

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica

Curso de Engenharia Civil

Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente

*Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de
resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis*

Pedro Luz Brancoli

Rio de Janeiro

2014

*Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de
resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis*

Pedro Luz Brancoli

Projeto de Monografia apresentado ao Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof.: ISAAC VOLSCHAN JR.

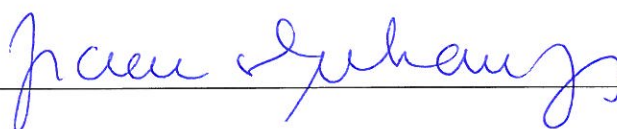
Rio de Janeiro

2014

*Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de
resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis*

Projeto de Monografia apresentado ao
Departamento de Construção Civil da
Escola Politécnica da Universidade
Federal do Rio de Janeiro, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro Civil.

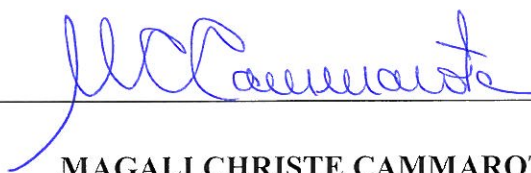
Examinada por:



ISAAC VOLSCHAN JR, D. Sc., Orientador



KATIA MONTE CHIARI DANTAS D.Sc.



MAGALI CHRISTE CAMMAROTA, D.Sc.

Rio de Janeiro

2014

Brancoli, Pedro Luz

Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis / Pedro Luz Brancoli – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.

xi, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Isaac Volschan Jr.

Projeto de Graduação - UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 91.

1. Digestão anaeróbia. 2. Co-digestão. 3. Biogás. 4. Digestor

I. Volschan, Isaac; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil; III. Avaliação experimental da co-digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e lodo de esgoto em digestores têxteis.

Agradecimentos

Aos meus pais por sempre colocarem a educação como prioridade em nossas vidas.

Ao meu orientador Isaac Volschan Jr. pela orientação e por todas as oportunidades ofertadas durante a graduação.

À Kajsa Sandberg e Dalenda Attir, grandes amigas e responsáveis diretas pelo experimento, e a quem continuo devendo a subida ao costão de Itacoatiara.

À Prof. Katia Monte Chiari Dantas por todo o apoio logístico com os resíduos e pela ajuda durante o experimento.

Ao pessoal do CESA, especialmente ao Paulinho e ao Marcelo por toda a ajuda e quebragalhos durante o experimento.

Aos funcionários do RECICLA-CT por todo o suporte com os resíduos. A ajuda de vocês foi essencial neste projeto.

À Maria Cristina Treitler Paixão e a todos do LEMA pela ajuda inestimável nas análises de amostras e por estarem sempre tão preocupadas com os caminhos da nossa pesquisa

À Ann Vellesalu, a mais brasileira dentre as estonianas, por vir de tão longe e me apoiar durante este tempo.

À Thaís Stilck, Fernando Brancoli, Daniel Brancoli e Jurgen Stilck, por me aturarem e fingirem que estão interessados em resíduos e bactérias.

Ao professor Hans Björk, responsável pela cooperação entre a UFRJ e a Universidade de Borås por toda ajuda neste projeto.

Aos amigos que fiz no CESA, Monica Pertel, Daniel Minegatti, Eder Fares, Viviane e Francisco.

À Mariana Argento Nunes pela ajuda durante o experimento e pelas sempre salvadoras chaves.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da UFRJ, que se dedicaram a transmitir seus conhecimentos para que eu pudesse me tornar engenheiro.

Resumo

Digestores domésticos são uma solução interessante para atender às demandas de energia para cozinhar e iluminação, e ao mesmo tempo como forma de tratamento dos resíduos de cozinha gerados e do lodo de esgoto. O trabalho apresenta os resultados da investigação da co-digestão anaeróbia de lodo de esgoto e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU). O experimento ocorreu sob condições mesofílica, em operação semi-continua em um digestor têxtil de 2 m³. O digestor foi alimentado com uma mistura em proporção de 25% de FORSU e 75% de lodo de esgoto. Foram analisados para o experimento os seguintes parâmetros: composição e volume do biogás, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos totais fixos (STF), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK). A produção de gás obtida varou entre 0,15 - 0,58 em L/g SV destruído. Foram avaliados os custos associados à instalação do digestor com a finalidade de iluminação e gás para cozinhar em três cenários distintos. O trabalho apresenta ainda um resumo das principais tecnologias de digestão anaeróbia existentes.

Palavras-chaves: digestão anaeróbia, co-digestão, digestor, biogás

Abstract

Household digesters are an interesting solution to meet the demands of energy for cooking and lighting, and a treatment way for food waste and swage sludge. The paper presents the results of an investigation of the anaerobic codigestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). The experiment took place under mesophilic conditions, in semi-continuous operation in a 2m³ textile reactor. The reactor was fed with a mixture ratio of 25% OFMSW and 75% sewage sludge. In the experiment the following data were determined: composition and volume of biogas, total solids (TS), volatile solids (VS), total fixed solids (STF), total suspended solids (TSS), fixed suspended solids (SSF), suspended solids, volatile (VSS), chemical oxygen demand (COD), total Kjeldahl nitrogen (TKN). The obtained gas production ranged from 0,15 - 0.58 g / L VS destroyed. The costs associated with the installation of the digester for the purpose of lighting and cooking were evaluated for three different scenarios. The work also presents a summary of the existing technologies for anaerobic digestion.

Keywords: anaerobic digestion, co-digestion, household digesters, biogas

1 ÍNDICE

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1 Histórico da digestão anaeróbia.....	1
1.2 Co-digestão de lodos de esgoto e da fração orgânica resíduos sólidos urbanos	3
1.3 Formação do Biogás – O processo de digestão anaeróbia	3
1.3.1 Hidrólise.....	4
1.3.2 Acetogênese.....	5
1.3.3 Metanogênese	5
1.3.4 Composição do biogás	7
1.4 Descrição Geral do Processo de Digestão Anaeróbia.....	8
1.5 Condições para formação de biogás	10
1.5.1 Concentração de nutrientes	10
1.5.2 Taxa de Carga Orgânica (Organic Loading Rate).....	12
1.5.3 Mistura	12
1.5.4 Tempo de detenção hidráulica.....	13
1.5.5 pH	13
1.5.6 Temperatura.....	14
1.5.7 Inibidores.....	15
1.5.8 Produtividade, rendimento e taxa de degradação	16
2 PROCESSOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	17
2.1 Introdução.....	17
2.2 Digestores de Estágio Único	18
2.2.1 Digestor de Estágio Único e Digestão Úmida.....	18
2.2.2 Digestor de Estágio Único e Digestão Seca.....	20
2.3 Digestores de Estágio Múltiplo	22
2.3.1 Digestor de Estágio Múltiplo e Digestão Úmida.....	23
2.3.2 Digestor de Estágio Múltiplo e Digestão Seca.....	23
2.4 Digestor de Batelada	24
3 MODELOS COMERCIAIS DE DIGESTORES	25
3.1 Processo DRANCO	25

3.2	Processo KOMPOGAS	26
3.3	Processo VALORGA.....	28
3.4	Processo BIOCEL.....	30
3.5	Processo SEBAC	31
3.6	Processo BTA.....	32
3.7	Processo WAASA	34
3.8	Processo Linde-BRV	36
3.9	Processo Linde-KCA	37
4	UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	40
4.1	Impurezas e purificação do biogás	40
4.1.1	Gás carbônico	40
4.1.2	Água.....	41
4.1.3	Sulfeto de hidrogênio	41
4.1.4	Amônia.....	42
4.1.5	Oxigênio e nitrogênio	42
4.1.6	Compostos orgânicos voláteis	43
4.2	Utilização e qualidade do biogás	43
4.2.1	Injeção de biometano em redes de gás natural	45
4.2.2	Geração combinada de calor e energia elétrica	45
4.2.3	Célula combustível	46
4.2.4	Motores Stirling	46
4.2.5	Turbinas a gás.....	47
4.2.6	Microturbinas a gás.....	47
5	EXPERIMENTO	48
5.1	Objetivos	48
5.2	Digestor	48
5.3	Inóculo	50
5.4	Configuração Experimental.....	50
5.5	Análises	54
5.6	Resultado e discussão	57
5.7	Problemas no digestor.....	63
6	Análise econômica.....	66
6.1	Metodologia.....	66

6.1.1	O Método do Valor Presente Líquido	70
6.1.2	Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)	71
6.1.3	Período de Retorno Descontado	71
6.2	Resultados	72
6.2.1	Biogás para cozinhar	72
6.2.2	Biogás para iluminação	77
6.2.3	Biogás para geração de energia elétrica	79
8	Conclusão	81
9	BIBLIOGRAFIA	83

2 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Digestão anaeróbia.	7
Figura 2 - Descrição geral do processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. .	10
Figura 3- Digestor de estágio único	19
Figura 4 - Digestor de Estágio Único e Digestão Seca VALORGA	21
Figura 5 - Digestores de Estágio Múltiplo. BTA process.	23
Figura 6 - Digestores de batelada	24
Figura 7 - Digestor DRANCO	26
Figura 8 - Esquema do processo KOMPOGAS	28
Figura 9 - Unidade KOMPOGAS.....	28
Figura 10 - Unidade de digestão VALORGA	30
Figura 11 - Processo SEBAC	32
Figura 12 - Diagrama do processo BTA	34
Figura 13 - Processo WAASA.....	36
Figura 14 - Processo Linde-BRV	37
Figura 15 - Processo Linde-KCA	38
Figura 16 - Rotas de utilização do biogás e do digerido	44
Figura 17 - Configuração experimental	49
Figura 18 – Digestores têxteis em operação no CESA	50
Figura 19 - Transporte dos resíduos via RECICLA-CT	52
Figura 20 - Contaminantes presentes no resíduo	53
Figura 21 - Evolução da produção diária de biogás e carga orgânica aplicada ao digestor	57
Figura 22 - Taxa de produção de biogás por tempo	59
Figura 23 - Porcentagem de degradação de Sólidos voláteis	60
Figura 24 - Volume de biogás produzido por massa de sólidos voláteis aplicados e destruídos	61
Figura 25- Evolução do conteúdo percentual em volume de CH ₄ e CO ₂ no biogás produzido.....	62
Figura 26 - Vazamento no digestor 2.....	64
Figura 27 - Detalhe do rompimento da tubulação do reator 2.....	64
Figura 28 - Detalhe do vazamento no digestor 1	65

3 ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e propriedades gerais do biogás proveniente de plantas de digestão anaeróbia	8
Tabela 2 - Concentrações adequadas de micronutrientes.....	11
Tabela 3 - Reatores Comerciais Fonte: elaboração própria.....	39
Tabela 4 - Parâmetros operacionais	54
Tabela 5 - Propriedades da alimentação.....	55
Tabela 6 - Resultados analíticos da alimentação	56
Tabela 7 - Resultados analíticos do efluente	58
Tabela 8 - Porcentagem de utilização de diferentes combustíveis para cozinhar.	67
Tabela 9 - Propriedades do biogás para o cenário de estudo.....	68
Tabela 10 - Utilização de GLP para diferentes tamanhos familiares.....	73
Tabela 11 - Consumo de biogás para diferentes fogões.	74
Tabela 12 - Custos do sistema de biogás para cozinhar.....	75
Tabela 13 - Economia e consumo para o cenário 1	75
Tabela 14 - Economia e consumo para o cenário 2	76
Tabela 15 - Economia e consumo para o cenário 3	76
Tabela 16 - Parâmetros econômicos	76
Tabela 17 - Custos de instalação do sistema de iluminação a biogás.....	77
Tabela 18 - Parâmetros para cenário 1 de iluminação	78
Tabela 19 - Parâmetros para o cenário 2 de iluminação	78
Tabela 20 - Parâmetros para o cenário 3 de iluminação	78
Tabela 21 - Parâmetros de análise econômica.....	79

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Histórico da digestão anaeróbia

A produção em escala industrial de biogás iniciou com uma planta de digestão anaeróbia Índia, por volta de 1860. Mais tarde, no ano de 1895, a Inglaterra iniciou a sua produção em estações de tratamento de esgoto onde gás produzido era utilizado em luminárias públicas. (Verma, 2002)

Anterior à produção em escala industrial, evidências históricas mostram a utilização do biogás na Assíria no século X AC para aquecimento de água para banho e na Pérsia no século XVI. (Verma, 2002)

Pesquisas científicas relacionadas ao tema se iniciaram no século XVII, quando o belga Jan Baptista Van Helmont relacionou a decomposição do material orgânico com a geração de gases inflamáveis, reafirmada posteriormente pelo italiano Count Alessandro Volta que estabeleceu que a quantidade de material orgânico decomposto estava relacionada à quantidade de gás inflamável produzido. Em 1930, Buswell identificou as bactérias anaeróbias e as condições necessárias para a geração de metano. (Verma, 2002)

A partir desta época diferentes técnicas mais sofisticadas de digestão anaeróbia se estabeleceram, como consequência de entendimento maior da operação do sistema. Nesta época a maior utilização da técnica era para a estabilização do lodo do sistema de esgotos das cidades em tanques fechados e por vezes com sistemas de aquecimento de forma a otimizar o processo. Porém, devido ao baixo custo do petróleo comparado ao metano, os sistemas caíram em desuso e só ressurgiram na Segunda Guerra Mundial devido à baixa disponibilidade do petróleo e consequente aumento nos preços. (Verma, 2002)

Posteriormente, a tecnologia de digestão anaeróbia continuou a se desenvolver principalmente em países como a China e a Índia, onde houve um aumento no número de digestores para a geração de energia elétrica descentralizada. Na década de 70, com mais uma crise energética global, a tecnologia de digestão anaeróbia retomou seu espaço nos países desenvolvidos para a geração de energia elétrica. Nos países em desenvolvimento que já adotavam a tecnologia, a crise fez com que o número de equipamentos instalados aumentasse ainda mais, principalmente os digestores comunitários para resíduos diversos que geravam energia elétrica para vilas e comunidades. Outros países como EUA, Rússia e países europeus focaram a pesquisa na digestão de esterco animal. Este início da retomada do interesse na tecnologia foi marcado por inúmeras falhas, estimando-se que em pelo menos metade dos projetos houve falhas no sistema.

A digestão anaeróbia se estabeleceu neste período como uma forma de estabilização de matéria orgânica além da produção de biogás, por ser uma tecnologia barata com índices satisfatórios de diminuição na demanda bioquímica de oxigênio, na recuperação de nutrientes e no tratamento do lodo dos esgotos gerados nas cidades.

A partir da década de 90 ocorreu um aumento significativo no número de plantas de digestão anaeróbia. Na primeira metade da década de 90, parte destas plantas destinadas ao tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos municipais. Neste período ocorreu também uma tendência de aumento na capacidade de tratamento das plantas, segundo OWS (1998), entre 1990 e 1995 a capacidade instalada aumentou a uma taxa de 30 kt/ano e entre 1996 e 2000 esta taxa foi de 150 kt/ano.

1.2 Co-digestão de lodos de esgoto e da fração orgânica resíduos sólidos urbanos

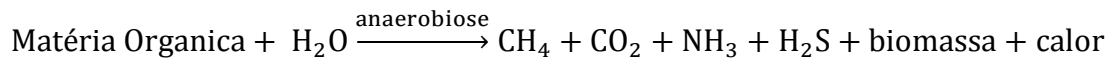
O lodo de esgoto é caracterizado por um elevado teor de compostos orgânicos. Portanto, antes da disposição final do lodo em aterro ou aplicação agrícola, este deve ser submetido à estabilização e higienização. Um método possível de estabilização e higienização envolve a digestão anaeróbia destes compostos. Resíduos sólidos urbanos (RSU) contêm uma fração orgânica facilmente biodegradável. A gestão convencional de resíduos sólidos urbanos também possui como principal local de disposição final os aterros, sejam eles controlados ou não. A co-digestão anaeróbia do lodo de esgoto com a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) é especialmente atraente neste contexto como uma possibilidade de aumentar o rendimento do processo de digestão anaeróbia. De acordo com Poggi-Varaldo & Oleszkiewicz (1992), as vantagens do processo de co-digestão incluem: diluição de potenciais compostos tóxicos, melhor equilíbrio de nutrientes através da suplementação de nutrientes que existam em baixa quantidade em um dos substratos, os efeitos sinérgicos de micro-organismos, aumento da carga de matéria orgânica biodegradável e melhores taxas de produção de biogás.

As principais desvantagens relacionadas à co-digestão estão no custo de transporte de diferentes substratos para uma mesma central. Existe ainda o problema de legislação, pois em muitos países existem entraves legais que impossibilitam a co-digestão de substratos.

1.3 Formação do Biogás – O processo de digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é um processo bioquímico de degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio e é realizado por um consórcio de micro-organismos. Neste processo ocorre a conversão da matéria orgânica principalmente em metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). A matéria orgânica degradada no fim do processo é rica em nutrientes e pode ser utilizada como fertilizante. Pode-se representar a digestão

anaeróbia pela seguinte reação: (Kelleher, Leahy, Henihan, O'dweyer, Sutton, & Leahy, 2002)



(1)

A composição do biogás proveniente da decomposição de resíduos orgânicos corresponde, em geral, a 55-70% de metano, 30-45% de dióxido de carbono, e 2-4 ppm de sulfeto de hidrogênio (Verma, 2002)

A digestão anaeróbia ocorre em três fases que ocorrem simultaneamente dentro do digestor. O primeiro grupo de bactérias secretam enzimas que degradam através da hidrólise carboidratos, proteínas e lipídios em compostos orgânicos mais simples. O segundo grupo, os das bactérias acetogênicas convertem estes compostos orgânicos mais simples em CO₂, H₂ e ácido acético. Na última fase, a metanogênese o metano é produzido através da conversão do CO₂ e do H₂. (Verma, 2002)

Cada fase é realizada por grupos de micro-organismos distintos que apresentam diferentes características de resistência e necessidade quanto à disponibilidade de nutrientes, pH, variações de temperatura e velocidade de reprodução (Chernicharo, 1997)

1.3.1 Hidrólise

Nesta primeira etapa, também conhecida como liquefação, bactérias fermentativas solubilizam a matéria orgânica, convertendo compostos orgânicos complexos e insolúveis em monômeros simples. Nesta etapa moléculas como, por exemplo, a celulose é convertida em açúcares ou álcoois e proteínas em peptídeos ou aminoácidos através de enzimas como amilase, celulase, protease e lipase (Verma, 2002).

A velocidade com que estas reações ocorrem depende da superfície de contato entre as enzimas e o substrato e a velocidade destas reações pode ser limitante no processo global. Algumas plantas industriais superaram este problema com a utilização de produtos químicos que aumentam as taxas de hidrólise. (Verma, 2002)

O processo pode ser resumido nestas reações:

Lipídios → Ácidos Graxos (2)

Polissacarídeos → Monossacarídeos (3)

Proteínas → Aminoácidos (4)

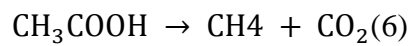
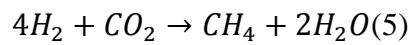
1.3.2 Acetogênese

Na segunda fase do processo ocorre a conversão dos produtos da hidrólise em ácidos simples, dióxido de carbono e hidrogênio. Os principais produtos são o acetato (CH_3COOH), propionato ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$), butirato ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) e etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Ocorre ainda a produção de amônia e H_2S .

1.3.3 Metanogênese

No último estágio do processo, o metano é gerado por arqueas metanogênicas através da conversão do dióxido de carbono, acetato e hidrogênio. A produção de metano pode ocorrer através de duas principais vias que se diferenciam pelo substrato utilizado. Um grupo das arqueas metanogênicas denominado hidrogenotróficas utilizam o hidrogênio e o carbono proveniente do dióxido de carbono para formar o metano. A outra via é realizada pelo subgrupo das acetoclásticas que utilizam o acetato como fonte para a produção de metano.

As duas equações a seguir expressam estas vias. A reação expressa em 6 é responsável por cerca de 70% da produção de metano, nesta equação o grupo metil é reduzido a metano e o grupo carboxílico é oxidado em gás carbônico.



