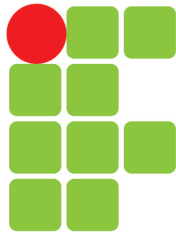


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR ANAERÓBIO
DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE INDÚSTRIA
ALIMENTÍCIA**

Camila Alonso de Almeida

[IFG]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
26 de novembro de 2014



**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
GOIÁS
Câmpus Goiânia

COORDENAÇÃO DO MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR ANAERÓBIO
DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE INDÚSTRIA
ALIMENTÍCIA**

Camila Alonso de Almeida

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), sob a orientação do Prof. Dr. Aylton José Alves e co-orientação do Prof. Dr. Joachim Werner Zang

[IFG]

[Goiânia - Goiás - Brasil]

26 de novembro de 2014

Al64p Almeida, Camila Alonso de.

Produção de biogás em reator anaeróbio de resíduos provenientes de indústria alimentícia/
Camila Alonso de Almeida. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, 2014.
98f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.
Coorientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do
Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Biodigestão anaeróbia. 2. Lodo - composição. 3. Tratamento - efluentes. I. Alves, Aylton José
(orientador). II. Zang, Joachim Werner (coorientador). III. Título.

CDD 628.354

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

“Vim, vi e venci”.

JÚLIO CÉSAR

*Dedico esse trabalho aos amores da minha vida... Meus pais, a
minha irmã e ao meu querido noivo, com todo o meu amor e
reconhecimento por tudo que fazem por mim... Amo vocês!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais uma conquista, por ter me abençoado me dando sabedoria, saúde e disposição para realizar esse trabalho.

Aos meus pais, Fátima e Reginaldo, e a minha irmã, Suélen, que com muito carinho e apoio me ajudaram a realizar esse trabalho.

Agradeço em especial ao meu orientador que me acompanhou durante esses dois anos com dedicação e muita atenção, fornecendo todos os suportes necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Joachim Werner, Dr. Sérgio Botelho e Dr. Wesley Pacheco que não mediram esforços para me ajudar em várias etapas do projeto.

Agradeço com muito carinho aos alunos do NEXT, em especial Geovanne Furriel, Rafael Ferraz e Maykon Santana, por todo o suporte que prestaram no desenvolvimento e conclusão do trabalho.

Agradeço os meus amigos Marco Túlio e Renata Ribeiro pelo incentivo, apoio e pelas risadas!

Agradeço os amigos da Lanagro-GO, Luís Sávio e Rosana, por toda a ajuda prestada para desenvolver as análises do trabalho, inclusive nos feriados.

Agradeço ao meu noivo Lucélio, com quem amo partilhar a vida. Obrigada pelo carinho, paciência, apoio e por me trazer paz durante esse período corrido.

RESUMO

A otimização da produção do biogás torna o processo da biodigestão anaeróbia mais eficiente, sendo então vantajoso para a indústria alimentícia que produz diariamente grande volume de lodo. Este trabalho utilizou-se de procedimentos para a produção de biogás em sistema laboratorial de batelada. Uma bancada foi proposta juntamente com uma técnica inovadora para medir a produção de biogás de forma automática, permitindo melhor precisão nas leituras e a possibilidade de automatização dos procedimentos de registro da produção de biogás em tempo real e a distância. Outro objetivo foi proporcionar contribuições para estudos que ampliem a quantidade e a eficiência energética do biogás, atualmente produzido em uma planta industrial anaeróbia de tratamento de efluentes da indústria alimentícia. Os procedimentos desenvolvidos neste trabalho através dos nove conjuntos de biorreatores em bateladas seguiu a Norma Alemã *VDI 4630*. A biomassa em estudo neste trabalho é o lodo resultante dos processos de tratamento dos efluentes da planta industrial, com produção diária de cerca de dez toneladas, atualmente, totalmente descartada. Através dos ensaios em batelada foi possível calcular o volume de biogás e o tempo de retenção da biomassa em estudo, obtendo dados para projetar o biorreator de fluxo contínuo laboratorial, e ainda fazer projeção do incremento de produção de biogás caso se opte pelo aproveitamento dessa matéria prima em biorreatores industriais. A caracterização da biomassa também foi realizada para conhecer a composição do lodo quanto ao valor de macronutrientes, micronutrientes, matéria seca orgânica e outras características físico-químicas.

BIOGAS PRODUCTION IN ANAEROBIC REACTOR OF WASTE FROM THE FOOD INDUSTRY

ABSTRACT

The optimization of the biogas production makes the process of anaerobic digestion more efficient, this is more advantageous for the food industry that produces daily large amounts of sludge. For this work laboratory batch experiments for biogas production have been realized. Therefore a system of nine batch bioreactors was developed with an innovative automated technique to measure the biogas production, using precision electronic scales to weigh water, which was dislocated by the generated biogas, allowing real time quantification. Another objective was to contribute to studies that expand the quantity quality of biogas produced in a industrial anaerobic waste water treatment plant of the food industry. The procedures to evaluate the biogas potentials applied in this work followed the German standard *VDI 4630*. The studied biomass was the sludge resultant of the physical wastewater treatment processes of the industrial plant with a daily production of about ten tons, which is totally discarded currently. Through the batch tests it was possible to estimate the volume of biogas and to calculate the biomass retention time, obtaining data for the design a continuous flow laboratorial bioreactor. Also the potential increase of biogas production in the treatment plant in case using this prime matter in an additional industrial bioreactor. This sludge was analyzed also to know the composition in relation of macronutrients, micronutrients, organic dry matter and other physicochemical characteristics.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	25
1.1.1 Geral:	25
1.1.2 Específicos:	25
1.2 Justificativa	25
1.3 Organização da Dissertação	27
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 Biomassa	29
2.1.1 Fontes de Biomassa	30
2.2 Tratamento de efluentes com biodigestão anaeróbia	32
2.2.1 Biodigestão anaeróbia	33
2.2.1.1 Hidrólise	34
2.2.1.2 Acidogênese	34
2.2.1.3 Acetogênese	35
2.2.1.4 Metanogênese	36
2.2.2 Fatores que alteram a biodigestão anaeróbia	37
2.2.2.1 Temperatura	37
2.2.2.2 Nível de acidez e alcalinidade (<i>pH</i>)	37
2.2.2.3 Toxicidade/Inibidores	38
2.3 Biodigestores	39
2.3.1 Tipos de biodigestores	39
2.3.1.1 Biodigestor indiano	40
2.3.1.2 Biodigestor chinês	41
2.3.1.3 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente de Camada (Manta) de Lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)	42

2.3.1.4	Reator de batelada	43
2.3.1.5	Biodigestor da Marinha	44
2.4	Biogás	45
2.4.1	Histórico do Biogás	45
2.4.2	Composição do Biogás	46
2.5	Biogás e a indústria alimentícia	48
2.6	Biofertilizante proveniente de biodigestão anaeróbia	48
CAPÍTULO 3 Processo de tratamento dos efluentes.		51
3.1	Tratamento de efluentes	53
3.1.1	Processo anaeróbio	55
3.1.2	Processo aeróbio	58
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA		61
4.1	Montagem da bancada de teste	61
4.2	Determinação de umidade, massa seca e massa seca orgânica para a bi- omassa e para o inóculo	66
4.3	Montagem do ensaio em batelada	67
4.4	Monitoramento do ensaio	68
4.5	Cálculo da energia para secagem térmica do lodo	69
4.6	Caracterização do lodo e do resíduo final da biodigestão: micronutrientes, macronutrientes e contaminantes	70
4.6.1	Contaminantes Inorgânicos, Macronutrientes Primários e Micronutri- entes:	71
4.6.2	Macronutrientes Secundários (Fósforo e Potássio):	72
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		75
5.1	Determinação da umidade, <i>MSI</i> e <i>MSO</i> antes e depois da biodigestão anaeróbia	75
5.2	Análises dos ensaios em batelada	76
5.3	Cálculo dos parâmetros do biorreator laboratorial de ciclo contínuo	82
5.4	Projeção preliminar da capacidade de produção de biogás a partir de um biorreator industrial para uso do lodo como biomassa	83
5.5	Resultado da determinação da secagem térmica do lodo	83
5.6	Resultados das análise: macronutrientes, micronutrientes e contaminan- tes inorgânicos	84

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	89
6.1 Contribuições do Trabalho	90
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Oferta interna de energia elétrica - OIEE	30
2.2 Bactérias dos estágios da biodigestão anaeróbia	33
2.3 Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo indiano. . .	40
2.4 Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo chinês. . .	41
2.5 Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo batelada. .	43
2.6 Biodigestor da marinha do Brasil	44
3.1 Lodo na saída do flotador	51
3.2 ETE da Heinz S.A., Nerópolis, GO	52
3.3 Tratamento realizado na ETE.	52
3.4 Peneira rotativa	54
3.5 Tanque de equalização	54
3.6 Tanque de flotação	55
3.7 Centrífuga	55
3.8 Capacidade do tanque de condicionamento	56
3.9 Biodigestores anaeróbios	56
3.10 Suspensão contendo as bactérias anaeróbias	57
3.11 Gasômetro	58
3.12 Flare	59
3.13 Lagoas aeróbias	59
4.1 Esquema do primeiro reator em batelada utilizado	62
4.2 Primeiro protótipo de captação de biogás	63
4.3 Segundo protótipo do biorreator a ser montado.	64
4.4 Reator com captação de gás (gasômetro)	65
4.5 Visão geral da bancada com nove conjuntos de bioreatores.	66
4.6 Determinação da umidade em balança de infravermelho	67
4.7 Inóculo seco	67
4.8 Lodo seco	68
4.9 Termostato com controle de temperatura com sensores externos	69
4.10 Preparo da amostra de lodo	71
4.11 Amostras prontas para realizar leituras	72
4.12 Espectrofotômetro de absorção atômica de chama	73
5.1 Produção acumulada de biogás da amostra de lodo 1	76

5.2	Produção acumulada de biogás da amostra 2	77
5.3	Produção acumulada de biogás da amostra 3	77
5.4	Produção diária de biogás amostra 1	78
5.5	Produção diária de biogás amostra 2	79
5.6	Produção diária de biogás amostra 3	79
5.7	Produção normalizada percentual líquida amostra 1	80
5.8	Produção normalizada percentual líquida amostra 2	81
5.9	Produção normalizada percentual líquida amostra 3	81
6.1	Bioreator de fluxo contínuo	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Composição típica do biogás	47
2.2 Relação dos volumes dos gases e poder calorífico comparados ao biogás .	47
5.1 Umidade, <i>MSI</i> e <i>MSO</i>	75
5.2 Contaminantes inorgânicos no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo.	84
5.3 Micronutrientes no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo	85
5.4 Macronutrientes primários no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo.	86
5.5 Macronutrientes secundários no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B	–	Boro
CI	–	Circulação Interna
Ca	–	Cálcio
Ca(OH) ₂	–	Hidróxido de Cálcio
CaO	–	Óxido de Cálcio
Cd	–	Cádmio
CH ₄	–	Metano
Cl	–	Cloro
CNTP	–	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO ₂	–	Gás Carbônico
CONAMA	–	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	–	Cromo
Cu	–	Cobre
DBO	–	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	–	Demanda Química de Oxigênio
EAA	–	Espectrometria de absorção Atômica de Chama
ETE	–	Estação de Tratamento de Efluentes
Fe	–	Ferro
Fe ³⁺	–	Íon Ferro
GEE	–	Gases do efeito estufa
H ₂	–	Gás Hidrogênio
H ₂ S	–	Ácido Sulfídrico
H ₂ O	–	Água
ICREPQ14	–	International Conference on Renewable Energies and Power Quality
IFG	–	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
IN	–	Instrução Normativa
K	–	Potássio
LANAGRO	–	Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás
MAPA	–	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDL	–	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mg	–	Magnésio
Mn	–	Mangânes
Mo	–	Molibdênio
MSI	–	Matéria Seca Inorgânica
MSO	–	Matéria Seca Orgânica
N	–	Nitrogênio
N ₂	–	Gás Nitrogênio
NH ₃	–	Amônia

Na_2CO_3	–	Carbonato de Sódio
NaHCO_3	–	Bicarbonato de Sódio
NH_4HCO_3	–	Bicarbonato de Amônia
NaOH	–	Hidróxido de sódio
Ni	–	Níquel
NO_3^-	–	Íon Nitrato
O_2	–	Gás Oxigênio
P	–	Fósforo
PC	–	Poder Calorífico
PCI	–	Poder Calorífico Inferior
Pb	–	Chumbo
pH	–	Potencial hidrogeniônico
PNDI	–	Produção Normalizada Diária de Inóculo
PNDL	–	Produção Normalizada Diária de Lodo
PNLDL	–	Produção Normalizada Líquida Diária do Lodo
Q	–	Vazão de Fluxo
REPQJ	–	Renewable Energy and Power Quality Journal
S	–	Enxofre
ST	–	Sólidos Totais
SO_4^-	–	Íon Sulfato
T	–	Tempo de Detenção
UASB	–	Upow Anaerobic Sludge Blanket
UV-VIS	–	Ultravioleta Visível
V	–	Volume
VDI	–	Verein Deutscher Ingenieure
Zn	–	Zinco

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis são recursos considerados não renováveis devido ao seu longo processo de formação. O seu consumo tem sido acelerado desde o final do século XVIII, causando reduções significativas nas jazidas de petróleo e desequilíbrios no meio ambiente, em todos os níveis, regionais e globais (GOLDEMBERG, 2000) e (CARVALHO *et al.*, 2010). O uso excessivo desses combustíveis acarretam alguns fatores negativos para o meio ambiente como: o aumento dos gases do efeito estufa (*GEE*), o aquecimento global e a chuva ácida. Esses combustíveis fósseis foram os mais utilizados depois da revolução industrial com a mecanização dos sistemas de produção com uso crescente dos combustíveis em diversos setores da economia mundial (WALTER *et al.*, 2010).

A emissão dos *GEE* e o aquecimento global são fatores que incentivaram a busca de estratégias que visam a redução nas fontes causadoras de gases prejudiciais ao meio ambiente. Como forma de amenizar esses problemas, algumas soluções estão sendo estudadas e devem ser adotadas como alternativa para abrandar os danos causados no planeta como, redução da utilização de combustíveis fósseis, redução das taxas de desmatamento, redução da queima da vegetação e o uso inadequado do solo (CARVALHO *et al.*, 2010).

Como consequência da conscientização do ser humano, em relação aos problemas oriundos dos insumos fósseis, surgiu a necessidade de produzir energia menos poluente e ainda renovável (DEMIREL; SCHERER, 2008), visto que os combustíveis fósseis são considerados não renováveis em função do longo período de formação. Dessa forma, novas pesquisas têm sido desenvolvidas, tanto no Brasil quanto no exterior, para produzir energia de forma renovável e sustentável, tornando cada vez menor a dependência dos combustíveis fósseis. Uma gama de atividades em novas tecnologias é explorada para encontrar outros caminhos para enfrentar a necessidade crescente de energia e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2000).

O desafio e a previsão para as próximas décadas é garantir que os meios para a produção de energia em quantidade e qualidade sejam suficientes para atender à demanda oriunda de uma população com bilhões de pessoas a mais do hoje. Nesse

cenário surge a bioenergia, que é uma fonte renovável, no que diz respeito a matérias-primas, por incluir também resíduos orgânicos urbanos, agrícolas e florestais (DCR, 2013). As fontes renováveis surgem por serem continuamente reaproveitadas com recursos naturais como o sol, o vento, as marés, a biomassa e outros. O crescimento do uso de tecnologias sustentáveis vem aumentando através do desenvolvimento de novas tecnologias de produção de energia.

Como alternativa de combustível de fontes renováveis, aparece a biomassa que vem sendo empregada na geração de eletricidade em sistemas de co-geração e em redes elétricas isoladas, apresentando vantagens na redução do consumo de combustíveis fósseis. A biomassa, em particular, aparece como oportunidade importante para colaborar na oferta de energia para o sistema interligado do país (PALHARES et al., 2003). A biomassa permite aliar a tecnologia limpa e sustentável à redução nos impactos socioambientais. São vários os tipos de biomassas que tem sido empregadas na geração de energia elétrica, por ser uma matéria prima natural permitindo diversificar a matriz energética e ainda gerar benefícios para o meio ambiente e para a sociedade.

A indústria de alimentos é produtora de biomassa em função da fabricação dos produtos, gerando grande volume de efluentes com alto teor de matéria orgânica que são encaminhados para as estações de tratamento de efluentes (ETE) das indústrias, onde é produzido o lodo, que pode ser utilizado como fonte de energia renovável. Um dos tratamentos que o lodo pode receber, para se tornar capaz de gerar energia, pode processar-se por intermédio da fermentação anaeróbia. Um processo que além da capacidade de despoluir, permite valorizar o produto energético, biogás, e ainda obter biofertilizante (PECORA, 2006).

