZANETTE, 2009).

Efluentes de frigoríficos e laticínios são ricos em proteínas e lipídeos, constituindo-se como fontes de carbono. Quando empregados na digestão anaeróbia, a degradação destes substratos pode resultar na geração de biogás com elevados teores de metano. Estes podem também complementar a digestão anaeróbia de substratos com elevados teores de nitrogênio, como os dejetos suínos, por exemplo, equilibrando a relação C/N (KARLSSON et al., 2014).

Este tipo de resíduo tem como destinações finais os aterros sanitários, aplicações na agricultura ou incineração. Porém, devido ao crescimento no volume de lodo produzido diariamente somente as aplicações tradicionais de destinação final do lodo serão inviáveis econômica e ambientalmente. A destinação para agricultura, apesar de ser a melhor forma atual de gerenciamento de lodo, também é problemática no sentido da necessidade de um tratamento rigoroso da qualidade do lodo, pois este pode conter substâncias químicas tóxicas e agentes patogênicos (LEE; SANTOS, 2011). Frente a este cenário, técnicas de reaproveitamento e estudos sobre a gestão do lodo estão sendo desenvolvidos, entre eles está a sua utilização como fonte de energia a partir do seu emprego na digestão anaeróbia.

A digestão conjunta de dejetos originados da produção animal e resíduos que complementem a composição dos substratos permite a melhoria do processo de biodigestão, promovendo maior atividade dos microorganismos e melhores taxas de conversão do material orgânico em biogás. Esse processo é conhecido por codigestão. Nesta concepção, a utilização de resíduos ricos em carbono tem sido amplamente empregada pela indústria, com resultados positivos sobre a geração do biogás (ZHANG et al., 2013).

Não há parâmetros no Brasil que definam proporções ideais dos materiais a serem combinados e, portanto a mistura de dois ou mais resíduos para a biodigestão anaeróbia tem sido efetuada com base nas suas disponibilidades e não com conhecimento sobre a composição ótima para a combinação dos mesmos (SUNADA et al., 2014).

4 METODOLOGIA

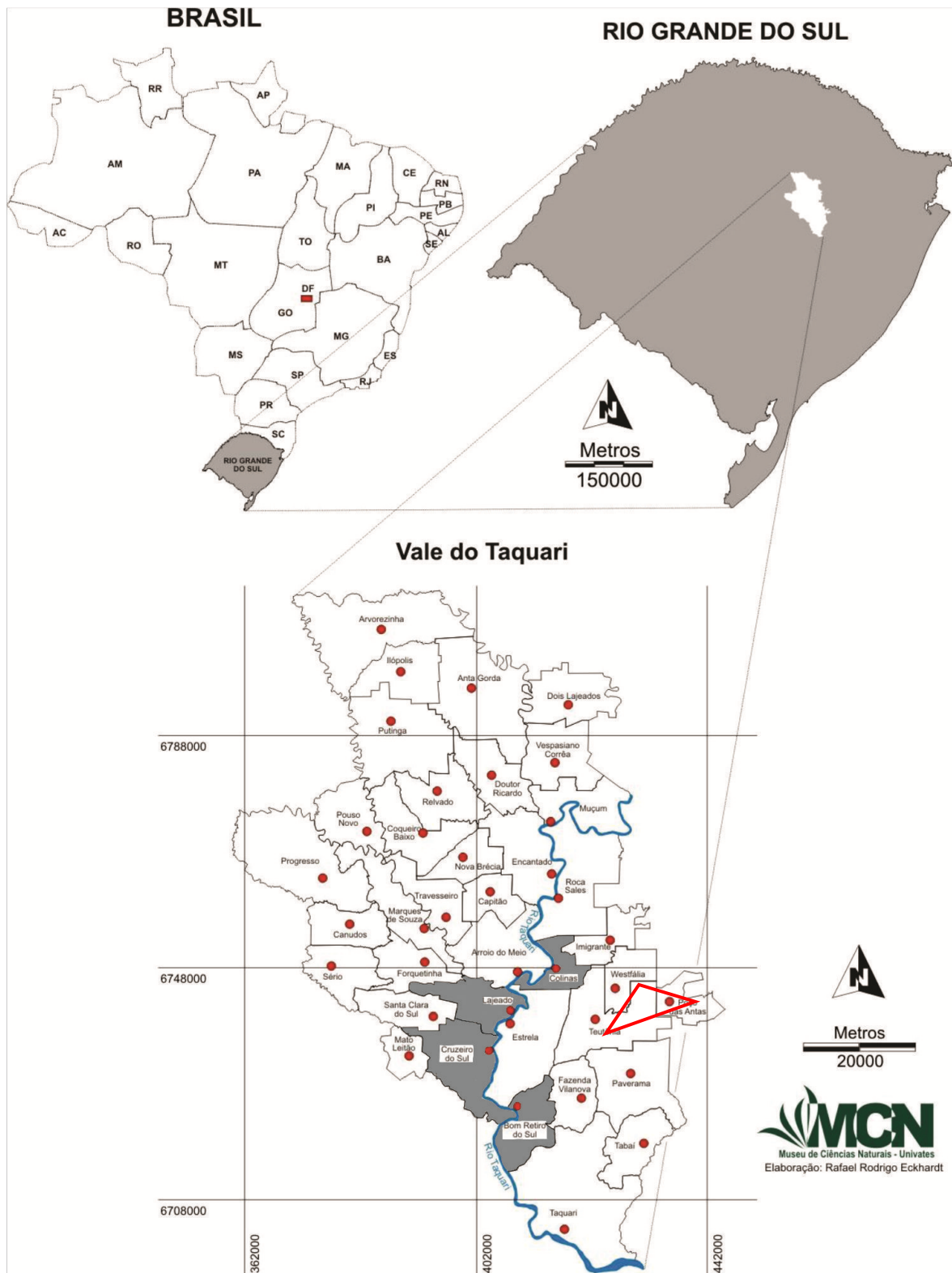
Para auxiliar na decisão de utilizar a biodigestão anaeróbia como método de tratamento de resíduos e geração de biogás, é necessário conhecer algumas características dos resíduos, como a sua biodegradabilidade e a capacidade de produzir biogás. Além de avaliar a produção específica de biogás e metano, sendo este um parâmetro decisivo e vital para o dimensionamento de biodigestores (STEINMETZ, et al., 2014).

Os experimentos práticos para avaliar o comportamento dos substratos orgânicos submetidos à biodigestão anaeróbia e o seu desempenho na geração de biogás foram realizados no Laboratório de Biorreatores da Univates. Em paralelo, neste mesmo local, foram realizadas as análises físico-químicas de pH, Sólidos Totais (ST), Voláteis (SV) e Fixos (SF), DQO, DBO₅, Carbono (C) e Nitrogênio (N) do efluente pré e pós biodigestão anaeróbia, com o objetivo de auxiliar na interpretação dos resultados da geração de biogás obtida, como parâmetros de controle de processo indicados para a digestão anaeróbia conforme literaturas.

4.1 Composição da mistura de substratos orgânicos avaliados

Os substratos orgânicos utilizados para os testes propostos caracterizaram-se como resíduos provenientes de atividades agroindustriais, relacionadas ao ramo alimentício, de uma Cooperativa do Vale do Taquari. A mesma possui suas unidades produtivas localizadas nos municípios de Teutônia, Poço das Antas e Westfália, no interior do Rio Grande do Sul, conforme destacado na Figura 6.

Figura 6 – Localização dos Municípios onde estão situadas as Unidades Produtivas geradoras das biomassas



Fonte: Museu de Ciências Naturais (MCN) – Univates.

A geração de efluentes potenciais para serem utilizados como biomassa, resultantes do processo produtivo da Cooperativa representa atualmente 4.739 ton/mês, sendo distribuídas

em 2.695 ton/mês de dejetos suínos provenientes de três Unidades Produtoras de Leitões (UPL) e 2.044 ton/mês correspondentes a subprodutos dos demais processos produtivos e lodos das estações de tratamento de efluentes de três Unidades Produtivas, conforme descritos quantitativamente e percentualmente na Tabela 3.

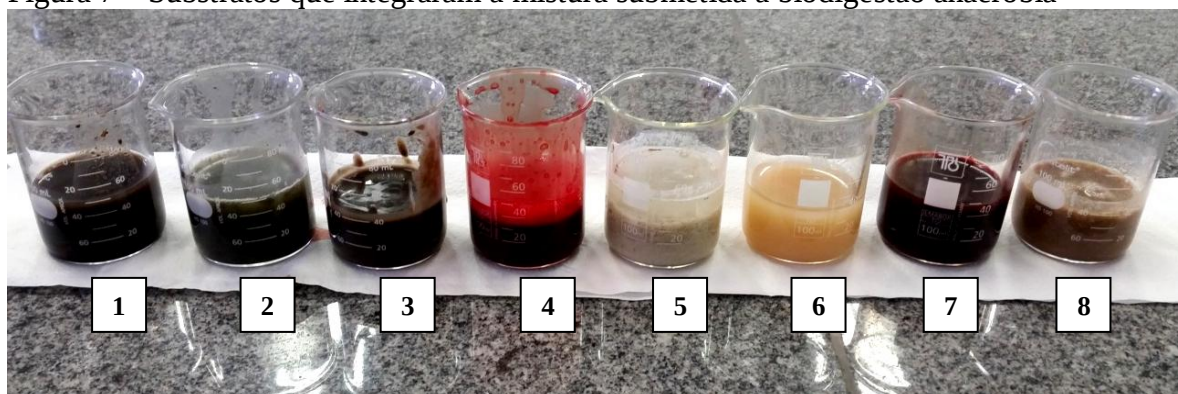
Tabela 3 – Quantificação de biomassas geradas pela Cooperativa

Resíduo/Origem	Quantidade Gerada (ton/mês)	%
Lodo Flotado (Frigorífico de Suínos)	653	31,95
Lodo Ativado desidratado (Frigorífico de Suínos)	18	0,88
Sangue (Frigorífico de Suínos)	172	8,42
Lodo Flotado (Laticínios)	183	8,95
Lodo Ativado (Laticínios)	183	8,95
Lodo Flotado e Ativado (Frigorífico de Aves)	625	30,58
Sangue (Frigorífico de Aves)	210	10,27
Total	2.044	100

Fonte: Cooperativa avaliada, base de dados de 2015.

Todas as biomassas citadas na tabela acima fizeram parte da mistura avaliada, além do inóculo (1) e do dejetos suíno oriundo de uma Unidade Produtora de Leitões (UPL) (2). A Figura 7 ilustra a composição da mistura a partir da identificação de cada substrato: lodo flotado do frigorífico de suínos (3), sangue suíno (4), lodo flotado (5) e lodo ativado (6) da ETE da Unidade de Laticínios, sangue de aves (7) e lodos flotado/ativado (8) do frigorífico de aves, e lodo ativado desidratado do frigorífico de suínos (não aparece na imagem).

Figura 7 – Substratos que integraram a mistura submetida à biodigestão anaeróbia



Fonte: Autora

Para a mistura destes resíduos, foram considerados inicialmente os percentuais que cada substrato representa, em termos de volume gerado, dentro da cooperativa, com exceção do dejetos suíno. A combinação dos substratos foi proporcional ao que cada um representa em

relação ao outro considerando o montante total de geração. A inclusão do dejetos suíno na mistura teve a sua participação percentual nos experimentos variável, de 0 à 100% respeitando intervalos de 10%, para fins de avaliação e comparativos com a eficiência na geração de biogás *versus* volume de reator necessário, em função da dificuldade da logística de transporte deste resíduo.

A Tabela 4 ilustra os percentuais de participação de cada substrato, bem como, os critérios adotados na definição dos mesmos.

Tabela 4 – Percentual de participação dos substratos na composição das misturas

Substrato	Percentual de Participação	Critério de Definição
1. Inóculo	30%	Metodologia do Laboratório
2. Demais Substratos	70%	Metodologia do Laboratório
2.1 Dejetos Suíno (UPL)	0% a 100%	Avaliar a influência (ganhos e perdas em termos de eficiência energética) deste substrato na mistura com os demais.
2.2 Mix de Substratos	0% a 100%	Variação em função da participação do dejetos suíno na mistura.
Composição do Mix*	Percentual	Critério
Lodo Flotado (Frig. de Suínos)	31,95%	Percentual fixo de acordo com a representatividade na geração total destes resíduos.
Lodo Ativado Desidr. (Frig. de Suínos)	0,88%	
Sangue (Frig. de Suínos)	8,42%	
Lodo Flotado (Laticínios)	8,95%	
Lodo Ativado (Laticínios)	8,95%	
Lodo Flotado e Ativado (Frig. de Aves)	30,58%	
Sangue (Frig. de Aves)	10,27%	

*O mix foi preparado em volume suficiente (10L) e de forma mais homogênea possível para ser utilizado em todas as triplicatas. Deste modo, o percentual descrito na tabela foi seguido e a variável nos reatores foi o volume em função da maior ou menor participação do dejetos suíno.

Salienta-se que, com exceção dos sangues e do lodo desidratado, os demais substratos envolvidos na mistura (lodos de ETE's e dejetos suíno) possuem lançamento em solo agrícola como método adotado para a sua disposição final. Dessa forma, a sua inserção em um

biodigestor anaeróbio antes deste procedimento acarretaria redução de impactos ambientais relacionados à carga orgânica lançada em solo.

A título de conhecimento, destaca-se que além dos seus resíduos, a Cooperativa conta com uma gama de associados que mantém atividades de criação de suínos para abate e que geram volumes superiores de dejetos aos gerenciados pela Cooperativa, totalizando aproximadamente 29.703 ton/mês (distribuídas nas fases creche, UPL e terminação) o que incide em um impacto ambiental ainda maior. Se houvesse uma gestão compartilhada destes resíduos este seria um dado de grande relevância, visto que ampliaria em mais de seis vezes o volume de dejetos suínos a ser tratado pela Cooperativa. Atualmente cabe aos produtores a responsabilidade do tratamento e disposição destes resíduos diretamente em suas propriedades.

4.2 Procedimentos de Coleta

A etapa de coleta dos substratos requer cuidados, uma vez que ao coletar-se uma amostra para experimentos, deve-se priorizar que esta seja a mais representativa possível do todo. Assim favorece que suas características sejam iguais, ou muito semelhantes ao sistema do qual foi retirada para evitar o risco da obtenção de resultados errôneos e que não expressem a realidade (KUNZ; PALHARES, 2004).

Conforme orientações de Kunz e Palhares (2004), a preservação e o transporte das amostras exigem procedimentos e cuidados para que se mantenham as suas características originais. Dentre estes, os autores destacam que os frascos para coleta devem estar limpos e sofrer tríplice lavagem com a própria amostra a ser coletada. Os frascos devem ser rotulados com informações claras de sua origem, local e data de coleta. No traslado do local de coleta ao laboratório, o frasco não deve ficar exposto ao sol. Quando este intervalo for superior a 4 horas, a amostra deve ser mantida sob refrigeração para se evitar a degradação desta. As condições em que se deu a coleta é um conhecimento importante para posteriormente se fazer a interpretação dos resultados.

Os substratos que integraram a mistura foram coletados diretamente nas Estações de Tratamento de Efluentes da Cooperativa com o auxílio de beakers plásticos, sendo as amostras armazenadas em recipientes plásticos limpos e acomodados dentro de uma caixa de

isopor durante o trajeto de transporte dos efluentes. Não houve necessidade de refrigeração, pois o tempo de coleta e deslocamento até o Laboratório foi inferior a 4 horas.

A coleta dos dejetos de suínos na Unidade Produtora de Leite (UPL), ficou sob responsabilidade dos operadores do local, em função de restrições sanitárias. Orientações foram repassadas para que houvesse uma especial atenção em função das características naturais de baixa homogeneidade deste dejetos, provocada pela alta velocidade de decantação dos sólidos presentes no mesmo. Com isso objetivou-se diminuir os erros com amostragem que se refletem na qualidade dos resultados e dos processos de mensuração no laboratório. A Figura 8 ilustra alguns procedimentos de coleta de substratos utilizados nos testes.

Figura 8 – Coleta de substratos

A: Lodo Flotado Laticínios; **B:** Lodo Ativado Laticínios; **C:** Lodo Flotado Suínos e **D:** Lodo Flot+Ativ. Aves



Fonte: Autora

4.3 Procedimentos de Experimentação

A pesquisa foi realizada em escala laboratorial e operada em batelada, que consiste na adição da matéria orgânica no reator de uma só vez. Neste processo o reator é fechado

hermeticamente, não permitindo a entrada de oxigênio, até que ocorra o processo de digestão anaeróbia. O experimento foi consolidado quando a produção de biogás decaiu, indicando que a matéria orgânica havia sido decomposta e que poderia ser feita a retirada da matéria restante, denominada biofertilizante (NETO et al., 2010). Como critério para a retirada dos reatores adotou-se o indicado pela VDI 4630, encerrando-se os experimentos quando o volume diário de biogás produzido nas triplicatas foi menor que 1% do total acumulado, por pelo menos três dias consecutivos.

Foram utilizados reatores de vidro com capacidade de 1000 mL, preenchidos com 600 mL de substratos, e mantidos em temperatura mesofílica (35 °C) em uma incubadora bacteriológica adaptada, conectada a um sistema automatizado de medição de biogás (Figuras 9-10). Os volumes de biogás gerados nos reatores foram monitorados diariamente através do *download* dos dados do sistema (Figura 11) e exportação dos mesmos para planilhas de controle, feitas em excel.

O teor de metano presente no biogás foi avaliado através de um sensor específico (*Advanced Gasmitter*), produzido pela empresa PRONOVA Analysentechnik GmbH & Co, que detecta o metano na mistura gasosa e apresenta os dados em percentual (Figura 12). As leituras por meio deste sensor foram realizadas três vezes por semana, preferencialmente nas segundas, quartas e sextas-feiras, sendo que para os dias intermediários foi considerada a média entre os valores lidos.