A Figura 1 mostra esquematicamente este processo.

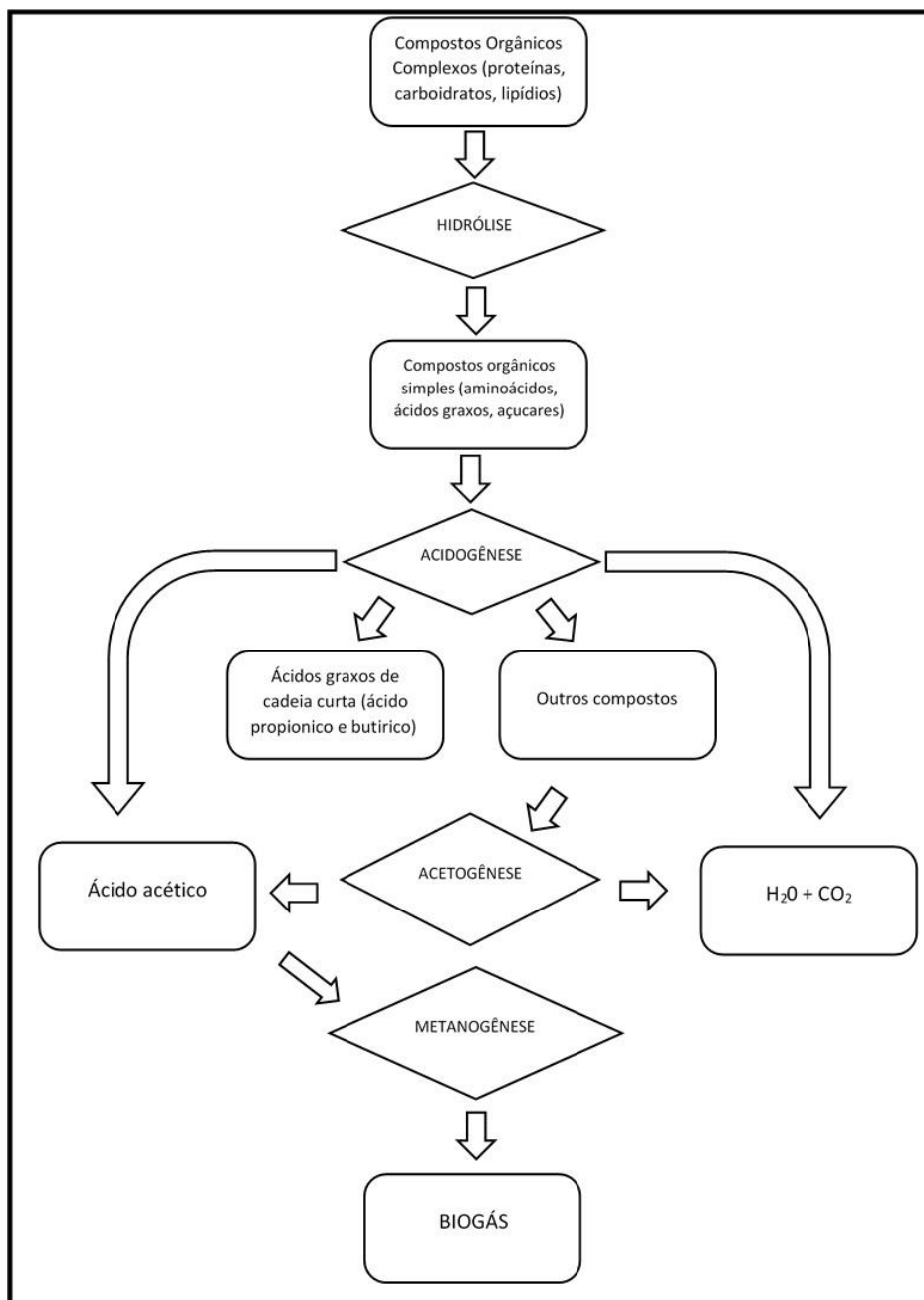


Figura 1 - Digestão anaeróbia. Fonte: adaptado de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2010)

1.3.4 Composição do biogás

A Tabela 1 mostra a composição do biogás proveniente de plantas de biogás em fazendas que consomem resíduos como esterco e proveniente de centrais de produção de biogás que consomem fração orgânica do resíduo sólido municipal.

Tabela 1 - Composição e propriedades gerais do biogás proveniente de plantas de digestão anaeróbia

CH ₄	55-70	(% vol.)
CO ₂	30-45	(% vol.)
N ₂	<1-2	(% vol.)
O ₂	<1	(% vol.)
H ₂ S	0 - 2000	(ppm)
NH ₃	100	(ppm)
Compostos halogenados	<0,25	(mg/m ³)
Siloxanos	<0,5	(mg/m ³)
Índice Wobbe	24-33	
Poder calorífico	19,7-25,1	(MJ/Nm ³)

Fonte: adaptado de (Kaparaju & Rintala, 2013)

1.4 Descrição Geral do Processo de Digestão Anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro etapas: pré-tratamento do resíduo, digestão, recuperação do gás e tratamento do efluente.

O pré-tratamento é necessário para se obter uma matéria-prima homogênea. É necessário também que se retire qualquer tipo de material inibidor, ou não degradável como plástico e metais. Deve-se ainda triturar os resíduos. Usualmente em plantas de digestão anaeróbia os resíduos são provenientes de coleta seletiva ou são separados mecanicamente in loco. Resíduos separados na planta são geralmente mais contaminados o que pode prejudicar a operação. (Verma, 2002)

A digestão anaeróbia pode se dar de diferentes maneiras, com alterações nos parâmetros operacionais como o substrato, temperatura dentro do digestor, teor de sólidos, dentre outros. Estes fatores são determinantes quantitativamente e qualitativamente no biogás produzido.

Os resíduos podem ser diluídos em água, lodo de esgotos, pode haver a recirculação do próprio efluente do digestor ou ainda o resíduo pode não passar por nenhum tipo de diluição. A diluição e formação da massa homogênea de resíduo podem ser feita dentro do digestor ou em uma unidade separada.

O biogás produzido deve ser coletado e armazenado. Deverá ainda passar por um tratamento com a finalidade de eliminar contaminantes presentes, como umidade, gás carbônico, gás sulfídrico, dentre outros. O nível de tratamento do gás é função da sua utilização. A Figura 2 mostra o esquema geral do processo.

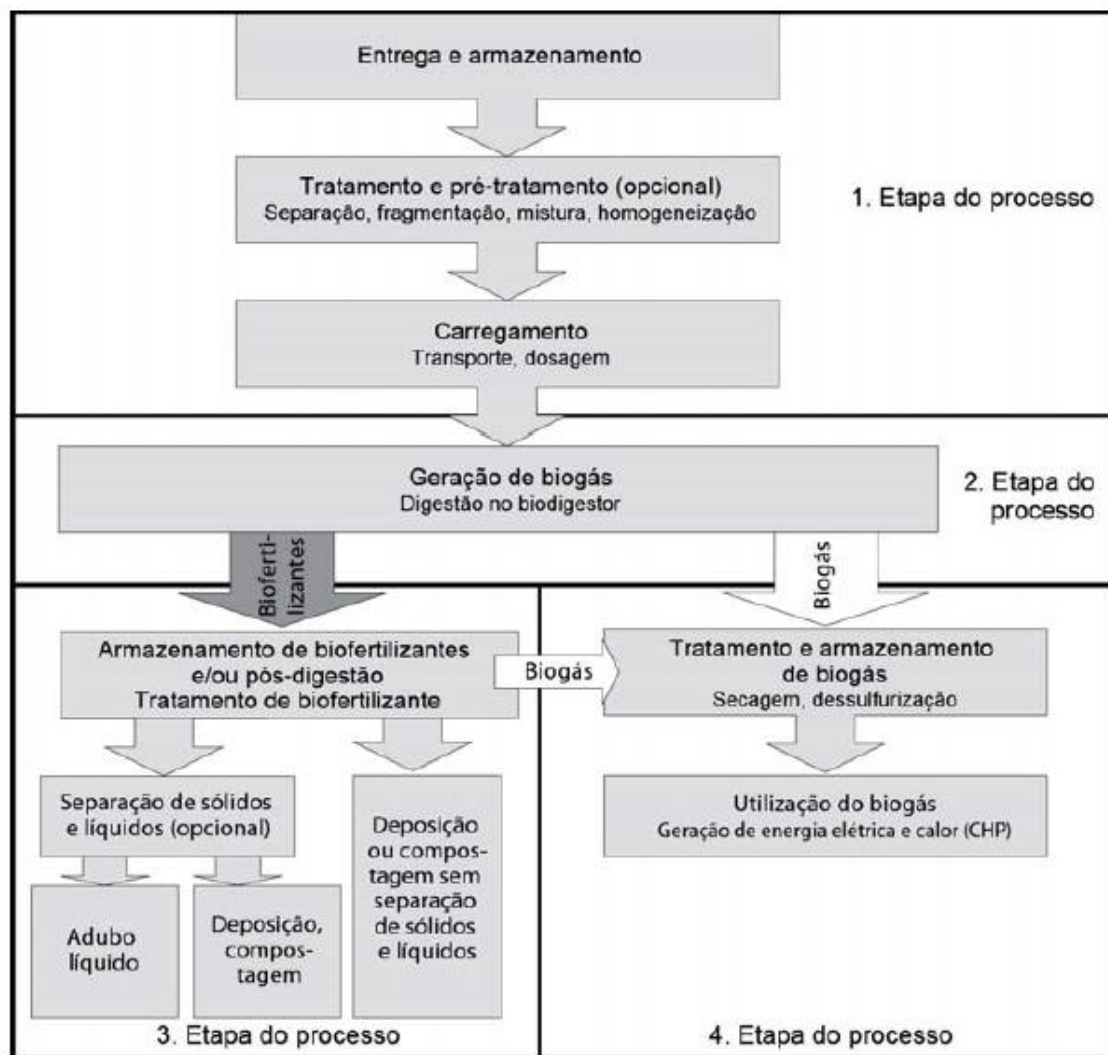


Figura 2 - Descrição geral do processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Fonte: (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2010)

1.5 Condições para formação de biogás

1.5.1 Concentração de nutrientes

Nutrientes são necessários para a estabilidade do sistema e para o desenvolvimento das comunidades bacterianas, principalmente das metanogênicas. Portanto macro elementos como carbono, nitrogênio, potássio, fósforo e micronutrientes como vitaminas, minerais e aminoácidos são indispensáveis. Desta forma o conhecimento da composição química do resíduo utilizado é importante na operação do sistema.

O carbono e o nitrogênio estão entre os elementos mais importantes do processo. O carbono é parte formadora do biogás e o nitrogênio é necessário na formação de enzimas envolvidas no metabolismo das bactérias. Daí a necessidade de estabelecer uma correta relação C/N. Quando a fração de carbono é muito maior que a de nitrogênio a atividade metabólica é desacelerada e não ocorre a degradação completa do carbono. Da mesma forma, quando a relação entre C/N é muito baixa, a abundância de nitrogênio pode levar a geração de amônia que é inibidora do crescimento das bactérias. A faixa adequada da relação C/N é entre 10 – 30. (Weiland, 2001)

A quantidade de metano possível de ser produzida por um substrato é determinada pelo seu teor de proteínas, gorduras e carboidratos presentes. Diferentes fontes bibliográficas recomendam diferentes concentrações dos micronutrientes. A tabela 2 mostra as faixas de valores encontradas em diversos artigos da literatura.

Tabela 2 - Concentrações adequadas de micronutrientes. Fonte: adaptado de (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2010)

Micronutriente	Faixa de concentração (mg/l)
Co	0,003 - 10
Ni	0,005 - 15
Se	0,008 - 0,08
Mo	0,005 - 0,2
Mn	0,005 - 50
Fe	0,1 - 10

1.5.2 Taxa de Carga Orgânica (Organic Loading Rate)

A taxa de carga orgânica é um parâmetro importante na operação de digestores anaeróbicos e indica a massa de resíduos orgânicos por unidade de volume do digestor por unidade de tempo que é colocada no digestor. A taxa de carga orgânica define os possíveis equipamentos eletromecânicos que compõe o digestor, como bombas e agitadores e é importante para as bactérias envolvidas no processo.

A taxa de produção de biogás é altamente dependente deste parâmetro. Existe um valor ótimo para cada tipo de planta de digestão anaeróbia que proporciona uma máxima produção de biogás. A partir deste valor aumentos na taxa de carga orgânica não ocasionam um aumento proporcional na produção de gás. (Monharo, 1974)

Cargas orgânicas muito elevadas podem levar a acidificação do meio, podendo ocasionar a parada na produção de biogás. Esta queda no pH do meio se deve ao aumento na produção de ácidos voláteis pelas bactérias acidogênicas e consequente morte das arqueas metanogênicas, que não toleram a valores de pH muito inferiores a 6,8. (Souza, 2002)

A taxa de carga orgânica é expressa usualmente em $[kgVS/m^3 * d]$ ou em $[kgDQO/m^3 * d]$

1.5.3 Mistura

A mistura dentro do digestor evita a formação de espuma e de gradientes de temperatura dentro do digestor. Garante ainda o contato do resíduo orgânico com os micro-organismos. A mistura, porém não deve perturbar os micro-organismos do digestor, sendo preferível a mistura lenta.

A necessidade de um equipamento e a potência necessária varia de acordo com o digestor e o teor de sólidos.

1.5.4 Tempo de detenção hidráulica

O tempo de detenção hidráulica (TDH) corresponde ao tempo em que o resíduo orgânico permanece no digestor. Este parâmetro varia dependendo do tipo de resíduo e de outros fatores como a temperatura. Em países tropicais como o Brasil este tempo varia entre 30 e 50 dias enquanto em países frios o tempo de retenção pode ser maior que 100 dias.

TDH muito curtos podem causar a perda das bactérias por lavagem e uma menor degradação do resíduo e conseqüentemente uma menor produção de biogás. Tempos muito longos requerem um maior volume do digestor e conseqüentemente um maior investimento. (Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, & Sangeeta , 2004)

$$\text{HRT} = \frac{\text{Volume do digestor}}{\text{Volume do substrato adicionado diariamente}}$$

É importante notar que o tempo de detenção hidráulica e carga orgânica são dois parâmetros que estão relacionados entre si. Em um mesmo volume, uma maior carga orgânica leva a menores tempos de detenção hidráulica.

1.5.5 pH

O pH é um índice da acidez ou alcalinidade da mistura no interior do digestor. Os diferentes grupos de bactérias envolvidos no processo de digestão anaeróbia possuem diferentes valores ótimos de pH para seu desenvolvimento. Bactérias hidrolíticas e acidogênicas possuem o valor ótimo entre 5,2 – 6,3, porém são capazes de atuar em faixas diferentes de pH sem que sua atividade diminua significativamente. (Weiland, 2001)

Os valores limites de pH são definidos pelas bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas que necessitam que este valor seja ser mantido na entre 6 – 8, preferencialmente na faixa de 6,8 – 7,2 onde a digestão é otimizada (Mazzucchi, 1980)

Digestores de um estágio são especialmente críticos neste ponto e seu pH deve ser mantido na faixa de atuação das arqueas metanogênicas. Valores acima ou abaixo desta faixa diminuem a produção de biogás e em casos extremos a produção pode ser interrompida. Segundo Jain e Mittiasson (Jain & Mattiasson, 1998), a geração de metano pode ser reduzida em até 75% para operação com pH abaixo de 5.

É importante notar que o sistema consegue se estabilizar automaticamente até certo limite. Em caso de uma taxa de carga orgânica muito alta ou outro motivo que leve a acidificação do meio, a variação no pH se reduz devido ao efeito tampão da amônia e do carbonato. (Mazzucchi, 1980) (Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, & Sangeeta, 2004)

1.5.6 Temperatura

A temperatura dentro do digestor anaeróbio é um parâmetro crucial na produção de biogás. Temperaturas altas agilizam o processo de fermentação, diminuindo, portanto o tempo de detenção hidráulica. Por outro lado a manutenção de temperaturas altas em um digestor gera custos ao processo.

Existem dois principais grupos de arqueas metanogênicas e estes grupos operam em diferentes intervalos de temperaturas: mesofílica, entre 30 – 40°C, e a termofílica, entre 50-60°C.

Usinas geralmente operam na faixa mesofílica, pois o rendimento é relativamente elevado e o sistema é satisfatoriamente estável. Culturas termofílicas são utilizadas quando há necessidade da higienização do substrato ou quando o substrato utilizado possui naturalmente temperaturas elevadas, como águas residuárias. Como a temperatura é maior as reações químicas ocorrem mais rapidamente e a taxa de degradação é maior. Os pontos negativos são a necessidade de um maior uso de energia para manter a temperatura durante a digestão e uma menor estabilidade do sistema. (Weiland, 2001)

Existe ainda outro grupo das bactérias psicrófilas que atuam em faixas menores de temperatura, abaixo de 30°C, porém as taxas de degradação da matéria orgânica são lentas e a produção de biogás é reduzida, o que usualmente impossibilita a operação em escala comercial. (Zennaki, Zadi, Lamini, & Aubinear, 1996)

Digestores com aquecimento que operam na faixa termofílica de temperatura apresentam maior eficiência na degradação da matéria orgânica e produzem quantidades maiores de biogás com tempos de retenção menor.

Garba (Garba, 1996) observou que as arqueas metanogênicas são sensíveis a variações bruscas na temperatura, portanto mudanças na temperatura de operação devem ser evitadas. Porém estas bactérias se adaptam a diferentes temperaturas desde que a variação seja lenta.

As bactérias no processo de digestão anaeróbia geram calor que, usualmente, é suficiente para a manutenção das mesmas. Para evitar a variação brusca na temperatura é comum os digestores serem semienterrados ou enterrados.

1.5.7 Inibidores

A introdução de substâncias inibidoras no sistema podem levar a morte das bactérias envolvidas no processo, desacelerar a taxa de degradação da matéria orgânica ou até mesmo interromper a produção de biogás.

Substâncias desinfetantes, bactericidas, herbicidas, sais e metais pesados mesmo em pequenas quantidades podem comprometer o processo. Grandes cargas orgânicas também são inibidoras no processo. Antibióticos geralmente entram no sistema via adubos orgânicos e através de gordura animal.

Definir concentrações máximas para nutrientes ou inibidores é difícil pois as bactérias possuem um poder elevado de adaptação.

1.5.8 Produtividade, rendimento e taxa de degradação

Estes parâmetros descrevem o desempenho do digestor. A produtividade estabelece uma relação entre o volume do digestor e o volume de metano produzido.

$$P_{(CH_4)} = \frac{V_{(CH_4)}}{V_R} [Nm^3 * m^{-3} * d^{-1}]$$

O rendimento pode se referir tanto à produção de biogás quanto à produção de metano a partir do substrato utilizado.

$$A_{(CH_4)} = \frac{V_{(CH_4)}}{m_{mos}} [Nm^3 * [t^{-1}]], \text{ onde}$$

$A_{(CH_4)}$ Rendimento de metano

$V_{(CH_4)}$ = produção de metano [Nm^3/d]

m_{mos} = matéria orgânica seca introduzida [t/d]

A taxa de degradação está relacionada à eficiência em que o substrato é degradado. A taxa de degradação pode ser determinada com base na matéria orgânica seca (MOS) ou na demanda química de oxigênio (DQO).

$$\eta_{MOS} = \frac{MOS_{sub} * m_{in} - (MOS_{sa} * m_{sa})}{MOS_{sub} * m_{in}} * 100 [\%]$$

Onde:

MOS_{sub}

= teor de matéria orgânica seca da matéria fresca introduzida [kg/t_{MF}]

m_{in} = massa da matéria fresca introduzida [t]

MOS_{sa} = teor de matéria orgânica seca no efluente do biodigestor $\left[\frac{kg}{t_{MF}} \right]$

m_{sa} = massa dos biofertilizantes [t]

2 PROCESSOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

2.1 Introdução

O processo de digestão anaeróbia para a produção de biogás pode ser feito por meio de diferentes técnicas que se diferenciam por parâmetros como teor de matéria seca nos substratos, tipo de alimentação, número de fases no processo e temperatura em que o processo ocorre.