O lodo gerado como resíduo da indústria alimentícia apresenta valor energético e pode ser aplicado como biomassa para a biodigestão anaeróbia. Os lodos resultantes do processo de tratamento de efluentes em plantas industriais são constituídos basicamente de materiais orgânicos, 90 % (sólidos voláteis) e minerais (sólidos fixos), além de água (JUNIOR, 2008). O processo da biodigestão anaeróbia permite melhorar a produção de gás, fazendo com que a biomassa seja financeiramente mais interessante para a empresa que a produz e com aproveitamento mais sustentável para o meio ambiente. O desenvolvimento e a implementação de alternativas tecnológicas com geração de energia a custos reduzidos podem gerar impactos socioeconômicos e ambientais positivos, diminuindo a sobrecarga das concessionárias, além da dimi-

nuição da emissão de *GEE* (PECORA, 2006).

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral:

Este trabalho teve como objetivo geral estudar o lodo, resíduo resultante do sistema de tratamento dos efluentes de uma planta industrial de indústria alimentícia, quanto a sua capacidade como combustível, para produção de energia; elétrica e térmica. A empresa produtora dos resíduos sob estudo é a Heinz do Brasil S. A. situada na cidade de Nerópolis-Goiás.

1.1.2 Específicos:

Para o estudo do lodo, desenvolvido neste trabalho, enumeram-se os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o lodo proveniente da centrífuga da ETE;
- Determinar o potencial de produção de biogás do lodo;
- Investigar a secagem térmica para o lodo para aplicar como combustível em caldeiras em substituição a outros tipos de combustíveis;
- Determinar o potencial de geração de biogás deste lodo;
- Desenvolver análises técnicas para o desenvolvimento de biorreator laboratorial de ciclo contínuo;
- Desenvolver análise do resíduo final do lodo proveniente do reator anaeróbio, objetivando o seu uso como fertilizante na agricultura.

1.2 Justificativa

Atualmente a indústria de alimentos, que produz o lodo em estudo na *ETE* da empresa, conta com um sistema de tratamento de efluentes formado por uma planta que contém dois biorreatores anaeróbios em funcionamento. No ano de 2011 havia apenas um biorreator instalado e este apresentou uma produção média de $4.740,42 \text{ m}^3/\text{dia}$ de biogás. O segundo reator anaeróbio foi implantado em julho de 2012 e elevou

a média da produção de biogás para $10.423,87 \text{ m}^3/\text{dia}$, apresentando concentração média de 54,6 % de metano.

A indústria tem em vista um projeto, em fase inicial de estudos, para a produção de energia elétrica a partir do biogás produzido na *ETE*. A concentração de metano, no momento observado, precisa ser melhor estudada com a finalidade de promover o aumento do volume e a otimização da produção de metano, elevando a concentração média de metano para a faixa de 70 % a 80 %.

A *ETE* da indústria produz diariamente o lodo durante o tratamento de efluentes. Esse lodo não é aproveitado no processo da indústria, então é descartado no aterro sanitário da cidade de Nerópolis, situada no estado de Goiás. A matéria prima descartada diariamente é um produto orgânico que pode ser utilizado na queima direta em caldeira, mas por apresentar umidade acima de 50 %, precisa receber tratamento antes de ser aproveitada na caldeira, aumentando assim o custo para a empresa. Portanto, o lodo em estudo é uma biomassa com potencial de produção de biogás, podendo ser aplicado em reator anaeróbico e assim contribuir para o aumento do volume de biogás há ser convertido em energia elétrica para a própria indústria.

A indústria de alimentos tem alto custo mensal de energia elétrica e gasta alto volume de biomassa para o funcionamento das caldeiras, sendo estes principalmente cavaco de madeira e bagaço de cana.

O lodo da *ETE* é um resíduo classificado como classe II A, não inerte segundo a norma *ABNT – NBR 10004/2004* ([ABNT, 2004](#)). O resíduo recebe essa classificação por apresentar propriedades como, biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. A produção diária desse lodo na *ETE* atinge valores próximos de dez toneladas (10 t) por dia, sendo todo esse montante descartado no aterro sanitário da cidade de Nerópolis-GO.

Para estudar a viabilidade econômica e os parâmetros de projeto de um biodigestor anaeróbico industrial para o lodo, os processos de produção do biogás foram realizados no primeiro momento em bateladas, a fim de se obter uma curva de produção diária de gás de uma amostra da matéria prima de interesse e, a partir dessa, determinou-se alguns dos principais parâmetros de funcionamento do processo.

O tempo de detenção da biomassa e o volume de biogás produzido são dados fundamentais para estimar o funcionamento de um biorreator de fluxo contínuo laborato-

rial e industrial que são obtidos em processos de batelada. Nessa etapa obtém-se os principais parâmetros que determinam o projeto e o funcionamento de um biorreator que opera em ciclo contínuo que possa atender o volume de lodo que é produzido diariamente. Dessa forma é possível projetar as dimensões específicas de um biorreator laboratorial de fluxo contínuo, a partir de um protótipo inicial de batelada.

O processo em batelada é também importante para avaliar outros fatores que são importantes para o bom desenvolvimento da biodigestão anaeróbia como, o *pH* e a temperatura do sistema. Esse processo ocorre em condições controladas, necessitando de operação adequada para a produção eficaz do produto. O ensaio de batelada testa os fatores que influenciam o bom rendimento do reator anaeróbio para alcançar a máxima eficiência na produção do biogás.

1.3 Organização da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta os conceitos sobre a biodigestão anaeróbia, indicando alguns tipos de biodigestores anaeróbios que são utilizados hoje em dia e descreve também as características do biogás.

O Capítulo 3 apresenta o detalhamento do processo de tratamento de efluentes utilizado na indústria alimentícia. Esse capítulo descreve todas as etapas que os efluentes percorrem até serem liberados no corpo hídrico, mostrando também onde é produzido o lodo utilizado na biodigestão anaeróbia do trabalho.

No Capítulo 4 são desenvolvidos:

- Os procedimentos que foram realizados para desenvolver e construir a bancada laboratorial com os reatores de biodigestão anaeróbia;
- Os procedimentos realizados nos ensaios em batelada para determinar o potencial de produção de biogás;
- Os métodos analíticos realizados para caracterizar o lodo e o resíduo final do processo.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados: dos ensaios realizados nos reatores anaeróbios construídos para os ensaios em batelada e das análises de caracterização do lodo e do resíduo final da biodigestão.

No Capítulo 6 encontram-se a conclusão e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo dedica-se a introduzir as principais tecnologias atualmente em uso nos processos de biodigestão anaeróbia. Apresenta ainda alguns conceitos e definições úteis, para o entendimento dos fatores que contribuem para o funcionamento adequado desses processos.

2.1 Biomassa

O crescimento da população e o estilo de vida moderno, exigem o desenvolvimento de outros tipos de combustíveis utilizados em substituição, principalmente, dos combustíveis oriundos de fontes não renováveis, tais como os derivados do petróleo: a gasolina, o diesel e o gás natural. O uso da biomassa na geração de energia elétrica representa vantagem para a redução do consumo de combustíveis fósseis, como é o caso do petróleo e de seus derivados. Existem tecnologias e processos que permitem que a biomassa seja disponível para atender à demanda de energia, classificados em processos com enriquecimento térmicos, físicos e bioquímicos ([BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010](#)).

Há longo tempo o homem tem utilizado a biomassa como fonte de obtenção de energia. Durante muito tempo uma das biomassas mais utilizadas foi a madeira. Com o uso do fogo e da lenha foi possível gerar energia por longo período de tempo. A madeira ainda continua participando da matriz energética mundial, em algumas regiões ela é componente importante no suprimento de energia primária, especialmente no uso doméstico e industrial ([BRITO, 2007](#)).

Utilizando a biomassa é possível disponibilizar energia elétrica, térmica e ainda como combustível para a combustão direta em equipamento, aliado a cogeração de calor e eletricidade ([BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010](#)). Outra alternativa de geração de energia pela biomassa é através do processo da biodigestão anaeróbia, um dos métodos mais vantajosos e importantes para a biomassa ([NASIR et al., 2012](#)). Um processo onde a fermentação dos resíduos orgânicos resultam em biogás, metano, que é convertido em energia elétrica.

A energia proveniente do biogás é considerada uma opção de baixo custo, uma vez que na maioria dos casos, é um resíduo descartável no meio ambiente, e ainda

há a possibilidade de se beneficiar de créditos de carbono disponíveis através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*MDL*) (GOLDEMBERG, 2009).

No Brasil o uso de biomassa como matéria prima para obtenção de energia elétrica tem aumentado, por apresentar imensa superfície e solo apropriado para a agricultura, além das condições geográficas e climáticas favoráveis à produção de biomassa (ANEEL, 2008). A Figura 2.1 ilustra a porcentagem que a biomassa representa na oferta interna de energia elétrica brasileira.

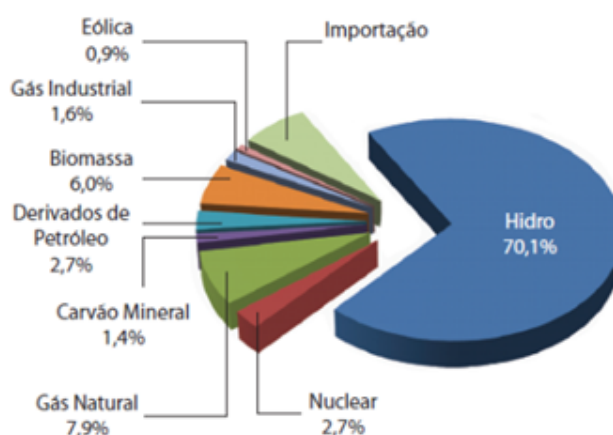


Figura 2.1 - Oferta interna de energia elétrica - OIEE
FONTE: (MME, 2013)

2.1.1 Fontes de Biomassa

A biomassa pode ser obtida de vegetais não lenhosos (sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos), de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e dos seus resíduos, e também a partir de resíduos orgânicos, dentre estes estão os resíduos agrícolas, urbanos e industriais (CORTEZ et al., 2008). As matérias primas, classificadas como biomassa, podem ser desde os resíduos de origem agrícolas, industriais, animais ou urbanos e ainda outras provenientes de culturas específicas para esse fim. Essa biomassa pode ser aproveitada como combustível em diversos processos de geração de energia como caldeiras, fornos de combustão e no processo da biodigestão anaeróbia (ANEEL, 2008).

As indústrias liberam diariamente no meio ambiente grande quantidade de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, que são produzidos durante os processos de fabricação dos mais variados tipos de produtos que a população desfruta para a sobrevivência. A destinação final desses resíduos geralmente não é a mais apropriada. Geralmente são descartados diariamente no meio ambiente sem passar por qualquer tipo de tratamento, ou aproveitamento, causando sérios problemas de poluição ambiental e desperdício de energia. Visto que os resíduos que contém biomassa, em geral, possuem alta concentração de matéria orgânica que podem ser reaproveitadas para a geração de energia elétrica renovável e limpa. A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos não utilizados ou sub-utilizados (CORTEZ et al., 2008).

Há várias iniciativas atualmente nos processos industriais e na produção agrícola para o aproveitamento de resíduos, contendo biomassa para a produção de energia. Permitindo assim oportunidade de reduzir a quantidade de lixo produzido diariamente, aliada a criação de produto energético.

A produção agrícola é responsável por fornecer grande quantidade de resíduos que podem ser destinados para o aproveitamento energético em virtude das tecnologias existentes. Os resíduos classificados como agrícolas são formados por restos de palhas, folhas e caules, e têm um poder calorífico médio de $15,7 \text{ MJ/kg}$ de matéria seca (CORTEZ et al., 2008). O Brasil, o maior produtor e exportador mundial de açúcar, produz grande volume de cana de açúcar onde cada 100 toneladas de cana utilizada, sobram 32 toneladas de bagaço, que é parcialmente aproveitado como biomassa na queima para a geração de energia (PEREIRA et al., 2008).

Os resíduos sólidos urbanos são obtidos a partir dos resíduos domiciliares e dos resíduos comerciais produzidos pela população e destinados aos lixões. O teor de matéria orgânica presente no lixo brasileiro está em 60 % aproximadamente do volume produzido, o que lhe confere bom potencial energético. O Poder Calorífico Inferior (*PCI*) médio do resíduo domiciliar fica em torno de 1.300 kcal/kg ($5,44 \text{ MJ/kg}$) (CORTEZ et al., 2008).

Os resíduos industriais são compostos por uma variedade de tipos biomassas produzidas durante os processos de fabricação do produto, como: casca, cavacos, maravalhas, serragem, da indústria de móveis e do setor de celulose e papel, restos de frutas da indústria de alimentos e bebidas, e vários outros tipos de grãos e alimentos da indústria alimentícia. A principal utilização desses resíduos, principalmente

os agroindustriais, é na queima direta em fornos e caldeiras, quando a umidade é baixa.

As criações de gado e de suínos são fontes de biomassa em função do grande volume de excremento liberado pelos animais. Quando seco, o esterco bovino apresenta poder calorífico de $14,6 \text{ MJ/kg}$, podendo sofrer queima direta. Essa biomassa tem aproveitamento energético maior quando aplicada na biodigestão para a produção de biogás. Na Alemanha, a criação de animais tem interesse comercial com enorme potencial de aproveitamento energético em usinas de biogás ([BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010](#)).

2.2 Tratamento de efluentes com biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia é uma tecnologia antiga, mas o primeiro relato de planta em funcionamento foi em 1859, com a construção da primeira planta de biodigestão em Bombaim, na Índia ([MONNET, 2003](#)). Após o surgimento da primeira planta de biodigestão, o método começou a ser utilizado com mais frequência. Novos estudos foram realizados e assim começou o desenvolvimento de diversas plantas com geração de biogás.

A medida que as técnicas foram sendo aperfeiçoadas, novos modelos de biodigestores, mais sofisticados foram desenvolvidos e testados. A grande difusão da biodigestão aconteceu a partir das experiências chinesa e indiana, que conseguiram aplicar a técnica com sucesso. Esses países em desenvolvimento aplicaram as plantas de biodigestão com grande aproveitamento energético.

Alguns anos depois, o biogás, produto da biodigestão anaeróbia começou a ser utilizado como combustível em iluminação de rua, sendo recuperado na instalação de tratamento de esgoto na cidade de Exeter, no sudoeste da Inglaterra ([VERMA, 2002](#)).

Com o desenvolvimento da biodigestão anaeróbia, os biodigestores tem sido empregados em tratamento de diversos tipos de resíduos sólidos, incluindo culturas agrícolas, dejetos de animais, lodos de *ETE*, lixo urbano e efluentes de indústrias agrícolas, alimentícias e de bebidas ([CHERNICHARO, 2007](#)). A partir de diferentes tipos de biomassa, a geração de biogás pôde ser realizada com êxito.

2.2.1 Biodigestão anaeróbia

A biodigestão da matéria orgânica da biomassa ocorre quando esta é degradada pelo consórcio de bactérias, resultando na formação do biogás. A biodigestão é o processo pelo qual bactérias anaeróbias, em ambiente desprovido de oxigênio (biodigestor), degradam a matéria orgânica, obtendo como subprodutos principais o biogás e o biofertilizante (CATARINO et al., 2009).

O processo da biodigestão anaeróbia é realizado em quatro estágios pelo consórcio de bactérias que atuam em cada fase. A Figura 2.2 ilustra as bactérias anaeróbias que degradam a biomassa em cada estágio. É um processo delicado e balanceado com processos metabólicos complexos. Os grupos de microrganismos que atuam somente em condições anaeróbias, convertem a matéria orgânica complexa em substâncias mais simples através das rotas metabólicas.

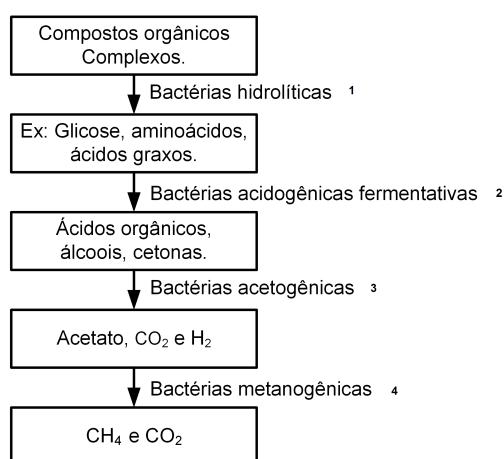


Figura 2.2 - Bactérias dos estágios da biodigestão anaeróbia

A estrutura da comunidade microbiana que fica presente no interior do biodigestor é responsável pelo desempenho da biodigestão anaeróbica. Alguns parâmetros operacionais e do ambiente onde o processo ocorre podem interferir no produto final. Outro fator que em alguns casos prejudica a biodigestão é a natureza do inóculo, que deve ser conhecida (DEMIREL; SCHERER, 2008).

O tratamento biológico ocorre em condições controladas e equilibradas. Alterações bruscas em alguns parâmetros de processo, como carga orgânica, *pH*, temperatura

ou concentração de algum elemento tóxico podem prejudicar o processo, causando a redução do metabolismo e a morte das bactérias (SUSTENTABILIDADE, 2009). A digestão pode efetuar-se entre os pH de 6,6 e 7,6, encontrando-se o ótimo a $pH = 7$ (COSTA, 2006).

2.2.1.1 Hidrólise

O primeiro estágio da biodigestão anaeróbia é a hidrólise. É uma etapa caracterizada por ser lenta e capaz de realizar a quebra das moléculas complexas em substâncias menores. Os materiais particulados e os polímeros são degradados em moléculas menores como ácidos graxos, açúcares e aminoácidos, nessa primeira fase da rota metabólica.