Figura 9 - Sistema automatizado de medição de biogás



Fonte: Laboratório de Biorreatores

Figura 10 – Reatores incubados



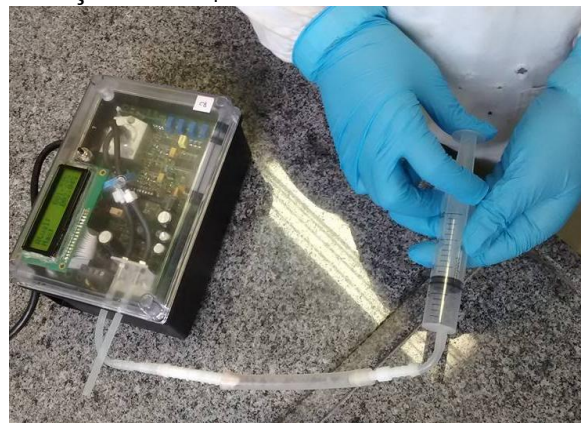
Fonte: Laboratório de Biorreatores

Figura 11 – Dados brutos disponibilizados pelo sistema

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Tube	Event	Day	Hour	Temp1(°C)	Pres1(hPa)	Vol1(ml)	Temp2(°C)	Pres2(hPa)	Vol2(ml)
2	1	1	11/ago	15:42:18	21,6	1021,66	40,8	22,5	1027,1	40,70782
3	1	2	11/ago	17:40:58	21,6	1021,66	40,8	22,0625	1027,6	40,62781
4	1	3	11/ago	19:43:34	21,6	1021,66	40,8	22,125	1028,1	40,61665
5	1	4	11/ago	21:36:03	21,6	1021,66	40,8	21,75	1029,3	40,51777
6	1	5	11/ago	23:18:25	21,6	1021,66	40,8	22,25	1030,5	40,53921
7	1	6	12/ago	00:58:58	21,6	1021,66	40,8	22,0625	1031	40,49383
8	1	7	12/ago	02:39:32	21,6	1021,66	40,8	21,875	1029,8	40,51526
9	1	8	12/ago	04:23:30	21,6	1021,66	40,8	21,75	1029,5	40,5099
10	1	9	12/ago	06:07:54	21,6	1021,66	40,8	21,625	1030,8	40,44166
11	1	10	12/ago	07:56:20	21,6	1021,66	40,8	21,625	1032	40,39464
12	1	11	12/ago	09:46:04	21,6	1021,66	40,8	19,1875	1033	40,02183
13	1	12	12/ago	11:34:40	21,6	1021,66	40,8	18,4375	1033,2	39,91143
14	1	13	12/ago	13:23:48	21,6	1021,66	40,8	19,375	1032,2	40,07854
15	1	14	12/ago	15:15:21	21,6	1021,66	40,8	18,125	1031,5	39,93436
16	1	15	12/ago	17:08:47	21,6	1021,66	40,8	17,9375	1032,2	39,88159
17	1	16	12/ago	19:35:36	21,6	1021,66	40,8	19,375	1034,4	39,9933
18	1	17	12/ago	21:29:43	21,6	1021,66	40,8	19,5625	1036,1	39,95327

Fonte: Laboratório de Biorreatores

Figura 12 - Sensor específico para a medição de CH₄



Fonte: Laboratório de Biorreatores

4.3.1 Preparo do Inóculo

Uma alternativa para aumentar o desempenho do processo é a utilização de um inóculo, que tem a função de acelerar o início da produção do biogás. É desejável que este seja um lodo anaeróbico composto pelo mesmo tipo do material teste, porém digerido anteriormente ao processo, contendo microorganismos típicos da digestão anaeróbia capazes de fermentarem o novo material em um menor tempo de detenção.

O inóculo utilizado, visando auxiliar na inicialização dos experimentos, foi preparado três semanas antes do início dos testes. Foi utilizado um lodo anaeróbico já digerido oriundo de experimentações em biodigestão anaeróbia do Laboratório de Biorreatores, alimentado com uma parcela das amostras testadas (ambientação) e novamente submetido às condições de digestão anaeróbia (Figura 13A). O teor de metano presente no biogás produzido pelo inóculo foi monitorado, em função da importância que este fosse superior a 50% até o momento do início dos testes. Este percentual foi ultrapassado chegando a um índice 82,05% de metano em sua composição no dia anterior à incubação das amostras, conforme ilustrado na Figura 13B.

Figura 13 – Preparo do inóculo

A: Alimentação do inóculo com parcela dos substratos; **B:** Percentual de metano obtido



Fonte: Autora

4.3.2 Composição das Triplicatas Teste

Considerando que os reatores foram preenchidos com 600 mL de substratos, 30% deste volume (180 mL) corresponderam ao inóculo e 70% (420 mL) corresponderam à mistura de substratos e dejetos suínos. Em relação aos 420 mL, a variação do percentual entre dejetos suínos e mix de substratos se deu da seguinte forma:

Triplicata 1: 0% de Dejetos Suínos e 100% da Mistura de lodos e sangue (420 mL)

Triplicata 2: 10% de Dejetos Suínos (42 mL) e 90% da Mistura de lodos e sangue (378 mL)

Triplicata 3: 20% de Dejetos Suínos (84 mL) e 80% da Mistura de lodos e sangue (336 mL)

Triplicata 4: 30% de Dejetos Suínos (126 mL) e 70% da Mistura de lodos e sangue (294 mL)

Triplicata 5: 40% de Dejetos Suínos (168 mL) e 60% da Mistura de lodos e sangue (252 mL)

Triplicata 6: 50% de Dejetos Suínos (210 mL) e 50% da Mistura de lodos e sangue (210 mL)

Triplicata 7: 60% de Dejeito Suíno (252 mL) e 40% da Mistura de lodos e sangue (168 mL)

Triplicata 8: 70% de Dejeito Suíno (294 mL) e 30% da Mistura de lodos e sangue (126 mL)

Triplicata 9: 80% de Dejeito Suíno (336 mL) e 20% da Mistura de lodos e sangue (84 mL)

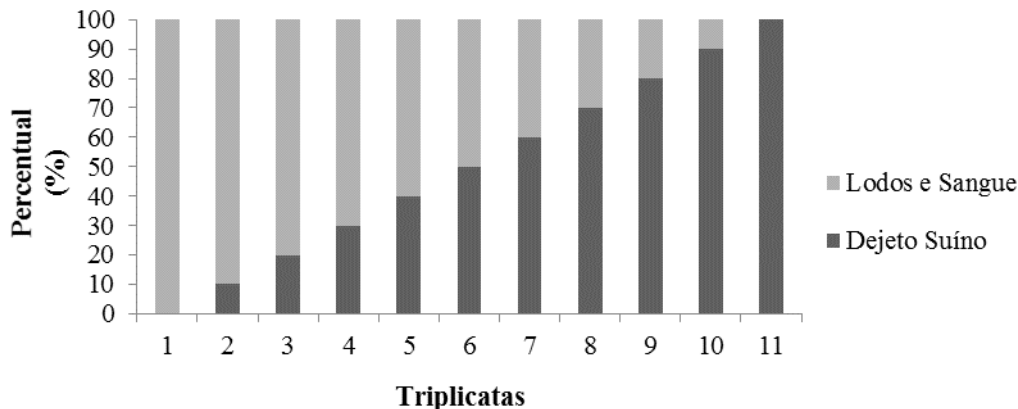
Triplicata 10: 90% de Dejeito Suíno (378 mL) e 10% da Mistura de lodos e sangue (42 mL)

Triplicata 11: 100% de Dejeito Suíno (420 mL) e 0% da Mistura de lodos e sangue

Além destas triplicatas, mantiveram-se três reatores contendo 30% de inóculo (180 mL) para fins de monitoramento da influência do inóculo nas misturas.

O Gráfico 1 ilustra a variação inversamente proporcional entre o dejeito suíno e a mistura de lodos e sangue na composição das triplicatas teste. Salienta-se que esta variação se refere aos 420 mL correspondentes a 70% do material inoculado, os 30% restantes correspondentes a 180 mL foram acrescidos de inóculo, lodo anaeróbico preparado no Laboratório já digerido e que, portanto, possuía os microorganismos de interesse para auxiliar na inicialização do experimento.

Gráfico 1 – Variação percentual do dejeito suíno, lodos e sangue nas triplicatas avaliadas



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 14 estão ilustradas algumas etapas da preparação dos reatores submetidos à experimentação, conforme metodologia especificada. Nas imagens 14A e 14B podem-se visualizar os três componentes das triplicatas: inóculo, dejeito suíno e o mix de lodos e sangue. A imagem 14C ilustra o preenchimento de todos os reatores com 180 mL de inóculo e a imagem 14D ilustra o preenchimento dos reatores com o mix, sendo possível identificar a variação nos volumes utilizados que ao final, foram igualados a 600 mL com a inserção do dejeito suíno.

Figura 14 – Etapas da preparação do experimento

A: Preparo dos componentes da mistura; **B:** Inóculo, Dejetos Suíno e Mix; **C:** Preenchimento dos reatores com inóculo e **D:** Reatores preenchidos com as parcelas de inóculo e mix determinadas.



Fonte: Autora

4.4 Análises Físico-químicas

As análises físico-químicas realizadas buscaram caracterizar as misturas de substratos inoculadas de acordo com os principais parâmetros sugeridos para o monitoramento de processos de digestão anaeróbia, dentre eles: pH, Sólidos Totais, Voláteis e Fixos, DQO, DBO₅, Carbono, Nitrogênio e Amônia. Estas análises foram feitas para todas as triplicatas do experimento, em dois momentos: pré e pós-digestão, com exceção da amônia que foi feita nas amostras pré-digestão.

4.4.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para a determinação do pH das amostras avaliadas, foi utilizado o pHmetro, marca DIGIMED, modelo DM-2P. Este pHmetro tem capacidade de medir o potencial de hidrogênio, em uma escala que varia de 0 (acidez máxima) a 14 (basicidade máxima), identificando se a amostra é ácida, básica ou neutra, também mede a voltagem e temperatura (DIGIMED, 2009).

As amostras foram colocadas em copos becker de 250 mL, sendo inserido o eletrodo do pHmetro nas mesmas, conforme ilustrado na Figura 15. O valor de pH foi informado no visor do equipamento após o contato com a amostra.

Figura 15 – Determinação de pH com uso de pHmetro



Fonte: Autora

4.4.2 Sólidos Totais, Voláteis e Fixos

A matéria sólida é a característica física de maior interesse no dimensionamento e controle de operações de unidades de tratamento de efluentes. Para a determinação dos sólidos totais, as amostras foram postas em cápsulas de porcelana previamente calcinadas e pesadas. O valor da massa da cápsula mais a amostra foi anotado e na sequência o material foi levado à estufa de secagem, marca SP LABOR, modelo SP-400 (Figura 16). Nesta estufa é utilizada a técnica do calor seco, para eliminar o teor de umidade da amostra. As cápsulas foram mantidas na estufa sob uma temperatura de 104 °C durante aproximadamente 24 horas. Após esse período, as cápsulas foram acondicionadas em um dessecador de vidro hermeticamente fechado (Figura 17) até atingirem a temperatura ambiente e na sequência foram pesadas, obtendo-se assim, o valor do material seco (AOAC, 1995). Por meio da equação 1 foi determinado o percentual de sólidos presentes na amostra.

$$\text{Sólidos Totais (\%)} = \frac{(A - B) \times 100}{C - B} \quad (1)$$

Onde:

A: Peso pós-estufa

B: Peso da cápsula

C: Peso da cápsula + amostra

Figura 16 - Estufa utilizada na determinação de sólidos totais



Fonte: Laboratório de Biorreatores

Figura 17 - Dessecador utilizado para acondicionar as cápsulas de porcelana



Fonte: Laboratório de Biorreatores

O valor dos sólidos voláteis e fixos foi determinado a partir do material seco obtido na análise dos sólidos totais. O material seco foi encaminhado para um forno do tipo mufla, marca SP LABOR modelo SP-1200, sob a temperatura de 550°C por aproximadamente 4 horas. Este equipamento é utilizado no processo de calcinação que consiste em volatilizar as substâncias de determinada amostra (Figura 18). Posteriormente a este procedimento as amostras foram esfriadas em dessecador e pesadas. As equações 2 e 3 demonstram os cálculos para determinação dos percentuais de sólidos voláteis e fixos.

$$\text{Sólidos Voláteis (\%)} = \frac{(A - D) \times 100}{A - B} \quad (2)$$

Onde:

A: Peso pós-estufa

B: Peso da cápsula

D: Peso pós-mufla

$$\text{Sólidos Fixos (\%)} = \frac{(D - B) \times 100}{A - B} \quad (3)$$

Onde:

A: Peso pós-estufa

B: Peso da cápsula

D: Peso pós-mufla

Figura 18 - Forno do tipo mufla utilizado na análise de sólidos voláteis



Fonte: Laboratório de Biorreatores

4.4.3 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise de DQO é um parâmetro utilizado como indicador da concentração de matéria orgânica presente em águas naturais ou residuárias, através da estimativa da quantidade de oxigênio necessária para a degradação química das amostras avaliadas, sendo muito utilizada no monitoramento de estações de tratamento para a avaliação da contaminação dos efluentes industriais (BADO; PERCIO; LINDINO, 2013).

A análise foi feita de acordo com o Método Titulométrico de Refluxo Fechado 5220C do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), que envolveu a digestão das amostras à temperatura de 150 °C em bloco digestor (Figura 19), por duas horas, em sistema fechado, com solução padrão de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em um meio fortemente ácido (H_2SO_4/Ag_2SO_4) e posterior detecção por titulometria com sulfato

ferroso amoniacal (FAS). A equação 4 descreve o cálculo utilizado para a determinação da DQO.

$$DQO \text{ (mg/L)} = \frac{(BD - A) \times M_{fas} \times 8000}{VA} \quad (4)$$

Onde:

BD: Volume de FAS utilizado na titulação do Branco Digerido (mL)

A: Volume de FAS utilizado na titulação da Amostra (mL)

M_{fas}: Molaridade do FAS

VA: Volume de amostra digerida (mL)

Figura 19 – Bloco Digestor utilizado na determinação da DQO



Fonte: Autora

4.4.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Segundo a Agência Nacional das Águas (2015), a DBO representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente em determinado efluente através da decomposição microbiana aeróbia. A DBO₅ é a quantidade de oxigênio consumido durante 5 dias em uma temperatura de 20°C.

Para a determinação da DBO₅, foi utilizado o aparelho Oxitop, marca WTW modelo Oxitop IS6. Este equipamento baseia-se na medição de pressão em um sistema fechado, que informa a quantidade de oxigênio consumido pelos microorganismos na degradação da

matéria orgânica, em uma faixa específica para a leitura da DBO_5 que vai de 0 a 4000 mg/L (WTW, 2008).

O procedimento de análise consistiu em adicionar as amostras previamente diluídas (em função da alta carga orgânica presente nas mesmas) em um frasco volumétrico de 22,5 mL, sendo este o volume indicado para análise de efluentes que contenham altas taxas de DBO_5 (0 a 4000 mg/L). Conforme ilustrado na Figura 20-A, o volume medido foi transferido para a garrafa de oxitop e na sequência adicionou-se uma gota de inibidor de nitrificação para inibir a ocorrência de processos químicos na amostra (FUNK; WOCHNIK, 2011). Posteriormente colocou-se, no suporte de borracha acoplado ao frasco, duas pastilhas de hidróxido de sódio (NaOH) que reagem com o dióxido de carbono (CO_2) gerado na decomposição da matéria orgânica, impedindo que a pressão do mesmo seja identificada no resultado da DBO_5 (SANTOS; SALES; DUARTE, 2003).

As garrafas foram armazenadas em uma incubadora a 20°C (Figura 20-B) e após cinco dias verificou-se o valor de DBO_5 , mostrado no visor. Este valor é multiplicado por 100 e pelo número de diluições feitas, conforme indicações do manual, para então obter-se o valor final deste parâmetro, que é dado em mg/L.

Figura 20 – Análise de DBO_5 através de oxitop

A: preparo da análise; B: garrafas de oxitop armazenadas em incubadora (20°C)



Fonte: Autora

4.4.5 Carbono Orgânico Total (COT)

A relação entre a quantidade de carbono e nitrogênio do substrato submetido à biodigestão anaeróbia é fundamental para que haja a formação de ácidos orgânicos que serão transformados pelas bactérias metanogênicas em biogás (SGORLON et al., 2011), em função disso que as análises de COT e NTK foram realizadas, a fim de verificar se as relações observadas estavam próximas das ideais.

Para a determinação do COT das amostras, foi utilizado o Método de Oxidação via úmida 5310, baseado na metodologia descrita pelo *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (APHA, 2000).

O procedimento de análise para a determinação do carbono orgânico baseia-se nas reações de oxi-redução que ocorrem em via úmida, com a adição de dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) como agente oxidante, em meio fortemente ácido, proporcionado pelo ácido sulfúrico adicionado, onde ocorre a oxidação do carbono à CO_2 . O dicromato utilizado deve ser em excesso, sendo este quantificado por titulação com sulfato ferroso amoniacal, que age como agente redutor do dicromato não envolvido na reação de oxidação (BENACI, 2010).

As amostras previamente secas em estufa a 105°C foram maceradas e pesadas em balança analítica (de 0,5 g a 2 g $\pm$ 0,1 g) sendo transferidas para erlenmeyers de 250 mL. Adicionou-se 50 mL da solução de dicromato de potássio 0,20 mol/L e na sequência acrescentou-se vagarosamente 50 mL de ácido sulfúrico concentrado. Movimentou-se suavemente o conteúdo do erlenmeyer e após a adição do ácido foi colocado um vidro de relógio e deixado em repouso por 10 minutos. As amostras foram então levadas para uma chapa aquecedora, previamente aquecida, da marca QUIMIS modelo Q-313AM, mostrada na Figura 21, por 30 minutos, à temperatura de 140°C .