Os digestores podem ser inicialmente classificados como:

- De estágio único
- De estágios múltiplos
- De batelada

Estas categorias poderão ser classificadas ainda de acordo com o teor de matéria seca nos substratos. A digestão úmida contém menos de 10% de sólidos totais, ou seja, os substratos são bombeáveis. A digestão seca contém entre 20 e 40% de sólidos totais no substrato, o que permite em tese o seu empilhamento. Estes limites não devem ser encarados de forma dogmática, de forma que os valores limites variam de acordo com o substrato. Substratos como restos de alimentos dispersos são bombeáveis até teores de 20% de massa seca devido ao elevado teor de substâncias solúveis e sua distribuição de partículas finamente dispersas e substratos como cascas de frutas e legumes são

empilháveis com teor de 10 a 20% de sólidos totais. (Verma, 2002) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2010)

Portanto os sistemas de estágio único ou múltiplo podem ser caracterizados como úmido ou seco.

2.2 Digestores de Estágio Único

Digestores de Estágio único utilizam um digestor tanto para a fase acidogênica quanto para a fase metanogênica.

2.2.1 Digestor de Estágio Único e Digestão Úmida

Este tipo de processo é largamente utilizado pela sua simplicidade. Sua utilização é feita há décadas principalmente para a estabilização do lodo de estações de tratamento de esgoto. O digestor mais utilizado nesta técnica é o Digestor Perfeitamente Agitado, também conhecido pela sigla CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor). Neste processo a taxa de alimentação é igual a taxa do efluente removido.

Digestores de estágio único e digestão seca possuem a vantagem de ser simples, um desenvolvimento tecnológico que vem sendo apurado há décadas e a utilização de equipamentos mais baratos no tratamento do lodo efluente.

Os principais problemas são a utilização de grande volume de água, que resulta em um maior volume do digestor e do efluente a ser tratado. Como consequência os custos de investimento e operação são maiores pois existe uma maior necessidade de energia tanto para aquecer o digestor, se operado em temperatura termofílica, quanto para secagem do efluente. Outro problema é a necessidade de pré-tratamento para a remoção de partículas grossas e contaminantes pesados. Este pré-tratamento em geral resulta na remoção de 15 a 25% dos sólidos voláteis.

Este sistema possui o problema de sedimentação das frações mais pesadas dos substratos e a formação de escória nas camadas superiores. Isto indica uma reação não homogênea. A camada sedimentada de partículas pesadas pode danificar os equipamentos de mistura, enquanto as camadas superiores impedem uma mistura eficaz dos resíduos. Desta forma, se faz necessária a remoção periódica da escória e das partículas sedimentadas. É possível ainda a ocorrência de curtos-circuitos, onde uma fração da alimentação pode passar pelo digestor com um tempo de detenção menor do que o de operação, resultando em uma menor degradação e conseqüentemente uma menor produção do biogás. O resíduo não degradado poderá ser digerido posteriormente com liberação de metano para a atmosfera. (Verma, 2002)

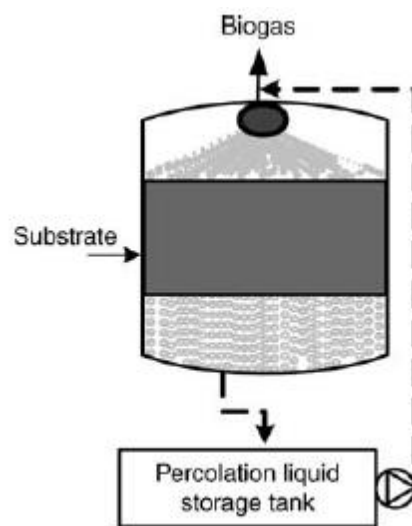


Figura 3- Digestor de estágio único

Digestores úmidos de estágio único apesar de aparentarem simplicidade, demanda uma serie de aspectos de ordem técnica que devem ser levados em conta para garantir uma operação eficiente. O pré-tratamento que possui a finalidade de diminuir o tamanho das partículas do resíduo e eliminar possíveis contaminantes pode ser muito complexo. Este processo pode acarretar na perda de sólidos voláteis do resíduo e demanda uma serie de equipamentos na planta.

Podem existir problemas ainda durante a digestão anaeróbia com a formação de espuma no topo do digestor e a sedimentação dos resíduos mais pesados para o fundo. A maior parte dos digestores portanto é dotado de algum equipamento de mistura mecânica que evita a formação destas fases distintas. A utilização destes equipamentos consome energia do processo. Outro problema comum que ocorre dentro dos digestores são os chamados curtos-circuitos, que ocorre quando o resíduo encontra um caminho preferencial e sai do digestor com um tempo de detenção hidráulica menor que o estabelecido em projeto. Este fenômeno gera problemas não apenas na taxa de produção de biogás como pode causar problemas na eliminação de patógenos. Podendo ser necessário portanto processos que garantam a eliminação de tais organismos.

Economicamente, a digestão úmida possui a vantagem da possibilidade de uso de equipamentos mais baratos como bombas e tubulações, se comparados com os equipamentos necessários para o transporte de resíduos secos. Por outro lado, os custos de investimento no digestor são maiores, já que o volume reacional é maior e existe ainda a necessidade de equipamentos de mistura.

O consumo de água é também maior comparado a outros processos por via seca, e isto acarreta em custos na operação de digestão e na secagem do efluente e nas estruturas relacionadas. Quando existe a necessidade de aquecimento do digestor, digestores de via úmida consomem uma quantidade maior já que possuem um volume maior.

2.2.2 Digestor de Estágio Único e Digestão Seca

A tecnologia de digestores em estágio único e digestão seca se desenvolveu na década de 80 com a possibilidade de maiores rendimentos na produção de biogás em comparação aos digestores com substratos diluídos.

É necessária a utilização de equipamentos mais robustos para o manuseio e transporte dos resíduos secos, como bombas e correias transportadoras. O pré-tratamento do resíduo, por

outro lado, é mais simples do que os de digestores em estágio único e digestão úmida, pois o sistema é capaz de suportar a presença de impurezas como pedras, madeira e vidro.

Este processo não necessita da mistura completa e em geral são utilizados digestores do tipo pistão. Digestores do tipo pistão são digestores cilíndricos onde os substratos são digeridos ao longo do digestor. Desta forma, este processo não requer componentes mecânicos além do digestor.

Normalmente as taxas de carga orgânica e a produção de biogás são maiores para este tipo de processo comparado com digestores de estágio único e digestão úmida. O motivo da produção de biogás ser maior é que não existe a necessidade de retirada da camada sedimentada nem da escória. Outra diferença marcante entre os dois sistemas é a quantidade de água utilizada, sendo muito menor no caso da digestão seca. (Verma, 2002)



Figura 4 - Digestor de Estágio Único e Digestão Seca VALORGA

Nestes tipos de digestores o custo de investimento tende a ser menor, pois o volume do digestor é menor comparativamente com os digestores por via úmida. Por outro lado, a

necessidade de equipamentos mais robustos para o transporte deste resíduo, como bombas e tubulações torna o custo total do projeto muito parecido com os digestores de via úmida. A operação do sistema é mais barata, tendo em vista que o consumo de energia para aquecimento é menor. Outra vantagem está na utilização de um menor volume de água, que acarreta em menores custos de operação e de secagem do efluente digerido.

2.3 Digestores de Estágio Múltiplo

Digestores de estágio múltiplo usualmente utilizam dois digestores. O primeiro é utilizado para as etapas de hidrólise, liquefação e acidogênese, enquanto o segundo digestor é compreende a etapa de metanogênese. O objetivo deste processo é melhorar a digestão anaeróbia e a flexibilidade para aperfeiçoar as fases do processo separadamente, pois cada fase possui condições ótimas e limitantes.

No primeiro digestor a taxa em que a reação ocorre é limitada pela hidrólise da celulose e no segundo pela taxa de crescimento das bactérias. Em digestores de múltiplos estágios é possível, por exemplo, aumentar a taxa de hidrólise estabelecendo um ambiente em condições microaerofílica, onde uma pequena quantidade de oxigênio é adicionada no meio. No segundo digestor é possível aprimorar a produção de metano através de digestores que promovam um tempo de detenção maior da biomassa, uma maior densidade de bactérias ou estabelecendo um meio suporte para as bactérias. (Verma, 2002)

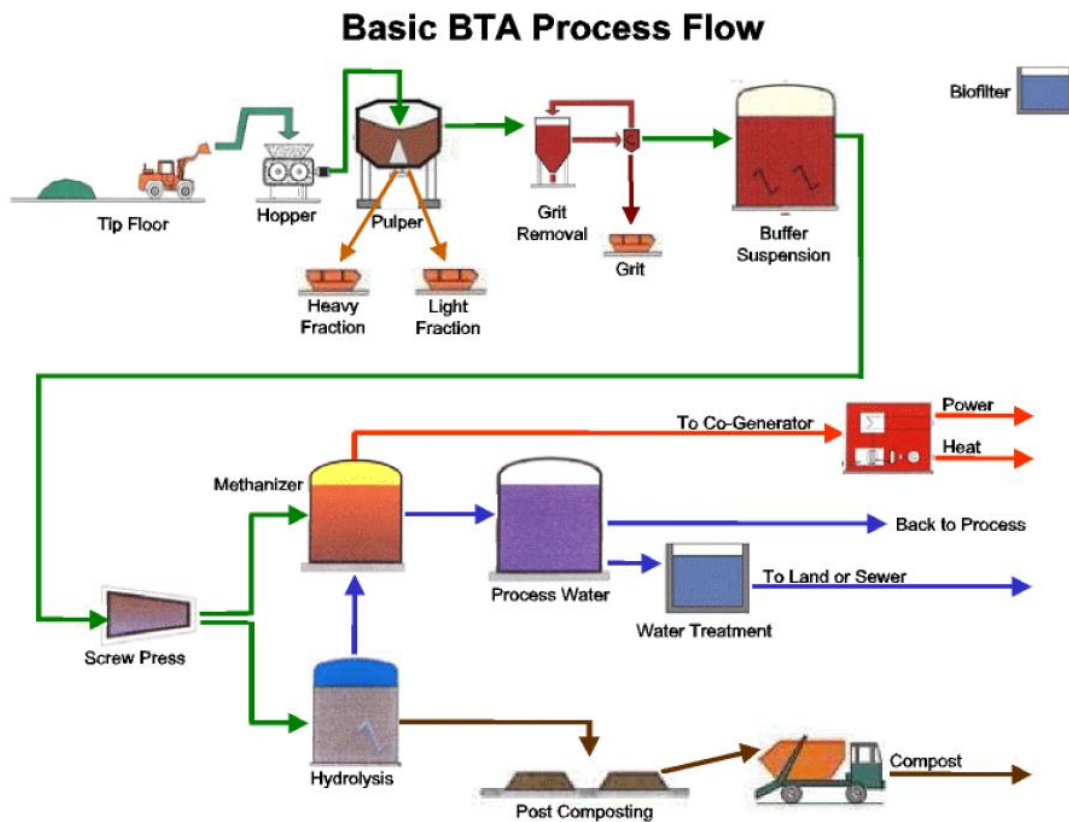


Figura 5 - Digestores de Estágio Múltiplo. BTA process. Fonte: www.canadacomposting.com

2.3.1 Digestor de Estágio Múltiplo e Digestão Úmida

Existem diferentes modelos comerciais de digestores de estágio múltiplo e digestão úmida e cada modelo possui características próprias. Usualmente o efluente do primeiro digestor é desidratado antes de ser utilizado no segundo digestor.

Possuem problemas semelhantes com os digestores de estágio único e digestão úmida, como curto circuito, formação de espuma e de camadas de material sedimentado e pré-tratamento caro. (Verma, 2002)

2.3.2 Digestor de Estágio Múltiplo e Digestão Seca

Alguns modelos de digestores de estágio múltiplo e digestão seca combinam um primeiro digestor para hidrólise e liquefação com um segundo digestor UASB com suportes fixos

para as bactérias. Em alguns casos é possível obter tempos de detenção hidráulica de uma semana. (Verma, 2002)

2.4 Digestor de Batelada

Digestores de batelada são digestores descontínuos, isto é, a produção de biogás ocorre durante um período e cessa para o descarte do material digerido e alimentação do digestor. Desta forma o processo consiste na alimentação do digestor, que é então hermeticamente selado e o substrato é digerido durante o tempo de detenção estipulado. No final deste período o digestor é descarregado e carregado novamente com novo substrato.

Existem três tipos de digestores a batelada: digestores de um estágio, digestores em sequência e o digestor anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, conhecido usualmente como UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

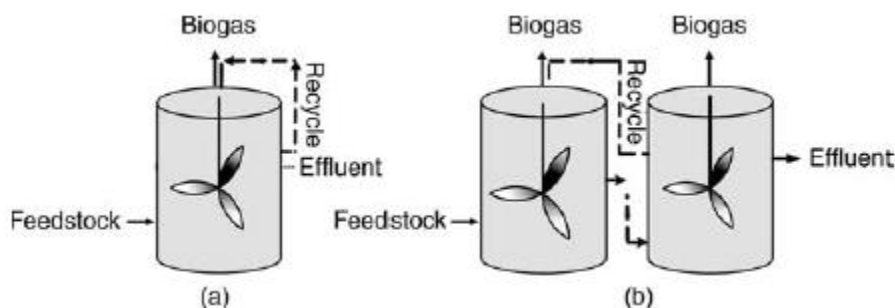


Figura 6 - Digestores de batelada

Digestores de um estágio envolvem a recirculação efluente para o topo do digestor.

Digestores de batelada sequenciais são compostos por dois ou mais digestores. O efluente do primeiro digestor, rico em ácidos orgânicos, é recirculado no segundo digestor onde ocorre a formação do metano. O efluente do segundo digestor é enviado para o primeiro digestor, com seu pH devidamente ajustado, para que sirva como inóculo.

O terceiro tipo de processo em batelada é o processo digestor de batelada trabalhando com um digestor UASB. Este processo se assemelha ao processo de múltiplos estágios com dois digestores. O primeiro digestor é simples digestor de batelada, mas o segundo digestor, onde ocorre a metanogênese é um digestor UASB.

As principais vantagens de digestores em batelada são sua simplicidade e robustez. São ainda relativamente baratos e com um pequeno consumo de água. As desvantagens são uma menor carga orgânica se comparado com outros sistemas, a possibilidade de sedimentação do substrato o que pode levar a inibição da digestão e o risco de explosão durante a descarga do digestor.

3 MODELOS COMERCIAIS DE DIGESTORES

3.1 Processo DRANCO

Este processo foi desenvolvido pela companhia belga Organic Waste Systems que atua no mercado de gestão de resíduos desde a década de 80. O nome do processo é uma sigla para Dry Anaerobic Composting.

A digestão anaeróbia neste processo é de estágio único, seca, e usualmente em faixa de temperatura termofílica, apesar de ser possível também a operação em condições mesofílica. Usualmente é operado com um tempo de detenção hidráulica na faixa de 20 dias e é especialmente indicado para resíduos com baixa umidade, já que o digestor é operado com elevado teor de sólidos, de até 50. Os principais resíduos estabilizados via este processo são os resíduos sólidos urbanos. Porém, também é possível a estabilização de alguns tipos resíduos orgânicos industriais e resíduos provenientes da agropecuária e suinocultura (OWSDRANCO, 2014)

No processo DRANCO a alimentação é feita de forma contínua. A primeira etapa do processo consiste na separação dos diferentes materiais e na redução do tamanho. A alimentação é feita no topo do digestor e o resíduo digerido é retirado na base do digestor. Não existem equipamentos mecânicos para a mistura interna dos resíduos no digestor, sendo a mistura feita através da movimentação da massa de resíduos e através da recirculação de parte do resíduo digerido. A carga orgânica aplicada pode variar entre 10 e 20 kgDQO m^{-3} .digestor.dia $^{-1}$. (OWSDRANCO, 2014)

A produção de biogás situa-se geralmente entre 100 e 200 m 3 por tonelada de resíduos. No final do processo, e em algumas estações, os resíduos digeridos são desidratados e passam por um tratamento aeróbio durante cerca de duas semanas para estabilização e sanitização. Aproximadamente, 50% da produção de biogás é utilizada no próprio processo, principalmente para aquecimento e estabelecimento de condição termofílica (OWSDRANCO, 2014)

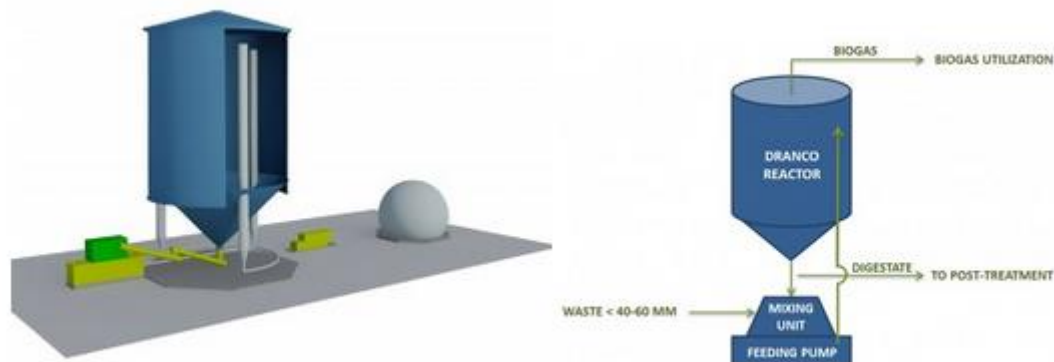


Figura 7 - Digestor DRANCO (OWS, 1998)

3.2 Processo KOMPOGAS

Este processo foi desenvolvido na Suíça pela empresa Axpo Kompogas AG. Assim como no processo DRANCO, a digestão anaeróbia no processo KOMPOGAS é de estágio único, seca, e usualmente em faixa de temperatura termofílica. Neste processo porém o

faixa de teor de sólidos em que o digestor opera é menor do que na tecnologia DRANCO, variando entre 23 e 28%. A capacidade de tratamento destas estações varia entre 4000 e 75000 toneladas de resíduos/ano (KOMPOGAS, 2014)

O processo se inicia com a separação dos resíduos. Nesta etapa são retirados componentes metálicos e a fração combustível com alto valor energético e que pode ser utilizada em usinas de incineração com recuperação energética. A fração orgânica restante é aquecida em uma câmara de aquecimento e posteriormente é utilizada no digestor, sendo alimentada continuamente em uma das extremidades e o efluente digerido retirado na outra extremidade do digestor. O digestor possui formato cilíndrico, funciona na horizontal e possui uma rotação com baixa velocidade. Os entalhes em seu interior homogeneizam a massa interna de resíduos. A rotação do cilindro favorece a soltura do biogás e evita a sedimentação das partículas mais pesadas. Parte do efluente digerido retorna ao início do processo com a finalidade de regular o teor de sólido da alimentação. (Lissens, Vandevivere, De Baere , & Biey, 2001)

O efluente digerido possui duas fases: uma líquida e uma sólida. A fração líquida possui elevado teor de nutrientes e pode ser utilizada como fertilizante. A fração sólida é desidratada através de equipamentos mecânicos usuais e tratada aerobiamente durante aproximadamente um mês.