A hidrólise ocorre devido à ação de exoenzimas excretadas por uma linhagem de bactérias fermentativas hidrolíticas. Essa etapa pode ser afetada com mudanças em fatores como a temperatura e o pH , o que ocasiona alteração no grau e na taxa que o substrato é hidrolisado (CHERNICHARO, 2007).

A hidrólise é a etapa que pode ser acelerada. Durante a hidrólise, quando ocorre a conversão da matéria orgânica complexa em moléculas solúveis, a água pode ser adicionada, a fim de diminuir o tempo da digestão e proporcionar rendimento maior no processo (MONNET, 2003). O CO_2 formado na fase hidrólise/acidogênese é dissolvido na água formando um tampão importante de bicarbonato (BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010).

Na hidrólise, alguns gêneros específicos de bactérias são encontrados, como: *Bacillus*, *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Peptococcus*, *Bacteroides*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, entre outros. Esses gêneros formam as diversas linhagens dos grupos bacterianos que atuam em cada parte do processo.

2.2.1.2 Acidogênese

As substâncias resultantes da fase da hidrólise, os monômeros orgânicos, são fermentadas no interior das células por outra linhagem do amplo grupo microbiano, formando ácidos carboxílicos voláteis dissociados (CHERNICHARO, 2007)(SANTANNA; LIPPEL, 2010). A acidogênese é caracterizada pela presença de microrganismos fermentativos que formam compostos com menor número de átomos de carbono (ácidos: acético, propiônico, butírico, hexanóico e valérico), que são encontrados na forma

dissociada.

Os microrganismos fermentativos da acidogênese atuam em etapa sequencial de degradação do substrato e são os mais beneficiados energeticamente. A maioria das bactérias acidogênicas são classificadas como anaeróbias estritas, mas cerca de 1 % é formada por bactérias facultativas. Essas bactérias podem oxidar o substrato orgânico por via oxidativa, sendo importante a presença das bactérias estritas que são protegidas contra a exposição ao oxigênio, que pode eventualmente estar presente no meio (CORREA et al., 2007).

A acidogênese é considerada limitante do processo quando o material a ser degradado não for facilmente hidrolisável (CHERNICHARO, 2007). Os produtos gerados nessa rota metabólica são substratos importantes para as etapas seguintes. Os gêneros de bactérias encontrados na acidogênese são: *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Peptococcus*, *Bacteroides*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, entre outros.

2.2.1.3 Acetogênese

Após a formação dos substratos intermediários, provenientes da acidogênese, ocorre a conversão dos mesmos em acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono, pela ação dos microrganismos sintróficos acetogênicos, caracterizando a etapa chamada de acetogênese. Durante a formação do acetato ocorre grande produção de H_2 , provocando queda no pH do meio reacional, ocasionando a acidificação do meio (AQUINO; CHERNICHARO, 2005).

A oxidação dos compostos orgânicos da terceira etapa é realizada pelas bactérias acetogênicas que formam substratos específicos para o microrganismos metanogênicos. A formação desses substratos ocorre nas reações sintróficas com consumo de hidrogênio e também com transferências de hidrogênios entre as espécies.

A simbiose comum em ambiente anaeróbio, é uma relação metabólica específica que ocorre entre dois ou mais organismos, os quais cooperam na degradação anaeróbia de compostos orgânicos (MADIGAN et al., 2004). Através das reações de simbiose, o crescimento é realizado sob forma associativa. Na biodigestão anaeróbia, a viabilidade de produção de acetato é maior, a partir de ácidos orgânicos de cadeias grandes.

A acetogênese é considerada uma etapa crítica pela presença da simbiose entre as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas.

Os gêneros mais atuantes na acetogênese são: *Syntrobacter* e *Syntrophomonas* (SANTANNA; LIPPEL, 2010).

2.2.1.4 Metanogênese

Essa etapa final é a decisiva do processo, chamada de metanogênese, onde ocorre a formação do metano e também do gás carbônico. O metano é obtido através da descarboxilação do acetato e/ou redução do CO_2 na presença de H_2 (SANTANNA; LIPPEL, 2010). Há evidências que concentrações elevadas de amônia/amônio no substrato podem inibir a metanogênese, portanto, a concentração de nitrogênio tem que estar dentro dos padrões específicos (BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010).

Essa conversão anaeróbia é realizada pelos microrganismos metanogênicos que são encontrados dentro do domínio *Archae*. Esse grupo é formado por microrganismos anaeróbios estritos e estão presentes em ambientes com baixa concentração de O_2 , NO_3^- , Fe^{3+} e SO_4^- , os chamados aceptores de elétrons (CHERNICHARO, 2007).

Os gêneros mais encontrados na etapa da metanogênese são: *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum* e *Methanosaeta* (SANTANNA; LIPPEL, 2010).

Como a diversidade morfológica da metanogênese é grande, apresenta variedade quanto à composição química das suas paredes celulares. Em função de sua afinidade por substrato e a sua fisiologia, as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: acetoclásticas e hidrogênotróficas.

- Metanogênicas Acetoclásticas: formam metano a partir do ácido acético, o acetato é a fonte de carbono. Poucas espécies metanogênicas conseguem produzir o CH_4 a partir do acetato. São os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia, responsáveis por cerca de 60 % ao 70 % de toda a produção de metano (CHERNICHARO, 2007). Pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* (formato de cocos) e *Methanosaeta* (formato de filamentos).
- Metanogênicas hidrogenotróficas: praticamente todas as espécies conhecidas de bactérias metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Nesse processo o CO_2 é a fonte de carbono e oceptor de elétrons, o hidrogênio é o agente redutor (CHERNICHARO,

2007). Os gêneros mais frequentemente isolados em reatores anaeróbios são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter*.

2.2.2 Fatores que alteram a biodigestão anaeróbia

2.2.2.1 Temperatura

A temperatura é um fator físico que modifica o crescimento das bactérias. Como os microrganismos não possuem meios de controlar a temperatura interna, então a temperatura da célula é controlada pela temperatura do meio externo (CHERNICHARO, 2007). As últimas etapas da biodigestão são as mais sensíveis a esse fator.

O crescimento microbiano é possível em três faixas de temperaturas:

- Faixa psicrófila: entre 4 °C e 15 °C
- Faixa mesófila: entre 30 °C e 40 °C
- Faixa termófila: entre 45 °C e 70 °C

A experiência da operação de biodigestores na faixa mesófila tem sido satisfatória, especialmente entre 30 – 40 °C. Além de operar na faixa ótima não deve ocorrer oscilação da temperatura no interior do reator, para não afetar a população microbológica presente. O grau de dissociação de diversos compostos depende fortemente da temperatura do meio. A termodinâmica das reações anaeróbias são afetadas pelas mudanças na temperatura (BOHRZ, 2010).

2.2.2.2 Nível de acidez e alcalinidade (*pH*)

Quando as quantidades de biomassa e de bactérias são proporcionais, o *pH* permanece em faixa favorável à atividade das bactérias metanogênicas. Contudo, quando ocorre desequilíbrio no meio, os ácidos voláteis continuam a ser produzidos ocasionando queda no *pH* e diminuição do volume produzido de metano. As diferentes populações de bactérias sobrevivem em valores de *pH* específicos, com pouca variação no valor (BOHRZ, 2010).

A faixa ótima para as bactérias metanogênicas fica entre 6,6 e 7,3 (DEMIREL; SCHEERER, 2008). O *pH* ótimo depende dos tipos de microrganismos envolvidos na digestão e do tipo de substrato. A operação do reator anaeróbio com *pH* constantemente

abaixo de 6,5 ou acima de 8,0, pode ocasionar diminuição significativa na taxa de produção de metano (CHERNICHARO, 2007).

O controle do valor do pH é ajustado pela adição de substâncias químicas até atingir o parâmetro ideal. As substâncias mais utilizadas são cal hidratado ($Ca(OH)_2$), cal virgem (CaO), carbonato de sódio (Na_2CO_3), bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$), hidróxido de sódio ($NaOH$) e bicarbonato de amônia (NH_4HCO_3) (CHERNICHARO, 2007).

2.2.2.3 Toxicidade/Inibidores

Os grupos de microrganismos presentes no reator tem suas necessidades específicas com relação ao teor de vitaminas, micro e macronutrientes para a decomposição anaeróbia. O crescimento e taxa de atividade das populações estão condicionadas à concentração e a disponibilidade dos nutrientes (CHERNICHARO, 2007). Os nutrientes inorgânicos devem ser fornecidos em quantidades suficientes e são avaliados através de investigações laboratoriais. Os nutrientes mais importantes em ordem decrescente para à estimulação nutricional são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B_{12} (CHERNICHARO, 2007).

A proporção ideal entre macro e micronutrientes é um pré requisito para a estabilidade do sistema. O nitrogênio aparece como nutriente mais importante, responsável pela formação de enzimas que realizam o metabolismo. As principais fontes de nitrogênio utilizadas pelos microrganismos são a amônia e a porção de nitrogênio orgânico (CHERNICHARO, 2007).

A inibição da produção de gás ou do processo pode ser originada por diferentes fatores, tendo cunho técnico ou operacional. O andamento do processo pode ser retardado em função da ação de substâncias classificadas como inibidoras, podendo ocasionar até na parada do processo. O excesso de substrato também pode inibir a digestão, influenciando negativamente nas bactérias. Antibióticos, solventes, desinfetantes, herbicidas, sais e metais pesados, são substâncias capazes de inibir o processo da biodigestão em grandes e até pequenas concentrações. O efeito inibitório de alguns compostos depende de diferentes fatores e dificilmente podem-se determinar limites absolutos (BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010).

2.3 Biodigestores

Os biodigestores são reservatórios, tanques ou caixas onde a matéria orgânica é degradada na ausência de oxigênio. É no interior do biodigestor que ocorre a fermentação da biomassa produzindo o biogás e o biofertilizante. Sendo, importante para o saneamento pois promove a redução da carga orgânica (quando converte o carbono em metano), diminuição dos sólidos e redução dos microrganismos patogênicos encontrados nos efluentes (ANDRADE et al., 2002).

Podem ocorrer em processo contínuo ou de forma descontínua. Quando o processo é descontínuo, a biomassa é colocada dentro do reator e permanece fechada durante determinado intervalo de tempo. Após este tempo o biodigestor é aberto e novo ciclo pode ser iniciado. No processo contínuo, o biodigestor é alimentado diariamente com a biomassa, e o biofertilizante também é retirado de acordo com a vazão do fluxo de entrada de biomassa no tanque.

Os biodigestores tem características específicas de acordo com o seu tipo e modelo. A escolha do tipo e do tamanho do biodigestor mais apropriado deve ser realizada em função de alguns aspectos característicos da biomassa e local em que o biodigestor será implantado. O tipo de digestor depende diretamente do tipo de matéria orgânica (biomassa) a ser utilizado, das condições locais do solo que será aplicado, dos investimentos, custo da manutenção do biodigestor e da sua eficiência para assim justificar os custos.

Há grandes benefícios econômicos, levando em consideração que a implantação de sistema com biodigestores promove ganhos pela redução de energia comprada e ainda uso dos recursos naturais para geração de energia sustentável mediante tecnologias de produção energética renováveis e mais limpas (BARBOSA; LANGER, 2011). Os biodigestores mais comuns são do tipo indiano, chinês, *UASB*, batelada e da Marinha do Brasil.

2.3.1 Tipos de biodigestores

O tópico seguinte trata a respeito dos principais modelos de biodigestores, atualmente em uso para biomassas presentes em resíduos de efluentes sólidos e líquidos.

2.3.1.1 Biodigestor indiano

A Figura 2.3 ilustra o biodigestor indiano, onde é ilustrado um tanque de fermentação com gasômetro, caixa de entrada da biomassa e caixa de saída dos efluentes. As caixas de entrada e saída são ligadas por tubulações conectadas na parte inferior do tanque de fermentação.

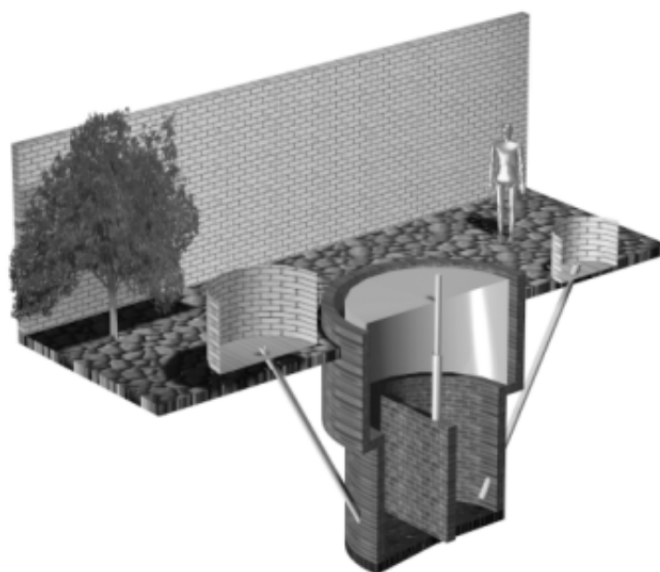


Figura 2.3 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo indiano.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

O tanque do biodigestor indiano é formado por duas câmaras de fermentação. As câmaras são separadas por uma parede divisória situada no centro do tanque. Essa parede permite que ocorra a circulação de toda a biomassa no interior da câmara de fermentação.

Esse modelo apresenta uma campânula, ou seja, uma redoma com gasômetro que fazem com que a pressão seja constante. O gasômetro tem função de deslocar-se verticalmente sempre que o biogás não é consumido de forma imediata. Esse mecanismo permite manter a pressão constante no interior do tanque. O fato de o gasômetro estar disposto sobre o substrato ou sobre o selo d'água reduz as perdas durante o processo de produção do gás (DEGANUTTI et al., 2002).

Segundo Deganutti (2002), o resíduo a ser utilizado para alimentar o biodigestor

indiano, deverá apresentar concentração de sólidos totais (*ST*) não superior a 8 %. Essa concentração de sólido total permite que ocorra com facilidade a circulação do resíduo no interior do tanque e previne que as caixas de entrada e saída do material sejam entupidadas.

O biodigestor indiano é considerado de simples construção, apresenta aspectos negativos em relação ao custo e a manutenção. O seu custo se torna elevado devido ao uso do gasômetro de aço e às constantes manutenções que o biodigestor necessita.

2.3.1.2 Biodigestor chinês

A Figura 2.4 ilustra o biodigestor do tipo chinês. O biodigestor opera com o princípio de uma prensa hidráulica. Quando o volume de biogás aumenta, ocorre aumento da pressão interior o que provoca a saída do efluente pela câmara de saída. É construído em peça única e disposto em área subterrânea, sofrendo assim pouca variação em relação à temperatura (CARON, 2010).

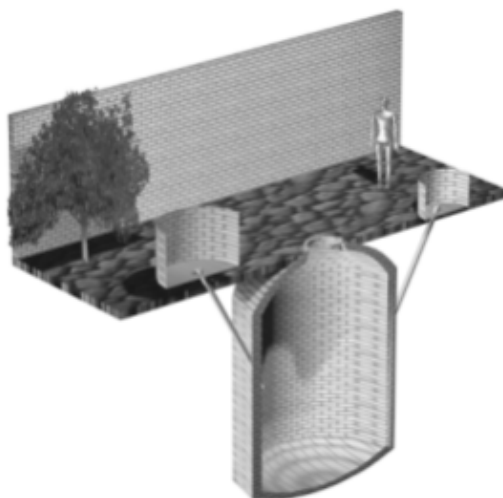


Figura 2.4 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo chinês.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

Esses biodigestores são formados por câmara cilíndrica onde ocorre a fermentação, geralmente construída em alvenaria. O teto apresenta geometria curvilínea, abóbada,

específica para armazenar o gás. A cobertura deve ser impermeável, evitando assim vazamentos de biogás do interior da câmara.

O biogás produzido no processo pode ser utilizado em estações de pequeno porte, pois pequena parcela desse gás é liberada na atmosfera com função de controlar a pressão interna. O ponto fraco desses biodigestores é quanto a sua impermeabilidade e vedação. Podem ocorrer problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada (DEGANUTTI et al., 2002).

Esses tanques podem ser alimentados diariamente para maior eficiência e para evitar entupimento, a concentração de sólido total deve ser baixa, em torno de 8 %.

2.3.1.3 Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente de Camada (Manta) de Lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

O reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket UASB* consiste em um tanque com fluxo ascendente que pode ser aplicado no tratamento anaeróbio de águas residuárias. Formado por coluna com escoamento ascendente onde os microrganismos crescem de forma aleatória. As bactérias anaeróbias se fixam no reator por auto adesão, formando camadas de grânulos suspensos. É composto por uma zona de digestão, uma zona de sedimentação e por um separador trifásico (sólido/líquido/gás). A biomassa é direcionada para o reator, sendo distribuída no fundo dessa câmara. Seguindo uma trajetória ascendente, descendo até a sua parte mais baixa, onde ocorre a mistura e a biodigestão anaeróbia do conteúdo orgânico.