Figura 21 – Amostras em processo de digestão em chapa aquecedora



Fonte: Laboratório de Biorreatores

Em seguida os erlenmeyers foram retirados da chapa e deixados em resfriamento à temperatura ambiente. Após o resfriamento, as amostras foram transferidas para balão volumétrico de 250 mL, completando o volume com água deionizada, deixando resfriar antes de cada adição de água. O balão é homogeneizado e deixado em repouso.

Uma alíquota de 50 mL da amostra e das provas em branco foi novamente transferida para erlenmeyer de 250 mL, acrescentando-se volume de 50 mL de água e 10 mL de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4). Com uma solução de sulfato ferroso amoniacal (FAS), de concentração aproximada de 0,5 mol/L foi titulado o dicromato remanescente, adicionando-se 0,5 a 1 mL da solução de ferroína como indicador, até a viragem para a coloração marrom. A equação 5 descreve o cálculo utilizado para a determinação do percentual de COT na amostra.

$$\text{COT (\%)} = \frac{(VB - VA) \times 9 \times C}{G} \quad (5)$$

Onde:

VB: volume de FAS utilizado na titulação do Branco (mL)

VA: volume de FAS utilizado na titulação da Amostra (mL)

C: Valor de padronização do FAS dado por $C = 2/VP$

G: massa inicial da amostra (g)

Para conversão do valor percentual para mg/L utiliza-se uma relação com o percentual de sólidos totais presentes na amostra.

4.4.6 Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

O termo “Nitrogênio Total” refere-se à combinação de íons de amônio e do nitrogênio orgânico. O método Kjeldahl de determinação de nitrogênio foi desenvolvido em 1883 e tornou-se referência. As análises de Nitrogênio foram feitas pelo Método 4500 N C Semi-Micro-Kjeldahl, publicado no *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (APHA, 2012). O método é baseado na decomposição da matéria orgânica através da digestão da amostra a 385°C com ácido sulfúrico concentrado, na presença de sulfato de cobre como catalisador que acelera a oxidação da matéria orgânica. O nitrogênio presente na solução ácida resultante é determinado por destilação com arraste de vapor, seguida de titulação com ácido diluído (Nogueira e Souza, 2005).

O procedimento de análise consistiu em adicionar 25 mL de amostra previamente diluída, em um tubo de proteína acrescentando-se 50 mL do reagente de digestão, composto por sulfato de potássio, sulfato de cobre, ácido sulfúrico concentrado. Na sequência, encaminharam-se as amostras para um bloco digestor à temperatura de 150 °C até que o volume reduzisse aproximadamente 30 mL, quando se elevou a temperatura do bloco para 385 °C e manteve-se a digestão por aproximadamente mais uma hora, até que as amostras ficassem em um tom de cor esverdeado.

Depois de frias, as amostras foram destiladas, adicionando-se 50 mL de NaOH 40% com tiosulfato de sódio, no destilador. Um erlenmeyer com 50 mL de ácido bórico 2% e quatro gotas de indicador misto foi acoplado para coletar a amostra destilada. A cor arroxeada do líquido no erlenmeyer começa a esverdear indicando a presença de nitrogênio. Titulou-se as amostras com ácido sulfúrico 0,02N, até que retornem para o tom de cor anterior. A equação 6 descreve o cálculo utilizado para a determinação do NTK na amostra.

$$NTK \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \times 280 \times F}{Va} \quad (6)$$

Onde:

A: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação da Amostra (mL)

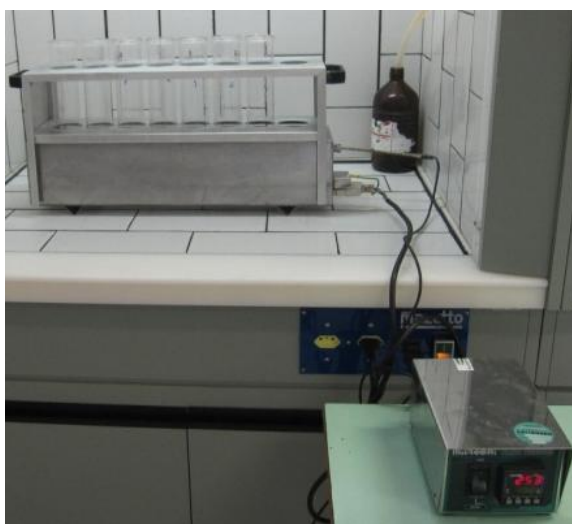
B: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação do Branco (mL)

F: fator de correção da normalidade do ácido

Va: volume de amostra utilizado na análise

Os equipamentos utilizados foram o bloco digestor, marca Marconi, modelo MA-85 (Figura 22) e o destilador de nitrogênio marca Tecnal modelo TE-0363 (Figura 23).

Figura 22 – Bloco Digestor utilizado na digestão das amostras



Fonte: Laboratório de Biorreatores

Figura 23 – Destilador utilizado na destilação das amostras



Fonte: Laboratório de Biorreatores

O bloco digestor é aplicável em digestões de amostras sob uma alta temperatura em meios ácidos e na presença de catalisadores e o destilador de nitrogênio é utilizado na destilação de nitrogênio amoniacal, bases voláteis totais e análise de nitrogênio/proteína.

4.4.7 Amônia

Esta análise foi realizada com a intenção de identificar o teor de amônia presente nas amostras pré-digestão anaeróbia, visto que esta se caracteriza como uma substância tóxica aos microorganismos envolvidos na digestão anaeróbia. Para tanto se utilizou o método titulométrico $4500\text{NH}_3 \text{ C}$, publicado no *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (APHA, 2012).

O procedimento consistiu na utilização de 100 mL de amostra previamente diluída, adicionando-se 25mL de tampão borato e ajustando-se o pH para 9,5 com o auxílio de NaOH 0,1N/6,0N e H₂SO₄ 0,02N. Na sequência, os tubos de digestão foram acoplados no destilador e a amostra destilada, coletando-se 100 mL de destilado em um erlenmeyer contendo 50 mL de solução indicadora de ácido bórico como solução absorvente. Titulou-se a amônia do destilado com H₂SO₄ 0,02N padronizado até o indicador adquirir uma empalidecida coloração de alface. A determinação da concentração de amônia presente nas amostras foi feita pela equação 7.

$$NH_3 - N \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \times 280 \times F}{V_a} \quad (7)$$

Onde:

A: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação da Amostra (mL)

B: volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação do Branco (mL)

F: fator de correção da normalidade do ácido

V_a: volume de amostra utilizado na análise

Salienta-se que esta análise foi realizada somente com as amostras pré-digestão anaeróbia visando justificar possíveis inibições nas produções de biogás e metano em função da toxicidade da amônia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio das experimentações laboratoriais realizadas, além de simulações feitas por meio da utilização dos valores encontrados, com a finalidade de ampliar o escopo deste trabalho. Ressalta-se que os valores ilustrados referem-se aos valores médios obtidos em cada triplicata do experimento avaliado.

A fim de obter um parâmetro estatístico para algumas explicações feitas, utilizou-se o coeficiente de correlação de *Pearson* que expressa a medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas, associando entre si as distintas variáveis analisadas neste trabalho.

5.1 Ensaios de Biogás

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de biogás estão apresentados na Tabela 5. Conforme o critério de encerramento adotado, baseado na VDI 4630, os reatores foram retirados quando o volume diário de biogás produzido nas triplicatas se apresentou menor que 1% do volume total acumulado, por no mínimo três dias.

Tabela 5 – Resultados dos Ensaios de Biogás nas Triplicatas avaliadas

Amostra	Metano (mL)	Outros Gases (mL)	Biogás (mL) Média (DP)	CH ₄ (%)	Outros Gases (%)	TDH
Inóculo	0,00	92,01	92,01 ± 5,68	0,00	100,00	59
0% DS	11.880,32	5.514,94	17.395,26 ± 363,84	68,30	31,70	59
10% DS	13.123,01	5.642,21	18.765,23 ± 685,35	69,93	30,07	59
20% DS	11.931,05	4.856,81	16.787,86 ± 983,38	71,07	28,93	59
30% DS	10.852,30	4.919,69	15.772,00 ± 47,73	68,81	31,19	50
40% DS	8.391,01	4.131,54	12.522,55 ± 1.415,82	67,01	32,99	41
50% DS	8.183,13	4.192,38	12.375,51 ± 2.208,57	66,12	33,88	41
60% DS	7.459,30	3.889,88	11.349,18 ± 867,41	65,73	34,27	27
70% DS	5.883,62	3.130,00	9.013,62 ± 563,22	65,27	34,73	27
80% DS	4.273,84	2.454,49	6.728,33 ± 356,31	63,52	36,48	27
90% DS	3.343,06	2.101,82	5.444,88 ± 218,39	61,40	38,60	27
100% DS	1.953,01	1.420,96	3.373,97 ± 442,38	57,88	42,12	27

Fonte: Elaborado pela autora

Pode-se verificar que o TDH das triplicatas variou de 27 a 59 dias de experimentação, fato este relacionado ao tempo exigido pelas diferentes misturas para a sua degradação. Nota-se que quanto maior o percentual de dejetos suíno (DS) presente na mistura menor foi o TDH.

O desvio padrão observado nas triplicatas dos ensaios de biogás também variou significativamente, porém os valores podem ser considerados aceitáveis visto que influenciam pouco na tendência final estabelecida pelos resultados. Os maiores valores de desvio padrão foram identificados nas amostras de 40 e 50% dejetos suíno, mesmo assim optou-se por trabalhar com os valores da triplicata, visto que as amostras não eram homogêneas e isso pode ter influenciado fortemente na variação do comportamento apresentado por cada reator. Neste sentido acredita-se que a média da triplicata indica um valor mais representativo do conjunto de reatores do que se fosse considerada uma duplicata descartando-se um dos reatores.

A correlação entre as variáveis avaliadas por *Pearson* e expressas na tabela 6 possibilitam inferências. Quanto menor a participação do dejetos suíno nas misturas, melhores foram os resultados de biogás e metano, expressos em volume. A relação entre os volumes de biogás e metano foi proporcional na maioria dos casos e o volume de biogás produzido pelas triplicatas teve uma relação de proporcionalidade com o TDH, visto que as que exigiram os maiores TDH foram também as que produziram os maiores volumes de biogás.

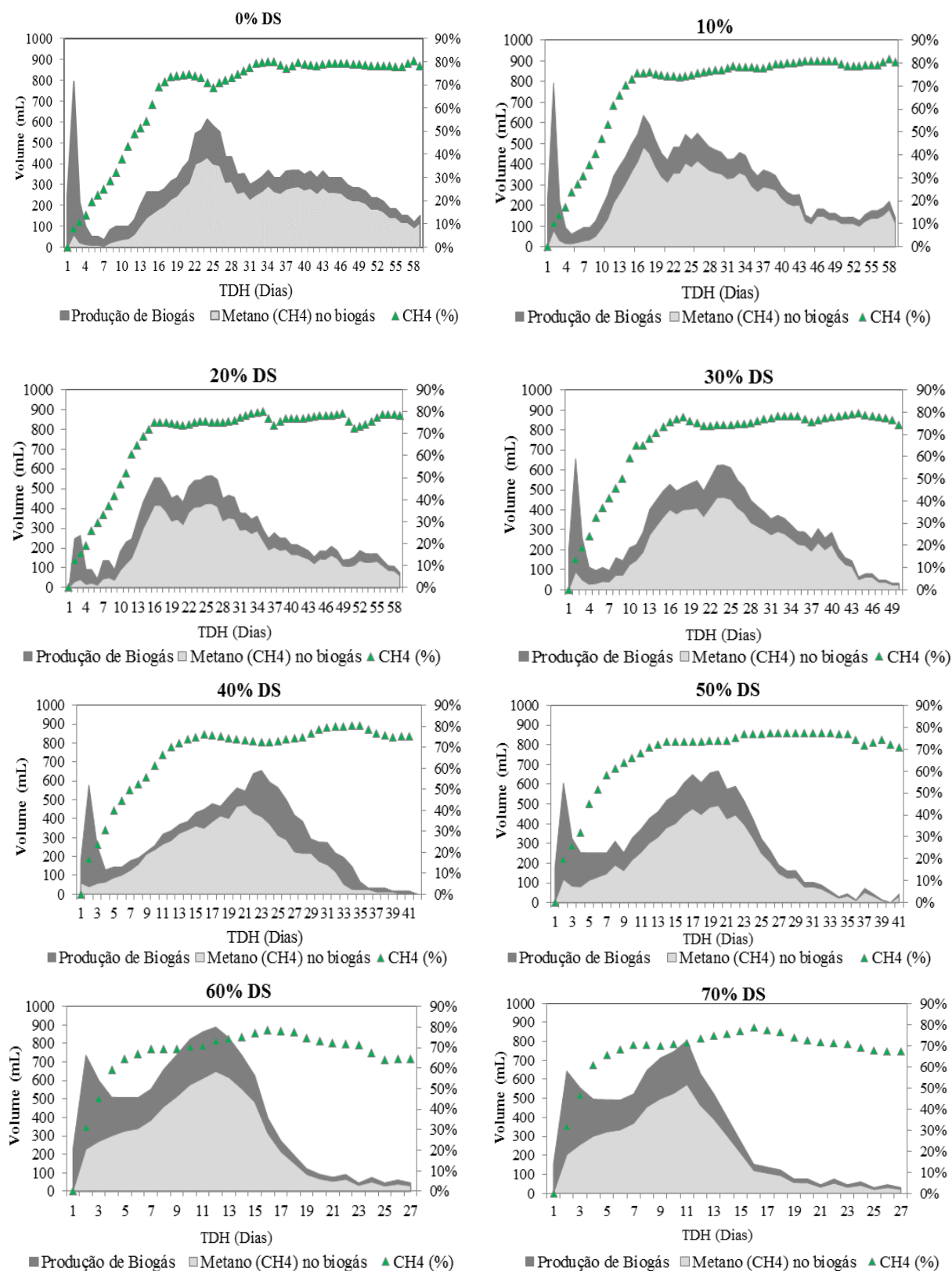
Tabela 6 – Correlação de *Pearson* para as variáveis envolvidas nos Ensaios de Biogás

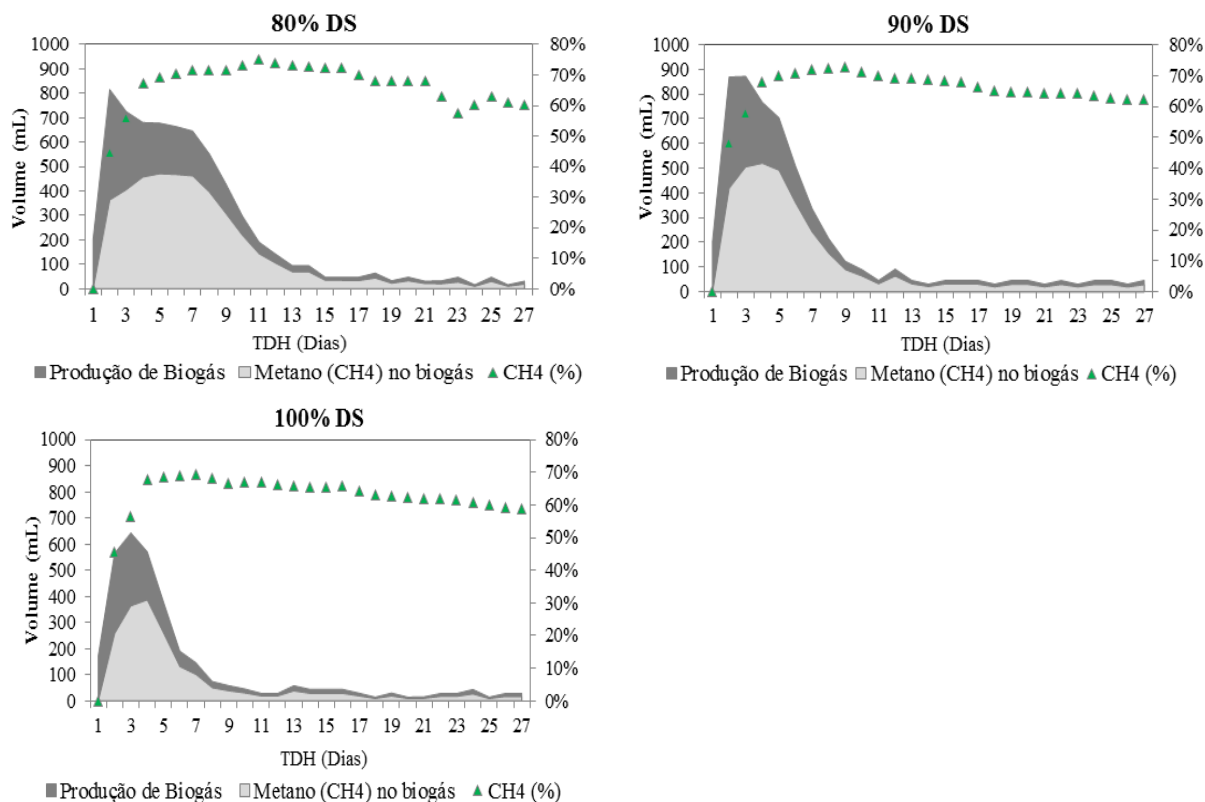
Matriz 1	Matriz 2	Resultado	Correlação
Percentual de DS	Volume de Biogás	-0,982	Muito Forte e Inversamente proporcional
Percentual de DS	Volume de Metano	-0,981	Muito Forte e Inversamente proporcional
Volume de Biogás	Volume de Metano	0,998	Muito Forte e Proporcional
Volume de Biogás	TDH	0,917	Muito Forte e Proporcional

Fonte: Elaborado pela autora

Na série intitulada de Gráfico 2, é possível visualizar o comportamento das amostras, ilustrado por meio dos valores médios obtidos nas triplicatas avaliadas em relação às produções diárias de biogás e metano.