A produção de biogás é função da composição do resíduo orgânico utilizado e usualmente varia entre 100 e 130 m³/ton. resíduos. Parte da produção de biogás é utilizada no próprio processo, principalmente para aquecimento e estabelecimento de condição termofílica. (KOMPOGAS, 2014)

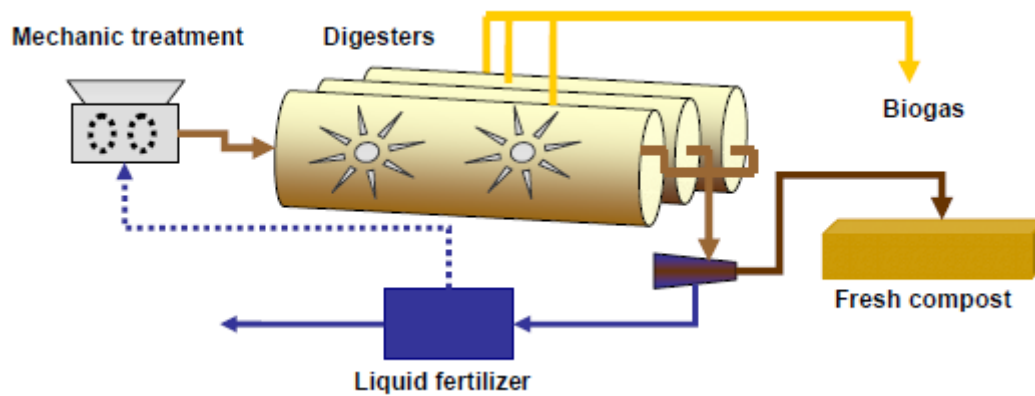


Figura 8 - Esquema do processo KOMPOGAS



Figura 9 - Unidade KOMPOGAS

3.3 Processo VALORGA

Este processo foi desenvolvido na França pela empresa Steinmuller Valorga Sarl. A digestão anaeróbia no processo VALORGA é de estágio único, seca, e em faixa de temperatura mesofílica. Neste processo o teor de sólidos em que o digestor opera varia na faixa de 20 a 35%. A capacidade de tratamento destas estações varia entre 10000 e 240000 toneladas de resíduos/ano. O tempo de detenção hidráulico é de cerca de 20 dias.

Uma unidade típica possui cinco subunidades: unidade onde ocorre a recepção dos resíduos e sua preparação, unidade onde ocorre a digestão anaeróbia, unidade de

utilização de biogás, unidade de tratamento aeróbio e unidade de tratamento do ar. (Lissens, Vandevivere, De Baere , & Biey, 2001)

O processo se inicia com a separação dos resíduos. Nesta etapa são retirados componentes não biodegradáveis e a fração orgânica restante homogeneizada posteriormente utilizada no digestor. A alimentação ocorre na parte superior do cilindro vertical e o efluente digerido é retirado na parte inferior. A mistura da massa de resíduos no interior do digestor é feita através da injeção em alta pressão na base de parte do biogás produzido. Estas injeções ocorrem em intervalos de 15 minutos. É relatado problemas nesta parte do sistema. É comum ocorrer obstruções nos bicos injetores tornando necessária a manutenção frequente do sistema.

A produção de biogás varia entre 80 e 160 m³/ton. resíduos. O efluente digerido é desidratado, resultando em uma fase líquida e outra sólida. A fração sólida é desidratada através de equipamentos mecânicos usuais e tratada aerobiamente durante aproximadamente um mês. Parte da fração sólida é recirculada e utilizada no ajuste da concentração de sólidos e o restante é lançado na rede de esgotos. Biofiltros e purificadores de ar atuam no sistema para evitar mau cheiro. (Lissens, Vandevivere, De Baere , & Biey, 2001)

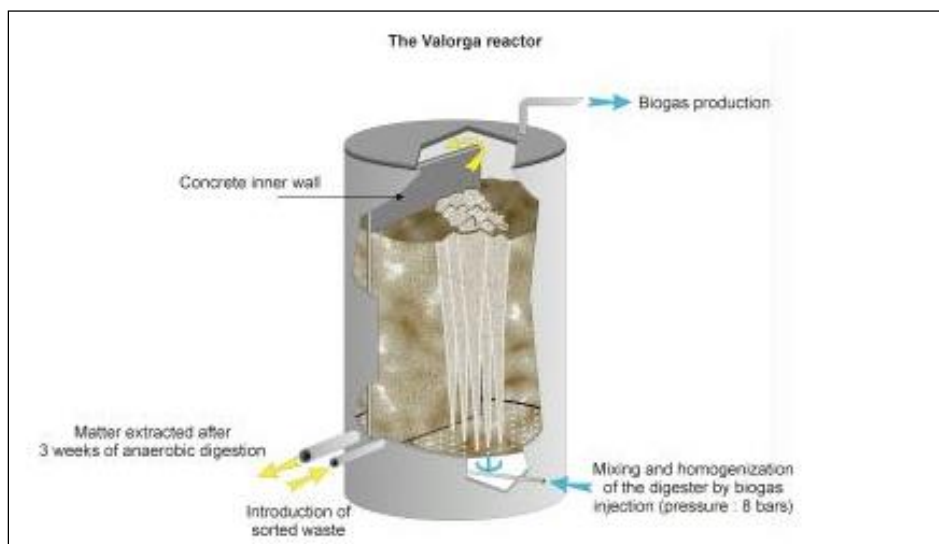


Figura 10 - Unidade de digestão VALORGA

3.4 Processo BIOCEL

Este processo foi desenvolvido na Holanda por um consórcio de atores, liderados pela CETaqua. A digestão anaeróbia no processo BIOCEL é de estágio único, seca, e em faixa de temperatura mesofílica. Neste processo o teor de sólidos em que o digester opera varia na faixa de 30 a 40%. A capacidade de tratamento da estação é de 50000 toneladas resíduos/ano. O tempo de detenção hidráulico é de cerca de 40 dias. (ten Brummeler, 2000)

O processo se inicia com a separação dos resíduos por via úmida. Nesta etapa são retirados componentes não biodegradáveis e a fração orgânica restante homogeneizada é misturada com inoculo e posteriormente utilizada no digester. A alimentação ocorre de forma descontínua nos digestores que operam em paralelo. Não existe nenhum tipo de equipamento para mistura da massa interna do digester. O tempo de detenção hidráulica é de cerca de 40 dias e ocorre quando a produção de biogás atinge níveis muito pequenos. Parte do efluente digerido é retirado na extremidade inferior do digester, aquecido e recirculado. A outra fração é utilizada como fertilizante e remediador de solo. (ten Brummeler, 2000)

Credita-se ao processo BIOCEL a capacidade de inativação de patógenos presentes nos resíduos, devido a elevada concentração de ácidos durante as primeiras semanas de operação.

Como qualquer sistema a batelada, isto é, de alimentação descontínua este processo conta com a desvantagem de possuir elevados custos de construção. Por outro lado os custos de operação são comparativamente pequenos. Outras desvantagens são o possível entupimento das câmaras que recolhem o efluente digerido, o que impediria a recirculação do mesmo. Existe também o problema de liberação de odores durante a carga e descarga do digestor. Existe ainda o risco de explosão quando o biogás acumulado no topo do digestor entra em contato com o ar atmosférico.

3.5 Processo SEBAC

Este processo foi desenvolvido nos Estados Unidos pela Universidade da Florida. O processo é composto por três estágios distintos, o arranque, a metanogênese e a maturação. O processo ocorre por via seca, com teores de sólidos entre 30% e 40% podendo operar tanto em faixas de temperaturas mesofílica quanto termofílicas e o tempo de detenção hidráulica varia entre 15 e 40 dias em função principalmente da faixa de temperatura utilizada. O processo não conta com nenhum equipamento de mistura ou agitação. (Rodrigues, 2005)

O processo SEBAC se baseia na recirculação do efluente digerido no início do processo, o arranque.

Inicialmente a fração biodegradável dos resíduos é separada e introduzida no primeiro digestor, iniciando assim o processo de tratamento. Após o arranque, este primeiro efluente digerido parcialmente e rico em ácidos orgânicos voláteis é recirculado para outro digestor onde ocorre a metanogênese. O lixiviado produzido durante este processo

é recirculado de modo contínuo pelo topo. Quando a mistura já se encontra livre de ácidos voláteis orgânicos e rica em inóculo, nutrientes e substâncias com poder tampão, na fase de maturação, ela é recirculada para o arranque de um novo ciclo de tratamento junto com resíduos orgânicos frescos. (Rodrigues, 2005)

Este processo produz uma fração sólida e outra líquida que podem ser utilizadas como fertilizante e remediador de solo. A qualidade destes efluentes é função do tipo de resíduo utilizado e do método de digestão. Usualmente o composto é tratado aerobiamente enquanto a fração líquida pode ser utilizada sem maiores tratamentos.

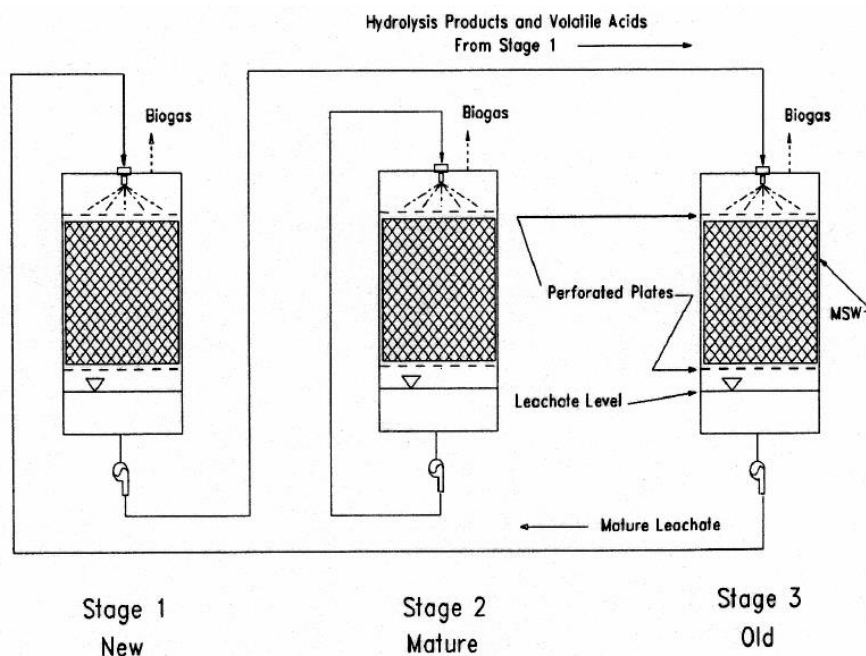


Figura 11 - Processo SEBAC

3.6 Processo BTA

Este processo foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Biotechnische Abfallverwertung GmbH & Co. KG. Atualmente existem outras empresas com licença de comercialização do processo. A digestão anaeróbia no processo BTA é de estágio único ou multiestágios, úmida, e em faixa de temperatura mesofílica. Neste processo o teor de sólidos em que o digestor opera varia na faixa de 10%. (Kübler & Schertler, 1994)

O processo se inicia com a separação dos resíduos por via úmida. Nesta etapa são retirados componentes não biodegradáveis e a fração orgânica restante homogeneizada é misturada com água recirculada do processo com a finalidade de adequação do teor de sólidos e posteriormente utilizada é no digestor. A mistura do resíduo com a água é feita através de um equipamento patenteado denominado “hydropulper”. Existe ainda um componente denominado “hidrocyclone” capaz de retirar contaminantes mais finos como areias e vidros. (Rodrigues, 2005)

O processo BTA possui variantes que são função da capacidade da estação e a destinação final do biogás e do composto produzido. Para pequenos digestores, isto é, com capacidade inferior a 50000 toneladas de resíduos/ano, a digestão é feita em um único digestor agitado. Estações com capacidades superiores a 50000 toneladas de resíduos/ano a digestão é feita em um sistema multiestágios. Após a etapa de pré-tratamento e separação de contaminantes os resíduos são armazenados em um tanque onde ocorre a primeira etapa da digestão e formação de ácidos orgânicos voláteis. Os resíduos passam então por um processo de desidratação, com a formação da fase líquida e sólida. A fase sólida é misturada com água novamente e recirculada para a um tanque onde ocorre a hidrólise do material. Esta etapa possui um tempo de detenção hidráulica de 2 a 4 dias, sendo ao fim desidratada novamente. A fração líquida desta etapa é enviada junto com o lixiviado resultante da primeira desidratação para um digestor onde ocorre a formação de metano, com um tempo de detenção hidráulica de 3 dias. O efluente desta etapa retorna ao início do processo. (Kübler & Schertler , 1994)

Durante o processo de digestão anaeróbia, cada fase é realizada por grupos de micro-organismos distintos que apresentam diferentes características de resistência e necessidade quanto à disponibilidade de nutrientes, pH, variações de temperatura e velocidade de reprodução (Chernicharo, 1997). Este processo ao distribuir estas etapas

em diferentes digestores, possibilita a adequação das condições ótimas para o crescimento de cada população bacteriana. Isto permite uma aceleração no processo de degradação dos resíduos orgânicos aliada a uma taxa de produção de biogás elevada.

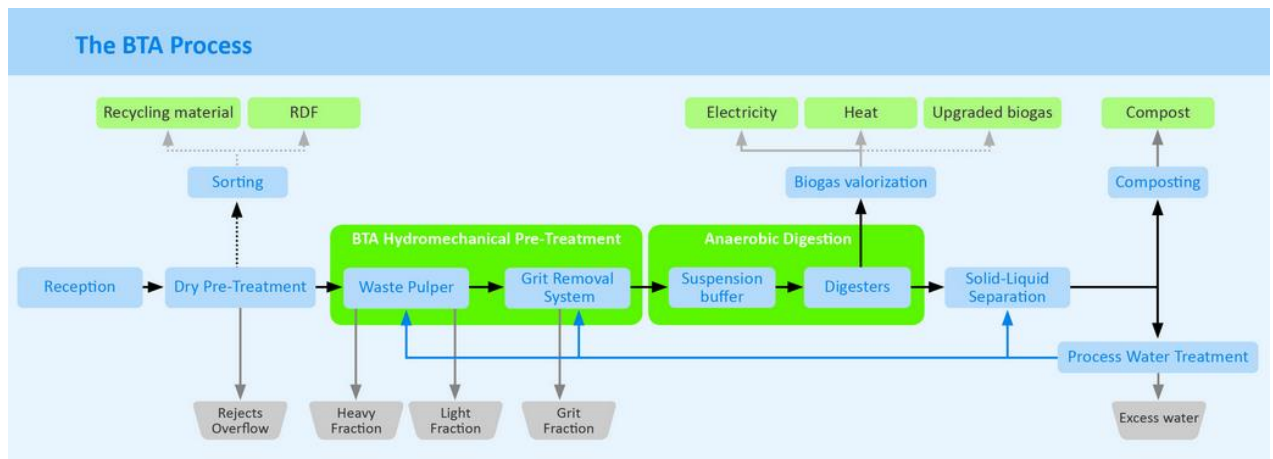


Figura 12 - Diagrama do processo BTA (BTA, 2014)

3.7 Processo WAASA

Este processo foi desenvolvido na Finlândia pela empresa *CITEC International Ltd. Oy*.

A digestão anaeróbica no processo WAASA é de estágio duplo, úmido, e usualmente em faixa de temperatura mesofílica podendo também ser operado em temperaturas termofílica. Neste processo o teor de sólidos em que o digestor opera varia na faixa de 10 a 15%. (Nichols, 2004)

Este processo é capaz de tratar resíduos orgânicos separadamente, como resíduos sólidos urbanos, resíduos de matadouros, resíduos agropecuários e da suinocultura, ou em co-digestão com lodos de esgoto, por exemplo.

O processo se inicia com a separação dos resíduos por via úmida. Nesta etapa são retirados componentes não biodegradáveis e a fração orgânica restante homogeneizada é misturada com água recirculada do processo com a finalidade de adequação do teor de sólidos e posteriormente utilizada é no digestor. A digestão é feita em cilindros verticais

que possuem duas câmaras internas, a pré-câmara e a câmara principal. O resíduo é adicionado no digestor na pré-câmara, que possui como objetivo a pré-digestão dos resíduos e evitar o curto circuito, isto é, que os resíduos adicionados encontrem um caminho preferencial e saiam do digestor em um tempo de detenção hidráulica menor do que aquele estipulado em projeto. Para promover a inoculação adequada dos resíduos na pré-câmara a biomassa da câmara principal é recirculada na pré-câmara. (Nichols, 2004)

Dentro da câmara principal os resíduos são homogeneizados através da injeção de biogás produzido na base do digestor. Sistemas com esta configuração costumam apresentar obstruções nos bicos injetores, tornando necessária a manutenção frequente do sistema. (Nichols, 2004)

A produção de biogás é função da composição do resíduo orgânico utilizado e usualmente varia entre 100 e 150 m³/toneladas de resíduos. (Nichols, 2004)

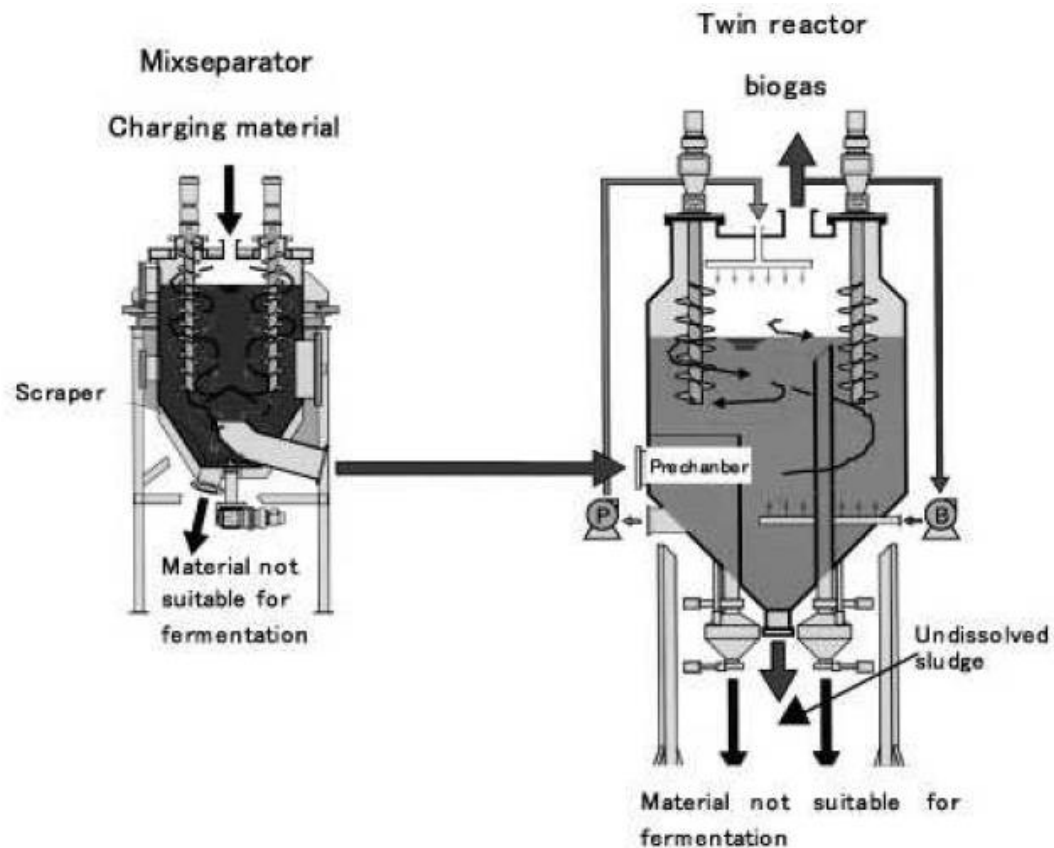


Figura 13 - Processo WAASA

3.8 Processo Linde-BRV

Este processo foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Linde-KCADresden GmbH em associação com a Linde BRV Biowaste Technologies AG. A digestão anaeróbica no processo Linde-BRV é de estágio duplo, seco, e em faixa de temperatura termofílica. Neste processo o teor de sólidos em que o digestor opera varia na faixa de 15 a 45%. (Rodrigues, 2005)

A primeira etapa do processo consiste na digestão aeróbica em condições microaerofílica dos resíduos, que são hidrolisados. A reação de hidrólise é maior nestas condições do que em condições anaeróbicas. Porém ocorre uma perda de cerca de 2% do material orgânico. O tempo de detenção hidráulica nesta etapa do processo varia entre 2 e 4 dias. Após este período, a massa de resíduos passa por um calibrador, onde o teor de sólidos é ajustado

para 22% e é introduzida no digestor. O digestor possui a forma de um cilindro posicionado horizontalmente e nele ocorre a etapa de metanogênese. O tempo de detenção hidráulica nestes digestores varia entre 21 e 25 dias. (Rodrigues, 2005)

Após esta etapa o efluente digerido é separado na fração líquida e na fração sólida. A fração líquida é recirculada para o início do processo com o objetivo de ajustar o teor de sólidos nos resíduos frescos.