Ainda em escoamento ascendente, ocorre a coleta de gases e o efluente residual é coletado na zona de sedimentação. A agitação ocorre provocada pelo próprio fluxo hidráulico durante a degradação da matéria orgânica. Uma das principais características é a configuração do reator que permite que uma grande quantidade de biomassa ativa, de flocos ou grânulos com alta densidade e resistência mecânica, fornecendo um elevado tempo de retenção celular (KATO et al., 1999).

Esse reator apresenta vantagens: ser um sistema compacto, ter baixo custo de implantação e operação, ter baixa produção de lodo, ter baixo consumo de energia, ter satisfatória eficiência de remoção de *DQO* e *DBO*, possibilidade de rápida partida e elevada concentração de lodo excedente (SALOMON, 2007).

2.3.1.4 Reator de batelada

A Figura 2.5 ilustra o reator do tipo batelada. Estes são formados por um sistema de operação simples sem muitas exigências operacionais, quando comparados a outros biodigestores. São reatores onde ocorrem as etapas do processo com ciclos de operação com tempos definidos.



Figura 2.5 - Representação tridimensional em corte do biodigestor modelo batelada.

Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

Os tanques de fermentação anaeróbia são montados e alimentados em única vez (XAVIER; JÚNIOR, 2010). A biomassa fica retida no tanque por período determinado sofrendo a biodigestão anaeróbia. O volume da alimentação é determinado com base: no tempo de detenção hidráulica, na carga orgânica, nas características de sedimentação, entre outros (CAMPOS et al., 2000). O tempo de detenção da amostra pode variar de acordo com o tipo de biomassa utilizada. O tempo deve ser o suficiente para que ocorra a máxima produção do biogás, degradando assim grande parte de matéria orgânica presente na biomassa.

Os reatores proporcionam as variações necessárias para a ocorrência da biodigestão com flexibilidade das etapas em ciclo, tendo como vantagem a facilidade de equalização das vazões de carga, facilidade no preenchimento do reator e flexibilidade do

tempo de detenção da amostra (PICKBRENNER, 2002).

2.3.1.5 Biodigestor da Marinha

A Figura 2.6 ilustra o biodigestor do tipo da Marinha do Brasil conhecido também como modelo balão. É um modelo horizontal com a largura maior que a profundidade, fator que permite uma área maior de exposição ao sol. É formado por uma base, construída em alvenaria, com formato retangular e forrada com um plástico maleável.

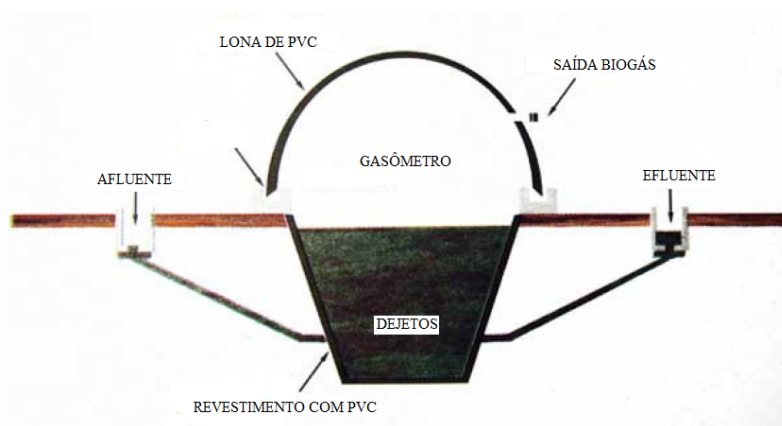


Figura 2.6 - Biodigestor da marinha do Brasil
Fonte: (OLIVER, 2008)

Esse biodigestor é fechado com uma cúpula do mesmo material plástico que o tanque é forrado. A cúpula permite que se torne hermético e com maior resistência a corrosão. A cúpula permite que o biodigestor aumente o seu volume quando o gás é produzido, a medida que o gás é formado ela infla como balão. O gás é contido no interior do reator devido a uma calha que trabalha como selo hidráulico, que contorna a câmara do tanque. A pressão no interior do reator é controlada através do selo hidráulico que funciona como lastro.

A desvantagem desse tipo de biodigestor é em relação ao controle de temperatura. Por ser um reator sensível às variações térmicas, é indicado para regiões mais quentes sem muitas variações na temperatura ambiente.

O reator da Marinha apresenta baixo custo de implantação, facilidade de transporte e a sua construção pode ser feita diretamente sobre o terreno ou pouco profunda

(ANDRADE et al., 2002). Comparado aos modelos mais antigos de biodigestores, o reator da Marinha tem maior facilidade de instalação e maior facilidade de limpeza do tanque.

2.4 Biogás

O biogás produzido durante a biodigestão pode ser utilizado como combustível para sistemas de geração elétrica em moto geradores de combustão ou em turbinas a gás. O biogás é um subproduto com grande potencial de utilização na forma de combustível de fonte renovável(CATAPAN et al., 2011).

O potencial energético do biogás varia em função da quantidade de metano que há em sua composição, quanto maior o volume de metano, maior será o seu valor energético. O biogás originário de aterro apresenta proporção média de 50 % e quando é gerado em reatores anaeróbios de efluentes, a concentração média é mais elevada, cerca de 65 % (COELHO, 2001).

Quando o biogás é produzido é preciso que ocorra destinação adequada, seja na sua queima direta ou a sua utilização como combustível em um motor específico, evitando assim que o mesmo seja liberado na atmosfera. O metano presente no biogás, quando comparado ao CO_2 , é cerca de vinte vezes mais poluente para o meio ambiente.

Alem do biogás, na biodigestão é produzido resíduo que pode ser aplicado na agricultura como forma de fertilizante ou condicionador de solo pois, apresenta composição de nutrientes ideais para o solo. A reciclagem desses lodos tratados, ou biossólidos, em áreas agrícolas é viável e desejável. Da mesma forma que os efluentes provenientes do tratamento do esgoto voltam aos rios com o menor impacto ambiental possível, os lodos devem ser tratados e reciclados para serem devolvidos à natureza (FERREIRA et al., 1999).

2.4.1 Histórico do Biogás

Em condições anaeróbias, o metano é gerado no processo de decomposição da matéria orgânica. No ano de 1667 o biogás foi descoberto, no entanto, somente um século depois que Alexandre Volta reconheceu o elemento combustível, o gás metano, que durante muito tempo ficou conhecido como gás do pântano, devido a sua expressiva produção nesses ambientes (SANTANNA; LIPPEL, 2010)(SALOMON, 2007).

Dependendo do local que o biogás é produzido, pode ser chamado também de: gás do pântano, gás de aterro e gás de digestor.

Em 1868 Bechamps concluiu que o gás metano era formado a partir de microrganismos, que foi verificado e confirmado depois por Van Senus. Em 1910 Sohngen demonstrou a formação do metano a partir das bactérias anaeróbias (SALOMON, 2007).

Nas décadas de 1950 e 1960 a recuperação e uso do biogás teve declínio em função da relativa abundância das fontes de energia tradicionais na maioria dos países desenvolvidos. Somente em países com poucos recursos de capital e energia, como a Índia e a China, o biogás desempenhou papel importante, principalmente, em pequenos aglomerados rurais (CASSINI, 2003).

A partir da crise energética dos anos 1970 o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse em vários países, levando ao aumento de sua produção nos países europeus (CASSINI, 2003). Atualmente, a biodigestão vem se difundindo como alternativa para o tratamento de resíduos por vários países, principalmente nos países em desenvolvimento.

2.4.2 Composição do Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível formada principalmente por gás metano (CH_4), gás carbônico (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) e água (H_2O). Podendo conter ainda traços de amônia (NH_3), gás hidrogênio (H_2) e gás nitrogênio (N_2).

O biogás é produto da decomposição microbiana de resíduos deixados em ambiente anaeróbio. É um gás incolor, insolúvel em água e geralmente inodoro, dependendo das impurezas presentes (IANNICELLI, 2008).

O biogás apresenta mistura gasosa composta principalmente por metano (50 % – 75 % em volume) e dióxido de carbono (25 % – 50 % em volume) e mais vestígios de outros compostos orgânicos e inorgânicos (BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, 2010). A Tabela 2.1, adaptada de (CATAPAN et al., 2011), dispõe a composição do biogás em suas faixas de variações que depende da composição da biomassa e do processo de digestão anaeróbica.

O biogás apresenta características parecidas ao gás natural, por isso se purificado e comprimido pode ser utilizado nas redes de distribuição de gás, podendo até substi-

Tabela 2.1 - Composição típica do biogás

Gás	Símbolo	Concentração no biogás (%)
Metano	CH_4	50 – 80
Dióxido de Carbono	CO_2	20 – 40
Hidrogênio	H_2	1 – 3
Nitrogênio	N_2	0,5 – 3
Gás Sulfídrico	H_2S	1 – 5
Amônia	NH_3	1 – 5

tuir o gás natural, alimentando motores de combustão ou ainda células de combustível. O biogás e o gás natural apresentam diferenças nos teores de contaminantes como N_2 , CO_2 e compostos com enxofre, pois, o gás natural apresenta baixos valores desses contaminantes.

O biogás apresenta poder calorífico (PC) que oscila com valores entre 22.500 kJ.m^{-3} a 25.000 kJ.m^{-3} (SALOMON; LORA, 2005), quando ocorre a remoção das impurezas como o CO_2 . O PC sofre variações conforme a porcentagem de metano presentes na amostra. A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudicam a sua queima diminuindo o poder calorífico a medida que se eleva a concentração de impurezas em sua composição (PECORA, 2006).

A Tabela 2.2, adaptada de (IANNICELLI, 2008), apresenta o poder calorífico para o biogás e outros gases para comparação.

Tabela 2.2 - Relação dos volumes dos gases e poder calorífico comparados ao biogás

Gás (m^3)	Poder Calorífico ($kcal/m^3$)	Relação com biogás
Biogás	5.500,00	1,00
Gás Natural	9.400,00	0,58
Gás Liquefeito de Petróleo	5.616,80	0,98

A geração de energia elétrica a partir do biogás apresenta vantagens por caracterizar geração descentralizada de energia, redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária, possibilidade de uso de processos de cogeração e ainda ser uma fonte renovável, mas também enfrenta problemas com relação a viabilidade econômica da tecnologia, dificuldade de realizar a purificação do biogás, principalmente a

eliminação do gás sulfídrico, problemas com o armazenamento e falta de fiscalização (SALOMON; LORA, 2005).

O biogás apresenta baixa densidade quando comparada a do ar, ocupando assim um volume maior. Não apresenta muito risco de explosão quando comparado ao butano e ao propano. Em condições normais de produção, não é considerado tóxico devido ao baixo teor de monóxido de carbono (IANNICELLI, 2008), mas é um gás corrosivo devido as impurezas que pode apresentar. O gás mais corrosivo desta mistura é o gás sulfídrico H_2S que reage com alguns metais, em altas concentrações.

2.5 Biogás e a indústria alimentícia

A indústria alimentícia produz diversos efluentes que apresentam alto teor de material orgânico (CHENG, 2007). Nesse ramo industrial, o processo da biodigestão anaeróbica oferece vantagens econômicas para a indústria e para o meio ambiente, quando comparadas aos métodos mais comuns para a destinação de resíduos, como aterros sanitários e a incineração.

Em relação a produção do biogás, estes resíduos podem ser classificados como biodegradáveis e fonte de energia, mas podem ser agentes poluidores ao mesmo tempo, através da liberação do gás metano (CHENG, 2007). As usinas de recuperação energética de biogás são apropriadas para processar os resíduos orgânicos da indústria alimentícia.

2.6 Biofertilizante proveniente de biodigestão anaeróbia

Os fertilizantes ou adubos, corretivos, inoculantes e biofertilizantes são insumos capazes de fornecer um ou mais nutrientes vegetais, essenciais para o crescimento e para a produção agrícola. Esses nutrientes são classificados em: macronutrientes primários (N , P e K), macronutrientes secundários (Ca , Mg e S) e micronutrientes (B , Cl , Cu , Fe , Mn , Mo e Zn).

Os fertilizantes são classificados em inorgânicos ou minerais e orgânicos, dependendo da sua composição. A fiscalização é realizada pelo Ministério da Agricultura que vistoria a produção e o comércio de fertilizantes, corretivos e inoculantes, conforme disposto na Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, regulamentada pelo Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, modificado pelo decreto 8059/2013.

Os resíduos dos reatores anaeróbios são constituídos de minerais, matéria orgânica e água. A quantidade relativamente grande de nutrientes, como fosfatos, nitratos e amônio, tem como principal vantagem a utilização desse resíduo na agricultura, recuperando a água do efluente e além disso, os constituintes desses efluentes, são produtos que podem aumentar a fertilidade dos solos por conterem nutrientes essenciais às plantas (SILVA et al., 2012).

A utilização de lodo de *ETE* em reator anaeróbio permite produzir resíduo com características de biofertilizante, pelo fato do lodo da *ETE* ser rico em matéria orgânica e nutrientes (BETTIOL; CAMARGO, 2006). O interesse agrícola do lodo está associado principalmente ao seu teor de nutrientes (*N*, *P* e micronutrientes) e ao conteúdo de matéria orgânica, podendo melhorar a resistência dos solos a erosão e ao adensamento, possibilitando a melhoria das condições do solo e o incremento da produtividade (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Os fatores indispensáveis na avaliação do potencial do lodo para uso na agricultura são: o teor de metais pesados, o perfil sanitário, valor agronômico, o teor de umidade, a consistência e a estabilidade do resíduo. Dependendo da origem, industrial ou doméstico, o lodo pode apresentar maior ou menor quantidade de metais pesados, substâncias que em níveis elevados são capazes de prejudicar as propriedades químicas e biológicas dos solos e provocar toxidez nas plantas e animais (FERNANDES, 1999).

CAPÍTULO 3

Processo de tratamento dos efluentes.

Este capítulo dedica-se ao processo detalhado do tratamento de efluentes da indústria alimentícia, descrevendo todas as etapas que os efluentes percorrem na *ETE*.

A Figura 3.1 apresenta o lodo na saída do flotador, resultante do processo de tratamento dos efluentes da indústria alimentícia. O lodo é produzido desde a implementação da *ETE*, no ano de 2008.



Figura 3.1 - Lodo na saída do flotador

A Figura 3.2 apresenta vista geral da *ETE* da indústria. A *ETE* tem dois procedimentos complementares de tratamento: estrutura para tratamento anaeróbico com biodigestores e estrutura com lagoas aeróbias. O sistema de tratamento anaeróbico é composto por dois reatores e o tratamento aeróbico é formado por três lagoas. A operação da planta da *ETE* é realizada através de sistema de controle do tipo *plant it*, ou seja, o operador consegue acompanhar, monitorar e ainda supervisionar o processo todo pela tela do computador. Esse sistema permite operar todo o tratamento de forma totalmente automatizada ou ainda completamente manual.

No período de safra do tomate, a *ETE* realiza o tratamento de 5.000 a 7.000 m^3 de efluente por dia, na entre safra o volume é menor e fica entre 4.000 a 6.000 m^3 por dia. A Figura 3.3 apresenta o fluxograma com as etapas do tratamento de efluentes realizadas na *ETE*.



Figura 3.2 - ETE da Heinz S.A., Nerópolis, GO

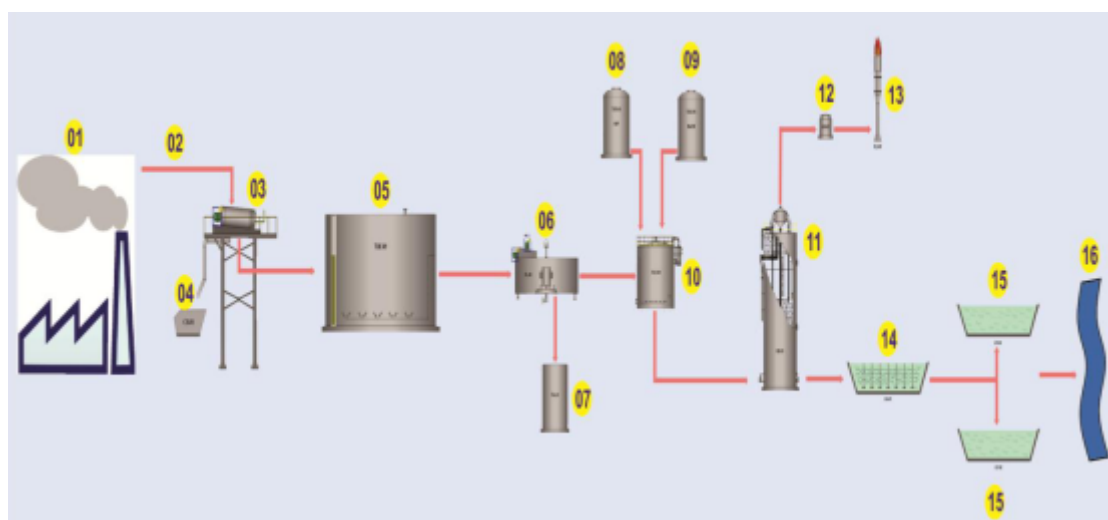


Figura 3.3 - Tratamento realizado na ETE.