Gráfico 2 – Série de gráficos ilustrando o comportamento diário das amostras em relação às produções de biogás e metano

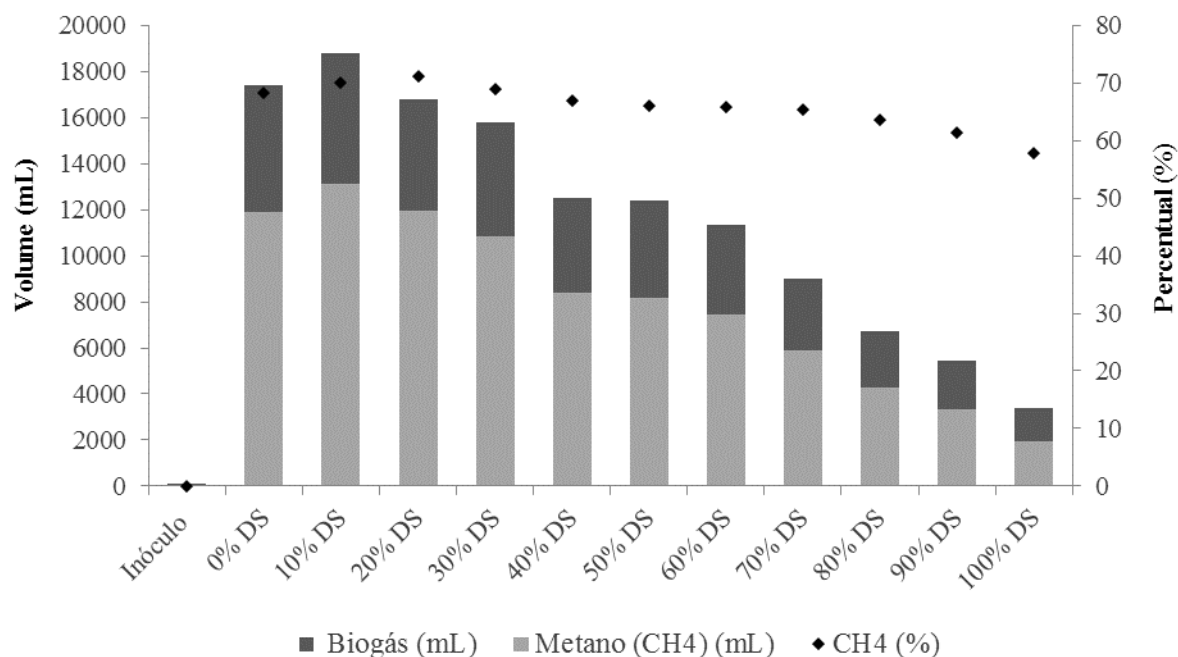




Fonte: Elaborado pela autora

Em relação às gerações de biogás e metano, nota-se que nas triplicatas com maior participação de DS, os maiores volumes foram produzidos logo nos primeiros dias de incubação e estas exigiram menores TDH para sua degradação, mas foram também as que obtiveram os menores volumes totais. Diferente do que aconteceu nas triplicatas com menor participação de DS, em que a concentração dos maiores volumes produzidos ocorreu a partir de um tempo maior de ambientação, exigindo maiores TDH. Com exceção da triplicata de inóculo, todas as demais triplicatas apresentaram o teor de metano no biogás superior a 50%. O Gráfico 3 apresenta o comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de biogás pelas triplicatas avaliadas.

Gráfico 3 – Comparativo da geração acumulada de biogás e metano nas triplicatas avaliadas



Fonte: Elaborado pela autora

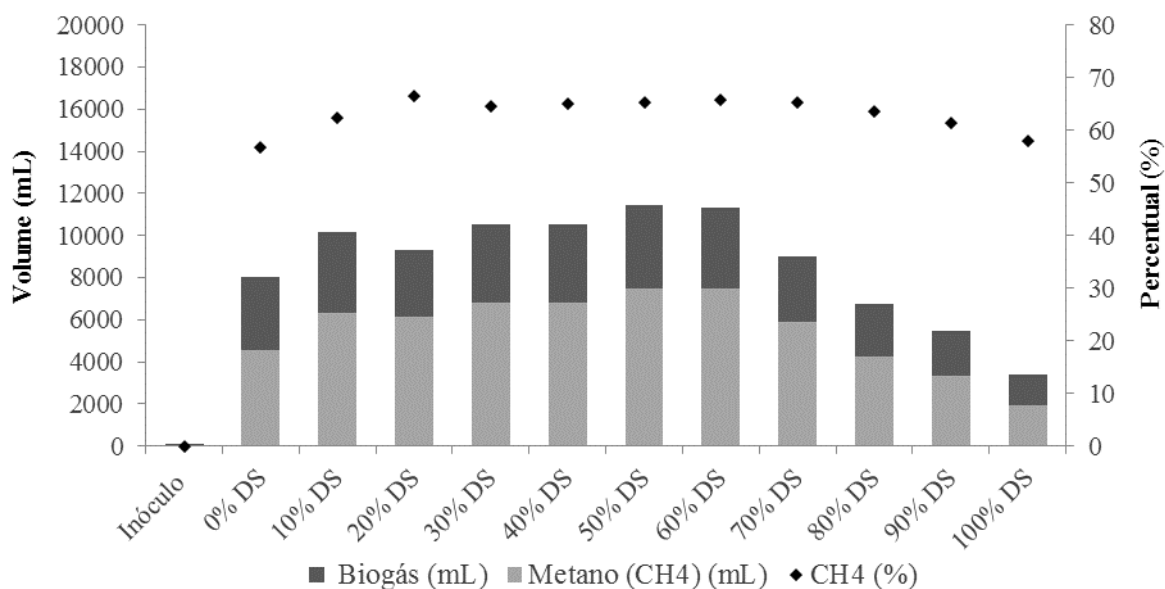
Visualmente, é possível traçar uma linha de tendência que indica que quanto maiores os percentuais de dejetos suínos na mistura menores os volumes de biogás e metano. Isso pode estar relacionado à diluição e aos compostos de fácil degradação que o dejetos suínos proporciona à mistura, visto que os maiores volumes de biogás e metano foram produzidos logo nos primeiros dias de experimentação nas triplicatas com teores de dejetos suínos superior a 50%, indicando que o substrato passível de degradação esteve mais acessível aos microorganismos nestas amostras. Nas triplicatas com teores de dejetos suínos abaixo de 50%, os maiores volumes foram gerados após 10 ou 15 dias de experimentação, indicando que a fase de hidrólise pode ter sido dificultada pela presença de compostos complexos, como a gordura, presente em maior volume nas misturas com menos dejetos suínos. Por este motivo também que pode ser explicado o fato da mistura que não recebeu a adição de dejetos suínos, contraditoriamente à tendência que se estabeleceu, não ter gerado o maior volume de biogás e metano, mesmo com os seus teores de ST e SV sendo superiores aos demais.

Sobre esta discussão, Mata-Alvarez et. al (2014) comentam que a codigestão dos dejetos originados com a produção animal e resíduos agroindustriais é uma técnica atual, que vem sendo explorada intensamente devido às características individuais destes resíduos e à melhoria que ocorre por meio da associação dos mesmos. Em relação à combinação de dejetos suínos com resíduos lipídicos, por exemplo, os autores atribuem as limitações dos

dejetos à sua baixa carga orgânica e a elevados teores de N amoniacal. Enquanto ressaltam como fatores limitantes, para os resíduos lipídicos, a elevada taxa orgânica, que, dependendo de sua biodegradabilidade, será capaz de gerar grandes quantidades de ácidos graxos em um curto período de degradação, além de baixos teores de N. Por isso, por meio do emprego da codigestão, algumas vantagens são estabelecidas otimizando o processo de biodigestão e favorecendo a geração de maiores volumes de biogás e metano.

Se o critério de encerramento dos experimentos tivesse sido definido de acordo com tempos usuais adotados em processos de biodigestão anaeróbia em escala real (20 ou 30 dias), a tendência dos resultados poderia ter sido diferente. Com o intuito de avaliar esta variação, o Gráfico 4 simula como seriam os resultados ao considerar o mesmo TDH para todas as triplicatas, adotando-se como referência o TDH de 27 dias obtido pelas triplicatas com 60%, 70%, 80%, 90% e 100% de dejetos suíno na mistura, visto que todas as outras triplicatas tiveram TDH's superiores a este e também considerando os volumes de biogás e metano produzidos pelas demais triplicadas dentro deste período.

Gráfico 4 - Comparativo da geração acumulada de biogás e metano nas triplicatas avaliadas considerando o mesmo TDH (27 dias)



Fonte: Elaborado pela autora

Esta avaliação, considerando o mesmo TDH para todas as triplicatas, induz a novas inferências, visto que a melhor eficiência na conversão de matéria orgânica em biogás e metano neste período de tempo pode ser observada nas triplicatas de 50% e 60% de dejetos suíno na mistura. Estas informações podem ser confirmadas a partir de um cálculo de

eficiência média relacionando os volumes de biogás e metano acumulados, pelo TDH, conforme apresentado nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Eficiência média diária da geração de biogás e metano considerando um TDH de 27 dias

Amostra	Metano (mL)	Biogás (mL)	TDH (Dias)	Metano (mL/dia)	Biogás (mL/dia)
0% DS	4.538,29	8.008,79	27	168,08	296,62
10% DS	6.333,51	10.152,56	27	234,57	376,02
20% DS	6.164,51	9.287,04	27	228,32	343,96
30% DS	6.788,26	10.512,20	27	251,42	389,34
40% DS	6.827,68	10.516,91	27	252,88	389,52
50% DS	7.460,00	11.428,53	27	276,30	423,28
60% DS	7.459,30	11.349,18	27	276,27	420,34
70% DS	5.883,62	9.013,62	27	217,91	333,84
80% DS	4.273,84	6.728,33	27	158,29	249,20
90% DS	3.343,06	5.444,88	27	123,82	201,66
100% DS	1.953,01	3.373,97	27	72,33	124,96

Fonte: Elaborado pela autora

Na Tabela 7 considerou-se o mesmo TDH para todas as misturas, avaliando-se a geração de biogás e metano que estas haviam alcançado aos 27 dias de incubação. Na Tabela 8 foi considerado o tempo de detenção e os volumes de biogás e metano que cada mistura alcançou ao final do experimento.

Tabela 8 – Eficiência média diária da geração de biogás e metano considerando o TDH real de cada triplicata avaliada

Amostra	Metano (mL)	Biogás (mL)	TDH (Dias)	Metano (mL/dia)	Biogás (mL/dia)
0% DS	11.880,32	17.395,26	59	201,36	294,83
10% DS	13.123,01	18.765,23	59	222,42	318,05
20% DS	11.931,05	16.787,86	59	202,22	284,54
30% DS	10.852,30	15.772,00	50	217,05	315,44
40% DS	8.391,01	12.522,55	41	204,66	305,43
50% DS	8.183,13	12.375,51	41	199,59	301,84
60% DS	7.459,30	11.349,18	27	276,27	420,34
70% DS	5.883,62	9.013,62	27	217,91	333,84
80% DS	4.273,84	6.728,33	27	158,29	249,20
90% DS	3.343,06	5.444,88	27	123,82	201,66
100% DS	1.953,01	3.373,97	27	72,33	124,96

Fonte: Elaborado pela autora

De qualquer modo, esta avaliação elucida que, considerando um TDH de 27 dias, a melhor eficiência diária de geração de biogás e metano foi obtida pela mistura contendo 50%

de dejetos suíno, porém, com este TDH, a biomassa desta mistura ainda estava produzindo volumes consideráveis de biogás e metano. Neste sentido, a melhor eficiência em termos de tempo de detenção e geração de biogás passou a ser da mistura com 60% de dejetos suíno.

5.2 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas a fim de avaliar se as características das biomassas testadas e as condições às quais foram submetidas estiveram de acordo com o indicado em literaturas, contribuindo desta forma para a análise e compreensão dos resultados obtidos nos ensaios de biogás. Todas as análises foram realizadas antes e após o período de biodigestão anaeróbia das misturas, com exceção da análise de amônia que foi realizada somente com as amostras pré-digestão anaeróbia. Os resultados apresentados referem-se aos valores médios obtidos em triplicatas ou duplicatas de cada análise para cada uma das 11 amostras avaliadas.

5.2.1 Análise de pH

O potencial hidrogeniônico (pH) foi medido, inicialmente, em todos os substratos que integraram o mix em separado e também nas misturas submetidas à biodigestão anaeróbia. A Tabela 9 apresenta o valor de pH de cada substrato. Salienta-se que não foi necessária a realização de ajustes/correção no pH das amostras submetidas aos testes.

Tabela 9 – Análise de pH dos substratos

Substrato	pH
Dejeto Suíno	7,41
Sangue Suíno	6,91
Lodo Desidratado	7,00
Lodo Flotado Suíno	5,88
Lodo Ativado Laticínios	7,69
Lodo Flotado Laticínios	6,36
Lodo Flotado/Ativado Aves	5,23
Sangue Aves	6,53
Mix Lodos e Sangue	5,96

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 10 ilustra os valores de pH nas misturas submetidas à biodigestão anaeróbia, na entrada e na saída dos experimentos.

Tabela 10 – Análise do pH nas misturas incubadas

Substrato	pH Entrada	pH Saída
Inóculo	8,28	7,91
0% DS	6,82	7,75
10% DS	6,92	7,87
20% DS	7,02	7,73
30% DS	7,10	7,81
40% DS	7,23	7,51
50% DS	7,29	7,58
60% DS	7,34	7,72
70% DS	7,46	7,68
80% DS	7,53	7,61
90% DS	7,65	7,56
100% DS	7,69	7,52

Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com Chernicharo (1997), os microorganismos metanogênicos apresentam crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora seja possível obter estabilidade na formação de metano numa faixa mais ampla, entre 6,0 e 8,0. Como pode ser observado na Tabela 10, o pH de todas as misturas encontrava-se no início dos experimentos dentro da faixa de pH considerada ideal, mantendo-se assim até o final do experimento. Isso indica que houve um equilíbrio entre a geração de ácidos graxos voláteis (AGV) e a assimilação destes pelos microorganismos para posterior conversão em metano. Este equilíbrio ocorre devido ao aumento de alcalinidade nos reatores com o consequente tamponamento do sistema, o que não permite o acúmulo de AGV e a queda do pH, mantendo estáveis as atividades microbianas (FERNANDES; OLIVEIRA, 2006). A alcalinidade presente no meio pode ter íntima relação com a presença de amônia oriunda do dejetos suíno. LANSING et al. (2010) consideraram benéfica a alcalinidade dos dejetos oriundos da produção animal utilizados com a finalidade proporcionar estabilidade aos processos de biodigestão anaeróbia, implicando em resistência à acidificação.

5.2.2 Análise de Sólidos

O teor de sólidos dos substratos é um fator de suma importância em ensaios de biogás. Quanto maior a concentração de sólidos voláteis na biomassa, maior a possibilidade de melhores rendimentos na produção de biogás, controlando-se adequadamente os outros fatores que interferem no processo de digestão anaeróbia (OLIVEIRA, 2005). Os sólidos voláteis representam a fração orgânica que pode ser convertida em biogás e, portanto, é

desejável que os seus teores sejam elevados. A determinação de SV objetiva identificar a quantidade de matéria biodegradável disponível nos substratos (LABIOGÁS, 2013). A Tabela 11 ilustra os teores de sólidos totais, voláteis e fixos verificados nas misturas submetidas à biodigestão anaeróbia.

Tabela 11 – Avaliação dos Sólidos Totais, Voláteis e Fixos no início e no fim dos experimentos

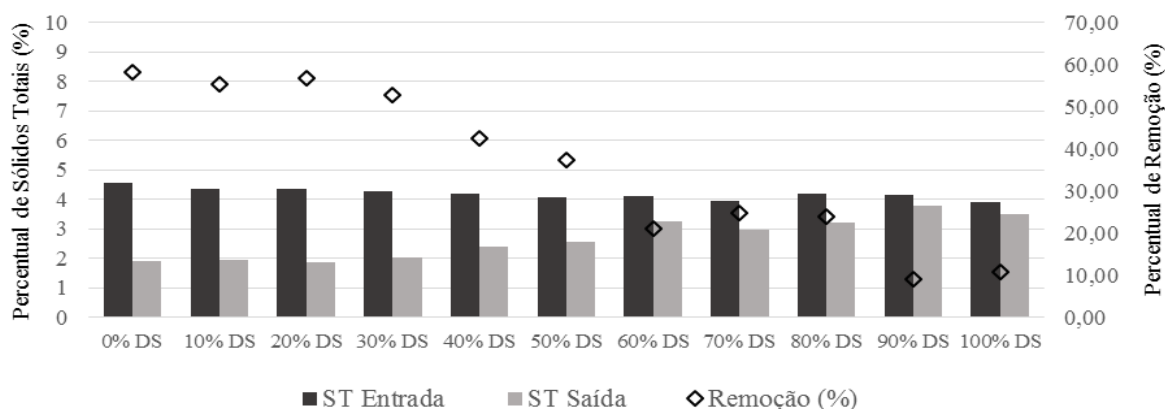
Amostra	ST		SV				SF			
	Entrada %	Saída %	Entrada % _{ST}	Saída %	Entrada % _{ST}	Saída %	Entrada % _{ST}	Saída %	Entrada % _{ST}	Saída %
Inóculo	3,55	1,57	72,65	2,58	66,29	1,04	27,35	0,97	33,71	0,53
0% DS	4,56	1,90	90,71	4,14	76,37	1,45	9,29	0,42	23,63	0,45
10% DS	4,38	1,96	88,44	3,87	71,17	1,39	11,56	0,51	28,83	0,56
20% DS	4,34	1,88	86,86	3,77	69,76	1,31	13,14	0,57	30,24	0,57
30% DS	4,28	2,03	83,85	3,59	69,33	1,40	16,15	0,69	30,67	0,62
40% DS	4,19	2,41	82,32	3,45	69,19	1,67	17,68	0,74	30,81	0,74
50% DS	4,07	2,55	79,69	3,24	66,58	1,70	20,31	0,83	33,42	0,85
60% DS	4,11	3,24	73,01	3,00	65,78	2,13	26,99	1,11	34,22	1,11
70% DS	3,95	2,98	75,90	3,00	65,99	2,05	24,10	0,95	34,01	1,14
80% DS	4,21	3,20	72,55	3,05	65,61	2,10	27,45	1,16	34,39	1,10
90% DS	4,17	3,79	69,78	2,91	60,66	2,30	30,22	1,26	39,34	1,49
100% DS	3,92	3,49	66,71	2,61	63,84	2,23	33,29	1,30	36,16	1,26

Fonte: Elaborado pela autora

%_{ST}: Percentual referente aos ST da amostra

Os Gráficos 5, 6 e 7 ilustram o comportamento dos sólidos totais, voláteis e fixos no comparativo entre o início e fim dos experimentos.