A principal vantagem deste processo se dá em um menor volume reacional devido a digestão ocorrer em via seca.

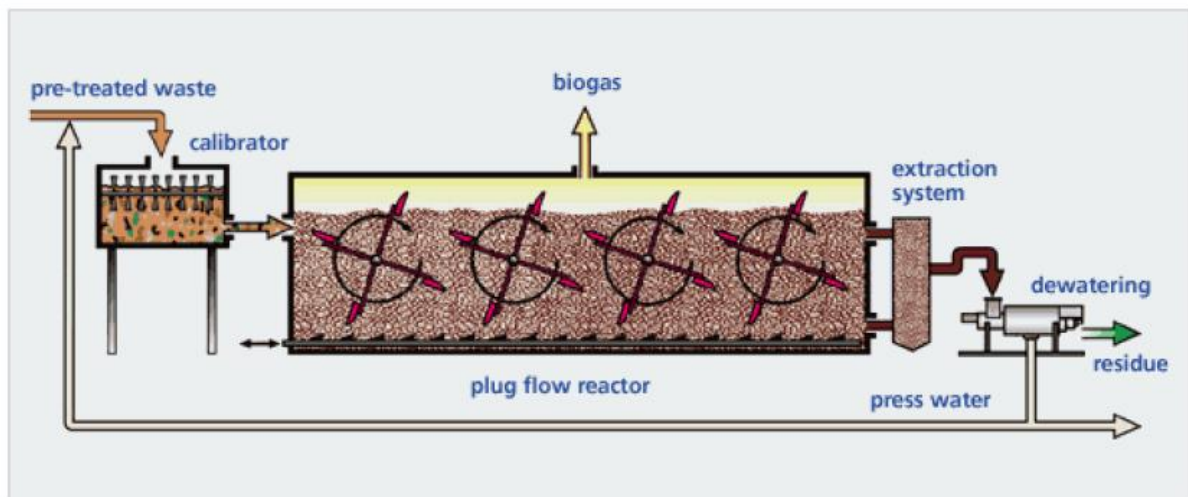


Figura 14 - Processo Linde-BRV

3.9 Processo Linde-KCA

Este processo foi desenvolvido na Alemanha pela empresa Linde-KCADresden GmbH em associação com a Linde BRV Biowaste Technologies AG. A digestão anaeróbia no processo Linde-KCA é de estágio único ou duplo, úmido, e em faixa de temperatura termofílica ou mesofílica variando em função do resíduo processado.

No processo de duplo estágio, inicialmente os resíduos são adicionados a um tanque onde é feito o ajuste do teor de sólidos com a recirculação da fração líquida do efluente digerido

no fim do processo. Posteriormente ocorre a separação de sólidos grosseiros e a massa de resíduos é enviada para um digestor agitado onde ocorre a hidrólise. Depois de hidrolisados os resíduos são enviados para outro digestor onde ocorre a metanogênese. Neste digestor é garantida a homogeneização dos resíduos através da recirculação do biogás produzido. (Rodrigues, 2005)

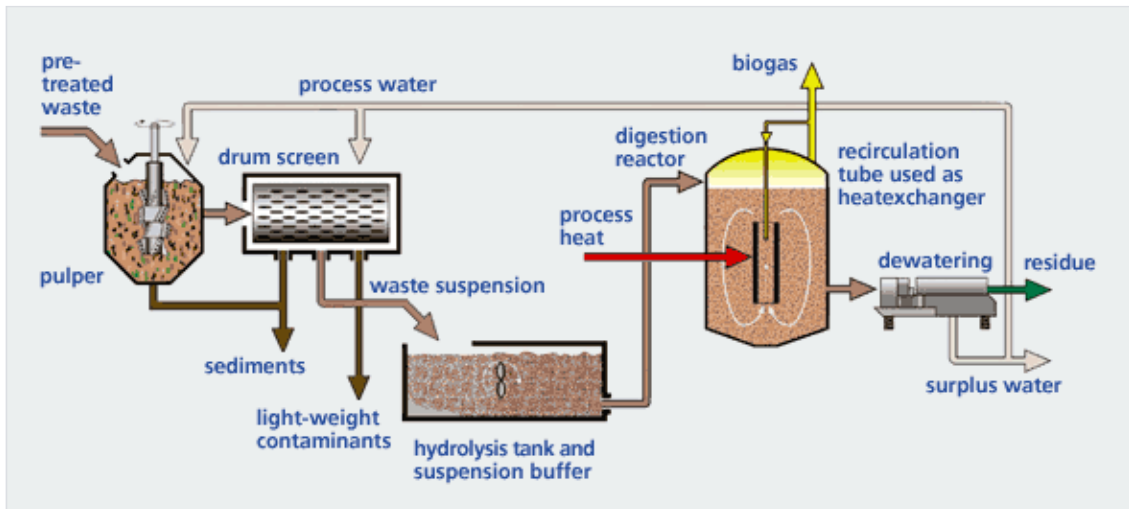


Figura 15 - Processo Linde-KCA

A tabela 3 a seguir resume as características e as condições de operação dos digestores anteriormente mencionados.

Tabela 3 - Reatores Comerciais Fonte: elaboração própria

	Tipo de Tecnologia	Teor de sólidos (%ST)	n° de estágios	Tempo de denteção hidráulica (dias)	Faixa de temperatura	Produção específica de biogás (Nm ³ /t RSU)	Tipo de alimentação	Tipo de digestor	Ajuste de teor de sólido	Sistema de Mistura	Capacidade de Tratamento (tonresíduos/ano)	
TECNOLOGIAS	DRANCO	Seca	20 - 50%	1	15 - 20	Mesofílica ou Termofílica	100 - 200	Contínua	Tubular vertical	Recirculação do resíduo digerido	Recirculação do resíduo digerido	20000 - 50000
	KOMPOGAS	Seca	23 - 28%	1	18 - 25	Termofílica	100 - 130	Contínua	Tubular horizontal	Recirculação do resíduo digerido	Rotação do digestor	15000 - 25000
	VALORGA	Seca	20 - 35%	1	16 - 20	Mesofílica	80 - 160	Contínua	Tubular vertical	Recirculação do lixiviado	Recirculação do biogás	10000 - 240000
	BIOCEL	Seca	30 - 40%	1	>40	Mesofílica	100	Descontínua	Vertical	Não há	Não há	35000 - 50000
	SEBAC	Seca	30 - 40%	3	15 - 40	Mesofílica ou Termofílica		Descontínua	Vertical		Não há	
	BTA (<50000 tonresíduooporano)	Úmida	10%	1		Mesofílica	100 - 130	Contínua	Vertical	Adição de água	Não há	1000 - 50000
	BTA (>50000 tonresíduooporano)	Úmida	10%	3		Mesofílica		Contínua	Vertical	Recirculação do lixiviado		50000 - 190000
	WAASA	Úmida	10 - 15%	2	20 (Mesofílica) 10 - Termofílica	Mesofílica ou Termofílica	100 - 150	Contínua	Vertical dividido em 2 câmaras		Mecânico	92000
	Linde-BRV	Seca	15 - 20%			Termofílica		Contínua	Horizontal	Recirculação do lixiviado		
	Linde-KCA	Úmida	20 - 45%	1 ou 2		Mesofílica ou Termofílica		Contínua	Vertical	Recirculação do lixiviado		
	FOV	Úmida		1		Mesofílica		Contínua	Horizontal		Não há	

4 UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

4.1 Impurezas e purificação do biogás

O biogás é composto principalmente por metano, gás carbônico e água. Porém apresenta ainda uma série de outros compostos químicos em sua composição como sulfureto de hidrogênio, amônia, oxigênio e nitrogênio. Estas impurezas presentes no gás podem causar problemas como corrosão e desgaste mecânico de equipamentos, ou ainda causar emissões indesejáveis durante a combustão do biogás.

4.1.1 Gás carbônico

O gás carbônico é o segundo componente principal no biogás. O gás carbônico é formado em diferentes etapas do processo de digestão anaeróbia e é responsável pela diminuição do poder calorífico do biogás. Sua presença é considerada um problema quando a sua utilização necessita de um alto poder calorífico, como por exemplo sua utilização como gás de cozinha ou combustível veicular, e neste caso o conteúdo de metano no biogás deve ser superior a 95% (Kaparaju & Rintala, 2013). Para outras aplicações como aquecedores, motores de combustão interna ou sistemas geradores não é necessária a remoção de CO₂.

A remoção de CO₂ do biogás oferece inúmeras vantagens sobre a utilização do biogás em estado natural e permite desta forma o transporte do gás para locais onde a energia total (potência e calor) é necessária, oferecendo assim a possibilidade de aumentar a eficiência global de utilização do gás. Outras vantagens estão na dissociação temporal e local da produção e utilização, aumento na capacidade de armazenamento tendo em vista que o dióxido de carbono corresponde entre 30 – 50% do volume total do biogás (Kaparaju & Rintala, 2013), flexibilização nas possíveis utilizações do biogás como eletricidade, calor, combustível veicular etc.... (Beil & BEYRICH, 2013)

4.1.2 Água

A água é outro composto encontrado no biogás e sua presença ocorre da evaporação da água presente no processo. O gás produzido se encontra saturado de água, portanto a quantidade de água presente no gás depende de fatores como a pressão e temperatura dentro do digestor. A água combinada com outros componentes pode causar problemas durante a utilização do biogás tais como: corrosão da tubulação quando combinada com dióxido de carbono devido a formação de ácido carbônico. A água ainda diminui o poder calorífico do gás causando os problemas citados acima.

Os principais métodos de remoção de água consistem na alteração de parâmetros que afetam a solubilidade da água no gás, como pressão e temperatura, ou por processos de absorção e adsorção. Impurezas dissolvidas na água serão também removidas.

Diminuição na temperatura ou aumento na pressão causará a condensação do vapor d'água já que a concentração correspondente a saturação do gás diminui. (Petersson, 2013)

4.1.3 Sulfeto de hidrogênio

O sulfeto de hidrogênio possui duas principais vias de formação durante a digestão anaeróbia. A primeira é através da digestão de proteínas que contem enxofre, a outra via é através de bactérias que tem a capacidade de reduzir o sulfato presente no digestor em sulfeto de hidrogênio. Estas bactérias estão presentes naturalmente no digestor e competem com as bactérias metanogênicas pelo mesmo substrato, mas, em vez da formação de biogás, sulfeto de hidrogênio é formado. Os principais problemas relacionados a presença de sulfeto de hidrogênio no biogás é a possibilidade de formação de ácido sulfúrico em presença de água que por sua vez é altamente corrosivo. O outro

problema está relacionado a emissão de ácido sulfúrico e outros óxidos de enxofre quando ocorre a combustão do biogás. (Petersson, 2013)

Existem diversas técnicas de remoção de sulfeto de hidrogênio, e elas funcionam removendo o componente dentro do digestor ou fora dele. O processo de remoção biológica se inicia com a injeção de ar atmosférico de forma que o sulfeto de hidrogênio reaja com o oxigênio presente no ar e forme enxofre elementar por oxidação biológica, catalisada pela bactéria *Thiobacillus* normalmente encontrada no digestor. Podem ocorrer problemas se for injetado uma quantidade grande de oxigênio pois afetara o processo de digestão anaeróbia. Este mesmo processo pode ser operado fora do digestor, através de um filtro biológico. (Petersson, 2013)

Dentre as técnicas de remoção física do sulfeto de hidrogênio estão a adsorção utilizando água ou solventes orgânicos, ou ainda adsorção com carvão ativado.

4.1.4 Amônia

A amônia é produzida durante a etapa da hidrólise de substratos ricos em proteínas. Sua presença em altos níveis é inibidora da metanogênese. Outro problema está relacionado à combustão da amônia em motores a gás, onde pode ocorrer a formação de óxido nitroso.

A remoção da amônia ocorre usualmente junto com a desidratação do gás, já que a amônia se dissolve em água.

4.1.5 Oxigênio e nitrogênio

Oxigênio e nitrogênio podem ser encontrados devidos a vazamentos que permitam a entrada de ar atmosférico no digestor.

São componentes difíceis de serem retirados do biogás e portanto deve ser evitada sua presença em níveis superiores aos estabelecidos de acordo com sua utilização. Sua

remoção pode ser feita através de processos de adsorção com a utilização de carbono ativado.

4.1.6 Compostos orgânicos voláteis

Compostos orgânicos voláteis são encontrados em diferentes concentrações no biogás. O tipo de composto e as suas concentrações dependem do substrato utilizado. Os exemplos mais comuns encontrados são os alcanos, siloxanos, e os hidrocarbonetos halogenados. E podem causar uma série de problemas como deposições nas câmaras de combustão e corrosão.

Hidrocarbonetos halogenados são encontrados usualmente em biogás provenientes de aterros sanitários e dificilmente estão presentes no biogás produzido através de resíduos orgânicos.

Siloxanos podem ser removidos por absorção com solventes orgânicos, ácidos fortes ou bases fortes, por adsorção com gel de sílica ou carvão ativado. Durante a combustão do biogás, siloxanos são convertidos em dióxido de silício microcristalino (SiO_2), um resíduo com propriedades químicas e físicas semelhantes ao vidro. Algumas partículas são removidas quando o gás é seco ou por meio de filtros ou ciclones. Os hidrocarbonetos halogenados podem ser removidos por adsorção com carvão ativado.

4.2 Utilização e qualidade do biogás

Existem uma série de utilizações possíveis para o biogás produzido através da digestão anaeróbia. A Figura 16 mostra as diversas rotas possíveis para a utilização do biogás.

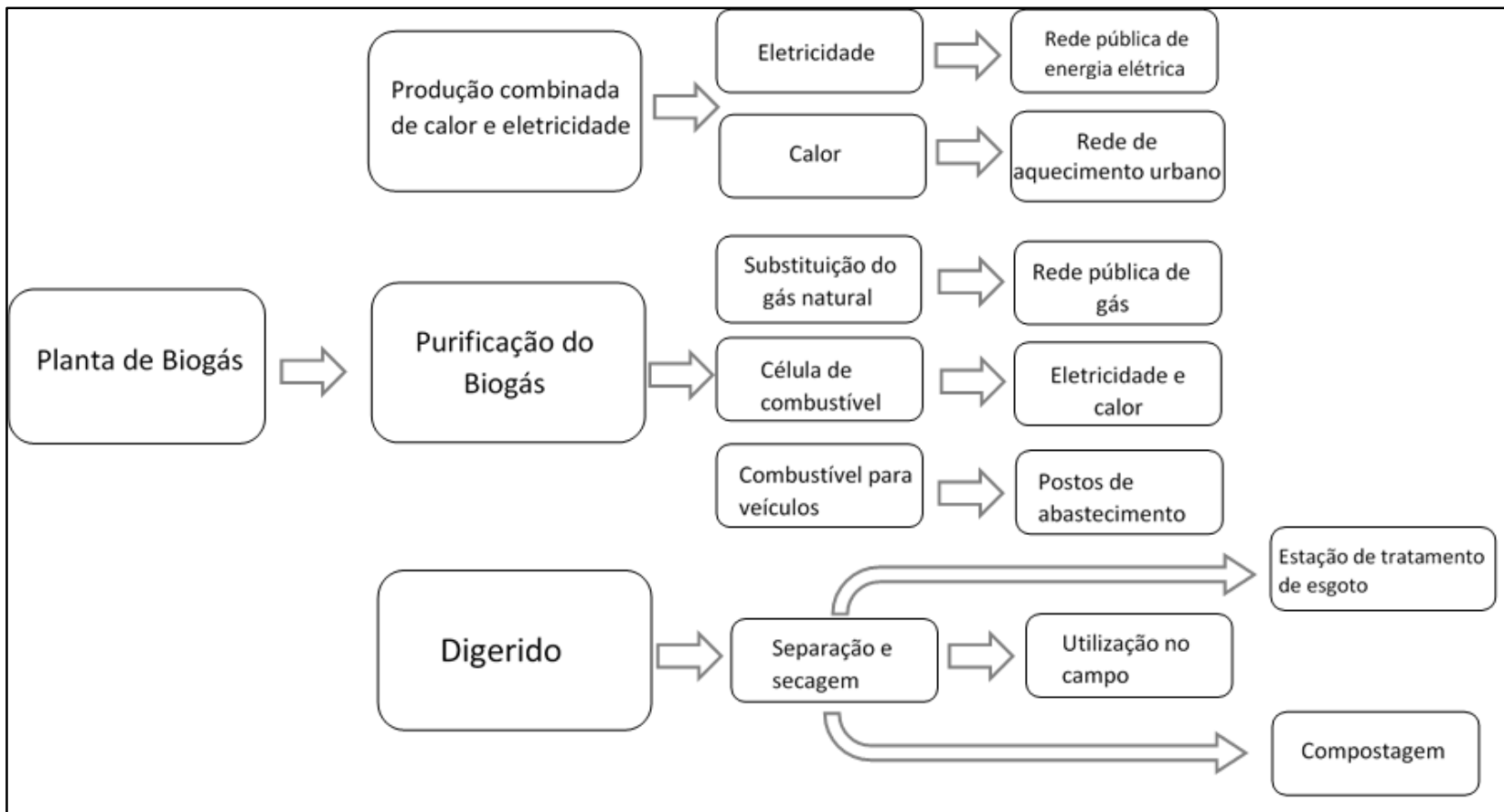


Figura 16 - Rotas de utilização do biogás e do digerido

4.2.1 Injeção de biometano em redes de gás natural

O biometano é um combustível que pode ser utilizado sempre em que o gás natural é utilizado sem a necessidade de alteração de equipamentos, e com a possibilidade de utilizar a mesma rede de distribuição utilizada pelo gás natural.

A conexão entre a unidade de purificação do biogás e a rede urbana de distribuição de gás é feita através de uma estação de alimentação. O gás inserido na rede deve atender requisitos de qualidade, pressão e volume. Usualmente uma estação de alimentação de gás na rede possui seguintes equipamentos e componentes: um compressor do biometano para a pressão de trabalho da rede, ou um equipamento de regulação de pressão quando a rede de distribuição trabalha em pressões baixas; equipamentos de monitoramento do gás injetado na rede, incluindo o índice de Wobbe e do poder calorífico; equipamentos de segurança como filtros, válvulas de segurança shut-off, regulador de pressão do gás, válvulas automáticas de fechamento com o refluxo de gás para a estação de tratamento de biogás, misturador de gás, regulação de fluxo, incluindo a proteção do equipamento a montante e a jusante em termos de pressão, temperatura e composição do gás; calibrador do volume injetado na rede e a rede de conexão. (Urban, 2013)

4.2.2 Geração combinada de calor e energia elétrica

A geração de energia elétrica ocorre através da combustão do biogás e o calor é recuperado através de uma unidade que captura o calor dos gases do sistema de exaustão da planta. Este calor é usualmente convertido na forma de vapor ou água quente.

A maior parte das plantas produtoras de energia elétrica e calor opera com biogás sem purificação e instalações modernas atingem a eficiência de 90%, somando a eficiência

elétrica e térmica. A eficiência elétrica por outro lado, ainda é pequena, em torno de 40%. (Kaparaju & Rintala, 2013)

A energia elétrica é disponibilizada na rede pública de energia elétrica e o calor é consumido na rede de aquecimento urbana. Parte do calor produzido é utilizado no próprio sistema de digestão anaeróbico de forma a manter a temperatura no digestor. (Pöschl, Ward, & Owende, 2010)

4.2.3 Célula combustível

As células de combustível geram eletricidade diretamente pela reação eletroquímica em que o oxigênio e o hidrogênio se combinam para formar água. Existem diferentes modelos de células combustíveis e cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens. Possui alta eficiência (cerca de 60%), baixas emissões e inúmeras utilizações como combustível. Porém, os custos de investimento ainda são relativamente altos. (Kaparaju & Rintala, 2013)

Os tipos mais comuns de células de combustíveis são as células de membrana eletrolítica polimérica, as células alcalinas, as células de ácido fosfórico e as de carbonato fundido. Estas células se diferenciam pelo eletrólito utilizado, a temperatura de operação. A eficiência destas células varia entre 40 – 60%. A célula combustível de carbonato fundido é a que se mostra mais promissora para utilização com o biogás.