Fonte: (TOMAZ et al., 2011)

Legenda:

- 1) Indústria de alimentos;
- 2) Chegada do efluente na ETE;
- 3) Peneira rotativa;
- 4) Caçamba para recolher resíduos sólidos;

- 5) Tanque de equalização;
- 6) Flotador;
- 7) Coleta do lodo;
- 8) Reservatório com solução nitrofosfatada (*N* e *P*);
- 9) Reservatório com *NaOH* (Hidróxido de Sódio);
- 10) Tanque de condicionamento;
- 11) Biodigestores;
- 12) Gasômetro;
- 13) Flare;
- 14) Lagoa de aeração;
- 15) Lagoas de polimento;
- 16) Corpo hídrico.

3.1 Tratamento de efluentes

O efluente da indústria é transportado por tubulações até chegar a *ETE*. Na *ETE* ele passa por uma peneira rotativa, ilustrada na Figura 3.4, que retém os resíduos maiores formado por restos de tomate, milho, ervilha e terra, que são encaminhados para o coletor. A parte líquida é direcionada pela tubulação até o tanque de equalização.

Quando o efluente líquido chega ao tanque de equalização, ilustrado na Figura 3.5, que apresenta volume total de 1250 m^3 . A mistura permanece em movimento constante nesse tanque que é agitado com auxílio de bomba centrífuga. A função do tanque é de homogeneizar a mistura do efluente.

A Figura 3.6 ilustra o tanque de flotação que recebe a mistura do tanque de equalização. Nesse tanque o lodo é coletado e enviado para a centrífuga, ilustrada pela Figura 3.7. Na centrífuga o lodo é separado do efluente líquido, sendo descartado em outro coletor e o efluente líquido volta para o tanque de equalização. Durante o período da entre safra, os resíduos sólidos em suspensão são retirados na superfície



Figura 3.4 - Peneira rotativa



Figura 3.5 - Tanque de equalização

do tanque utilizando apenas o ar dissolvido, sem a necessidade de adicionar nenhum tipo de substância coagulante. Quando a carga orgânica é elevada, no período de safra de tomate, é preciso utilizar produto de origem orgânica a base da casca da árvore chamada acácia negra, para melhorar a eficiência do processo.

O efluente líquido que sai do tanque de flotação é encaminhado para o tanque de condicionamento com pH entre 3,8 a 5,0.

A Figura 3.8 ilustra a capacidade do tanque onde o pH é corrigido. Nesse tanque com capacidade de $240 m^3$ a correção do pH é realizada com adição de hidróxido de

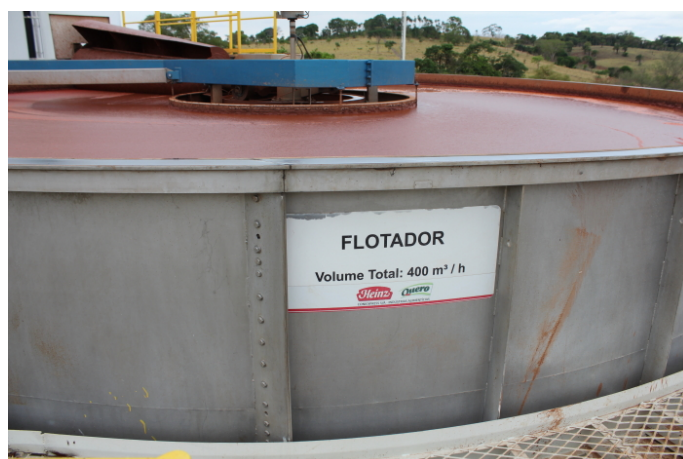


Figura 3.6 - Tanque de flotação



Figura 3.7 - Centrífuga

sódio ($NaOH$) 50 %, aumentando o pH do efluente líquido até atingir valores entre 6,4 a 6,6. Quando a eficiência do reator diminui é adicionado nesse mesmo tanque solução nitrofosfatada (N/P), que provoca o aumento na produção de biogás.

3.1.1 Processo anaeróbio

Após a correção do pH , o efluente é levado para os biodigestores, ilustrados na Figura 3.9. Os biodigestores são tanques verticais com capacidade de $785 m^3$ e $1095 m^3$ de volume. Nesses tanques a matéria-orgânica é convertida em biogás e no resíduo líquido que é encaminhado para as lagoas, em meio anaeróbio.



Figura 3.8 - Capacidade do tanque de condicionamento

O efluente líquido entra de baixo para cima nos reatores e fica retido por período de três horas seguidas dentro dos biodigestores.



Figura 3.9 - Biodigestores anaeróbios

O modelo dos reatores anaeróbios é do tipo circulação interna (*CI*), ou seja, reatores pressurizados pelo gasômetro, revestidos internamente por polipropileno, um material resistente a corrosão. O interior dos reatores é constituído por duas colméias com função de captar o biogás, localizadas no meio e na parte superior dos reatores.

O biogás produzido é levado até o tanque desgaseificador situado no topo dos reatores

com papel de realizar pré armazenamento do gás e controlar o volume, mantendo segurança no caso do nível máximo de volume de gás seja alcançado. Quando o nível atinge o máximo, o bombeamento de efluentes é parado e o alarme acionado.

Os biodigestores operam com temperaturas entre 33 a 34 °C, sem aumentos bruscos de temperatura. O consórcio de bactérias anaeróbias ilustradas na Figura 3.10, são sensíveis a mudanças de temperatura e *pH*, exigindo ambiente anaeróbio com controle de: volume de carga orgânica, vazão do efluente, *pH* e temperatura do meio reacional. Se houver excesso de carga orgânica e alteração nos parâmetros de controle do reator, pode ocasionar a morte das bactérias.



Figura 3.10 - Suspensão contendo as bactérias anaeróbias

O biogás formado nos tanques é direcionado para o gasômetro que está ilustrado na Figura 3.11. O gasômetro tem função de armazenar e pressurizar o biogás que vem do degaseificador para melhor eficiência do reator. No gasômetro é realizado o controle de vazão e de pressão do biogás.

Atualmente todo o biogás produzido é queimado em flare ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.11 - Gasômetro

A produção do biogás durante a safra fica entre 7.000 m^3 a 11.000 m^3 por reator, na entre safra o volume diminui para valores entre 5.000 m^3 a 8.000 m^3 por dia. O flare possui sistema de ignição automático e interrompe a liberação do metano caso a chama se apague.

3.1.2 Processo aeróbio

O resíduo líquido que sai do biodigestor é direcionado para depósito em sequência de três lagoas aeróbias, que foram projetadas com sistema de injeção de oxigênio na água utilizando sopradores de ar e difusores tubulares revestidos com lona cheia de pequenos furos em sua estrutura. Os difusores liberam uma *névoa de ar* realizando micro aeração na lagoa de forma lenta e espontânea.

Para não ocorrer comprometimento no funcionamento da lagoa, essa não deve ficar grande período sem receber oxigênio. O tempo de detenção na lagoa aeróbia é de 72 horas.

A Figura 3.13 ilustra as lagoas do processo aeróbio. A primeira lagoa chamada de lagoa de aeração, recebe a fração líquida do biodigestor com cerca de 10 a 20 % de



Figura 3.12 - Flare

matéria orgânica não degradada.



Figura 3.13 - Lagoas aeróbias

A água tratada da lagoa aeróbia, passa para as duas lagoas de condicionamento para eliminar fungos e bactérias provenientes dos reatores que não podem chegar ao

manancial hídrico. O tempo de detençãõ dessas lagoas é de 48 horas.

Após todo o tratamento realizado na *ETE*, a água tratada pode retornar ao corpo hídrico apresentando *DBO* com valores permitidos pelas legislações estaduais e federais, conforme a LEI nº 8544 de 17/10/78 sobre o controle da poluição do meio ambiente e *CONAMA* 430/11 que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida para a realização dos estudos. No primeiro item da metodologia estão descritas as etapas que foram atingidas para elaborar e confeccionar a bancada laboratorial com os reatores anaeróbios, descrevendo os mecanismos adotados para determinar o potencial de produção de biogás a partir do lodo.

O segundo item do capítulo descreve as análises físico química realizadas na biomassa e no inóculo com objetivo de definir a massa e o volume que os reatores devem ser preenchidos para dar início ao processo de biodigestão, seguindo as regras da Norma Alemã *VDI 4630/2006* ([VDI, 2006](#)).

O terceiro item do capítulo descreve a maneira que os reatores foram montados para dar início ao processo de biodigestão anaeróbia.

O quarto item do capítulo descreve o monitoramento diário que foi realizado no experimento para medir o volume de biogás produzido nos reatores em batelada.

O quinto item descreve os procedimentos que foram realizadas para calcular a secagem térmica do lodo da centrífuga.

O sexto item do capítulo apresenta os procedimentos utilizados para caracterizar o lodo e o resíduo final do processo. O sétimo item descreve os métodos analíticos realizados na amostra no início e no término da biodigestão. As análises foram realizadas no Laboratório Nacional Agropecuário em Goiás (*LANAGRO – GO*).

4.1 Montagem da bancada de teste

O desenvolvimento e a montagem do reator anaeróbio em batelada foram definidos a partir de testes preliminares realizados no laboratório, com intuito de estudar e verificar a melhor forma de realizar a captação do biogás. O primeiro protótipo desenvolvido do reator anaeróbio foi montado utilizando: uma proveta, mangueira, kitassato, aquecimento de água por banho maria, garras e suporte universal.

O kitassato funcionou como tanque da biodigestão anaeróbia por ser um recipiente de vidro, material preferencial para todas as partes da aparelhagem que estejam

em contato com a atmosfera do biogás (UNIDO, 2011). Esse recipiente ficou imerso no banho maria a temperatura de 37 °C. O aquecimento do reator foi controlado com sensores externos de temperatura conectados ao equipamento. O recipiente foi lacrado com uma rolha de borracha na parte superior, evitando a entrada de oxigênio. Para deixar a atmosfera anaeróbia, gás nitrogênio (N_2) foi colocado no kitassato com função de retirar o gás oxigênio (O_2) residual e assim manter o ambiente anaeróbio (UNIDO, 2011).

Na saída lateral do kitassato foi conectada uma mangueira própria para uso em sistema de gás, com função de levar o biogás produzido no interior do kitassato até a bureta, ligando o tanque de biodigestão com o tanque de armazenamento de biogás. A bureta, que estava preenchida com água, teve a função de coletar e armazenar o biogás produzido. Para isto, ela ficou imersa em um béquer contendo água, com capacidade de 10 litros, de cabeça para baixo. O gás produzido no kitassato foi direcionado para o interior da bureta onde ocorreu o deslocamento da água pelo interior da proveta, permitindo assim verificar o volume de biogás produzido.

A Figura 4.1 ilustra o funcionamento da primeira montagem do reator anaeróbio em batelada.

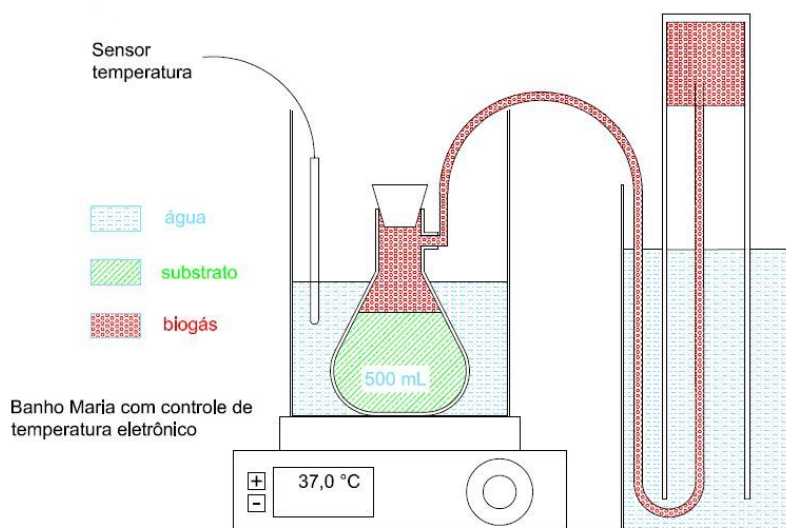


Figura 4.1 - Esquema do primeiro reator em batelada utilizado
Fonte: (ALMEIDA et al., 2011)

O recipiente utilizado como tanque de biodigestão foi satisfatório no ensaio, armazenando a biomassa em condições anaeróbias durante o processo.

A Figura 4.2 mostra a montagem realizada para o reator anaeróbio. Essa montagem apresentou problemas para quantificar o biogás produzido, devido a problemas de vazamento de biogás e precisou ser aperfeiçoada. A dificuldade para fixar as provetas nos suportes e os problemas enfrentados para acoplar a mangueira do reator até a proveta não permitiram quantificação exata do biogás produzido. O erro de paralaxe nas leituras, causado ao observar o volume de biogás produzido, não permitiu realizar medida exata. Ainda foi verificado problemas em relação ao espaço ocupado pelos baldes na bancada e a evaporação da água contida nos mesmos, que serviram para mergulhar as provetas. O protótipo impossibilitou também a automatização dos procedimentos de leitura a distância. O que ensejou o desenvolvimento de uma estratégia diferente para a realização dos referidos testes.

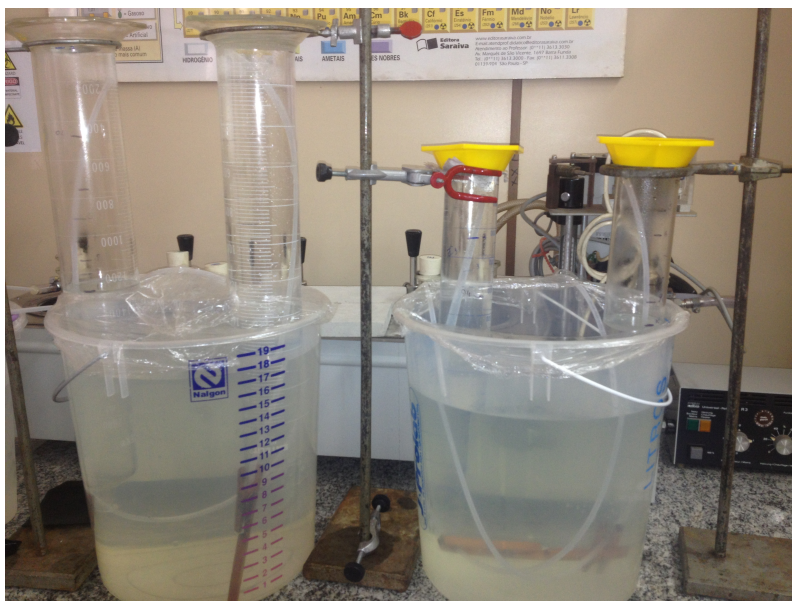


Figura 4.2 - Primeiro protótipo de captação de biogás

Considerando as dificuldades apresentadas na estrutura laboratorial mostrada na Figura 4.2, foi projetado e montado outra estrutura mais adequada para tal fim. Essa montagem é apresentada na Figura 4.3, que tem como vantagem: a simplicidade na coleta de biogás do reator, facilidade de manuseio do gasômetro, recipiente para armazenar o biogás produzido e saída para coletar amostras de biogás, porém ainda

carecia de melhorias pois continuava a apresentar os problemas de leitura observados na montagem da figura 4.2.



Figura 4.3 - Segundo protótipo do biorreator a ser montado.

Portanto, a bureta foi trocada por um recipiente cilíndrico de vidro que ficou com abertura para baixo, fechado com uma tampa fabricada especialmente para esse recipiente. A tampa foi projetada com duas aberturas. Uma para a entrada do gás produzido no kitassato e outra para a saída da água expelida pela pressão do gás produzido. Uma das mangueiras foi conectada no reator (kitassato) e teve função de transportar o biogás do tanque de digestão até a entrada de gás do recipiente de vidro.

A Figura 4.4 é o esboço, para um conjunto completo de sistema de batelada, que apresenta como novidade a utilização de uma balança eletrônica, para a medição da massa de água deslocada pela entrada de igual volume de gás no gasômetro. Esta bancada e os procedimentos metodológicos aqui adotados tem o mérito de serem muito precisos.

A captação do biogás do reator continuou a mesma da Figura 4.3. A diferença foi na mangueira da saída de água, que foi direcionada para outro recipiente vazio, que teve a função de medir o peso da água deslocada pelo biogás. Desse modo foi possível calcular o volume de biogás produzido em função da quantidade de água deslocada para o recipiente.

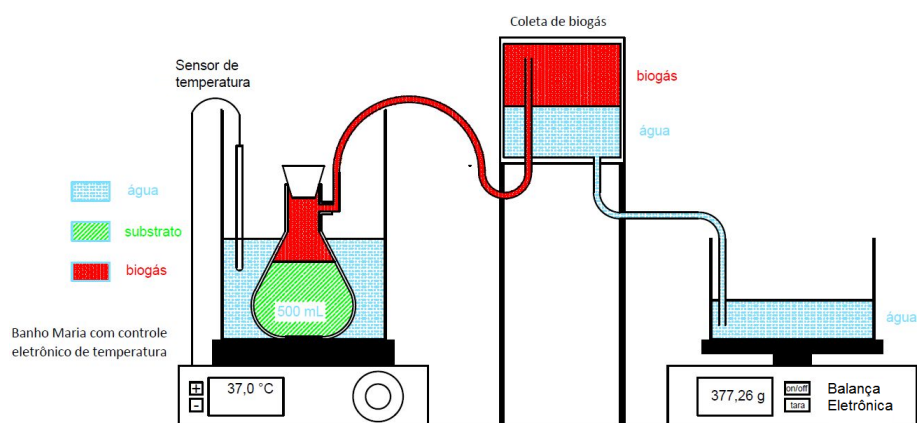


Figura 4.4 - Reator com captação de gás (gasômetro)

Fonte: (ALMEIDA et al., 2011)

Considerando a necessidade de realizar nove testes simultâneos, foi projetado e montado uma bancada laboratorial para esse fim.