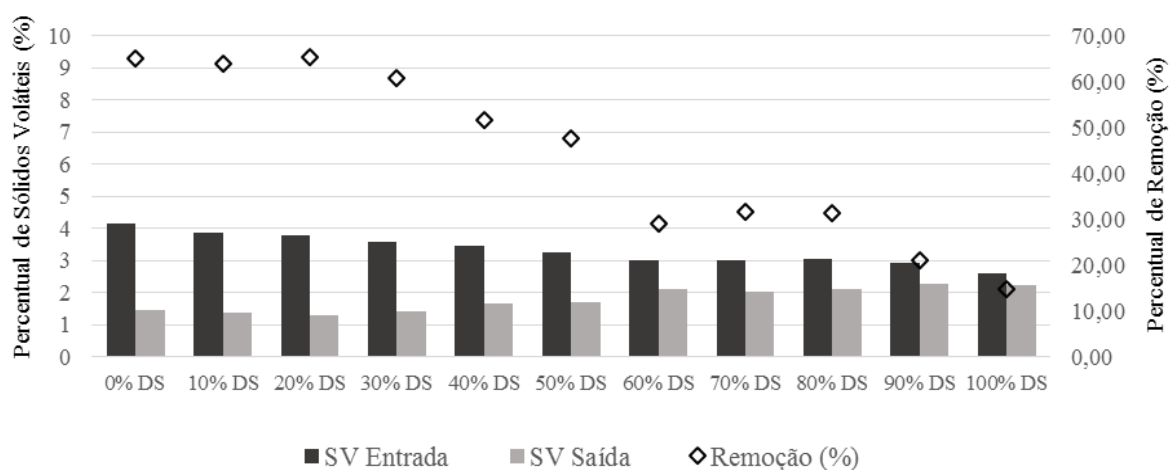
Gráfico 5 – Comparativo dos Sólidos Totais na entrada e saída do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

A remoção de sólidos totais em experimentos de biodigestão anaeróbia é, normalmente, uma consequência da conversão dos sólidos voláteis, visto que os sólidos fixos não se alteram por relacionarem-se com a parcela inorgânica/mineral do substrato. Nos Gráficos 5 e 6 é possível perceber que a remoção dos sólidos voláteis e totais, foi mais eficiente nas triplicatas com menores percentuais de dejetos suíno, possivelmente em função da maior participação dos sólidos voláteis nestas triplicatas. Os percentuais de remoção dos ST variaram de 9,23% a 58,33%, sendo estes valores correspondentes às misturas de 90% DS e 0% DS respectivamente. Para os SV as remoções oscilaram de 14,75% a 65,30%, sendo estes valores respectivos às misturas de 100% DS e 20% DS. As menores remoções de SV e ST foram observadas nas misturas com maior participação de DS, sendo que nestas havia também a maior presença de SF.

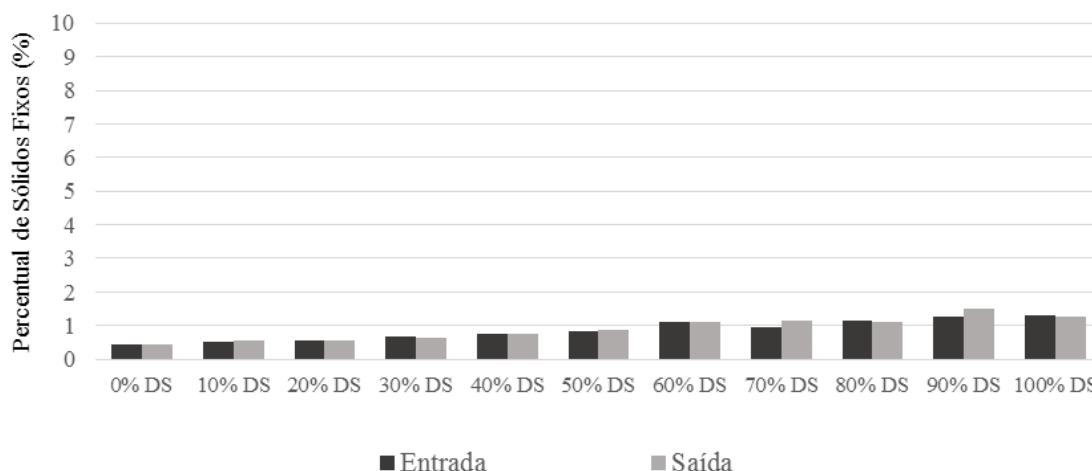
Gráfico 6 – Comparativo dos Sólidos Voláteis na entrada e saída do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

Enquanto a parcela de sólidos voláteis foi maior nas amostras com os menores percentuais de dejetos suíno, no gráfico 7 pode se observar que a parcela de sólidos fixos foi maior nas amostras que continham os maiores percentuais de dejetos suíno na mistura.

Gráfico 7 - Comparativo dos Sólidos Fixos na entrada e saída do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

O comportamento dos sólidos fixos se manteve praticamente estável na entrada e na saída do experimento, e dentro do esperado, visto que esta parcela de sólidos se relaciona com a matéria inorgânica presente nos substratos que, por meio de um tratamento biológico, tem poucas chances de ser alterada ou removida. Deste modo, acredita-se que as pequenas variações verificadas em algumas amostras estejam relacionadas à baixa homogeneização das mesmas, fator este que pode influenciar diretamente nos resultados desta análise.

Em uma análise que relaciona os volumes de biogás e metano gerados com a presença de SV nas misturas, observou-se a tendência de que quanto menor o volume de DS na mistura, maiores foram os teores de SV e, consequentemente, maior a produção de biogás e metano. No entanto, cabe ressaltar que esta análise não considera o TDH das misturas, sendo que estes apresentaram variação de 27 a 59 dias. Os resultados apresentados na tabela 12 expressam a relação entre os volumes de biogás e metano produzidos e a presença de sólidos voláteis nos substratos.

Tabela 12 - Eficiência da geração de biogás e metano por gSV presente nas misturas

Amostra	Metano (mL)	Biogás (mL)	gSV	Metano (mL/gSV)	Biogás (mL/gSV)
0% DS	11.880,32	17.395,26	24,84	478,27	700,29
10% DS	13.123,01	18.765,23	23,22	565,16	808,15
20% DS	11.931,05	16.787,86	22,62	527,46	742,17
30% DS	10.852,30	15.772,00	21,54	503,82	732,22
40% DS	8.391,01	12.522,55	20,70	405,36	604,95
50% DS	8.183,13	12.375,51	19,44	420,94	636,60
60% DS	7.459,30	11.349,18	18,00	414,41	630,51
70% DS	5.883,62	9.013,62	18,00	326,87	500,76
80% DS	4.273,84	6.728,33	18,30	233,54	367,67

90% DS	3.343,06	5.444,88	17,46	191,47	311,85
100% DS	1.953,01	3.373,97	15,66	124,71	215,45

Fonte: Elaborado pela autora

A tendência estabelecida indica que, quanto maior a quantidade de sólidos voláteis, maiores os volumes de biogás e metano produzidos. Correlacionando os volumes de metano com as gSV presentes nas amostras obteve-se um coeficiente de *Pearson* de 0,937 que indica uma forte correlação proporcional entre estas duas variáveis. Lucas Jr. (1994) afirma que os SV são os responsáveis diretos pela produção de biogás e, portanto, quanto maior a quantidade de sólidos voláteis na alimentação de um biodigestor, maior será a capacidade do mesmo em produzir biogás. Karim et al. (2005), em avaliações sobre biogás, também observaram uma tendência geral que indica que maiores proporções de SV incidem em maiores quantidades de metano. No entanto, a mistura 0% DS, que não recebeu a adição de dejetos suíno, mesmo contendo o maior teor de SV dentre as demais, não foi a que produziu a maior quantidade de biogás e metano por g/SV, visto que a melhor eficiência foi obtida na mistura de 10% DS. Wilkie (2003) comenta que o teor de sólidos voláteis pode dar uma estimativa sobre a quantidade de substrato que pode potencialmente ser transformada em metano. Porém é preciso considerar que os sólidos voláteis são constituídos por diferentes compostos orgânicos que têm diferentes velocidades de degradação.

Xavier e Lucas Jr. (2010) afirmam que os rendimentos de biogás a partir da digestão anaeróbia podem variar, principalmente em função da qualidade do resíduo adicionado ao biodigestor, do grau de diluição e do tempo de retenção. No entanto, outros fatores também podem contribuir para oscilações nestes rendimentos, como a adição de um substrato complemento (HIDALGO e MARTIN-MARROQUÍN, 2014).

Com base nestas constatações, acredita-se que a maior produção de biogás e metano não ocorreu na mistura com maior teor de SV porque nesta também se concentraram os maiores teores de gordura. Além disso, a ausência do dejetos suíno na mistura pode ter sido determinante. Isto pode ter acarretado maiores obstáculos na fase de hidrólise (quebra dos compostos complexos) resultando em um menor rendimento nas produções de biogás e metano nas etapas posteriores da digestão anaeróbia. Sobre os benefícios da codigestão, Cuetos et al. (2010) inferem que a combinação de resíduos com alta concentração de lipídeos e substratos de elevada concentração de nitrogênio (como os dejetos suínos) reduz os problemas de sobrecarga orgânica, devido à diluição do nitrogênio, ao ajuste da relação C/N

e melhoria da biodegradabilidade, pois as características dos dois resíduos são complementares.

5.2.3 Análises de DQO e DBO₅

As análises de DQO e DBO₅ relacionam-se às frações de matéria orgânica química e biologicamente degradáveis, respectivamente, ou ainda às frações de difícil e de fácil degradação disponível nas misturas. Para verificar a eficiência do tratamento anaeróbio, os lodos utilizados no mix dos experimentos foram caracterizados inicialmente quanto a esses dois parâmetros (Tabela 13). Estes possuem como destinação final o seu lançamento em solo agrícola, assim que são removidos das ETE's, com exceção do lodo desidratado que é encaminhado para aterro.

Segundo Von Sperling (1995), a relação DQO/DBO é um indicativo de biodegradabilidade de efluentes e do método de tratamento a ser utilizado. Conforme Metcalf & Eddy (1991), a faixa da relação DQO/DBO adequada para o resíduo ser passível de tratamento biológico situa-se entre 1,0 e 3,0.

Tabela 13 – Caracterização dos lodos que integraram o mix

Substrato/Lodo	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	Relação DQO/DBO
Dejeto Suíno	52.328	14.000	3,74
Flotado Suíno	139.877	52.000	2,69
Desidratado Suíno	142.086	56.000	2,53
Ativado Laticínios	5.301	1.400	3,79
Flotado Laticínios	94.601	38.000	2,49
Flotado/Ativado Aves	98.466	58.000	1,70

Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se, que a relação DQO/DBO dos lodos apresentou valores que indicam biodegradabilidade, sendo estes favoráveis ao tipo de tratamento proposto, destacando-se apenas que o dejeto suíno e o lodo ativado de laticínios demonstraram valores um pouco superiores aos desejados para adoção de tratamento biológico. Sobre esta ocorrência, Matos (2006) comenta que valores da razão DQO/DBO acima de 2,5 indicam conteúdo significativo de inertes ou material não biodegradável presentes no resíduo. Isto também ficou evidente nas análises de sólidos, onde as maiores parcelas de sólidos fixos foram identificadas nas amostras que receberam mais dejeto suíno, por exemplo.

A Tabela 14 apresenta os valores de DQO, DBO e a relação entre estes dois parâmetros para cada uma das misturas submetidas à biodigestão anaeróbia, evidenciando que

praticamente todas as misturas apresentavam alta biodegradabilidade no início dos experimentos.

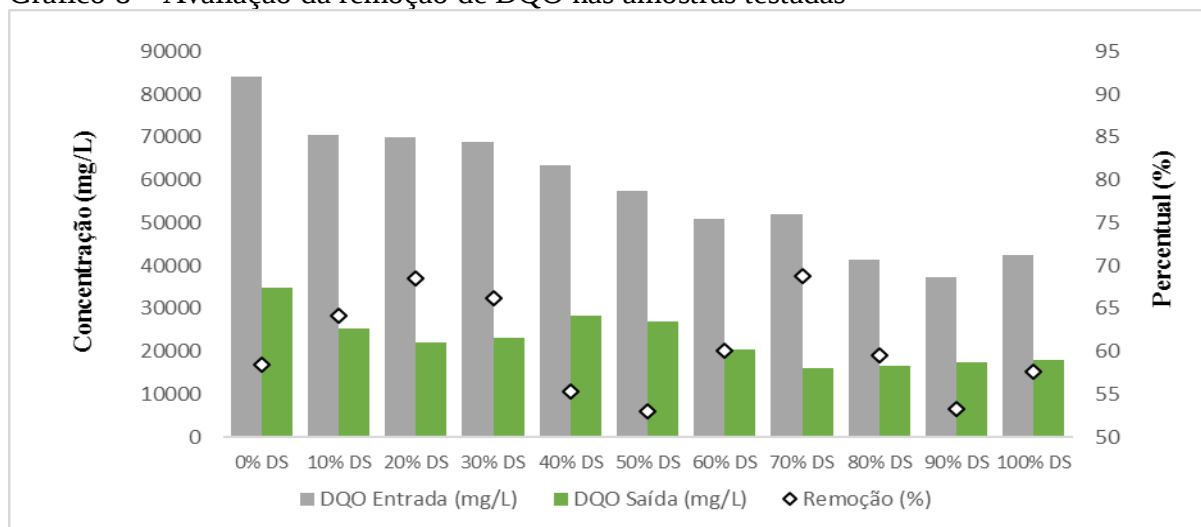
Tabela 14 – Caracterização das misturas submetidas ao tratamento anaeróbio

Substrato	DQO (mg/L)		DBO ₅ (mg/L)		Relação DQO/DBO	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
0% DS	84.197	35.000	50.000	8.000	1,68	4,38
10% DS	70.426	25.250	42.000	4.000	1,68	6,31
20% DS	70.033	22.000	42.000	2.200	1,67	10,00
30% DS	68.852	23.254	34.000	3.000	2,03	7,75
40% DS	63.344	28.267	36.000	3.000	1,76	9,42
50% DS	57.442	26.991	28.000	3.000	2,05	9,00
60% DS	50.951	20.364	26.000	2.000	1,96	10,18
70% DS	51.934	16.182	22.000	2.000	2,36	8,09
80% DS	41.311	16.727	16.000	2.000	2,58	8,36
90% DS	37.377	17.455	12.000	1.000	3,11	17,45
100% DS	42.492	18.000	10.000	1.000	4,25	18,00

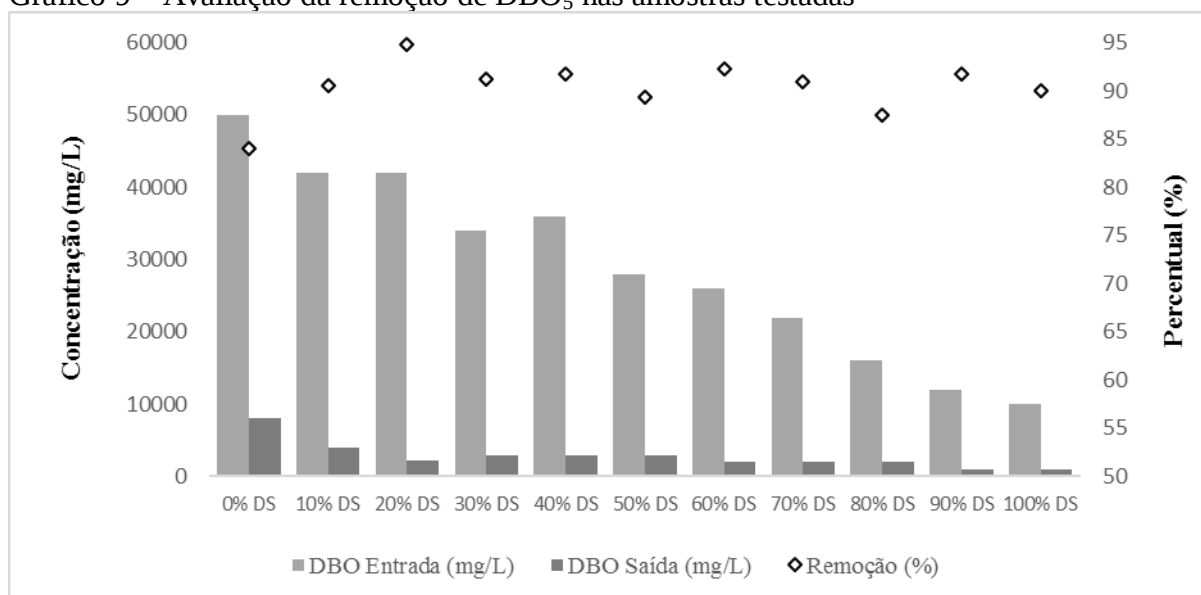
Fonte: Elaborado pela autora

Os Gráficos 8 e 9 ilustram o comportamento da DQO e da DBO no início e no fim do experimento, bem como, os percentuais de remoção atingidos para cada um destes parâmetros em cada mistura. Como pode ser observada, a faixa de remoção da DQO variou de 50 a 70%, enquanto que para a DBO, em praticamente todas as misturas, as remoções foram superiores a 85%. Estudos de Rodrigues et al. (2016), ao avaliarem a eficiência nas remoções de DQO e DBO proporcionadas pelo tratamento de efluentes de um frigorífico de aves, por meio de um reator UASB, apontaram valores de remoção que também variaram, de 83 a 99% para a DBO e de 50 a 98% para a DQO.