4.2.4 Motores Stirling

O princípio de um motor Stirling baseia-se na conversão de energia térmica em energia mecânica. O motor Stirling é um sistema fechado em que o gás ou fluido se move dentro do motor entre duas câmaras que dotadas de trocadores de calor. Como resultado, o meio motor é aquecido e resfriado, alternadamente, resultando em compressão e expansão cíclica o que faz movimentar dois êmbolos ligados a um eixo comum. O motor pode

utilizar qualquer fonte externa de calor e teoricamente é ideal para geração de eletricidade. (Kaparaju & Rintala, 2013)

4.2.5 Turbinas a gás

Turbinas a gás são utilizadas para a produção de energia elétrica com biogás. Uma turbina a gás consiste basicamente em um compressor, uma câmara de combustão e a turbina.

A turbina opera continuamente, e o processo se dá com a compressão do ar atmosférico e sua injeção na câmara de combustão, onde então o biogás é inserido e a combustão ocorre. O gás produzido se expande e transfere sua energia para a turbina. A energia gerada pela turbina move tanto o compressor quanto um gerador que produz energia elétrica. O gás que deixa a primeira turbina possui uma temperatura inferior e pode ser utilizado em uma outra turbina a jusante. Unidades comerciais possuem uma capacidade que varia entre 500kW e 250 MW.

4.2.6 Microturbinas a gás

Microturbinas a gás são pequenas turbinas de alta velocidade, com uma potência de 25 500 kW. Micro turbinas são considerados fáceis de manusear e são possuem relativamente baixo nível de ruído e sem vibração.

Micro turbinas são mais caras do que as turbinas a gás tradicionais, mas os seus requisitos de manutenção são muito menores e, assim, os custos relacionados a manutenção são reduzidos. Seu tempo de vida também é relativamente longo.

5 EXPERIMENTO

5.1 Objetivos

Este experimento teve como objetivos principais:

1. A inoculação do reator com a fauna bacteriana necessária para a digestão anaeróbia.
Neste sentido foram avaliadas diferentes possibilidades para a inoculação.
2. O início operacional do reator, que incluiu acordos de separação dos orgânicos gerados por um restaurante, viabilizar o transporte desses resíduos até o Centro Experimental de Saneamento Ambiental e a instalação da instrumentação necessária.
3. Determinar a produção de biogás e sua relação com os parâmetros operacionais do experimento.
4. Analisar economicamente as possibilidades de utilização do biogás produzido como fonte de geração de energia descentralizada para fins de utilização como gás de cozinha e como fonte de iluminação para diferentes cenários de produção.
5. Avaliar o reator como produto para as condições climáticas local, de forma a verificar sua resistência e estanqueidade.

5.2 Digestor

O digestor utilizado no experimento é fabricado com um material têxtil estanque e é fornecido pela empresa sueca FOV Fabrics AB. A Figura 17 mostra esquematicamente o digestor que conta com uma entrada, localizada em uma das extremidades, por onde o digestor é alimentado com o resíduo, uma saída por onde o material digerido é retirado e uma outra saída no topo do digestor para o biogás produzido. Ambas as saídas do efluente e do biogás são dotadas de registros. O digestor possui um volume total de 2 m³ e um

volume útil de 1,4 m³, sendo o volume restante utilizado no armazenamento temporário do biogás produzido.

O digestor não possui qualquer sistema mecânico para mistura. Para garantia da saída do efluente do digestor, e da mistura interna, o mesmo foi instalado em uma superfície de concreto dotada de uma declividade de aproximadamente 2%

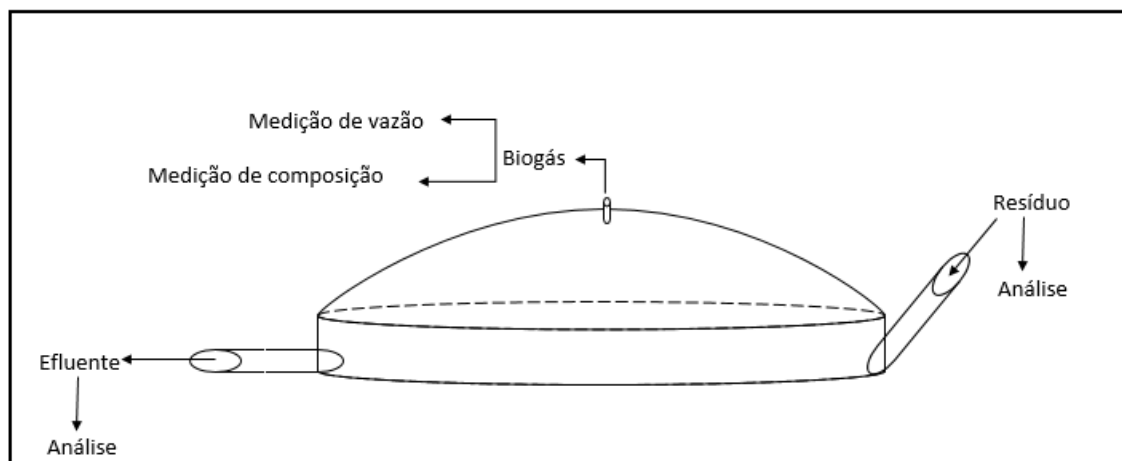


Figura 17 - Configuração experimental



Figura 18 – Digestores têxteis em operação no CESA

5.3 Inóculo

O inóculo utilizado com o objetivo de introduzir no digestor grupos de bactérias necessários para a digestão dos resíduos era proveniente do lodo de um digestor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) localizado no Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ (CESA-UFRJ). O digestor foi preenchido até o volume útil de trabalho com este lodo e então foi alimentado com baixa carga orgânica, aproximadamente $0,10 \text{ gSV/dm}^3 \cdot \text{dia}$, com o objetivo de adaptação do conjunto bacteriano com o novo tipo de alimentação.

5.4 Configuração Experimental

O digestor operou durante o tempo do experimento em regime semi-contínuo, úmido e em faixa de temperatura mesofílica. A alimentação era feita com uma sazonalidade de três vezes por semana.

Os resíduos orgânicos eram provenientes de restaurantes localizados no Centro de Tecnologia da UFRJ. Durante o experimento os principais fornecedores foram o restaurante “Projectus” e o Restaurante Universitário do CT. Os resíduos eram transportados por funcionários do RECICLA-CT até a sua sede de onde eram transportados para o CESA.

Os resíduos produzidos pelos restaurantes possuíam duas naturezas distintas. Uma fração do resíduo era composta por resíduos orgânicos provenientes da preparação das refeições, e era constituído de cascas de vegetais e frutas, caules de hortaliças e outras partes não aproveitadas de alimentos. A outra fração era composta por resíduos produzidos após as refeições, e os resíduos eram os alimentos não consumidos, como arroz, feijão, legumes, hortaliças e produtos de origem animal como frango e peixe.

O Recicla CT é um Programa de Coleta Seletiva Solidária implantado no Centro de Tecnologia da UFRJ, que possui como objetivos principais sistematizar e organizar as iniciativas informais existentes na Universidade com relação à coleta seletiva, implementar em todos os Centros da instituição um sistema de gerenciamento de resíduos e integrar diversas iniciativas isoladas de reciclagem existentes.



Figura 19 - Transporte dos resíduos via RECICLA-CT

Os resíduos eram coletados semanalmente e no CESA passavam por um pré-tratamento manual onde qualquer tipo de material contaminante era retirado. Além dos contaminantes não orgânicos, eram retirados contaminantes orgânicos como limões e outros substratos com alto teor de acidez sempre que presentes em grandes quantidades. Esta separação tinha como objetivo evitar a acidificação do meio, que poderia ocasionar a inibição das bactérias. Posteriormente o resíduo era triturado com tamanho de partícula menor que 10 mm, embalado em sacos e congelado em um freezer a uma temperatura aproximada de -20°C . A preparação da alimentação era feita com uma frequência semanal.

Apesar do acordo feito com os restaurantes para a separação dos resíduos orgânicos, e da triagem feita pelos funcionários do Recicla CT, inúmeros tipos de contaminantes e materiais não orgânicos eram encontrados no resíduo, como mostra a Figura 20. Os contaminantes mais comumente encontrados eram sacolas plásticas e presilhas plásticas

utilizadas para prender ramos de hortaliças. Com frequência também eram encontrados talheres, copos e sacolas plásticas e embalagens longa vida.



Figura 20 - Contaminantes presentes no resíduo

A introdução de substância inibidoras no sistema pode levar a inibição das bactérias envolvidas no processo, desacelerar a taxa de degradação da matéria orgânica ou até mesmo interromper a produção de biogás, sendo portanto de extrema importância evitar a entrada de material indesejado no sistema.

Neste ponto vale ressaltar a importância da separação in loco dos resíduos. Neste projeto trabalhou-se com uma média de 100 kg de resíduos orgânicos por semana, e era gasto um tempo considerável na separação dos contaminantes. Em uma escala maior é necessário um sistema mecânico de separação e quanto mais contaminado o resíduo maior o gasto na operação do sistema.

A cada alimentação o resíduo sólido era misturado com parte do efluente do digestor UASB (fração líquida) e a fração restante era utilizada para dar uma descarga no tubo de alimentação de forma a garantir que o resíduo entrasse de fato no digestor e não ficasse preso no tubo de entrada.

Os parâmetros operacionais do experimento estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros operacionais

Volume total	2000	dm ³
Volume útil	1400	dm ³
Tempo de detenção hidráulica	30	dias
Volume de alimentação	109	dm ³ por alimentação
Volume de resíduo	21	dm ³ por alimentação
Volume de lodo de esgoto	88	dm ³ por alimentação
Dias de operação	35	dias

5.5 Análises

O processo de digestão anaeróbia foi avaliado através da análise dos seguintes parâmetros: sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos totais fixos (STF), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), volume e composição do biogás produzido.

A alimentação era produzida semanalmente e portanto analisada em laboratório com a mesma frequência. O efluente digerido era analisado com uma frequência de duas vezes por semana. Para ambas as amostras eram analisados os seguintes parâmetros: sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos totais fixos (STF), sólidos suspensos totais

(SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), demanda química de oxigênio (DQP) e nitrogênio total Kjeldahl (NTK).

Foram utilizadas as seguintes metodologias na análise dos resíduos de alimentação:

- DQO = Método: 5.220 D. Refluxo Fechado Colorimétrico. SMEWW - 20º Edição
- NTK = Método: 4.500 C. Digestão/Destilação/Titulação – SMEWW - 20º Edição
- Sólidos Totais /Fixos e Voláteis = Método: 2.540 B – Método Gravimétrico - SMEWW - 20º Edição
- Sólidos Suspensos Totais /Fixos/ Voláteis = Método: 2.540 D – Método Gravimétrico – SMEWW - 20º Edição

O volume de biogás produzido era medido através de um medidor de gás do tipo tambor Ritter, do modelo TG5-PVC-PVC.

A composição de biogás produzido era medida através de um detector de metano LANDTEC, GEM2000, que mede em porcentagem de volume as quantidades de dióxido de carbono e de metano presentes no biogás.

Na semana 0, de forma representativa, a amostra da alimentação foi analisada além dos parâmetros usuais, para sua composição relativa de carboidratos, gordura e proteína. Estes se configuram como os principais componentes digestíveis. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades da alimentação

Sólidos totais	0,0977	g/g
Sólidos fixos	8323,75	mg/g
Proteína	7,63	g/L
pH	5,23	
Gordura	22,9	mg/g
Carboidrato	20900	mg/L

Devido à variabilidade na composição dos resíduos utilizados no experimento, as características do substrato se alteraram durante as semanas do experimento. A cada batelada semanal de produção de resíduo eram enviadas amostras nas quais eram determinados os parâmetros mostrados na Tabela 7.

Vale notar que houve uma mudança na metodologia de alimentação e análise em relação à semana 0 e as demais semanas. Na semana 0 a alimentação e consequentemente a amostra enviada para o laboratório era composta de duas amostras: uma contendo apenas do resíduo orgânicos e a outra contendo o lodo de esgotos. Nas semanas seguintes eram enviadas apenas uma amostra com a mistura resíduo mais lodo na proporção de uma unidade de volume de resíduo para quatro unidades de volume de lodo, a mesma proporção utilizada na alimentação.

Tabela 6 - Resultados analíticos da alimentação

SEMANA	DQO (mg/dm³)	NTK mg/ dm³	ST mg/ dm³	STF mg/ dm³	STV mg/ dm³	SST mg/ dm³	SSF mg/ dm³	SSV mg/ dm³
0 (resíduo)			131733,3	18723,3	113010			
1	20350	0	31613,3	2996,6	28616,7	8850	110	8740
2	25600	140	34775	3340	31435	7730	375	7355
3	15750	66,5	17776,6	2406,6	15370	14160	510	13650
4	18850	91	22943,3	2656,6	20286,7	9400	65	9335

5.6 Resultado e discussão

A produção diária de gás (expresso como dm^3/dia) em conjunto com a carga orgânica aplicada (expresso como $\text{gSV}/\text{m}^3.\text{dia}$) é apresentada na Figura 21 para o digestor. A produção específica de gás (PEG), medido por unidade de SV adicionado no digestor, variou durante o experimento na faixa de valores de 0,14 - 0,5 (dm^3/g SV alimentado) e a produção de biogás medido por unidade de SV destruído (PG) na faixa de 0,15 – 0,6 (dm^3/g SV destruído). A produção média diária de biogás foi de 292dm^3 por dia. Estes resultados são apresentados na Tabela 7, em conjunto com os parâmetros de avaliação do desempenho dos digestores.

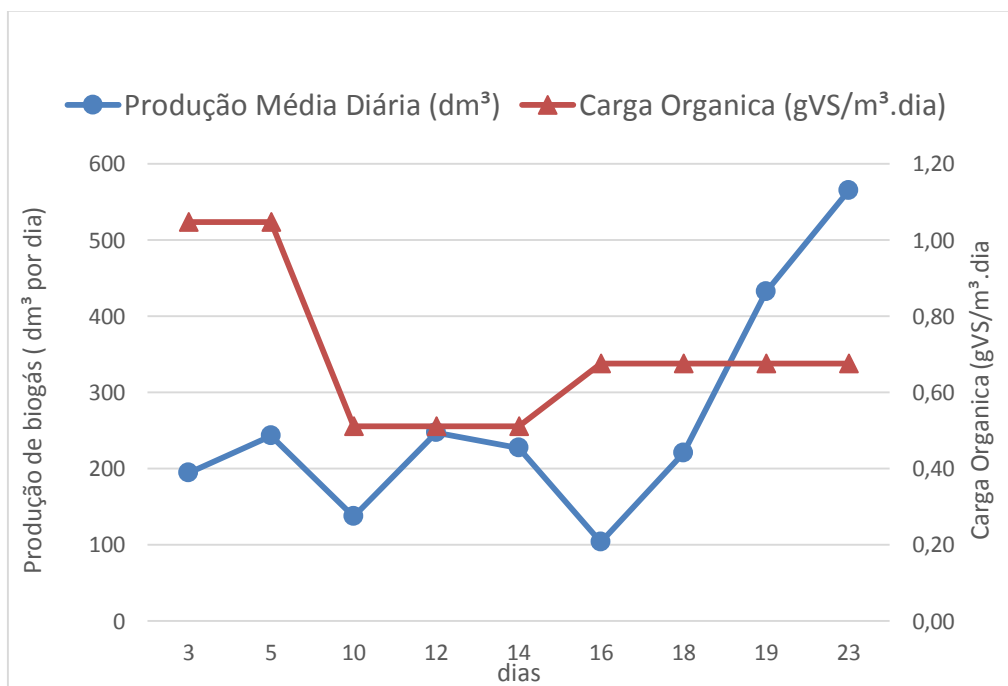


Figura 21 - Evolução da produção diária de biogás e carga orgânica aplicada ao digestor

Tabela 7 - Resultados analíticos do efluente

SEMANA	Carga Orgânica (gVS/m³. dia)	Carga Orgânica (gDQO/m³. dia)	Produção de Biogás (dm³/g SV destruído)	PEG (dm³/g SV alimentado)	Produção Média Diária (dm³)	Eficiência de degradação de VS(%)
0	0,73	-	-	-	-	99%
1	0,95	0,68	-	-	-	97%
2	1,05	0,85	0,15	0,14	207,00	96%
3	0,51	0,53	0,36	0,33	233,86	92%
4	0,68	0,63	0,58	0,50	477,00	92%
Média	0,78	0,67	0,36	0,32	305,95	95%

Ao comparar os resultados obtidos neste experimento com resultados publicados na literatura é possível observar certas questões. Em um experimento de co-digestão de lodo de esgoto com a fração orgânica do lixo, são encontrados valores de produção de biogás na faixa de 0.4 – 0.8 (dm³/g SV destruído) e valores de PEG na faixa 0,2–0,4 (dm³/g SV alimentado). (Gomez, Cuetos, Cara, Morán, & García, 2005)

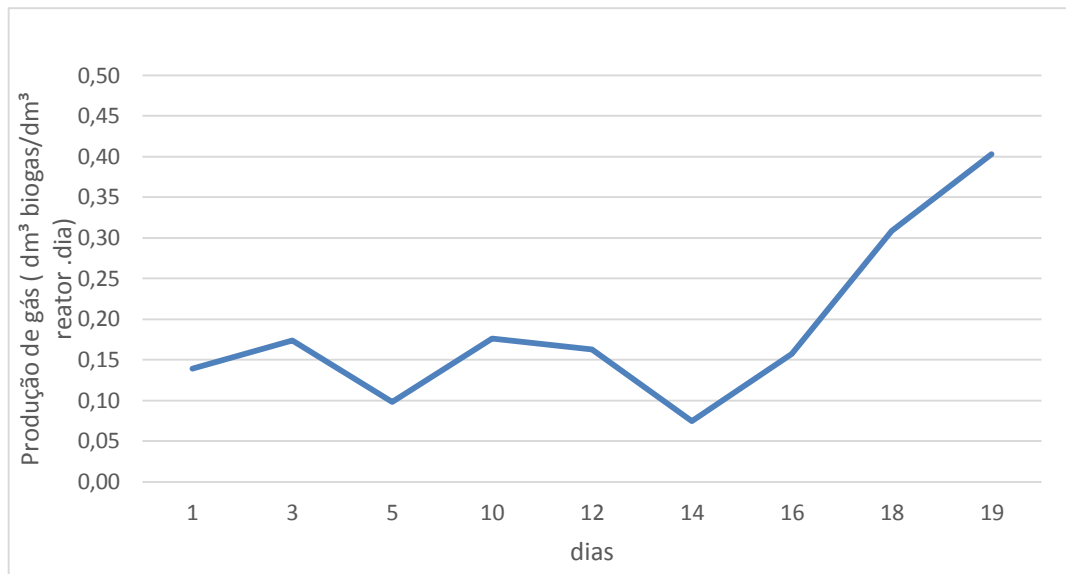


Figura 22 - Taxa de produção de biogás por tempo

Comparativamente os resultados deste experimento mostram que nas primeiras semanas os valores da produção de biogás são inferiores aos encontrados em Gomez, Cuetos, Cara, Morán, & García, porém este valor aumenta significativamente nas semanas seguintes, se aproximando do valor comparado. A explicação está no fato que devido a questões logísticas e de início operacional do digestor, durante três meses o digestor era alimentado com uma menor carga orgânica e o efluente era recirculado no digestor, com o objetivo de não ocorrer perda da fauna bacteriana e fortalece-la. Isto acarretou no fato de quando o digestor começou a operar em um ciclo contínuo, onde o mesmo volume adicionado na alimentação era retirado de efluente, o sólido retirado possuía um tempo de detenção hidráulica maior do que 30 dias e conseqüentemente sua degradação era mais avançada. Portanto os resultados das primeiras semanas são inferiores aos encontrados na literatura. Nas semanas seguintes, principalmente nas últimas, após 30 dias do início da operação e, portanto em um intervalo de tempo igual ou maior que o tempo de detenção hidráulica, estes valores aumentam significativamente. Esta discussão fica clara na análise da Figura 23, onde taxa de degradação de VS que diminuiu a cada semana.