A Figura 4.5 apresenta a bancada laboratorial desenvolvida nesse trabalho. Essa bancada contém nove unidades idênticas ao esquema mostrado na Figura 4.3, formando número ideal de reatores para realizar o ensaio em triplicata com as três misturas do ensaio. A bancada foi construída para servir de suporte para os recipientes de vidro que serviram para a captação e armazenamento do biogás. Os recipientes foram preenchidos com água e colocados no suporte feito de madeira e metal. Os recipientes de captação e armazenamento de gás foram projetados e construídos na parte superior do suporte, abaixo ficaram os vasos receptores de água em cima das balanças eletrônicas e atrás do suporte ficaram os reatores mergulhados no aquecimento por banho maria. A construção da bancada com suporte permitiu fácil manuseio dos reatores e dos coletores de gases.

Para a construção da bancada foi necessário os seguintes componentes:

- Nove recipientes do tipo kitassato: com capacidade total de 500 mL utilizados para a fermentação anaeróbia, sendo que a biomassa ocupou volume de 350 mL.
- Nove balanças eletrônicas.
- Dois reservatórios com aquecimento de água (banho maria) e com controle externo de temperatura.



Figura 4.5 - Visão geral da bancada com nove conjuntos de bioreatores.

- Nove recipientes coletores de gás com mangueiras e válvulas acopladas.

4.2 Determinação de umidade, massa seca e massa seca orgânica para a biomassa e para o inóculo

Para a realização dos ensaios, realizados em laboratório, foi necessário calcular alguns parâmetros recomendados pela Norma Alemã *VDI 4630/2006* (VDI, 2006). Uma norma da associação de engenheiros da Alemanha que recomenda que os reatores anaeróbios tenham uma proporção de 1 : 0,4 da massa seca orgânica do inóculo em relação a massa seca orgânica da amostra. Os ensaios devem ser montados para que a proporção da *MSO* corresponda à 25 % da quantidade de inóculo. Portanto, a umidade da matéria seca orgânica (*MSO*) e a umidade da matéria seca inorgânica (*MSI*) do lodo e do inóculo foram determinadas.

A Figura 4.6 ilustra o aparelho utilizado para determinar a umidade e a massa seca do lodo e do inóculo. O aparelho utilizado foi um determinador de umidade por infravermelho da marca Marte. O equipamento calculou a umidade e secou as amostras, indicando a massa seca e a umidade do inóculo e do lodo.

As amostras secas foram colocadas em uma mufla, por um período de uma hora com aquecimento gradativo até a temperatura até 550 °C, seguido de mais quatro horas na mesma temperatura seguindo a norma alemã.

Após o término do aquecimento na mufla, foi determinado as massas de *MSO* e



Figura 4.6 - Determinação da umidade em balança de infravermelho

MSI das amostras. As Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram a matéria seca após os procedimentos. A partir desses cálculos foi possível definir as proporções necessárias do lodo e do inóculo para montar o biorreator anaeróbio.



Figura 4.7 - Inóculo seco

4.3 Montagem do ensaio em batelada

Com a bancada montada e a composição do biorreator definida, a montagem do ensaio em batelada foi preparada seguindo a Norma Alemã *VDI 4630/2006* (VDI, 2006). Alguns parâmetros como o *pH* e a temperatura, foram controlados para o melhor desempenho do processo.



Figura 4.8 - Lodo seco

As amostras que foram colocadas nos reatores (nos kitassatos) sofreram correções de pH até valores de 6,8. Como o pH inicial do lodo e do inóculo estavam mais ácidos do que recomendado para o processo da biodigestão anaeróbia, foram corrigidos com adição de bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$).

Para fins de validação dos resultados os ensaios foram realizados em triplicatas, contendo as seguintes misturas nos biodigestores: somente inóculo, biomassa (lodo da *ETE*) com inóculo e celulose microcristalina (padrão) com inóculo. Estas misturas formaram total de nove amostras e foram montadas nas mesmas condições para assim poder comparar a produção do biogás. A Tabela 5.1 apresenta a massa do início do ensaio e do final do ensaio.

Após a correção do pH , todos os reatores sofreram modificações na sua atmosfera ambiente em função da passagem de gás nitrogênio, que teve objetivo de deixar o meio anaeróbio. Em seguida os reatores foram imersos na água a temperatura de $37\text{ }^{\circ}C$ (WARD et al., 2008). O equipamento de aquecimento do reator foi adaptado com termostato de controle de temperatura com sensores externos. A Figura 4.9 ilustra o termostato utilizado com sensores externos.

Depois que os reatores foram preparados e colocados no *banho maria*, o processo da biodigestão anaeróbia e o monitoramento diário do ensaio foi iniciado.

4.4 Monitoramento do ensaio

O ensaio foi monitorado a cada vinte e quatro horas, durante o período de detenção da amostra no reator. Durante esse período foram realizadas medidas diárias do peso



Figura 4.9 - Termostato com controle de temperatura com sensores externos

da água que era deslocada para o recipiente situado em cima da balança, verificando assim a produção do biogás. Os valores dos pesos obtidos nas balanças indicaram o volume de gás diário produzido no processo. Para fazer a conversão de massa de água em volume de gás, foi utilizado o valor da densidade da água na temperatura e pressão local.

Durante as medidas diárias foram observadas também a temperatura do ambiente e a pressão atmosférica do local, para realizar os cálculos com uma normalização dos resultados. O gasômetro foi capaz de armazenar o biogás produzido no processo nas *CNTP* (Condições Normais de Temperatura e Pressão).

4.5 Cálculo da energia para secagem térmica do lodo

O consumo de energia e a eficiência de secagem do lodo pode ser obtida de forma analítica que fornece o mínimo de energia necessária para secar o lodo. O consumo de energia específica de secagem é definido pela unidade da amostra, pela massa de água extraída durante a secagem e pela variação de temperatura. A expressão (4.1) determina a energia necessária para secagem do lodo (SCHELLE; SANDER, 2008), considerando que sua umidade fique próxima de 5 %.

$$W_a = (m_{H_2O} \times C_{H_2O} + M_{BW,tr} \times C_{BW}) \cdot \Delta T + r_v \times \Delta m_{H_2O} \quad (4.1)$$

Onde:

- W_a é a Energia para secagem;
- m_{H_2O} é a quantidade de água introduzido para o processo de secagem;
- $M_{BW,tr}$ é a massa seca do lodo;
- C_{H_2O} é a capacidade térmica de água ($4,20 \text{ kJ} \cdot (\text{kgK})^{-1}$);
- C_{BW} é a capacidade térmica do algodão (padrão) = ($1,34 \text{ kJ} \cdot (\text{kgK})^{-1}$);
- ΔT é a diferença entre temperaturas de ebulição e ambiente (Temperatura de ebulição da água a $97,5 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando uma altitude de 823 m Temperatura média ambiente de $21,9 \text{ }^\circ\text{C}$);
- r_v é a entalpia específica de ebulição de água em $60 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $r_v \text{ } 60 \text{ }^\circ\text{C} = 2358 \text{ kJ} \cdot (\text{kg})^{-1}$;
- Δm_{H_2O} é a quantidade de água liberada durante a secagem (considerando uma secagem até 5% de umidade).

4.6 Caracterização do lodo e do resíduo final da biodigestão: micronutrientes, macronutrientes e contaminantes

A caracterização do lodo e do resíduo final da biodigestão permite avaliar a presença de micronutrientes e macronutrientes, para possível aplicação dos mesmos como fertilizantes. A análise dos contaminantes inorgânicos permite avaliar a qualidade do lodo e do resíduo final da biodigestão identificando assim a toxicidade das amostras. A caracterização permitiu analisar as amostras para possível aplicação como biofertilizante.

A análise do lodo inicial e do resíduo final da biodigestão foram realizadas ao mesmo tempo. Portanto, para manter a composição inicial, a amostra de lodo foi seca em estufa na temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingir peso constante, depois foi triturada e armazenada para não ter interferências na hora de realizar as análises. A Figura 4.10 mostra a trituração da amostra.



Figura 4.10 - Preparo da amostra de lodo

As análises de caracterização do lodo e do resíduo final foram realizadas na LANAGRO – GO, seguindo o manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos, anexo da Instrução Normativa (IN) n° 28, de 27 de julho de 2007.

4.6.1 Contaminantes Inorgânicos, Macronutrientes Primários e Micronutrientes:

Os contaminantes inorgânicos determinados foram: Cádmio (*Cd*), Chumbo (*Pb*), Cromo (*Cr*) e Níquel (*Ni*). O micronutriente primário determinado foi o Zinco (*Zn*) e os macronutrientes secundários analisados foram Cálcio (*Ca*) e Magnésio (*Mg*).

Nas análises de contaminantes, macronutrientes e micronutrientes foi realizado o processo da extração com solventes¹ das amostras: lodo, inóculo e produto final do reator. Para a extração foi realizada a pesagem de 1,000 g de cada uma das amostras representativas de lodo analisadas. Cada uma das massas pesadas foram transferidas para erlenmeyers de 125 mL, onde foi adicionado 10 mL de ácido clorídrico concentrado utilizando uma pipeta volumétrica. Essas amostras foram levadas para uma chapa aquecedora para que o volume fosse reduzido ao máximo, ficando bem próximo de secar o extrato. Depois as amostra foram retiradas da chapa e resfriadas. Para preparar a solução utilizou-se uma proveta graduada com volume total de 25,0 mL, que foi preenchida com 20,0 mL de água destilada e 5,0 mL de ácido clorídrico concentrado, essa mistura foi transferida para o extrato.

¹Extração com solvente: técnica em que uma mistura é posta em contato com um solvente a fim de provocar uma transferência de um ou mais solutos para a mistura.

Em seguida a mistura foi aquecida por 10 minutos e logo após resfriada. Após o resfriamento, a solução foi filtrada com auxílio de um funil de vidro e papel de filtro de porosidade média. O filtrado foi transferido para um balão volumétrico de 100 mL. O resíduo retido foi lavado com água destilada e depois o balão foi completado com água até atingir o menisco.

A Figura 4.11 ilustra as amostras analisadas após abertura.



Figura 4.11 - Amostras prontas para realizar leituras

Os elementos foram quantificados utilizando a técnica de espectrometria de absorção atômica de chama (*EAA*).

A Figura 4.12 apresenta o espectrofotômetro de absorção atômica utilizado. Para cada tipo de elemento utilizado foi colocada uma lâmpada de cátodo oco referente ao elemento em análise. Foi utilizado também as linhas específicas dos respectivos elementos no monocromador e fotomultiplicador do espectrofotômetro de absorção atômica. O equipamento usado na análise contaminantes inorgânicos e macronutrientes foi o espectrofotômetro da marca VARIAN, modelo spectrAA 200.

4.6.2 Macronutrientes Secundários (Fósforo e Potássio):

Para análise de fósforo, o fósforo foi extraído das amostras conforme procedimento de extração para micronutrientes. A extração iniciou com ataque químico fortemente ácido e a quente, com função de extrair todo o seu conteúdo de fósforo. Ocorreu a formação de complexo colorido (amarelo) entre o fosfato e os reagentes vanadato e

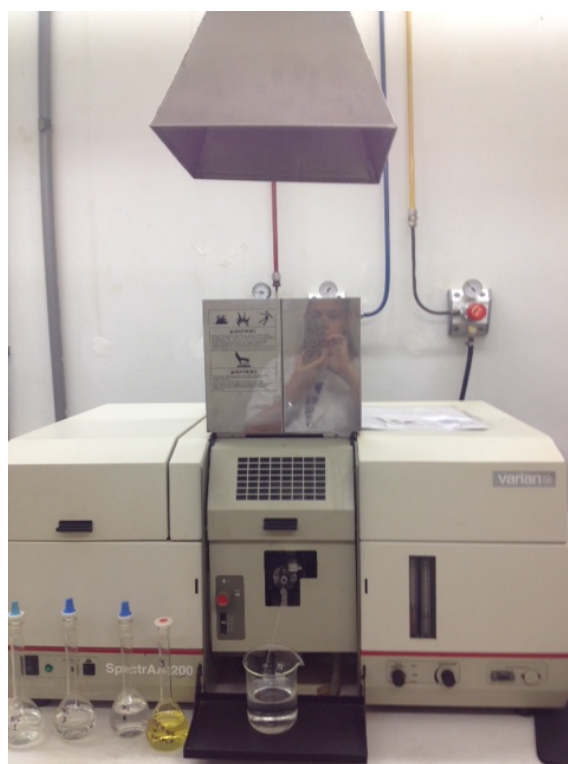


Figura 4.12 - Espectrofotômetro de absorção atômica de chama

molibdato de amônio. Com esse ataque ocorreu precipitação do íon fosfomolibdato. As amostras foram analisadas no espectrofotômetro *UV – VIS* da marca INSTRUMENTUM UV-1000A.

A análise do potássio ocorreu com a extração das amostras conforme o procedimento específico para micronutrientes, onde foi realizada a medida da sua emissão em fotômetro de chama, devidamente calibrado para esse procedimento. As análises de micronutrientes procedeu-se através da quantificação em fotômetro de chama da marca MICRONAL modelo B4621.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a construção e o funcionamento do reator anaeróbio. Analisando os ensaios em batelada e definindo parâmetros para a construção de um reator laboratorial de fluxo contínuo e o cálculo da secagem térmica do lodo. O capítulo finaliza com as análises da caracterização do lodo e da fração líquida do reator.

5.1 Determinação da umidade, *MSI* e *MSO* antes e depois da biodigestão anaeróbia

O cálculo dos valores da umidade, da *MSI* e da *MSO*, foram realizados na amostra inicial do lodo e do inóculo, separados, e ao final do experimento com o produto da biodigestão anaeróbia. A realização das medidas dos parâmetros físicos foram realizadas no laboratório de Química do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Goiânia, sob as mesmas metodologias aplicadas.

O lodo foi coletado no mês de outubro em condições ambientes e apresentou umidade de 56,83 %. Após realizar os devidos cálculos, o reator foi montado em um sistema anaeróbio e permaneceu fechado durante vinte dias consecutivos. Após o período de retenção da amostra o reator foi aberto e novos cálculos dos parâmetros foram realizados e os valores se encontram na a Tabela 5.1.

Com os valores das massas iniciais e com os valores obtidos durante o ensaio, foram calculados os valores de *MSI* e *MSO*, das amostras do início e do fim da biodigestão. O cálculo da umidade, da *MSI* e da *MSO* foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto, pois foi possível calcular o total da *MSO* presente no reator no início do ensaio que foi de 28,5 g e após o processo da biodigestão anaeróbia foi verificado que uma parte da matéria orgânica foi degradada, pois a *MSO* diminuiu

Tabela 5.1 - Umidade, *MSI* e *MSO*

Amostra	Massa inicial (g)	Umidade (%)	<i>MSI</i> (g)	<i>MSO</i> (g)
Lodo	10,873	56,83	2,734	1,959
Inóculo	10,24	92,95	0,055	0,686
Resíduo final da biodigestão	10,10	91,52	0,375	0,480

para 16,5 g.

5.2 Análises dos ensaios em batelada

As Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, apresentam os resultados das três amostras de lodo (Lodo 1, Lodo 2 e Lodo 3), respectivamente, normalizados de acordo com a *CNTP*, avaliando o desempenho da biomassa para a produção do biogás. Os testes foram realizados em triplicatas com intuito de validar o teste e comparar a produção de biogás nos reatores.

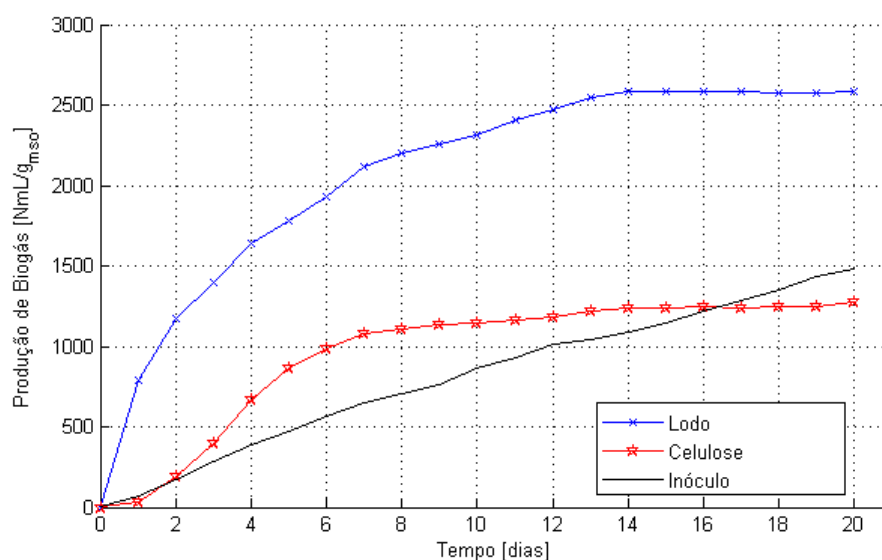


Figura 5.1 - Produção acumulada de biogás da amostra de lodo 1

As Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam os valores acumulados da produção de biogás dos reatores montados com as seguintes composições: *i*) lodo + inóculo, *ii*) padrão (celulose microcristalina) + inóculo e *iii*) inóculo, respectivamente. O período considerado para a amostragem dos valores foi de vinte dias, definidos após testes iniciais que demonstraram que após esse período a produção de biogás se tornou desprezível.