Gráfico 8 – Avaliação da remoção de DQO nas amostras testadas



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 9 – Avaliação da remoção de DBO₅ nas amostras testadas

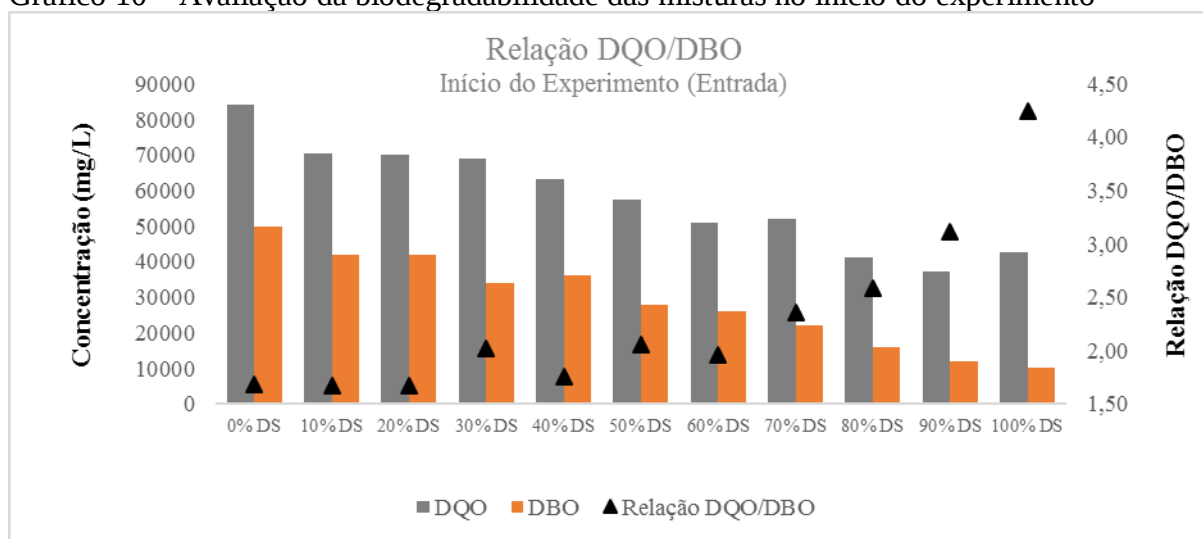
Fonte: Elaborado pela autora

A eficiência do processo e da remoção de DQO é dependente da atividade metanogênica do lodo, relacionada à sua capacidade de transformar acetato, hidrogênio (H₂) e CO₂ em CH₄, havendo relação estequiométrica entre a quantidade de metano formada e a fração de matéria orgânica removida (CHERNICHARO, 1997). Relacionando estatisticamente os valores iniciais de DQO e DBO das triplicatas com os volumes finais de metano obtidos em cada uma delas, a correlação de *Pearson* apontou valores (0,93 e 0,96) que indicam uma relação forte de proporcionalidade entre estas variáveis, de tal modo que, quanto maiores os valores de DQO e DBO das amostras, melhores os rendimentos na produção de metano.

Para fins de comparativos, Andrade et al. (2015) obtiveram remoções de DQO na faixa de 69,8% ao tratar dejetos suínos por meio da digestão anaeróbia. Panichnumsin et. al (2006) observaram que, quando realizada a digestão do dejetos suíno isoladamente, a média de redução de DQO foi menor (62%) do que quando comparado ao processo de codigestão. Mas este fato não ficou evidente neste experimento, visto que as remoções de DQO nas misturas oscilaram, embora tenham se mantido dentro da faixa esperada para o tratamento anaeróbio.

Com relação à biodegradabilidade das misturas submetidas ao tratamento anaeróbio, com exceção das amostras de 90% DS e 100% DS, as demais apresentaram alta biodegradabilidade no início do experimento, visto que estavam na faixa de 1,0 a 3,0 da relação DQO/DBO, indicando adequada a adoção de tratamento biológico (Gráfico 10).

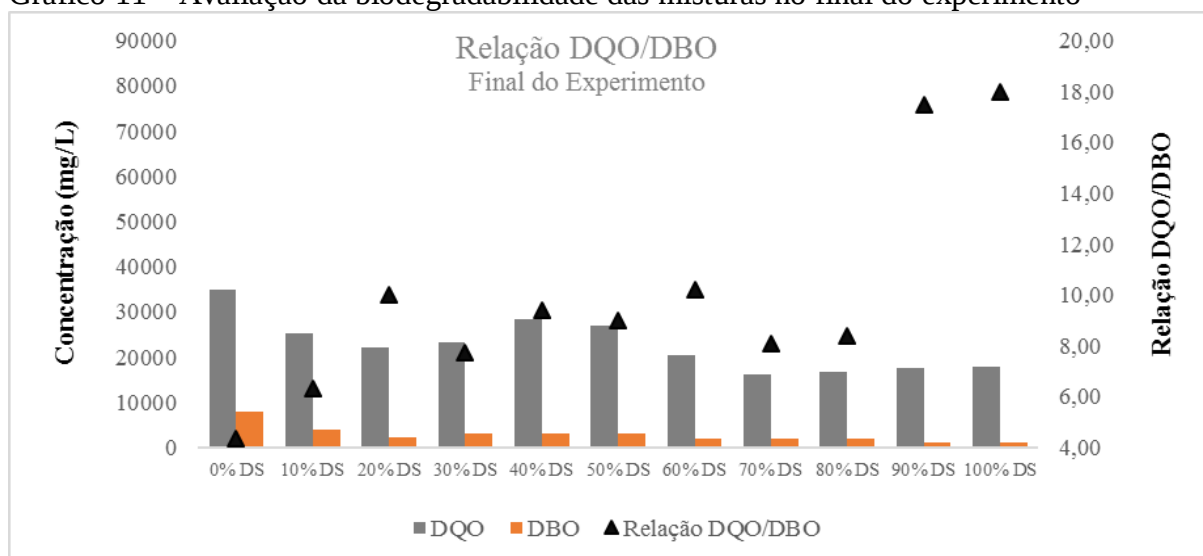
Gráfico 10 – Avaliação da biodegradabilidade das misturas no início do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

Ao final do experimento, como os percentuais de remoção de DBO_5 foram altos, esta relação aumentou (Gráfico 11), indicando recalcitrância do material de saída dos reatores. O digestato de todas as amostras apresentou características de efluente mineralizado, com a relação DQO/DBO acima de 4, podendo ser identificado como um efluente com características recalcitrantes. Segundo Leite et al. (2009), este processo de mineralização está associado diretamente ao consumo de materiais de fácil degradação presentes nas amostras, tais como as proteínas e carboidratos, pelos microorganismos. Restando apenas os constituintes químicos de difícil degradação que demandam um período de tempo maior para serem bioestabilizados ou ainda outro tipo de tratamento.

Gráfico 11 – Avaliação da biodegradabilidade das misturas no final do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

5.2.4 Análises de Carbono e Nitrogênio

A avaliação da concentração de carbono e nitrogênio das biomassas se dá pelo fato destes representarem nutrientes necessários para o desenvolvimento celular dos microorganismos que atuam na biodigestão anaeróbia. A relação entre estes dois parâmetros (C/N) recomendada por literaturas para testes de biogás deve ser, inicialmente, de 20 ou 30:1, sendo o composto considerado estabilizado quando esta relação atinge 10:1.

A Tabela 15 ilustra os valores obtidos nas análises de entrada e saída, bem como as relações entre estes dois parâmetros, em que se pode observar que a relação C/N inicial esteve muito abaixo da recomendada pelas literaturas. Isso está relacionado à composição das biomassas utilizadas nos testes que possuem seus níveis de nitrogênio elevados em relação aos de carbono.

Tabela 15 – Valores de carbono e nitrogênio presentes nas amostras

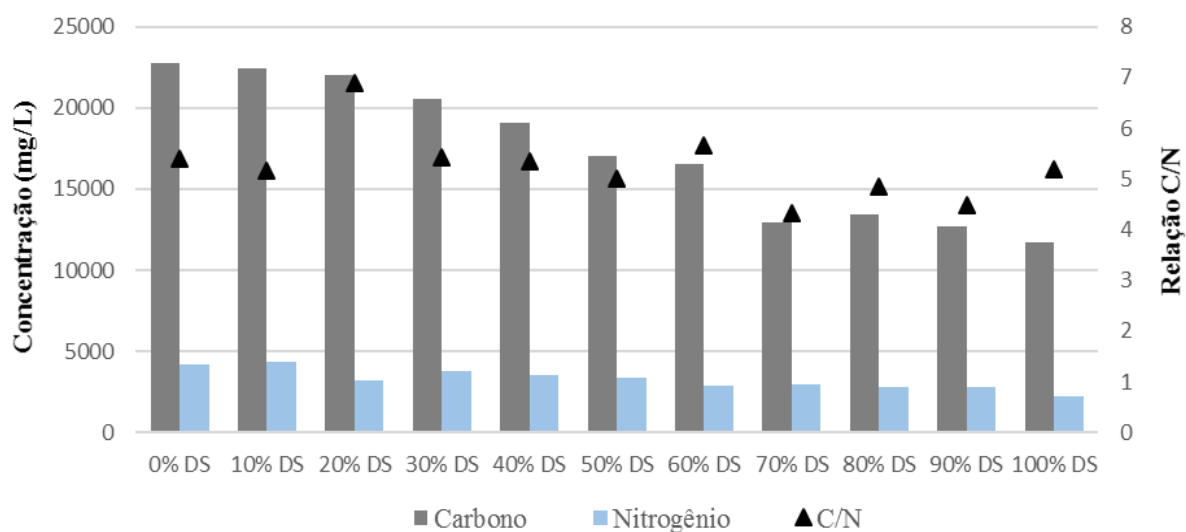
Substrato	Carbono (mg/L)		Nitrogênio (mg/L)		Relação C/N	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
0% DS	22.756,7	8.445,3	4.219,6	4.207,0	5,39	2,01
10% DS	22.408,9	7.879,6	4.347,0	4.536,0	5,16	1,74
20% DS	22.028,4	7.138,7	3.192,0	4.397,4	6,90	1,62
30% DS	20.526,5	7.490,3	3.784,2	4.064,2	5,42	1,84
40% DS	19.114,0	8.448,8	3.568,6	3.875,2	5,36	2,18
50% DS	17.038,7	9.052,0	3.403,4	3.425,8	5,01	2,64
60% DS	16.509,5	10.411,5	2.923,2	2.836,4	5,65	3,67
70% DS	12.960,4	10.000,9	2.998,8	2.780,4	4,32	3,60
80% DS	13.434,3	10.391,5	2.770,6	2.700,6	4,85	3,85
90% DS	12.716,4	11.777,8	2.839,2	2.734,2	4,48	4,31
100% DS	11.713,0	10.601,9	2.259,6	2.231,6	5,18	4,75

Fonte: Elaborado pela autora

Experimentos desenvolvidos por Luna (2003), utilizando como substratos resíduos sólidos vegetais, também apresentaram a relação C/N em uma faixa abaixo da recomendada e do mesmo modo não se verificou efeito adverso ao processo de bioestabilização. No entanto, acredita-se que se fosse estabelecida uma melhor condição entre os parâmetros de carbono e nitrogênio, ampliando o fornecimento de carbono aos reatores, a geração de biogás e metano poderia ser ainda mais eficiente do que a apresentada.

Os gráficos 12 e 13 ilustram a variação nos teores de carbono e nitrogênio e a relação entre estes nas misturas, comparando-se entrada e saída do experimento.

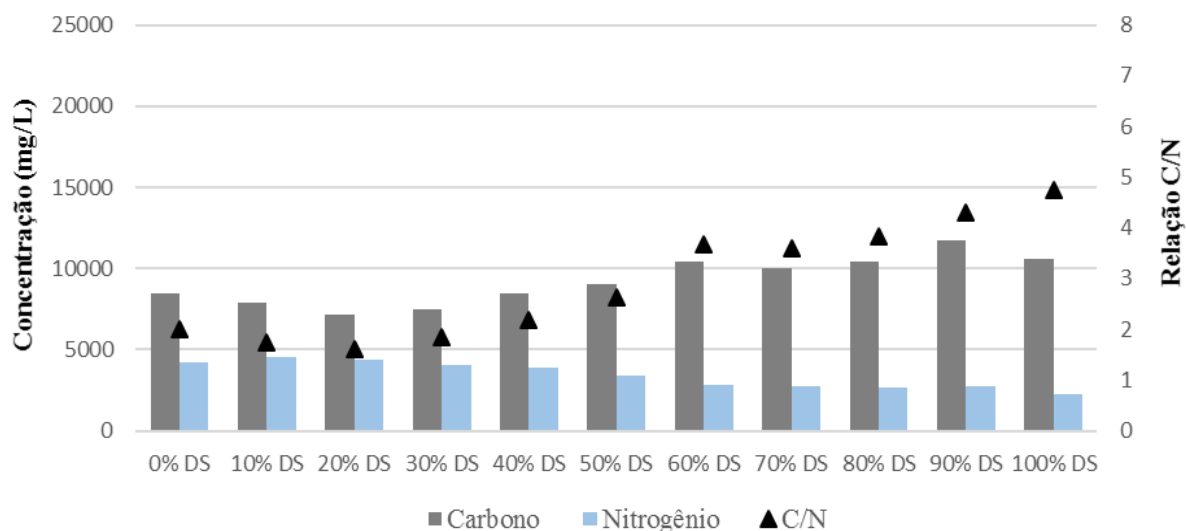
Gráfico 12 – Avaliação da relação C/N nas amostras no início do experimento



Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se que os teores de carbono apresentaram-se mais elevados nas misturas com menor participação de dejetos suínos. Mesmo assim a relação C/N entre as amostras não variou tanto, obtendo-se uma média de $5,24 \pm 0,68$.

Gráfico 13 - Avaliação da relação C/N nas amostras no final do experimento



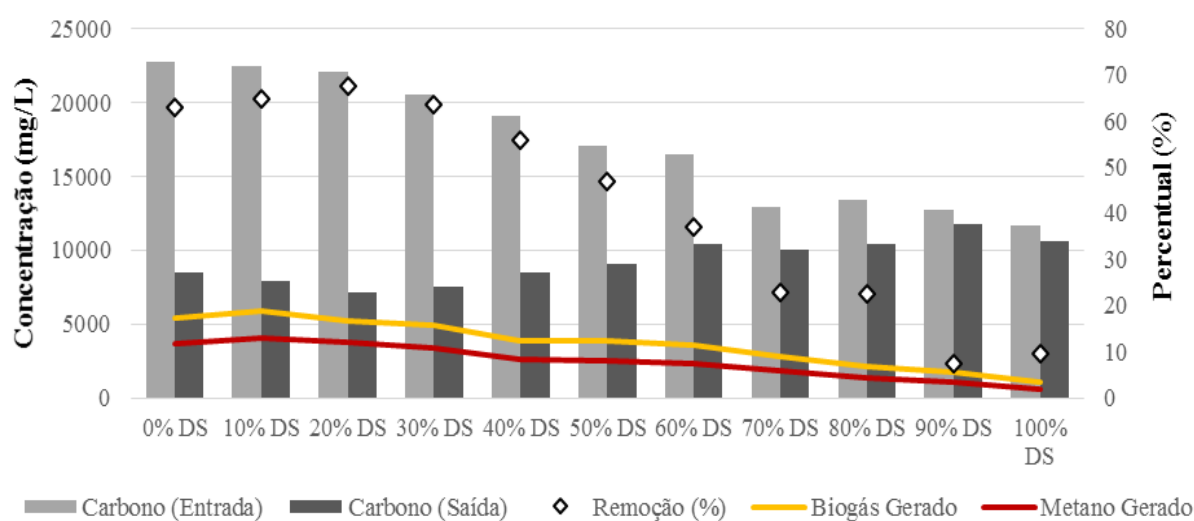
Fonte: Elaborado pela autora

Segundo Hartmann e Ahring (2005), se a razão C/N for muito elevada, pode resultar em um déficit de nitrogênio fundamental à síntese celular dos microorganismos. Por outro lado, se esta razão for baixa, pode ocorrer formação de amônia em quantidades elevadas, podendo esta ter um efeito tóxico ao meio. Este fato não foi elucidado porque houve geração de volumes significativos de biogás e metano, embora as amostras que inicialmente

apresentaram os maiores teores de amônia tenham sido também as que obtiveram os menores rendimentos.

Sabe-se que o carbono orgânico degradado pelos microorganismos, por meio da biodigestão anaeróbia é um dos constituintes do gás metano (CH_4), gás de principal interesse no biogás quando se visa ao aproveitamento energético. A eficiência na sua degradação, por meio de sua assimilação pelos microorganismos, é decisiva na geração do biogás com boa qualidade, visto que esta se associa ao teor de metano presente. O Gráfico 14 ilustra a eficiência da degradação do carbono em cada uma das misturas avaliadas relacionada às quantidades de biogás e metano geradas. O coeficiente de *Pearson* obtido na correlação entre teor de carbono e volume de metano produzido pelas amostras (0,97) indica forte relação de proporcionalidade, evidenciada também no gráfico.