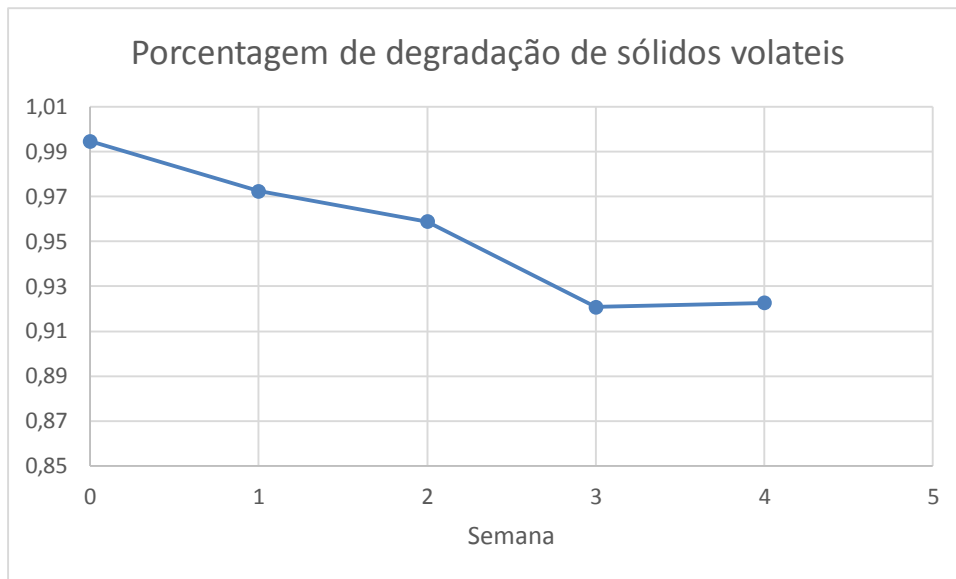


Figura 23 - Porcentagem de degradação de Sólidos voláteis

Quando a produção de biogás é analisada a luz do parâmetro da produção específica de biogás (PEG), medido por unidade de SV adicionado no digestor, observa-se desde as primeiras semanas valores próximos aos encontrados em Gomez, Cuetos, Cara, Morán, & García, já que os sólidos do efluente, com um tempo de detenção hidráulica maior, não são considerados, sendo considerado neste parâmetro apenas os sólidos voláteis adicionados no digestor.

A Figura 22 mostra a taxa de produção de biogás expressa como a taxa de produção de biogás por volume útil do digestor por dia ($\text{dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$) devido à digestão mesofílica do substrato com o lodo. Inicialmente a taxa de produção de biogás aumentou de $0,14 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$ para $0,17 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$ nos primeiros dois dias, depois houve uma diminuição neste valor para $0,10 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$. Nas duas semanas seguintes este valor variou pouco, com exceção do dia 16 onde houve uma queda significativa desta taxa de produção para $0,07 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$. Nos últimos dias do experimento ocorre um aumento significativo na taxa de produção de biogás atingindo o valor máximo de $0,40 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{dia}$.

A Figura 24 apresenta a relação entre a produção de biogás e a massa de sólidos voláteis aplicados no reator e a massa de sólidos voláteis destruídos no reator. A análise da figura mostra que não houve durante o período do experimento uma relação direta entre a carga orgânica adicionada e a produção de biogás, como é esperado. Nota-se que a produção de biogás neste período esteve relacionada a outros fatores. A análise desta figura em conjunto com a Figura 22 mostra que a produção de biogás esteve relacionada durante o período do experimento com a variável temporal. As maiores produções de biogás estão concentradas na semana final do experimento ainda que o resíduo utilizado nesta semana possua um teor de sólidos voláteis menor.

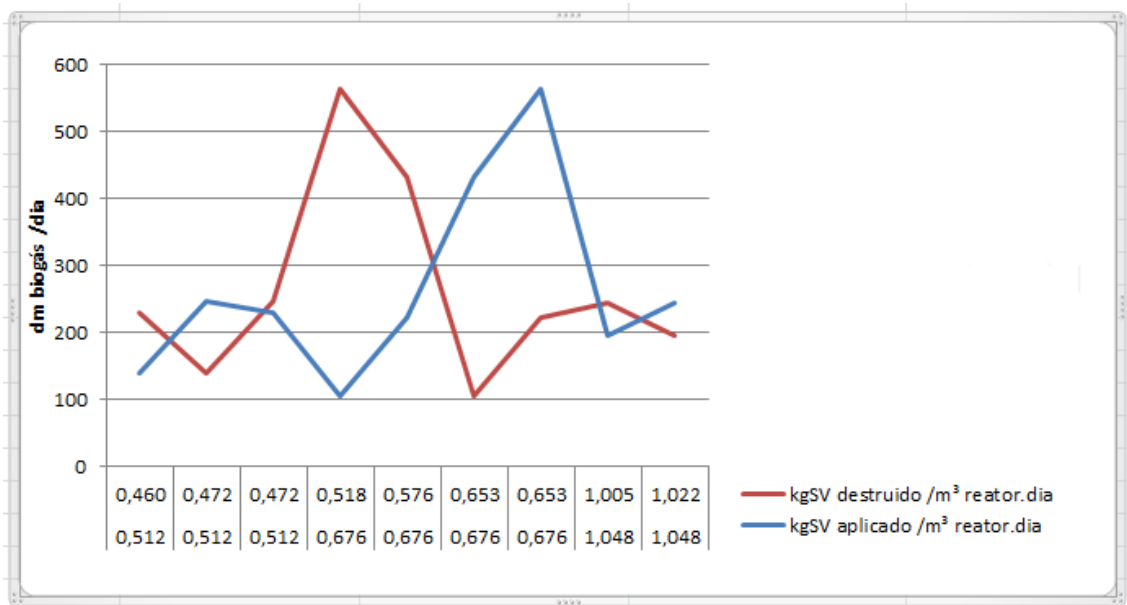


Figura 24 - Volume de biogás produzido por massa de sólidos voláteis aplicados e destruídos

A composição do biogás foi analisada durante todo o período do experimento e também durante os meses iniciais de inoculação do digestor. Foi analisada a concentração de metano e gás carbônico. Os resultados estão na Figura 25.

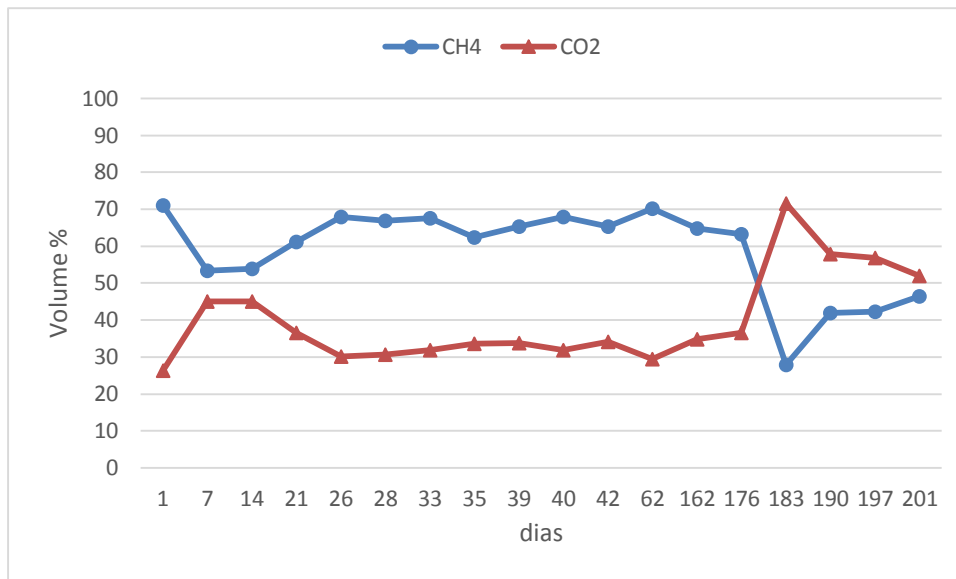


Figura 25- Evolução do conteúdo percentual em volume de CH₄ e CO₂ no biogás produzido

A análise da Figura 25 nos mostra que durante o período de inoculação a composição do biogás produzido se estabilizou na faixa de 30% em volume de CO₂ e 70% de CH₄. Quando se encerrou a etapa de inoculação e iniciou-se a alimentação do digestor, após o intervalo por problemas operacionais, com carga orgânica total ocorreu uma inversão nestes valores de concentração dos gases principais. Esta inversão indica que com o aumento na carga orgânica ocorreu um aumento na acetogênese, que corresponde à segunda fase de produção do metano e onde ocorre a conversão dos produtos da hidrólise em ácidos simples, dióxido de carbono e hidrogênio. Acredita-se que com um tempo de operação maior as concentrações de metano e gás carbônico se estabilizariam nos patamares anteriores.

O experimento durou 35 dias e foi interrompido pelo surgimento de vazamentos no reator. Os resultados dos parâmetros obtidos mostram que o processo de digestão anaeróbico ainda não estava estável até a data de interrupção do experimento. Foi observado variações na produção de biogás por massa de sólidos voláteis. Para este questionamento foram levantadas duas hipóteses. Na primeira, o substrato utilizado em semanas distintas

possuíam degradabilidade diferentes, o que explicaria o fato de que a produção de biogás em uma semana com maior carga orgânica ser menor do que outra com menor carga orgânica aplicada. Na segunda, o processo de digestão apresentou variações na capacidade de degradação do substrato, seja por questões relacionadas à fauna bacteriana ou por outros fatores.

Como os resíduos eram provenientes de uma mesma fonte e sua composição não se alterou de forma significativa, acredita-se que a segunda hipótese seja a correta. A ideia de que o sistema ainda não estava estável é reafirmado na análise da composição do biogás que até o final do experimento estava em patamares abaixo do que os encontrados anteriormente com o sistema estável. Os resultados deste experimento possuem uma limitação por não representar um sistema estável. Um experimento com um tempo de operação maior ainda se faz necessário para a validação dos resultados. Estes resultados, porém, mesmo que restritos indicam a viabilidade da co-digestão anaeróbia como fonte alternativa de energia.

5.7 Problemas no digestor

Inicialmente o experimento contava com dois digestores iguais. Na segunda semana de operação observou-se vazamento em um dos digestores. A Figura 26 indica o local onde ocorreu o vazamento, a junção entre o tubo de alimentação e o digestor. Contatou-se que o problema ocorreu devido ao rompimento da cola que unia estas duas partes do digestor. Uma hipótese levantada sobre a origem do problema são as altas temperaturas em que o digestor era exposto, devido ao clima do Rio de Janeiro. É provável que durante o verão os digestores tenham sido expostos a temperaturas superiores a 40°C.



Figura 26 - Vazamento no digestor 2

O experimento continuou, desta vez utilizando apenas um digestor, que após quatro semanas de experimento apresentou o mesmo problema em local semelhante e uma ruptura na tubulação de alimentação, como mostra a Figura 27.



Figura 27 - Detalhe do rompimento da tubulação do reator 2

Ambos os digestores haviam sido utilizados previamente em outro experimento. Contabilizando o tempo de utilização total o primeiro digestor apresentou defeito após 6

meses de utilização, enquanto o segundo digestor apresentou defeito após aproximadamente 9 meses de operação.



Figura 28 - Detalhe do vazamento no digestor 1

Observou-se que devido ao material em que estes digestores são feitos estes são dotados da capacidade de se tornarem estanques após um vazamento sem nenhum tipo de reparo, a depender da localização e tamanho do furo no digestor. Este caso foi verificado no digestor 2 onde se verificou que os vazamentos aumentavam quando existia uma maior quantidade de biogás armazenado no interior do digestor, gerando um aumento na pressão interna. Este aumento na pressão interna esticava o material têxtil do digestor e aumentando o tamanho do furo. Quando esta pressão interna era diminuída, seja por descarga do biogás, por diminuição do volume útil do digestor ao se retirar a mistura de resíduo e inoculo ou ambos, nota-se que o vazamento é estancado naturalmente devido às dobras que se formam no tecido e que fecham o vazamento.

Após o segundo vazamento que interrompeu esta pesquisa, decidiu-se encher novamente o segundo digestor até a pressão interna em que este aparenta ser estanque e dar continuidade ao experimento para averiguar se de fato é possível continuar a operação sem a necessidade de reparos.

O digestor se mostrou resistente durante o tempo de operação a ação de vetores, principalmente ratos. O local de instalação dos digestores por ser uma área aberta e por existir resíduos da trituração de orgânicos para a alimentação do próprio digestor, era uma área com potencial de atração de vetores, porém nenhum dos danos relacionados possuía relação com vetores.

6 Análise econômica

6.1 Metodologia

Segundo dados da empresa FOV, fornecedora do produto, o custo do digestor gira em torno de \$100 dólares por metro cúbico de digestor. O digestor utilizado no experimento possui 2 m³ e custa portanto aproximadamente R\$500. O tempo de vida útil estimado é de 15 anos.

No Brasil a maior parte dos domicílios utiliza gás liquefeito de petróleo (GLP) ou gás natural como combustível para cozinhar, e esse valor chega a 92% dos domicílios brasileiros. Os domicílios que não utilizam gás GLP ou gás natural para cozinhar, utilizam como alternativa basicamente a queima da madeira ou carvão. Estes valores e valores comparativos de outros países estão descritos na Tabela 8. (Heltberg, 2013)

Existe, portanto, um grande mercado no país para a utilização do biogás, especialmente ao biogás purificado, também chamado de biometano, que pode ser injetado nas redes urbanas existente de GLP ou incorporado aos botijões de gás.

A análise econômica para este estudo será feita para a utilização direta do biogás, isto é, sem o processo de transformação em metano ou injeção na rede. Para este estudo considera-se o digestor familiar fornecendo biogás diretamente, com um sistema de remoção de H₂S apenas, para utilização em um fogão, iluminação e produção de energia elétrica.

O purificador é necessário devido à toxicidade do H₂S e sua capacidade de corrosão dos equipamentos. O purificador utilizado neste estudo é da marca BGS e o processo se dá por meio químico a seco. O biogás atravessa uma malha de palha de aço onde ocorrem reações químicas que oxidam o H₂S. O purificador atende à vazão de biogás de até 15 m³/dia e tem capacidade para tratar até 800 m³ de biogás antes de ter seu composto férrico regenerado ou substituído.

Tabela 8 - Porcentagem de utilização de diferentes combustíveis para cozinhar. Fonte: (Heltberg, 2013)

	Electrified	LPG for cooking	Kerosene for cooking	Electricity for cooking	All nonsolid cooking fuels
Brazil	0.92	0.92	0	0.02	0.93
Nicaragua	0.69	0.29	0.02	0.01	0.32
South Africa	0.54	0.08	0.43	0.46	0.86
Vietnam	0.78	0.22	0.08	0.13	0.33
Guatemala	0.73	0.45	0.05	0.02	0.50
Ghana	0.41	0.05	0.01	0	0.07
Nepal	0.14	0.02	0.07	0	0.09
India	0.59	0.16	0.08	0	0.24

Notes: Row shares of individual nonsolid fuels may not sum to the total for all nonsolid fuels due to multiple fuel use by households.

^a The Brazil questionnaire does not allow distinction between LPG and other types of gas (piped gas).

Tabela 9 - Propriedades do biogás para o cenário de estudo

Cenário	Produção de biogás (m ³ /mês)	Composição do gás (%vol.)		Poder calorífico inferior
		Metano	Gás carbônico	
1	16,935	65	35	23 MJ/Nm ³
				6,5 kWh/Nm ³
2	7,902	45	55	16 MJ/Nm ³
				4,4 kWh/Nm ³

Uma mistura gasosa em que os gases não reagem entre si comporta-se como um gás único. Para prever as propriedades do biogás em questão será utilizada a lei do gás ideal. Esta lei é uma lei limite porém razoavelmente correta para gases em pressões usuais (Jones & Atkins, 2001). Esta equação será utilizada para estimar a quantidade em mols e em massa do metano e do gás carbônico presentes no biogás.

$$PV = nRT$$

Onde:

- P: Pressão (atm.)
- V: Volume do gás (l)
- N: número de mols
- R: constante universal dos

Considerando a pressão de uma atmosfera (1 atm.), a temperatura de 25°C (298 K), a constante dos gases $8,20578 \times 10^{-2} \text{ l.atm.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$, a massa molar do metano de 16,04 g/mol e a massa molar do dióxido de carbono de 44,01 g/mol.

Temos para o cenário 1:

- n= 450,15 mols de metano
- n= 242,39 mols de dióxido de carbono
- M= 7,22 kg de metano

- $M = 10,66$ kg de dióxido de carbono

Para o cenário 2:

- $n = 210,05$ mols de metano
- $n = 113,10$ mols de dióxido de carbono
- $M = 3,37$ kg de metano
- $M = 4,98$ kg de dióxido de carbono

Para o cenário 3:

- $n = 957$ mols de metano
- $n = 515,3$ mols de dióxido de carbono
- $M = 15,35$ kg de metano
- $M = 22,68$ kg de dióxido de carbono

A análise econômica consiste na estimativa do investimento inicial, gastos de operação e manutenção e as receitas geradas durante o tempo de operação do sistema. Com estas informações é possível montar um fluxo de caixa para cada cenário de produção de biogás e de utilização do biogás produzido.

Neste estudo foram considerados três cenários de produção distintos: o cenário médio do experimento, o cenário superior do experimento e um cenário estimado de potencial de geração quando o digestor é alimentado com uma carga orgânica maior do que as aplicadas no experimento, baseados em (Rajendran, Aslanzadeh, Johansson, & Taherzadeh, 2013) que estima a produção de biogás para um reator têxtil semelhante de 2 m^3 em 36 m^3 por mês. Foram analisados três cenários distintos para a utilização do biogás produzido: iluminação direta, utilização como gás de cozinha e geração de energia elétrica. Foram comparados estes indicadores econômicos com

o que se espera obter em investimentos alternativos. Os critérios utilizados neste estudo foram a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e o Tempo de Retorno (TR) e o Tempo de Retorno Descontado (TRD).

6.1.1 O Método do Valor Presente Líquido

O Método do Valor Presente Líquido é considerado exato, e consiste em trazer para o tempo presente, após a definição da taxa mínima de atratividade, os valores obtidos a partir de um determinado fluxo de caixa.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) foi utilizada como parâmetro de retorno exigido do investimento. Neste caso foi aplicada a Taxa SELIC líquida, com o Imposto de Renda descontado. Isto significa que a referida taxa, cujo valor no ano de 2014 era equivalente a 11% ao ano, foi descontada pela alíquota do imposto de renda (15%) aplicada sobre investimentos no mercado financeiro. O valor aplicado, portanto foi de 9,3% ao ano.

A motivação para a escolha da taxa SELIC foi o fato dela ser o índice de referência para remuneração em títulos públicos do Governo Federal brasileiro, emitidos pelo Tesouro Nacional e considerados investimentos seguros, com baixo nível de risco.

Quanto maior o VPL, maior é a atratividade do projeto. Desta forma, este método auxilia na tomada de decisão da escolha alternativa com melhor retorno financeiro, isto é, aquela que apresenta o maior VPL.

$$VPL = \sum FC(1 + i)^{-n}$$

Onde:

- FC: fluxo de caixa
- i: taxa de juros
- n: número de períodos

6.1.2 Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

O método de análise pela taxa interna de retorno, assim como o método VPL também é considerado um método exato, assim como o valor presente líquido.