A produção de biogás ocorreu em todos os nove reatores de batelada durante os vinte dias consecutivos. Nos reatores que continham apenas o inóculo, a produção de biogás foi relativamente pequena e igual em todas as amostras. Os reatores formados pelo inóculo com adição da celulose microcristalina apresentaram produção de biogás

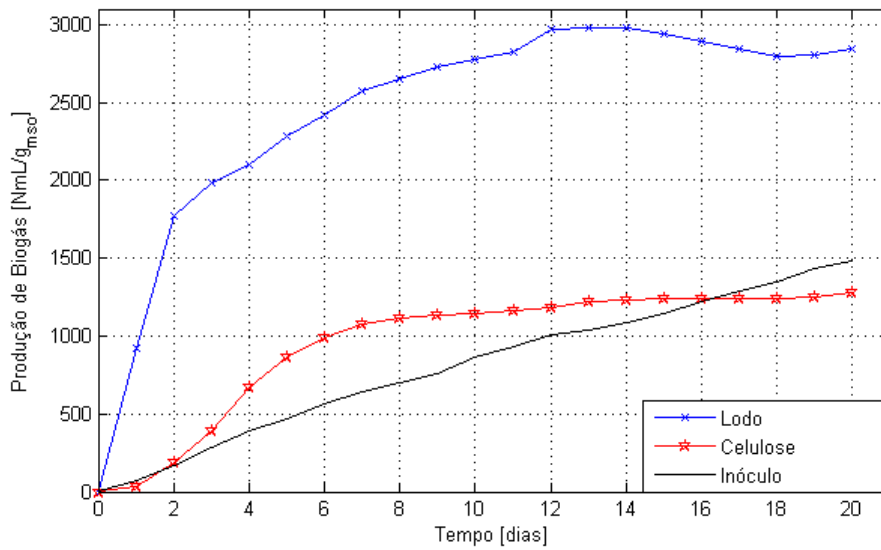


Figura 5.2 - Produção acumulada de biogás da amostra 2

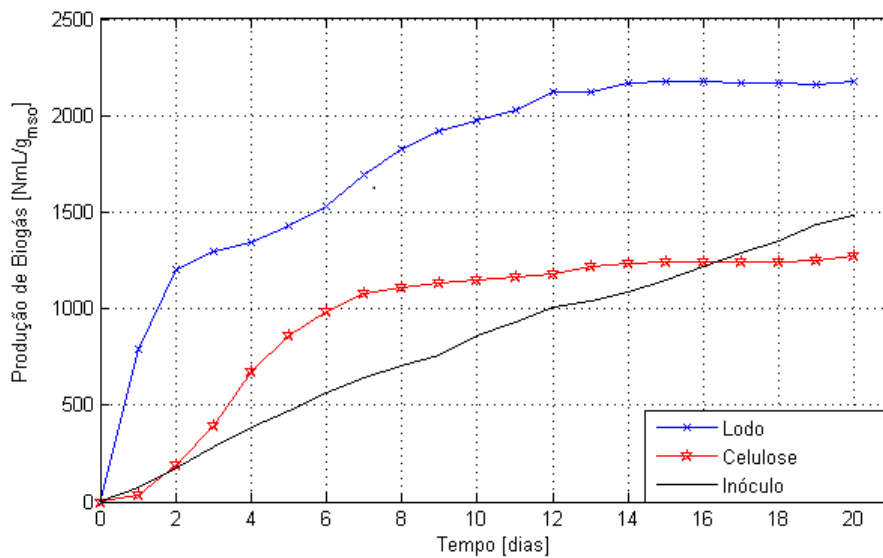


Figura 5.3 - Produção acumulada de biogás da amostra 3

inferior aos produzidos pelo lodo. Os reatores constituídos com inóculo e o lodo, apresentaram produção de biogás superior a todos os outros. As curvas construídas com os dados obtidos nos ensaios, foram obtidas subtraindo a produção de biogás produzido pelo inóculo. A curva do lodo identifica os valores obtidos somente com a produção da biomassa, a curva do lodo ficaria mais elevada se acrescentasse a

produção do inóculo.

Os reatores com o inóculo e com a celulose microcristalina obtiveram baixa produção de biogás no primeiro e no segundo dia, apresentando aumento discreto na produção de biogás a partir do terceiro dia até o sexto dia de produção, após esse período o volume de gás formado nesses reatores voltou a diminuir até se tornar insignificante, ou seja, menor que 1 % por dia.

As Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6, apresentam a produção normalizada líquida diária do lodo (*P_{NLLDL}*), das triplicatas dos reatores. As figuras mostram a variação do volume de biogás produzido a cada 24 horas, onde pode ser verificado que a produção ultrapassa 700 *NmL/g_{msso}* logo no primeiro dia. As leituras realizadas por dia identificam também que a produção de biogás é maior nos primeiros dias do ensaio e que depois de algum tempo o volume de gás produzido é reduzindo até chegar a valores desprezíveis.

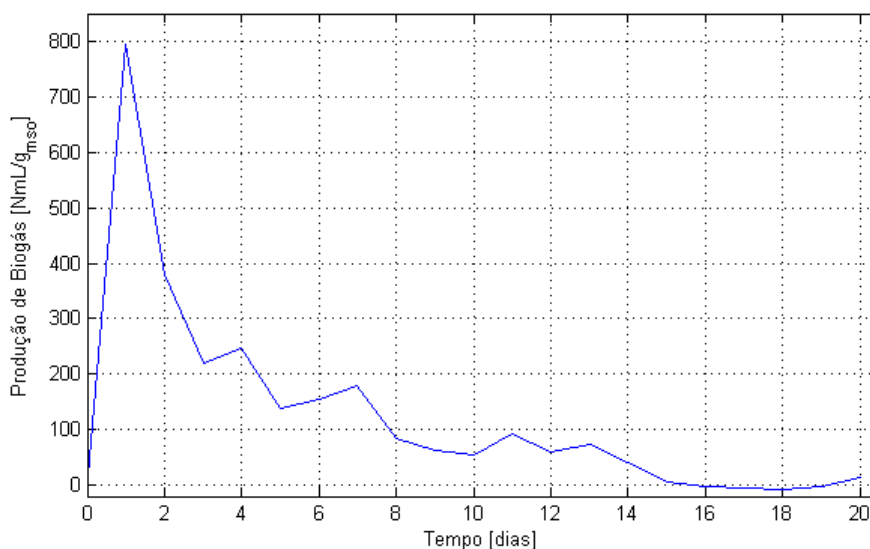


Figura 5.4 - Produção diária de biogás amostra 1

Para determinar o (*P_{NLLDL}*) utilizou-se a expressão (5.1), que permite calcular somente o volume de biogás produzido devido a presença da biomassa na mistura, esse valor calculado mostra que as bactérias são capazes de produzir volume maior de biogás quando são alimentadas com a biomassa, que é verificado no início do

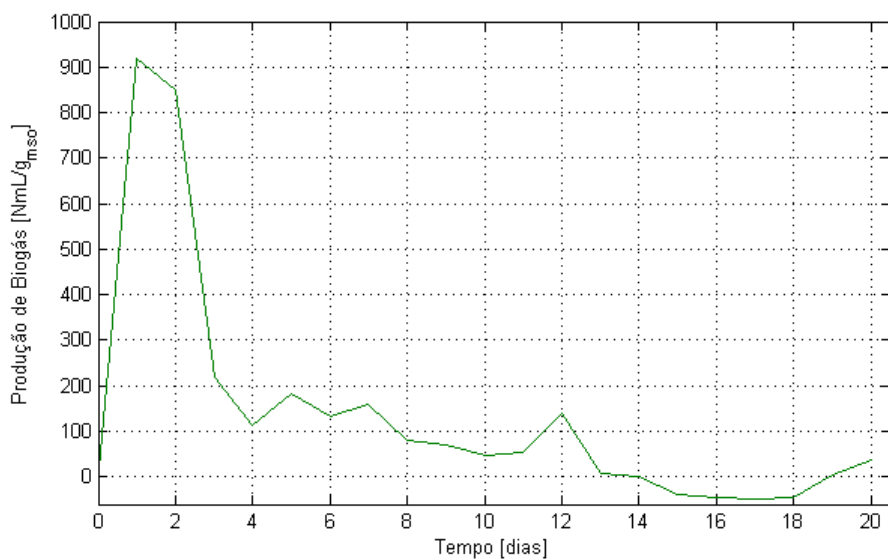


Figura 5.5 - Produção diária de biogás amostra 2

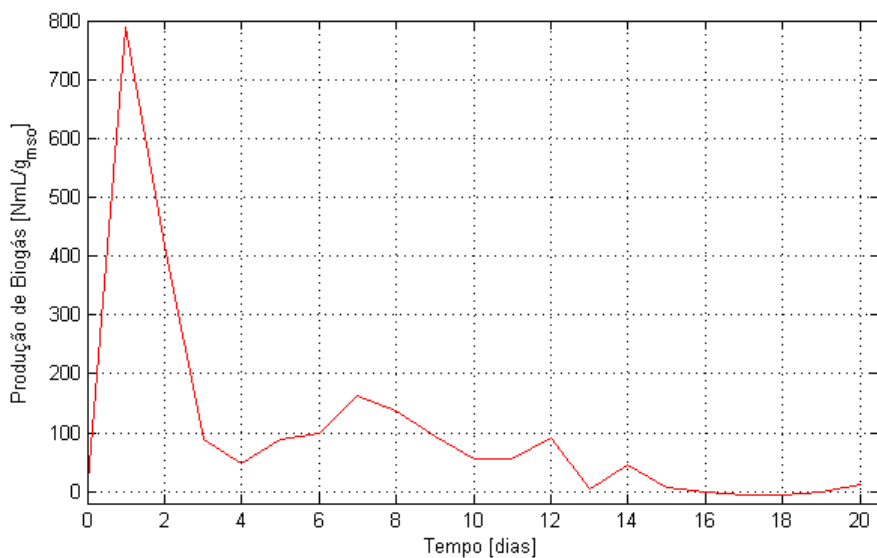


Figura 5.6 - Produção diária de biogás amostra 3

processo quando a quantidade de matéria orgânica é maior.

$$PNL DL = PNDL - PNDI \quad (5.1)$$

onde:

- $PNLDL$ é a produção normalizada líquida diária de lodo ($NmL/gmso$);
- $PNDL$ é a produção normalizada diária de lodo ($NmL/gmso$);
- $PNDI$ é a produção normalizada diária de inóculo ($NmL/gmso$).

As Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, apresentam as produções normalizadas percentuais líquidas das amostras do lodo ($PNLDL$) dos volumes de biogás produzidos por dia nos reatores em triplicata. Nessas figuras pode-se verificar, após o sexto dia de produção do gás, que já havia produzido 70 % do volume total de biogás, para o tempo de amostragem considerado.

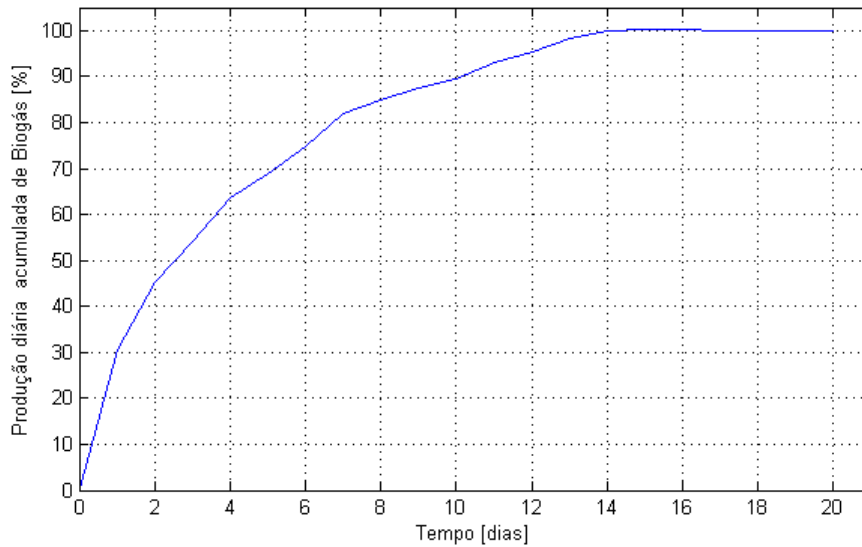


Figura 5.7 - Produção normalizada percentual líquida amostra 1

A expressão (5.2) foi utilizada para calcular o percentual de biogás produzido por dia.

$$PNL DL(\%) = \left(\frac{PNDL - PNDI}{\sum (PNDL - PNDI)} \right) \times 100 \quad (5.2)$$

onde:

- $\sum (PNDL - PNDI)$ é o somatório da produção diária do lodo menos

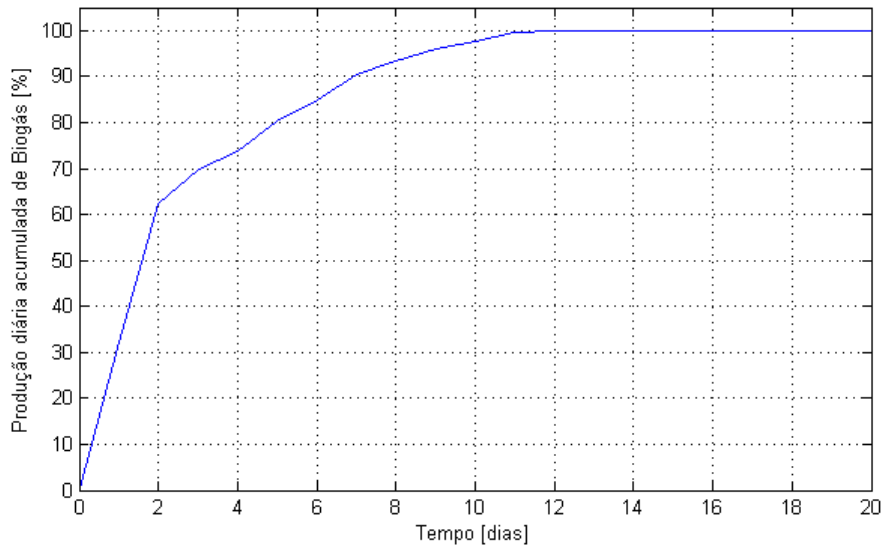


Figura 5.8 - Produção normalizada percentual líquida amostra 2

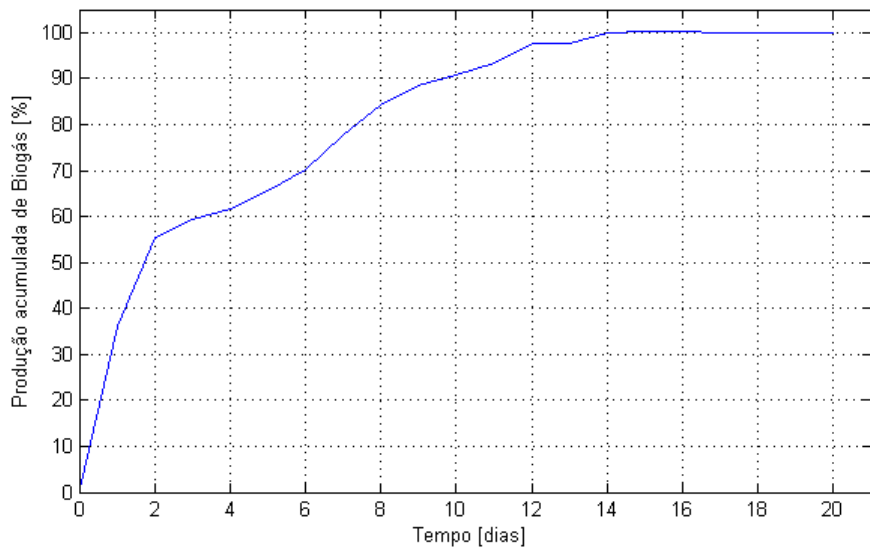


Figura 5.9 - Produção normalizada percentual líquida amostra 3

a produção diária do inóculo para o período de avaliação considerado (NmL/g_{mso}).

5.3 Cálculo dos parâmetros do biorreator laboratorial de ciclo contínuo

Partindo da biomassa com características conhecidas e seguindo as recomendações da Norma Alemã *VDI* 4630/2006, o tempo de detenção foi definido em função da relação do total de gás produzido na batelada pelo valor diário de biogás formado.

A partir de análises das Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, opta-se pelo tempo de detenção como sendo de 6 dias, ou seja, o tempo em que a produção acumulada percentual de biogás foi de 70 %. Para determinar o tempo de detenção, o regime de balanço de massa foi considerado o mesmo, ou seja, o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída, dessa forma o tempo de detenção ficou definido em seis dias consecutivos.