Gráfico 14 – Relação entre o carbono degradado e a tendência estabelecida na geração de biogás e metano



Fonte: Elaborado pela autora

Os maiores volumes de biogás e metano foram produzidos pelas amostras que, inicialmente, apresentaram as maiores concentrações de carbono. Sendo que a sua conversão também ocorreu de forma mais eficiente nestas amostras (maior percentual de remoção).

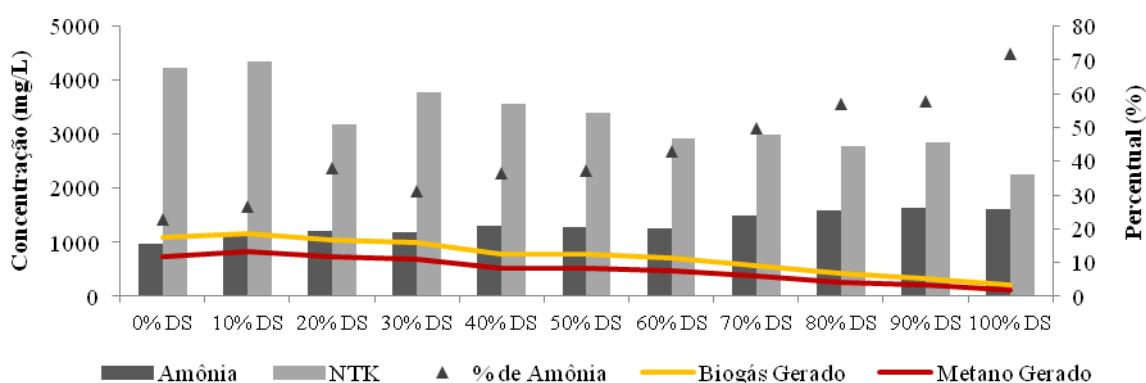
As análises de NTK nas amostras de saída não evidenciaram remoções significativas deste nutriente por meio do tratamento adotado. Nas amostras de 10 a 50% DS, houve incremento, fato este que se destacou, visto que o nitrogênio é um nutriente requerido para o crescimento dos microorganismos que atuam na digestão anaeróbia. A amônia e o nitrogênio

orgânico liberado na degradação são as principais fontes de nitrogênio utilizadas pelos microorganismos (CHERNICHARO, 1997). Acredita-se, portanto, que este incremento observado possa estar relacionado à baixa homogeneização das amostras somada às diluições necessárias para a realização desta análise.

Em uma avaliação dos teores de amônia presentes nas amostras pré-digestão anaeróbia, relacionados aos valores de NTK e à proporção de DS utilizada, observou-se que, nas amostras com maior percentual de DS a concentração de amônia também era maior. Estudos apontam que altas concentrações de amônia nos substratos submetidos à digestão anaeróbia podem ser tóxicas aos microorganismos, sendo até capazes de inibir a produção de metano (TADA et al., 2005). Sabe-se que as concentrações de amônia tendem a ser elevadas em dejetos animais, neste sentido, em função da inclusão do dejetos suíno nas amostras, buscou-se identificar a sua concentração inicial presente nas mesmas.

O Gráfico 15 ilustra a concentração de amônia nas amostras em relação à concentração de NTK, correlacionadas às quantidades de biogás e metano produzidas. Os valores de amônia verificados nas amostras variaram de 966 mg/L (0% DS) a 1635,2 mg/L (90% DS), obtendo-se a média de $1333,05 \text{ mg/L} \pm 218,80 \text{ mg/L}$.

Gráfico 15 – Identificação de amônia nas amostras relacionada à tendência estabelecida na geração de biogás e metano



Fonte: Elaborado pela autora

A tendência estabelecida, evidenciou que, quanto menor o teor de amônia, melhores os desempenhos nas produções de biogás e metano. Isto pode explicar o fato das baixas remoções dos SV obtidas nas amostras com maior participação de DS e, conseqüentemente, maior concentração de amônia. A baixa eficiência na conversão dos SV a metano nestas amostras pode ter sido influenciada pela maior concentração de amônia que, por sua vez, pode ter prejudicado a ação eficiente dos microorganismos.

5.3 Simulações com base nos resultados obtidos

Visando estimar os volumes de reatores necessários para tratar as misturas de acordo com as distintas proporções de dejetos suíno estabelecidas e, considerando tratar todo o volume de lodos gerados pela Cooperativa, foram realizadas duas simulações variando o TDH, conforme ilustrado nas tabelas 16 e 17. Para estimar os volumes de biogás que poderiam ser produzidos em escala real, extrapolaram-se os dados obtidos em escala laboratorial para cada uma das misturas, adotando-se a regra da proporcionalidade para o cálculo. Adotou-se como referência o valor da mistura de lodos e sangue gerada mensalmente pela cooperativa (2.044 m³), por isso os valores referentes à amostra de 100% DS foram desconsiderados. A exemplo, se a mistura de lodos e sangue equivaler a 10% no reator, o volume de dejetos suíno a ser acrescido deve ser de 18.396 m³ (90%), ainda soma-se a estes valores 30% de volume correspondente ao inóculo, como adotado nos experimentos. Deste modo, o reator de 90% DS deveria ter o volume de 26.572,2 m³, resultante do somatório dos três valores: 10% (2.044); 90% (18.396); 30% (6.132). Este raciocínio foi replicado para todas as misturas obtendo-se os volumes ilustrados nas tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Estimativa do volume útil de reatores considerando o TDH real obtido nos experimentos

Substrato	Volume do Reator (m ³)	Unidades	TDH	m ³ de biogás	m ³ biogás/dia
0% DS	2.657,2	2	59	77.037,8	1.305,7
10% DS	2.952,4	2	59	92.343,2	1.565,1
20% DS	3.321,5	2	59	92.943,9	1.575,3
30% DS	3.796,0	2	50	99.798,9	1.995,9
40% DS	4.428,6	2	41	92.394,0	2.253,5
50% DS	5.314,4	2	41	109.640,8	2.674,2
60% DS	6.643,0	1	27	125.691,2	4.655,2
70% DS	8.857,3	1	27	133.106,5	4.929,9
80% DS	13.286,0	1	27	149.045,9	5.520,2
90% DS	26.572,0	1	27	241.241,8	8.934,9

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 17 - Estimativa do volume útil de reatores considerando o TDH de 27 dias

Substrato	Volume do Reator (m ³)	Unidades	TDH	m ³ de biogás	m ³ biogás/dia
0% DS	2657,2	1	27	35.468,3	1.313,6
10% DS	2952,4	1	27	49.960,5	1.850,4
20% DS	3321,5	1	27	51.416,5	1.904,3
30% DS	3796,0	1	27	66.516,9	2.463,6
40% DS	4428,6	1	27	77.593,1	2.873,8
50% DS	5314,4	1	27	101.251,1	3.750,0
60% DS	6643,0	1	27	125.691,2	4.655,2
70% DS	8857,3	1	27	133.106,5	4.929,8
80% DS	13286,0	1	27	149.045,9	5.520,2
90% DS	26572,0	1	27	241.241,8	8.934,9

Fonte: Elaborada pela autora

Algumas discussões podem ser traçadas se comparados os volumes úteis de reatores necessários com a produção de biogás que poderia ser atingida. Ao estimar o volume dos reatores com base em 27 dias de TDH, baseando-se nos volumes de biogás que as misturas tinham produzido neste tempo, nota-se que a eficiência diária na geração de biogás aumentou nas misturas que tiveram TDH's superiores, em relação à estimativa feita utilizando o TDH real das misturas. Isso indica que as produções dos maiores volumes de biogás, de fato ocorreram dentro destes dias, e o restante dos dias exigidos contribuiu apenas para a fase de estabilização final do substrato. Também se observa que, para as misturas acima de 70% DS, o volume dos reatores ficou muito elevado em relação ao volume de biogás produzido. Considerando uma eficiência que relacione os m³ de biogás produzidos por m³ de volume útil necessário, a mistura que se destaca é a de 50% DS, seguida da de 60% DS, como pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18 – Avaliação da mistura mais eficiente por m³ de volume útil

Substrato	Volume do Reator (m ³)	m ³ de biogás	m ³ biogás/m ³ reator
0% DS	2657,2	35.468,26	13,34
10% DS	2952,4	49.960,51	16,92
20% DS	3321,5	51.416,53	15,47
30% DS	3796,0	66.516,97	17,52
40% DS	4428,6	77.593,07	17,52
50% DS	5314,4	101.251,06	19,05
60% DS	6643,0	125.691,22	18,92
70% DS	8857,3	133.106,50	15,02
80% DS	13286,0	149.045,96	11,21
90% DS	26572,0	241.241,76	9,07

Fonte: Elaborada pela autora

Em uma análise geral desta eficiência, embora as misturas de 50% e 60% DS tenham se destacado, não se podem descartar os resultados apresentados pelas demais, pois foram relativamente próximos, com exceção do 90% DS que ficou abaixo, em relação aos demais. Acredita-se, portanto, que os pontos cruciais para a definição do volume de reator adotado em uma escala real poderiam ser a necessidade energética da indústria (quantidade de biogás que se deseja produzir) associada à logística de transporte das biomassas. Visto que este é um custo que muitas vezes inviabiliza projetos, e o fato das biomassas encontrarem-se distribuídas em, pelo menos, três localidades distintas implicaria no transporte de pelo menos duas parcelas de biomassas.

Como produto final de todas as avaliações feitas por meio deste trabalho, no que tange sobre a investigação da sinergia dos substratos envolvidos nas amostras e com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que a codigestão entre os resíduos avaliados foi favorável, pois possibilitou melhorias nos rendimentos de biogás e metano produzidos. Convergindo a estes resultados, Cirne et al. (2007) afirmou em seus estudos que a biodigestão anaeróbia, integrando substratos com elevados níveis de lipídeos e dejetos, resultou no acréscimo da produção de metano e na maior eficiência da digestão. Estudos feitos por Lansing et al. (2010) ponderaram que a elevada alcalinidade dos dejetos favorece processos de codigestão envolvendo resíduos de altos níveis lipídicos.

6 CONCLUSÃO

O aumento da demanda energética mundial é destaque nas discussões atuais e tem maior relevância, principalmente entre os grandes consumidores de energia, segmento no qual figuram as indústrias. A energia é um dos insumos indispensáveis para a garantia da manutenção das atividades produtivas, porém os custos energéticos são elevados e oneram os custos de produção. Diante deste cenário, possibilitar a geração de energia própria e, consequentemente, reduzir a dependência de fontes externas de energia, significa produzir com mais autonomia e menor custo, o que implica no aumento da competitividade além de reduzir a exposição à variação de preços deste insumo.

Com base nos resultados apresentados por este estudo, pode-se verificar que a sinergia dos substratos combinados, é capaz de superar a eficiência da produção de biogás, quando comparada ao desempenho do dejetos suíno, por exemplo, que é uma biomassa tipicamente empregada como substrato em processos de digestão anaeróbia, sendo também produzida em maior volume pela cooperativa. A codigestão de dois ou mais substratos de origem diferente, permite o desenvolvimento eficiente do processo devido ao comportamento sinérgico dos cosubstratos utilizados, que compensam os pontos fracos que cada um teria separadamente (LADINO 2011). Deste modo, quando além de tratar uma biomassa, a intenção é obter melhores rendimentos de biogás produzido, a codigestão pode ser o melhor caminho. A introdução de outras biomassas combinadas ao dejetos suíno melhorou a eficiência do processo de geração de biogás, mas também é preciso considerar que quanto maiores os percentuais do mix de lodos nos reatores, maior foi o tempo de detenção exigido para a sua degradação. Embora, tenha sido constatado que, os maiores volumes de biogás em todas as misturas foram produzidos nos primeiros 27 dias de experimentação.

Na simulação feita, com fins de estimativas e dimensionamento de reatores em escala real, considerando um tempo de detenção menor para tratar maior quantidade de substratos, com geração expressiva de biogás, nota-se que a mistura com 60% de dejetos suíno mostrou-

se como uma das mais adequadas. No entanto, ressalta-se que, em um estudo de viabilidade técnica-econômica, maiores volumes de biomassas a serem transportadas podem implicar em custos, que por sua vez podem não ser abatidos com a eficiência que estes volumes representam. Neste caso, as misturas que exigiram menores percentuais de dejetos suíno podem apresentar-se como a melhor alternativa, em decorrência dos custos e da logística de transporte dos volumes de dejetos suíno.

Cabe ressaltar também que as biomassas, quando submetidas ao tratamento anaeróbio, geram um biofertilizante e sua composição apresentou redução significativa nas cargas de DQO e DBO₅ em relação aos lodos, avaliados de forma isolada, da maneira como já vêm sendo dispostos em solo. Em função disso, têm-se ganhos ambientais decorrentes da redução destas cargas poluidoras que acabam sendo depuradas no tratamento e não diretamente no ambiente.

Por meio deste trabalho, pretendeu-se avaliar a eficiência das diferentes combinações de biomassas residuais em relação aos seus potenciais de geração de biogás e metano, visando ao aproveitamento energético. Esta análise pode ser replicada por outras Cooperativas ou indústrias do ramo alimentício, servindo de base e incentivo para que sejam realizados outros testes com diferentes tipos e percentuais de biomassas. Os resultados destes podem fomentar a utilização do biogás para fins energéticos com o objetivo de incrementar o uso de renováveis na matriz energética.

Esta avaliação poderá embasar a tomada de decisão da Cooperativa em relação ao dimensionamento do volume de um biodigestor que poderá ser implementado, além da estimativa dos ganhos econômicos que poderão ser obtidos a partir do aproveitamento do biogás gerado. A partir dos volumes e da qualidade do biogás verificada em escala laboratorial e sua projeção para a escala real, poderá ser elaborado um estudo da logística do transporte das biomassas e o cálculo do *payback*, indicador utilizado na análise de retorno de projetos, apresentando o tempo necessário para o lucro acumulado gerado igualar o investimento inicial.

Como parte integrante da tríplice da sustentabilidade, além da redução nos custos econômicos e do benefício social do emprego de uma tecnologia que exigirá o envolvimento dos colaboradores da Cooperativa, este estudo também evidenciou benefícios ambientais. Estes podem ser obtidos pelo tratamento das biomassas (redução das cargas orgânicas) e pela

redução do consumo de recursos naturais empregados no modelo atual de geração de energia, atendendo deste modo às premissas estabelecidas para o desenvolvimento sustentável, foco da área de atuação da Engenharia Ambiental.

REFERÊNCIAS

ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. **Biogas Energy**. 1st ed. New York, USA: Springer, 2012.

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Levantamentos ABPA**. Disponível em: <<http://abpa-br.com.br/noticia/embarques-de-carne-suina-crescem-192-em-setembro-1401>>. Acesso em 23 out. 2015.

ANA. Agência Nacional das Águas. Portal da Qualidade das Águas. **Índice de Qualidade das Águas**. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: 22 out. 2015.

ANDRADE, E. E.R. **Metodologia de implantação e avaliação de sistemas solar térmico e fotovoltaico: estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica Brasil. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: 153 p. 2002.

AOAC. Association of Official Analytical Chemistry. **Official methods of analysis**. 6 ed. Arlington: AOAC International, p. 1025, 1995.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22º ed. Washington (USA), 2012.

BADO, C.; PERCIO, J. E.; LINDINO, C. A. **A demanda química de oxigênio: questionamentos**. Revista Analytica, n. 63, dez. 2012/jan. 2013.

BAEYENS, J.; KANG, Q.; APPELS, L.; DEWIL, R.; LV, Y.; TAN, T. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 47, p. 60-88, 2015.

BANOS, R.; MANZANO-AGUGLIARO, F.; MONTTOYA, F. G.; GIL, C.; ALCAYDE, A.; GÓMEZ, J. **Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15(4), p. 1753-1766, 2011.

BARRICHELO, R.; HOFFMANN, R.; SILVA, S. O. C. da.; DEIMLING, M. F.; CASAROTTO FILHO, N. **O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região noroeste do Rio Grande do Sul**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 8, n. 2, p. 333-355, 2015.

BENACI, V. **Avaliação de métodos de análise para carbono orgânico em amostras de interesse agrônomo.** Dissertação de Mestrado. Instituto Agronômico de Campinas, Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, 2010.

BENITO, T. P. **Práticas de energia solar fotovoltaica.** Porto: Editora Publindústria, 2011.

BILGEN, S.; **Structure and enviromental impact of global energy consumption.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 890-902, 2014.

BLEY JR, C. **Biogás: a energia invisível.** 2ª ed. rev. e ampl. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu : ITAIPU Binacional, 2015.

BOHN, C.; SCHIAVON MAIA, D.; NICLEVICZ, R. R.; PEREIRA, N. C.; GIMENES, M. L.; FRARE, L. M. **Impacto econômico da purificação de biogás no processo de geração de energia elétrica em um frigorífico de aves.** XX COBEQ, Florianópolis: 2014.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C.M. **Geração de Energia Elétrica: fundamentos.** São Paulo: Editora Érica, 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030.** 2007. Disponível:<http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_e_nergetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf>. Acesso em: 13 jul 2015.

CALLADO, N. H.; DE PAULA JR, D. R. **Gerenciamento de resíduos de uma indústria de processamento de côco - Estudo de caso.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1999.

CATAPAN, D. C.; CARVALHO, R. I. N. de; CATAPAN, A. **Perfil da produção e destino dos dejetos de suínos no município de São José dos Pinhais.** Rev. Acad., Ciências Agrárias Ambientais, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 247-255, 2011.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. **Bioresource Technology**, v. 99, p.4044-4064, 2008.

CHERNICHARO, C.A. de L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Belo Horizonte: Politécnica, 246 p. 1997.

CHING, W. H.; RODRIGUES, C. W. **Biodiesel.** SEBRAE. Disponível em: <[http://201.2.114.147/bds/BDS.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/\\$File/NT00035116.pdf](http://201.2.114.147/bds/BDS.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/$File/NT00035116.pdf)>. Acesso em 03 out. 2015.