A TIR é obtida a partir da análise projetiva do fluxo de caixa, sendo definida como a taxa de juros que torna nulo o VPL da alternativa analisada, ou seja, a taxa de juros onde as receitas e as despesas se igualam. Para pequenos investimentos se a TIR apresentar retorno não negativo de rentabilidade o resultado é considerado satisfatório.

$$TIR = \sum FC(1 + i)^{-n} = 0$$

$$VPL = \sum FC(1 + i)^{-n}$$

Onde:

- FC: fluxo de caixa
- i: taxa de juros
- n: número de períodos

6.1.3 Período de Retorno Descontado

O período de retorno descontado é medido o prazo necessário em anos para a recuperação do investimento. Este cálculo leva em conta o investimento inicial, as receitas geradas pelo projeto, o tempo de vida do sistema, a taxa de desconto, o

período de retorno simples, e o fator de recuperação de capital. As equações estão descritas abaixo.

$$PRS = \frac{\text{Investimento Inicial (R\$)}}{\text{Economia por ano } \left(\frac{\text{R\$}}{\text{ano}}\right)}$$

$$FRC_{(d,n)} = \frac{d * (1 + d)^n}{(1 + d)^n - 1}$$

$$PRD = n * FRC_{(d,n)} * PRS$$

Onde:

- d: taxa de desconto (7%aa);
- n: vida útil das partes do sistema (15 anos);

6.2 Resultados

6.2.1 Biogás para cozinhar

O maior custo na instalação de um sistema de biogás para cozinhar está no digester. O investimento total inclui ainda o fogão, tubos de distribuição, medidores de pressão, purificadores de biogás e eventualmente dispositivos de armazenamento. De modo geral, espera-se que o investimento será pago pela economia nos custos de energia, com a substituição do combustível, e em alguns casos por um aumento na renda devido à venda do fertilizante produzido. Somam-se ainda os custos de operação do sistema.

O consumo de biogás para cozinhar é estimado em 0,21 m³/pessoa.dia (Ravindranath & Ramakrishna, 1997). A produção de biogás para o cenário 1, seria suficiente para suprir em 90% as necessidades de uma família de 3 pessoas. Enquanto para o cenário 2, a quantidade seria suficiente apenas para 1 pessoa.

A Tabela 10 mostra o consumo de GLP de acordo com o tamanho da família. Para uma família de 1 a 3 pessoas o consumo de GLP é de 11 kg/mês (Rajendran, Aslanzadeh, Johansson, & Taherzadeh, 2013). Considerando que o GLP possui um valor calorífico específico típico de 46,1 MJ / kg, a energia total utilizada por esta família é de aproximadamente 507 MJ por mês. A geração energética total do biogás no cenário 1 é de 389,5 MJ por mês, conforme mostra a 9, o que corresponde a aproximadamente 76% da necessidade familiar. O biogás gerado é suficiente, segundo a Tabela 11, para 55 horas de utilização no menor consumo por mês ou 14 horas mensais no cenário de maior consumo.

Tabela 10 - Utilização de GLP para diferentes tamanhos familiares. Fonte: adaptado de (Rajendran, Aslanzadeh, Johansson, & Taherzadeh, 2013)

Tamanho da família	Consumo de GLP (kg/mês)
1-3	11
4-6	15
4-7	20
10+	25

Outros estudos feitos com um digestor semelhante por (Rajendran, Aslanzadeh, Johansson, & Taherzadeh, 2013), demonstram uma produção 36 m³ para um digestor de 2.0 m³.

Tabela 11 - Consumo de biogás para diferentes fogões. Fonte: (Fulford , 1996)

	Energia produzida (kW)	Consumo de biogás (10 mbar) (m³h⁻¹)
Fogão doméstico	1.2 - 5.5	0.3 - 1.2
Fogão comercial	5.5 – 17	1.2 – 4

Em pesquisa de mercado foram pesquisados os custos para a instalação de um sistema de biogás para cozinhar. A empresa BGS fornece fogões de queimador duplo com as seguintes especificações técnicas.

- Potência calorífica: 2,8 kW
- Taxa de consumo de gás: 0,45 m³/h (por queimador)
- Eficiência térmica: > 57%
- Pressão de entrada do gás: 1.600 Pa
- Eficiência do acendedor: > 98%

Em pesquisa foi determinado o custo do equipamento em R\$354,00 (2014).

Para a comparação entre o sistema a biogás e um sistema convencional que utiliza GLP, foi avaliado como referência um fogão a gás Electrolux 56SE 4 Bocas. Suas especificações técnicas foram extraídas do manual de instruções e são:

- Potência Total 12,25kW;
- Potência queimadores 2 de 2.100W e 2 de 2.700W;
- Potência do forno 2.650W;
- Consumo de gás (GLP) para 1 queimador [LIQUIGAS] 0,056kg/h
- Preço médio do gás (PmGLP) - 14 a 600 m³ [COMGAS] R\$ 3,53/m³

Em pesquisa de mercado o custo do fogão encontrado foi de R\$605,00. (2014)

A Tabela 12 mostra os custos dos equipamentos necessários para o sistema de biogás para cozinhar.

Tabela 12 - Custos do sistema de biogás para cozinhar

Custo			
Componente	Custo unitario	unidades	Custo total (R\$)
Digestor	500	1	500
Purificador	171	1	171
Custo Total			671

Considerando o consumo do fogão a biogás de referência e o volume mensal produzido de biogás no experimento para os diferentes cenários, calculou-se a autonomia do sistema, isto é o número de horas em que o sistema pode funcionar com o biogás produzido mensalmente.

As Tabela 14, 15 e 16 mostram os resultados de economia com a utilização do sistema a biogás em detrimento ao sistema convencional para todos os cenários.

Tabela 13 - Economia e consumo para o cenário 1

Economia no cenário 1	
Consumo	0,5 m ³ /hora
Autonomia do sistema	37,6 horas
Consumo fogão convencional	0,1 kg/h
Gás consumido	2,1 kg
Densidade do media GLP	2,5 kg/m ³
Gás consumido	0,8 m ³
Custo GLP	3,6 R\$/m ³
Economia Cenário 1	3,0 R\$/mes

Tabela 14 - Economia e consumo para o cenário 2

Economia no cenário 2	
Consumo	0,5 m ³ /hora
Autonomia do sistema	17,6 horas
Consumo fogão convencional	0,1 kg/h
Gás consumido	1,0 kg
Densidade do media GLP	2,5 kg/m ³
Gás consumido	0,4 m ³
Custo GLP	3,6 R\$/m ³
Economia Cenário 2	1,4 R\$/mes

Tabela 15 - Economia e consumo para o cenário 3

Economia no cenário 3	
Consumo	0,5 m ³ /hora
Autonomia do sistema	80,0 horas
Consumo fogão convencional	0,1 kg/h
Gás consumido	4,5 kg
Densidade do media GLP	2,5 kg/m ³
Gás consumido	1,8 m ³
Custo GLP	3,6 R\$/m ³
Economia	6,4 R\$/mes

Considerando o fluxo de caixa, que inclui as receitas geradas pela economia de gás, os gastos com a troca do purificador e os custos operacionais estimados em 5% da receita gerada, foram calculados o período de retorno simples e descontado, o valor presente líquido e a taxa interna de retorno. A vida útil dos equipamentos foi estimada em 15 anos a taxa de desconto em 10% ao ano. Os resultados para os diferentes cenários estão na Tabela 16

Tabela 16 - Parâmetros econômicos

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Taxa	9,70%	9,70%	9,70%
VPL (R\$)	-697,17	-825,53	-426,25
PRS (anos)	19,7	42,2	9,3
PRD (anos)	32,4	69,4	15,2

Comparativamente, com o cenário da utilização do gás convencional todos os cenários avaliados para a utilização de biogás apresentaram valores superiores no valor presente líquido. E como no cenário a gás convencional não existe geração de receita não existe retorno do investimento.

6.2.2 Biogás para iluminação

O biogás produzido diariamente pode ser utilizado na iluminação residencial, de forma a gerar uma economia no consumo de energia elétrica residencial. O equipamento utilizado para iluminação são lâmpadas semelhantes a lampiões a gás.

Em pesquisa de mercado encontrou-se um fornecedor e o custo é de R\$85,00 por lâmpada. Segundo o fabricante BGS a iluminação produzida é similar a uma lâmpada incandescente de 60-100W e possui acendedor automático. O consumo é de 0,07 m³ de biogás por hora de acordo com o fornecedor.

Para a instalação das lâmpadas são necessários ainda alguns outros equipamentos, como purificadores de biogás para a retirada de H₂S, tubos e conexões, registros e medidores de pressão.

A Tabela 17 mostra os custos, levantados em pesquisa de mercado, associados à instalação do sistema de iluminação a biogás.

Tabela 17 - Custos de instalação do sistema de iluminação a biogás

Custo			
Componente	Custo unitario	unidades	Custo total (R\$)
Digestor	500	1	500
Purificador	171	1	171
Custo Total			671

A autonomia do sistema foi calculada para os dois sistemas e, considerando como referência uma lâmpada de 100W, foi calculada a economia gerada, conforme mostram a Tabela 18 e a Tabela 19.

Tabela 18 - Parâmetros para cenário 1 de iluminação

Economia no cenário 1		
Consumo	0,07	m ³ /hora
Autonomia do sistema	241,9	horas
Lampada incandescente equivalente	100	W
Energia Consumida	24,2	kWh
Economia gerada	10,21	R\$/mes

Tabela 19 - Parâmetros para o cenário 2 de iluminação

Economia no cenário 2		
Consumo	0,07	m ³ /hora
Autonomia do sistema	112,9	horas
Lampada incandescente	100	W
Energia Consumida	11,3	kWh
Economia gerada	4,76	R\$/mes

Tabela 20 - Parâmetros para o cenário 3 de iluminação

Economia no cenário 3		
Consumo	0,07	m ³ /hora
Autonomia do sistema	514,3	horas
Lampada incandescente equivalente	100	W
Energia Consumida	51,4	kWh
Custo	21,70	R\$/mes

Considerando o fluxo de caixa, que inclui as receitas geradas pela economia de gás, os gastos com a troca do purificador e os custos operacionais estimados em 5% da receita gerada, foram calculados o período de retorno simples e descontado, o valor presente líquido e a taxa interna de retorno. A vida útil dos equipamentos foi estimada em 15 anos a taxa de desconto em 10% ao ano. Os resultados para os diferentes cenários estão na Tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros de análise econômica

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Taxa	9,70%	9,70%	9,70%
VPL (R\$)	-24,07	-290,40	732,42
TIR	0,09	-0,01	0,28
PRS (anos)	5,8	12,4	2,7
PRD (anos)	9,5	20,4	4,5

6.2.3 Biogás para geração de energia elétrica

Para a determinação do equipamento a ser utilizado, foi avaliado aquele que melhor se ajustava ao volume de biogás produzido. Para a utilização do biogás poderá ser utilizado um gerador movido a biogás com as seguintes especificações:

Gerador modelo B4T-5.000, linha biogás. Especificações:

- Motor Branco, monocilíndrico, 4 tempos, 389 cm³, refrigerado a ar e OHC;
- Dimensões (mm): 695 x 555 x 580;
- Ignição: CDI;
- Consumo: 2,0 m³/h (1,4 m³ CH₄/h);
- Potência máxima: 4 kW (para uso em biogás);
- Potência nominal: 3,6 kW (para uso em biogás);
- Voltagem: 110/220 (bi-volt);
- Corrente de carga (A): 8,3;
- Sistema de partida: manual e elétrica;
- Transporte: compacto e portátil;
- Sistema de filtro integrado que permite a conexão do motor direto ao biodigestor;
- Recomendado para trabalhar de 16 a 18 horas por dia;

O fornecedor recomenda a manutenção preventiva: troca do óleo do motor a cada seis meses ou 1.000 h.; verificação do filtro de ar a cada uso e sua substituição a cada três

meses ou 500 h.; verificação e troca da vela de ignição a cada 12 meses ou 5.000 h.; troca do filtro de biogás a cada seis meses ou 1.000 h.; verificação da folga de válvulas e sua substituição a cada 12 meses ou 5.000 h.; limpeza do cabeçote a cada 1.000 h.

A partir de pesquisa de mercado o preço do produto foi determinado em R\$ 5.023,39.

Considerando o cenário 1 com a produção mensal de 17 m³, o equipamento poderá funcionar durante 8,5 horas por mês por digestor. Considerando a equação abaixo, a energia produzida seria de 30,6 kW. Para o cenário 3, o equipamento poderá funcionar por 18 horas produzindo um total de 64,8 kWh.

$$E_G = N_h * P_{sistema}$$

Onde:

- E_g: Energia gerada (kWh);
- P_{sistema}: potência instalada do sistema (3,6 kW)
- N_h: número de horas que o sistema é ligado

Conclui-se que a utilização deste tipo de sistema para digestores na escala trabalhada não é viável. Os custos são muito grandes e o tempo de retorno do investimento longo. A única possibilidade deste tipo de digestor é seu uso compartilhado a uma serie de digestores ou a um digestor com um maior volume reacional.

8 Conclusão

As demandas energéticas globais crescem a cada década bem como os problemas associados à utilização de combustíveis fósseis e as emissões de gases estufa associadas. Neste contexto inclui-se ainda a problemática da destinação correta dos resíduos sólidos e o tratamento de efluentes sanitários.

Neste sentido, este experimento verificou a produção de biogás associada à co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos e lodo de esgoto.

Foi possível determinar a produção de biogás e os parâmetros relacionados à digestão anaeróbia, como degradabilidade do substrato, as relações entre produção de biogás e carga orgânica aplicada e a composição do gás produzido, informações estas importantes tanto para o dimensionamento dos digestores como para a operação dos mesmos.

Os resultados obtidos se limitaram ao tempo de operação do reator, considerado curto para estabelecer estas relações de forma mais confiável. Julga-se que o tempo de operação não foi suficiente para a estabilização do processo, logo os parâmetros obtidos são limitados aos sistemas estáveis.

O ponto positivo do experimento é que prova que mesmo em condições instáveis do sistema, isto é, desde o início da sua operação, a produção de gás é suficiente e viável para aplicação em escala doméstica sendo um substituto para o GLP e o GNV para iluminação bem como sua utilização como gás de cozinha.

O reator utilizado no experimento, por suas características e volume de trabalho, se mostrou adequado como forma de geração de energia descentralizada para um núcleo familiar. Avalia-se também positivamente a utilização deste reator em maiores escalas para a geração coletiva de biogás, tanto como forma de destinação correta e

reaproveitamento energético da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos como para a estabilização de lodo de esgotos.

Recomenda-se para a empresa fornecedora do produto uma reformulação no design da tubulação de entrada do substrato e saída do digerido, pontos frágeis do sistema que apresentaram vazamentos. Nestes pontos considera-se necessária a utilização de materiais mais resistentes, principalmente nas entradas de substratos que estão constantemente em atrito com as tubulações de PVC. Avaliou-se positivamente a facilidade de instalação dos reatores, seu peso e simplicidade de operação. O modo e material como os reatores são feitos facilitam seu transporte. Avaliou-se positivamente também a resistência dos reatores contra vetores e sua estanqueidade.

Como recomendações e sugestões a futuros trabalhos nesta linha sugerem-se:

- Estudos comparativos de produção de biogás para reatores semelhantes trabalhando com diferentes porcentagens de misturas entre resíduos orgânicos e lodo de esgoto de forma a verificar o ponto ótimo de produção.
- A avaliação experimental do biogás produzido, através da sua utilização em equipamentos como fogões, luminárias e geradores de energia elétrica.
- Avaliação do digerido como fertilizante. Análise dos nutrientes presentes e da viabilidade sanitária da sua utilização no campo.

9 BIBLIOGRAFIA

- BTA. (11 de Julho de 2014). Fonte: BTA: http://www.bta-international.de/fileadmin/redaktion/BTA_Prozess/BTA_Prozess/BTA_prozess_grafik_en.jpg
- http://www.ows.be/household_waste/dranco/. (7 de Julho de 2014). Fonte: http://www.ows.be/household_waste/dranco/:
http://www.ows.be/household_waste/dranco/
- KOMPOGAS. (11 de Julho de 2014). Fonte: KOMPOGAS: <http://www.axpo.com/axpo/kompogas/en/home.html>
- OWSDRANCO. (2014). Fonte: <http://www.ows.be/dranco.html>
- Soton. (10 de Julho de 2014). Fonte: www.soton.ac.uk
- Beil, M., & BEYRICH, W. (2013). Biogas upgrading to biomethane. In: A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The biogas handbook Science, Production and applications* (pp. 342 - 375). Woodhead.
- Chernicharo, C. A. (1997). Principios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbicos. Belo Horizonte.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2010). *Guia Prático do Biogás Geração e Utilização*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
- Fulford, D. (1996). *Biogas Stove Design - A short course*. Kingdom Bioenergy.
- Garba, B. (1996). Effect of temperature and retention period on biogas production from lignocellulosic material. *Renew. Energy – An Int. J.* 9 (1–4), 938–941.
- Gomez, X., Cuetos, M., Cara, J., Morán, J., & García, A. (2005). Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate.
- Hamzawi, N., Kennedy, K. J., & Mc Lean, D. D. (s.d.). Technical feasibility of anaerobic co-digestion of swage sludge and municipal solid waste. *Environ. Techonoly* 19, 993-1003.
- Heltberg, R. (2013). *Household fuel and energy use in developing countries – a multicountry study*. Washington DC: Oil and Gas Policy Division, The World Bank.
- Jain, S. R., & Mattiasson, B. (1998). Acclimatization of methanogenic consortia for low pH biomethanation process. *Biotech. Lett.* 20, 771–775.
- Jones, L., & Atkins, P. (2001). *Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. Porto Alegre: Bookman.

- Jordão, E. P., & Pessôa, C. A. (1995). *Tratamento de Esgotos Domésticos*. ABES.
- KAPARAJU, P., & RINTALA, J. (2013). Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. In: A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The biogas handbook Science, Production and applications* (pp. 378 - 403). Woodhead.
- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'dweyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology - a review. *Bioresource Technology* V83, pp. 27 - 36.
- Kübler, H., & Schertler, C. (1994). Three-phase anaerobic digestion of organic wastes. *Water Science and Technology*, 30, 367-374.
- Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., & Biey, E. M. (2001). Solid waste digesters: process performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water Science Technology*, 44, 91-102.
- Mazzucchi, O. A. (1980). Biodigestor rural. São Paulo, CESP. 29.
- Monharo, G. J. (1974). Scientific aspects of cow dung digestion. *Khandi Gramodyog* 29, 340-357.
- Nichols, C. (2004). Overview of anaerobic digestion technologies in Europe. *Biocycle*, 45.
- OWS. (1998). Traitment de Dechets Municipaux par Le Systeme Dranco, organic waste system NV.
- PETERSSON, A. (2013). Biogas cleaning. In: A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The biogas handbook Science, Production and applications* (pp. 329 - 341). Woodhead.
- Poggi-Varaldo, H. M., & Oleszkiewicz, J. A. (1992). Anaerobic cocomposting of municipal solid waste and waste sludge at high total level. *Environ. Technology* 13, 409-421.
- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy* 87.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., Johansson, F., & Taherzadeh, M. J. (2013). Experimental and economical evaluation of a novel biogas digester. *Energy Conversion and Management* 74, 183 - 191.
- Ravindranath, N., & Ramakrishna, J. (1997). Energy options for cooking in India. *Energy*, 63 - 75.

- Rodrigues, A. L. (2005). *Co-digestão anaeróbia de resíduos de natureza orgânica*. Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento.
- Souza, M. E. (2002). Fatores que influenciam a digestão anaeróbica. *Bioresource Technology*, 27 - 36.
- ten Brummeler, E. (2000). Full scale experience with the BIOCEL process. *Water Science and Technology*, 41, 299-304.
- URBAN, W. (2013). Biomethane injection into natural gas networks. In: A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, *The biogas handbook Science, Production and applications* (pp. 378 - 403). Woodhead.
- Verma, S. (2002). *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes*.
- Weiland, P. (2001). Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. *Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI Berichte, n° 162*, 19-32.
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., & Sangeeta , K. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource Technology* 95.
- Zennaki, B. Z., Zadi, A., Lamini, H., & Aubinear, M. (1996). Methane Fermentation of cattle manure: effects of HRT, temperature & substrate concentration. *Tropical Agricultural* 14 , 134–140.