CIRNE, D.G.; PALOUMET, X.; BJÖRNSSON, L.; ALVES, M.M.; MATTIASSON, B. **Anaerobic digestion of lipid-rich waste - Effects of lipid concentration.** Renewable Energy, v.32, n.6, p.965-975, Elsevier: 2007.

COLLINS, G.; WOODS, A.; MCHUGH, S.; CARTON, M. W.; O'FLAHERTY, V. **Microbial community structure and methanogenic activity during start-up of psychrophilic anaerobic digesters treating synthetic industrial wastewater.** Microbiology Ecology. v.46, p.159-170, 2003.

CRUZ-ARDILA, J. C.; CARDONA-GÓMEZ, J. C.; HERNÁNDEZ-PORRAS, D. M. **Aplicación electrónica para el ahorro de energía eléctrica utilizando una energía alternativa**, Cali – COL, v. 9, n. 2, p. 234-248, 2013.

CUETOS, M. J.; GÓMEZ, X.; OTERO, M.; MORÁN A. **Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield**. Waste Manage, 30, pp. 1780–1789 (2010).

DAL SOLER, A. L. **Levantamento de dados da geração e caracterização de dejetos na suinocultura em fase de creche e terminação**. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Univates. Lajeado, 2012.

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. **Manejo de dejetos de suínos**. Boletim Informativo de Pesquisa e Extensão, v.7, n.11, p.1-32, 1998.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. do C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Bauru, 2002. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0004.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2015.

DEUBLIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. 1ª ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

DIESEL, R.; MIRANDA, C. R.; PERDOMO, C. C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Boletim Informativo de Pesquisa - Embrapa Suínos e Aves e Extensão EMATER/RS. 31 p. Ano 10. Bipers nº 14. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2002.

ECYCLE. **Metano: O gás estufa pode ser utilizado para geração de energia**. Disponível em: <<http://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/2426-metano-composicao-o-que-e-pra-que-serve-hidrocarboneto-ch4-incolor-inodoro-fontes-digestao-lixo-organico-reservatorios-hidretricas-efeitos-aquecimento-global-gas-estufa-controlar-biogas-gas-natural-aterro-sanitario-lixao-compostagem-domestica.html>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015**. Ano base 2014: Relatório Síntese. Ministério de Minas e Energia, MME. Rio de Janeiro: 2015.

FACCO, A.; VIEIRA, F. dos S. **Análise de viabilidade técnica e econômica da implantação de um grupo motor-gerador em uma granja suinícola**. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2012.

FERNANDES, G. F. R.; OLIVEIRA, R. A. **Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura**. Revista Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p. 243-256, 2006.

FERRAREZ, A. H.; FILHO, D. O.; TEIXEIRA, C. A. **Independência energética de granja suinícola a partir do uso de biogás**. Revista Engenharia na Agricultura, v. 18, n. 3, p. 248-257. Viçosa/MG: 2010.

FREITAS, G. S.; DATHEIN, R. **As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental**. Revista Nexos Econômicos – CME-UFBA, v. 7, n. 1, 2013.

FUNK, P.; WOCHNIK, P. **DBO – Um Parâmetro Global Observado de Perto**. Relatório de Aplicação UW-002, umwelt. 10 p. Blumenau, 2011.

GLATZ, P.; MIAO, Z.; RODDA, B. **Handling and treatment of poultry hatchery waste: a review**. Sustainability, v. 3, p. 216-237, 2011.

GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C. **Energias renováveis**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.

GOMES, A. C. A.; ROCHA, M. M.; GALVÃO, A. da S.; ALBINO, P. M. B. **Incentivos para a viabilização do biogás a partir dos resíduos da pecuária leiteira no Estado de Minas Gerais**. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente (RMA), v. 30, p. 140-160, jul. 2014.

GOMES, F. O. de C.; CAPPI, N. **Redução de Sólidos de Dejetos de Poedeiras em Biodigestores Operados com Diferentes Tempos de Retenção Hidráulica**. In: Periódicos UEM. Encontro de Iniciação Científica, v.1, n.1. 2011.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. **Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure**. Water Research. V. 39, p. 1543–1552. 2005.

HIDALGO, D.; MARTÍN-MARROQUÍN, J.M. **Effects of inoculum source and co-digestion strategies on anaerobic digestion of residues generated in the treatment of waste vegetable oils**. Journal of Environmental Management, v. 142, p. 17-22, 2014.

HODGE, M.; OCHSENDORF, J.; FERNÁNDEZ, J. **Quantifying potential profit from material recycling: a case study in brick manufacturing**. Journal of Cleaner Production, v. 18, n. 12, p. 1190-1199, 2010.

IEA. **International Energy Agency**, 2010. Disponível em: Disponível em: <<http://www.iea.org>> Acesso em: 19 jul. 2015.

KARIM, K.; KLASSON, K. T.; HOFFMANN, R.; DRESCHER, S. R.; DEPAOLI, D. W.; AL-DAHMAN, M.H. **Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mixing**. Bioresource Technology, 96, 1607, 2005.

KARLSSON, T.; KONRAD O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual Básico de Biogás**. 1ª Ed. Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KONRAD, O.; LUMI, M.; HEBERLE, A. N. A.; TONETTO, J. F.; CASARIL, C. E. **A influência da codigestão de óleo vegetal residual na geração de biogás por lodo de estação de tratamento de efluentes**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 2, p. 1-20, 2013.

KONZEN, E. A. **Dejetos de suínos fermentados em biodigestores e seu impacto ambiental como insumo agrícola**. SIMPÓSIO GOIANO DE SUINOCULTURA. Seminários Técnicos de Suinocultura. Goiânia: Avesui Centro-oeste, p. 56 – 64, 2005.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. **Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil**. Caderno de Ciência e Tecnologia, v.22, n3, p.652-665, 2005.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. **Aproveitamento de dejetos animais para geração de biogás**. Revista de Política Agrícola. Ano XV, n. 3, 2006.

KUNZ, A.; PALHARES, J. C. P. **A importância do correto procedimento de amostragem para avaliação das características dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA – CNPSA, 2004.

KUNZ, A.; PERDOMO, C. C.; OLIVEIRA, P. A. V. de. **Biodigestores: avanços e retrocessos**. Suinocultura Industrial, v. 04, n. 178, p, 14-16, 2004.

LABIOGÁS. **Documentos internos**. Foz do Iguaçu: CIBiogás - PR, 2013.

LADINO E. D. C. **Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable**. Magíster em Ingeniería Mecánica (Tese). Universidad Nacional de Colombia, 2011.

LANSING, S.; MARTIN, J.F.; BOTERO, R.B.; SILVA, T. N.; SILVA, E. D. **Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease**. Bioresource Technology. n.101, p.4362-4370, Elsevier: 2010

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. dos. **Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético**. UNESP/IGCE. II Congresso Brasileiro sobre Gestão Ambiental, 2011.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; BELLI FILHO, P. **Bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T de.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.2, p.190-196. Campina Grande, PB, UAEE/UFCG, 2009.

LETTINGA, G.; REBAC, S.; ZEEMAN, G. **Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment**. Trends in Biotechnology, v. 19, n. 9, 2001.

LIU, T., SUNG, S. **Ammonia inhibition on thermophilic aceticlastic methanogens**. Water Science Technology. n.45, 2002.

LOPEZ, R. A. **Energia solar para produção de eletricidade**. São Paulo: Artliber, 2012.

LUCAS JR, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios**. 137 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LUNA, M. L. D. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos para pequenas comunidades**. Dissertação Mestrado. 75p. Campina Grande: UFPB/UEPB/PRODEMA, 2003.

MARI, A. G. **Digestão anaeróbia de dejetos suínos na presença de produtos de limpeza e desinfecção na fase acidogênica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura. Cascavel/PR: UNIOESTE, 2014.

MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, M.S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. **A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v. 36, p. 412-27, 2014.

MATOS, A. T. **Práticas de qualidade do meio físico ambiental**. Roteiro de aula prática. Universidade Federal de Viçosa, 64p. Viçosa, 2006.

MENARDO, S.; BALSARI, P.; DINUCCIO, E.; GIOELLI, F. **Thermal pre-treatment of solid fraction from mechanically-separated raw and digested slurry to increase methane yield**. Bioresource Technology: v. 102, n. 2, p. 2026-2032, 2011.

MENDES, A. A.; CASTRO, H. F. de; PEREIRA, E. B.; FURIGO JÚNIOR, A. **Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos**. Quim. Nova, v. 28, n. 2, p. 296-305, 2005.

METCALF, E. & EDDY, M. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3ed. Newyork: Mcgraw-Hill, 1334 P. 1991.

MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

MIN, H.; KYU, S.; HYUB, J.; MOON, J. **Bioresource Technology Microbial community structure in a thermophilic aerobic digester used as a sludge pretreatment process for the mesophilic anaerobic digestion and the enhancement of methane production**. Bioresource Technology, v. 145, p. 80–89, 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS**. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/index.php/probiogas>> Acesso em: 06 out. 2015.

MONTEIRO, A. D. **O impacto das energias renováveis na economia dos países emergentes: o caso de Cabo Verde**. Dissertação de mestrado. Lisboa: ISCTE-IUL, 2012.

MOURA, J.P. de. **Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. 122f. 2012.

MOURA, J. P. **Estudo do dimensionamento da produção de biogás a partir de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas a partir de uma revisão da literatura**. Revista Educação Ambiental em Ação, n. 38, ano X. 2011.

- MUNEER, T.; MAUBLEU, S.; ASIF, M. **Prospects of solar water heating for textile industry in Pakistan**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.10, n. 1, p. 1-23, 2006.
- NETO, E. D. D.; ALVARENGA, L. H.; COSTA, L. de M.; NASCIMENTO, P. H.; SILVEIRA, R. Z.; LEITE, L. H. de M. **Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua**. Revista eletrônica E-xacta, v. 3, n. 2. 2010.
- NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 313p. 2005.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão a alternativa energética**. Editora Nobel: São Paulo, 93p. 1986.
- OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelocanadense**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 33 p. 2012.
- OLIVEIRA, P. A. V. de. Produção e aproveitamento do biogás. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: Manual de boas práticas**. Concórdia: Gestão Integrada de Ativos Ambientais, cap. 4, p. 42-55 2004.
- OLIVEIRA, P. A. V. **Uso de resíduos de suínos para produção de biogás**. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Canoas, RS, p. 32-40, 2005.
- OLIVEIRA, S. V. **Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property**. Biomass and bioenergy, v. 35, n. 7, p. 2608-2618, 2011.
- OLIVER, A.P.M.; NETO, A.A.S.; QUADROS, D.G.; VALLADARES, R.E. **Training manual on biodigestion**. USAID, Winrockinternational Brasil e Energia e desenvolvimento. Brasil, 2008. Disponível em: <<http://www.winrock.org.br/media/biodigestionmanualv2.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2015.
- ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. **Avaliação de parâmetros da biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos alimentados com dietas à base de milho e sorgo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p.600-607, 2010.
- PANICHNUMSIN, P., NOPPHARATANA, A., AHRING, B. K., & CHAIPRASERT, P. **Anaerobic Co-digestion of Cassava Pulp and Pig manure: Effects of Waste Ratio and Inoculum Substrate Ratio**. SEE 2006 Sustainable Energy and Environment Technology and Policy Innovations, 1, 932-937. 2006.
- PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. **Role of renewable energy sources in environmental protection: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 3, p. 1513-1524, 2011.
- PENG, J.; SONG, Y.; WANG, Y.; YUAN, P.; LIU, R. **Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor**. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 80, p. 60–65, 2013.

PEREIRA, M. S.; GODOY, T. P.; GODOY, L. P.; BUENO, W. P.; WEGNER, R. da S. **Energias renováveis: biogás e energia elétrica provenientes de resíduos de suinocultura e bovinocultura na UFSM.** REGET/UFSM, v. 19, n. 3, 2015.

PIROTA, R. D. P. B.; TONELOTTO, M.; DELABONA, P. da S.; TREMACOLDI, C. R.; FARINAS, C. S. **Caracterização de fungos isolados da região Amazônica quanto ao potencial para produção das enzimas envolvidas na conversão da biomassa vegetal.** Revista Ciência Rural, v. 45, n. 9, p. 1606-1612, 2015.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2010.

PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização.** GIZ-Ministério das Cidades. 2010.

RASLAVIČIUS, L.; GRZYBEK, A.; DUBROVIN, V. **Bioenergy in Ukraine-Possibilities of rural development and opportunities for local communities.** Energy Policy, v. 39, n. 6, p. 3370-3379, 2011.

REFOSCO, D. **Utilização de resíduos da suinocultura para produção de energia através do biogás e fertilizantes orgânicos.** Estudo de caso: Granja Marmentini, Dois Vizinhos/PR. Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia do Paraná, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2011.

RIZZONI, L. B.; TOBIAS, A. C. T.; DEL BIANCHI, M.; GARCIA J. A. D. **Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos suínos.** Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária. Ano IX, n. 18, 2012.

RODRIGUES, L. S.; LOPES, B. C.; LIMA, C. A.; RIBEIRO, M. C.; SANTOS, R. P.; SILVA, I. J. **Tratamento de efluentes de abatedouro de frangos por meio de reator UASB seguido de filtro anaeróbio.** Arq. Bras. Med. Vet. Zootec., v.68, n.1, p.97-103, 2016.

ROSA, M. F.; SOUZA FILHO, M. S. M.; FIGUEIREDO, M. C. B.; MORAIS, J. P. S.; SANTAELLA, S. T.; LEITÃO, R. C. **Valorização de resíduos da agroindústria.** II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais – II SIGERA. Foz do Iguaçu/PR, 2011.

SANCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO, L.; MARTIN, A.; COLMENAREJO, M.F. **Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste.** Bioresource Technology, v. 96, p. 335-344, 2005.

SANTOS, E. O.; SALES, P. R.; DUARTE, M. M. B. **Estudo Comparativo Entre as Técnicas de Diluição e Manométrica na Quantificação da Demanda Bioquímica de Oxigênio.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Santa Catarina, 2003.

SANTOSH, Y.; SREEKRISHNAN, T. R.; KOHLI, S.; RANA, V. **Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review.** Bioresource technology, v. 95, n. 1, p. 1, 2004.

SCHUCH, S. L. **Agroenergia da biomassa residual animal:** Oportunidade de negócio e renda, na região oeste do Paraná. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

SEGURA, M. L. **A evolução da matriz energética brasileira: O papel dos biocombustíveis e outras fontes alternativas.** Revista Âmbito Jurídico, 2011. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=11039> Acesso em: 30 ago. 2015.

SEGANFREDO, M. A. **Os dejetos suínos e seus riscos ambientais no uso como fertilizante.** Nordeste Rural. Revista Agromais, v.2, n.8, p.22-24, 2008.

SGORLON, J. G.; RIZK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. **Avaliação da DQO e da Relação C/N Obtidas no Tratamento Anaeróbio de Resíduos Fruti-hortícolas.** Acta Scientiarum Technology, v.33, n.4, p.421-424. 2011.

SOSA, R.; CHAO, R.; RÍO, del J. **Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos Del Tratamiento de Residuales Agrícolas com Producción de Biogás.** 2004. Disponível em: <www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpn/rev62/RCPP62art1.html> Acesso em: 30 ago. 2015.

STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; AMARAL, A. C. do.; MOTA, S. C. A. **Avaliação da produção de biogás de resíduos de incubatório de ovos.** Anais do 4º Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental na Agropecuária. Bento Gonçalves, 2014.

SUNADA, N. da S.; LUCAS JÚNIOR J. de.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; SCHWINGEL, A. W.; COSTA, M. S. S. de M. **Addition of lipolytic enzyme in anaerobic co-digestion of swine manure and inclusion levels of waste vegetable oil.** International Journal of Agricultural Policy and Research, vol. 2 (12), p. 468-474, 2014.

TADA, C.; YANG, Y.; HANAOKA, T.; SONODA, A.; OOI, K.; SAWAYAMA, S. **Effect of Natural Zeolite on Methane Production for Anaerobic Digestion of Ammonium Rich Organic Sludge.** Bioresource Technology, 96, 459. 2005.

TALEGHANI, G.; KIA, A. S. **Technical-economical analysis of the saveh biogas power plant.** Renewable Energy, v. 30, n. 3, p. 441-446, 2005.

TARRENTO, G. E. MARTINEZ, J. C. **Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa.** In: XIII Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru – SP, p. 8., 2006.

TERA. Tratamento de Efluentes e Reciclagem Agrícola. **Resíduos da indústria alimentícia.** Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/residuos-provenientes-da-industria-alimenticia>>. Acesso em: 30 de out. 2015.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e Planejamento do Setor energético no Brasil.** Resvista Estudos Ambientais, São Paulo, v.26, n.74, 2012.

TORRES, A.; PEDROSA, J. F.; MOURA, J. P. de. **Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais.** Revista Educação Ambiental em Ação. Ano XI, n. 40, 2012.

WILKIE, A. C. **Anaerobic Digestion of Flushed Dairy Manure. Proceedings - Anaerobic Digester Technology Applications in Animal Agriculture – A National Summit, from the Water Environment Federation.** 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/agstar/pdf/wefjune2003.pdf>>. Acesso em maio de 2016.

WTW. Wissenschaftlich Technische Werkstätten GmbH. Manometrische BSB-Meßgeräte. **Manual de Instruções.** Germany.2008. p. 23.

VDI 4630. Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate , sampling, collection of material data, fermentation tests. 92 p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure – VDI, 2006.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações.** São Paulo: Érica, 2012.

VILLELA, I. A. de C.; SILVEIRA, J. L. **Aspectos técnicos da produção de biogás em um laticínio.** 2005.

VON SPERLING M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias:** Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Eng. San. e Ambiental - UFMG. Belo Horizonte, v. 1, 240 p., 1995.

XAVIER, C. DE A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. de. **Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.2, p.212-223, mar./abr. 2010.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

ZHANG,C.; XIAO, G.; PENG, L.; SU, H.; TAN, T. **The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure.** Bioresource technology, v.129, p. 170-176, 2013.