O tempo de detenção é um parâmetro que influencia diretamente no rendimento do sistema anaeróbio e por outro lado representa custos de investimento para construir o biorreator. Quanto maior o tempo de detenção do lodo maior será o volume do biorreator.

Considerando que um biorreator de bancada de fluxo contínuo de mistura perfeita tenha 5 litros de capacidade para armazenar o inóculo e a biomassa, necessita ter um volume total igual a 6,67 litros. Desse volume total do biorreator, 75 % corresponde ao volume espacial ocupado pela fração sólida líquida da amostra (mistura de inóculo e lodo) e 25 % corresponde ao volume espacial para expansão do gás (SCHOEN; BAGLEY, 2012).

A taxa de vazão de fluxo de entrada do lodo será de 0,83 litros por dia, que é apresentada na expressão (5.3).

$$Q = \frac{V}{T} \quad (5.3)$$

onde:

- Q é a vazão de fluxo;
- V é o volume da fração líquida;
- T o tempo de detenção.

5.4 Projeção preliminar da capacidade de produção de biogás a partir de um biorreator industrial para uso do lodo como biomassa

A partir dos ensaios realizados em batelada, foi possível prever o volume de biogás que pode ser produzido utilizando todo o lodo produzido na indústria de alimentos. O volume diário de lodo produzido na ETE corresponde a aproximadamente 10 toneladas por dia, essa quantidade de biomassa apresenta valor aproximado de 1,8 *ton/dia* de matéria seca orgânica. No ensaio de batelada foi verificado que 1 *g MSO* de lodo produziu em média 2,6 *NL* de biogás, com desvio padrão de 0,2. Pode-se então projetar que a capacidade de produção de biogás utilizando todo o lodo produzido diariamente será de 4.684,447,8 *NL* ou 4.684,4 *Nm³.dia⁻¹*.

A partir da produção média de biogás medida na *ETE* da indústria alimentícia de 10.423,87 *Nm³/dia*, calcula-se que o incremento médio de biogás obtido a partir da utilização do lodo, em biorreator industrial será de 43,11 %. Foi publicado um trabalho, que calculou a energia média possível de ser gerada, a partir do uso de moto gerador de ciclo otto com o uso desse biogás como combustível no motor (RAMOS et al., 2014a; RAMOS et al., 2014b). Os estudos apontaram para produção média, em regime contínuo, de 747 *kWh*, totalizando 6,7 *GWh/ano*. Caso opte pelo aproveitamento do lodo como biomassa em biorreator industrial, calcula-se que poderá gerar cerca de 321,21 *kWh* ou 2,81 *GWh/ano*.

5.5 Resultado da determinação da secagem térmica do lodo

A secagem térmica é uma operação capaz de remover a fração líquida agregada ao sólido, através de vaporização térmica (DAVID, 2002). A energia necessária para secar o lodo foi calculada utilizando uma amostra de 1 *Kg* de lodo com umidade de 56 %. A massa seca também foi calculada a partir de 1 *Kg* de lodo e o valor obtido foi de 0,44 *Kg*. Para esse cálculo foi considerado a temperatura de ebulição da água considerando a altitude da cidade de Nerópolis que é 823 *m*, a variação de temperatura foi calculada levando se em conta a temperatura de ebulição da água do local da coleta do lodo e a temperatura local do cálculo da umidade do lodo.

O cálculo foi realizado imaginando uma secagem do lodo até 5 % de umidade final. Para esse valor final de umidade, a massa de água liberada durante a secagem foi de 0,51 *Kg*, obtendo-se 1,4 *MJ* de energia necessária para secar o lodo.

Como a produção diária de lodo é cerca de 10 *t*, precisa-se de cerca de 11,2 *GJ* de

energia calorífica para secagem do lodo da *ETE*. Após a secagem o lodo pode ser aplicado na caldeira para a queima direta.

De acordo com os dados de catálogo da Caterpillar, fabricante de grupos moto geradores para gás, a dissipação mínima de calor (Minimum heating value (*LHV*)), na exaustão, para um grupo típico operando, ao consumir 1 Nm^3 de biogás a 60 % de metano é de 18 *MJ*. Sabendo-se que planta da *ETE*, da indústria alimentícia, produz 10.423,87 Nm^3/dia , calcula-se que a dissipação total de calor de um conjunto moto gerador, consumindo esse gás combustível, será de 187,629 *GJ/dia*. Calcula-se, portanto, que a dissipação total de calor mínima do moto gerador é cerca de 16 vezes maior do que a necessária para secar todo o lodo.

5.6 Resultados das análise: macronutrientes, micronutrientes e contaminantes inorgânicos

A Tabela 5.2 apresenta os valores da análise para os contaminantes inorgânicos: Cromo (*Cr*), Níquel (*Ni*), Cádmio (*Cd*) e Chumbo (*Pb*). Os valores encontrados no lodo *in natura* e nos reatores apresentam valores inferiores aos limites estipulados pela legislação de fertilizantes orgânicos.

Tabela 5.2 - Contaminantes inorgânicos no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo.

Amostra [<i>mg.L</i> ⁻¹]	Cádmio (<i>Cd</i>)	Chumbo (<i>Pb</i>)	Cromo (<i>Cr</i>)	Níquel (<i>Ni</i>)
Limite Máximo	3	150	200	70
Lodo	< 0,50	< 2,00	0,49	0,229
Resíduo [<i>mg.L</i> ⁻¹]	Cádmio (<i>Cd</i>)	Chumbo (<i>Pb</i>)	Cromo (<i>Cr</i>)	Níquel (<i>Ni</i>)
Reator 1	< 0,50	< 2,00	1,24	0,93
Reator 2	< 0,50	< 2,00	1,06	1,77
Reator 3	<0,50	< 2,00	1,38	2,51

O órgão federal responsável pela fiscalização do comércio de fertilizantes no Brasil é o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabeleceu limites máximos para a concentração de contaminantes inorgânicos em fertilizantes orgânicos através da Instrução Normativa (*IN*) n° 27, de 5 junho de 2006. Os contaminantes inorgânicos analisados na amostra atingiram valores muito inferiores aos

considerados pela legislação. A baixa presença desses contaminantes permite classificar os subprodutos dos reatores como possível fertilizante, sendo capaz de agregar nutrientes ao solo.

Os baixos valores de contaminantes inorgânicos encontrados tanto no lodo *in natura* quanto nos resíduos dos reatores é fator positivo, principalmente por tratar-se de elementos nocivos a saúde humana. Além da quantidade de metais pesados que podem ser liberados no solo, é preciso considerar as quantidades de contaminantes que são adicionados no solo ao longo do tempo, verificando os teores totais desses elementos inadequados para a saúde humana (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

O resíduo do reator não é considerado produto comercial da indústria, portanto, ao utilizá-lo como fertilizante, não é preciso expressar os valores específicos da concentração de cada contaminante, sendo necessário apenas verificar se as concentrações encontradas são inferiores aos limites máximos de contaminantes.

A legislação brasileira de comercialização de fertilizante preconiza valores máximos de contaminantes inorgânicos, onde esses valores só são aplicados quando ocorre a comercialização dos fertilizantes. No entanto, para consumo próprio, os fertilizantes com baixos teores de contaminantes apresentam capacidade de segurança para a disposição no meio ambiente, evitando contaminação por excesso desses metais pesados nos solos e nas águas.

As concentrações dos micronutrientes *Cu* e *Zn* são descritas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Micronutrientes no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo

Amostra [mg.kg ⁻¹]	Cobre (Cu)	Zinco (Zn)
Lodo	111,9	242,0
Resíduo [mg.L ⁻¹]	Cobre (Cu)	Zinco (Zn)
Reator 1	1,6	16,82
Reator 2	3,63	21,25
Reator 3	4,89	37,1

A presença de micronutrientes foi verificada tanto no lodo *in natura* como no re-

síduo da biodigestão, indicando que esses subprodutos podem provocar processo de melhoria no solo aumentando a sua produtividade. A presença de traços desses micronutrientes, mesmo em pequenas quantidades melhora a qualidade do desenvolvimento das plantas no solo.

A Tabela 5.4 indica as concentrações de macronutrientes primários e a Tabela 5.5 indica as concentrações de macronutrientes secundários presentes no lodo da ETE e no resíduo da biodigestão anaeróbia.

Tabela 5.4 - Macronutrientes primários no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo.

Amostra [g/100g]	Potássio (K ₂ O)	Nitrogênio (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)
Lodo [%]	3,06	0,97	0,89
Resíduo [mg.L ⁻¹]	Potássio (K ₂ O)	Nitrogênio (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)
Reator 1	6,30	465,59	666,00
Reator 2	5,81	479,29	1088,00
Reator 3	8,42	454,37	1555,00

Tabela 5.5 - Macronutrientes secundários no lodo e biofertilizantes da biodigestão anaeróbia do lodo

Amostra [g/100g]	Magnésio (Mg)	Cálcio (Ca)	Cobre (Cu)	Zinco (Zn)
Lodo	1,10[%]	0,12[%]	119,90[mgKg ⁻¹]	242,00[mgKg ⁻¹]
Resíduo [mg.L ⁻¹]	Magnésio (Mg)	Cálcio (Ca)	Cobre (Cu)	Zinco (Zn)
Reator 1	1,36	0,65	1,60	16,82
Reator 2	1,70	1,02	3,63	21,25
Reator 3	2,23	1,18	4,89	37,10

A presença dos macronutrientes nos subprodutos permite utilizar e classificar o subproduto como fertilizante de solo ou ainda aplicar como condicionador de solo. O lodo tratado apresenta características interessantes em relação à fertilidade, confirmada pela presença de concentrações significativas de macronutrientes essenciais para funções fisiológicas das plantas.

Esses nutrientes indispensáveis para as plantas são absorvidos em quantidades específicas, necessárias para o seu desenvolvimento. Os macronutrientes primários são as moléculas essenciais e são necessários em grandes quantidades, devido a função estrutural, enquanto os micronutrientes fazem parte das enzimas com função reguladora, sendo necessários em quantidades menores. Ambos são importantes, são apenas necessários em quantidades e concentrações diferentes.

A matéria orgânica que não foi degradada na biodigestão anaeróbia, sendo solúvel ou em suspensão, possibilitará também a liberação dos nutrientes presentes na sua composição. As concentrações variáveis dos elementos tornam necessário que a fração líquida tratada seja utilizada de forma controlada na irrigação. Essa matéria orgânica presente no efluente tratado, apresenta características de subproduto ainda biodegradável podendo ainda ser transformado quando aplicado no solo, incorporado ao húmus com controle das propriedades do solo como a capacidade de troca de cátions, absorção de água, entre outros.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes da indústria alimentícia mostrou-se satisfatório no biodigestor, apontando para a produção de um volume significativo de biogás. A adição do lodo nas bactérias anaeróbias provocou um aumento na produção de biogás, devido a elevada quantidade de matéria orgânica presente na biomassa.

A quantidade de matéria orgânica presente no lodo, no período de junho a outubro do ano de 2013, durante a safra, obteve valores entre 42 % e 55 % do total da massa de lodo. Após a aplicação da biodigestão, foi verificado uma redução da matéria orgânica, atingindo degradação em até 40 % do total da matéria orgânica presente no lodo. O método da biodigestão anaeróbia, foi capaz de reduzir a porcentagem da matéria orgânica, produzindo ainda um componente energético, o biogás e ainda um biofertilizante, como subprodutos da reação.

A quantidade de biogás captada no processo de batelada serviu como suporte para definir alguns parâmetros necessários para projetar o reator de fluxo contínuo. Identificando assim a vazão de biomassa que deve ser aplicada em um reator de escala laboratorial. O ensaio serviu também para definir o tempo de detenção que a biomassa deve ficar retida no tanque do reator anaeróbio, necessário para atingir um rendimento alto de produção de biogás.

A produção diária inicialmente prevista para o volume total de biomassa produzida na indústria de alimentos é de $4.684,4 \text{ m}^3/\text{dia}$, o que representa cerca de 43,11 % da produção de biogás da planta de tratamento de efluentes já instalada na empresa. Estudos preliminares baseados na produção atual de biogás com aproximadamente $10.423,87 \text{ m}^3/\text{dia}$, apontaram para uma potência média de geração termoelétrica de 747 kW , em regime contínuo, obtendo $6,7 \text{ GWh/ano}$ o que pode ser incrementada em mais $321,21 \text{ kW}$ ou $2,81 \text{ GWh/ano}$ isto é, poderia gerar aproximadamente $1,1 \text{ MW}$, caso se opte pelo aproveitamento termoelétrico do biogás. Esse volume inicial previsto também pode ser aumentado alterando os parâmetros no reator de ciclo contínuo.

Além do aproveitamento energético, o biofertilizante produzido na biodigestão provoca benefícios na produtividade do solo, melhorando a qualidade das colheitas e

ainda uma redução de custos e longevidade da atividade agrícola. Os nutrientes encontrados tanto no lodo *in natura* como no subproduto da biodigestão são importantes para o desenvolvimento das plantas de forma sustentável, com a preservação do meio ambiente. Utilizar a reciclagem na agricultura exige uma produção de insumos com qualidade garantida do produto de uso agrícola, visando também rentabilidade ao produtor.

6.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições são descritas da seguinte forma:

- a) Confeção de uma bancada contendo nove reatores anaeróbios com operação em regime de batelada.
- b) Produção de biogás a partir de reações anaeróbias nos reatores em batelada.
- c) Quantificação da capacidade de produção de biogás do lodo produzido na *ETE* da indústria alimentícia *HEINZ*, situada na cidade de Nerópolis-GO.
- d) Análises que permitiram avaliar e concluir, a respeito da utilidade e potencialidades do uso dos resíduos de saída do biorreator industrial que venha a utilizar o lodo como biomassa.
- e) Cálculo dos parâmetros para construção de biorreator laboratorial de ciclo contínuo de mistura perfeita.
- f) Obtenção da seguinte produção bibliográfica:

Artigos

1. Publicado em periódico:

Artigo publicado: Study of parameters for the design of a continuous flow laboratory biogas reactor (C. A. Almeida, A. J. Alves, S. B. Oliveira, J. W. Zang, W. P. Calixto, and E. G. Domingues), *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, *ISSN* : 2172 – 038.

2. Apresentado em congresso:

Study of parameters for the design of a continuous flow laboratory biogas reactor (C. A. Almeida, A. J. Alves, S. B. Oliveira, J. W. Zang, W. P. Calixto, and E. G. Domingues), International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ14) Cordoba (Spain), 8th to 10th April, 2014.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

a) Construção de um reator de fluxo contínuo

Um reator de fluxo contínuo poderá ser construído e alimentado de acordo com os dados obtidos no ensaio em batelada. Com esse reator será possível verificar quais parâmetros podem ser modificados para aumentar a produção de metano no biogás, tentando assim otimizar o processo da produção de biogás. Levando-se em consideração a relativa baixa umidade do lodo, com valores próximos de 57 % e não desejando proporcionar uma substancial diluição desta biomassa pela adição de água, um possível arranjo para o biorreator laboratorial de ciclo contínuo é indicado na Figura 6.1.

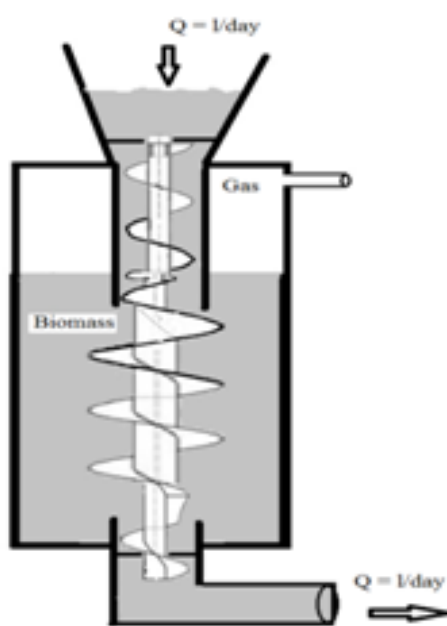


Figura 6.1 - Bioreator de fluxo contínuo

A biomassa entra pela parte superior do reator que é direcionada para um tanque central através do agitador com função de homogeneizar a mistura

que permanece por um tempo de detenção específico. Após esse período o resíduo da biomassa degradada é direcionado para a saída do reator situada na parte inferior do equipamento. A captação do biogás formado ocorre na lateral do reator.

- b) Projetar um reator com operação em escala industrial após testes com reator a nível laboratorial de fluxo contínuo, com produção máxima de biogás.
- c) Testar o produto final obtido no reator como fertilizante orgânico. Verificando a sua eficiência e o seu potencial de aumento da produtividade e melhoria nas colheitas, obtendo redução de custos.
- d) Analisar a composição do biogás produzido no reator, quantificando as substâncias presentes, principalmente o volume de CH_4 , CO_2 e H_2S .
- e) Desenvolver uma metodologia de purificação e armazenamento do biogás produzido para o melhor aproveitamento do combustível produzido.
- f) O biogás produzido no reator pode ser aproveitado como combustível em motores a gás. Para o melhor aproveitamento é preciso desenvolver técnicas para aplicar o biogás em motores específicos e assim obter energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, N. 10004. resíduos sólidos–classificação. **Rio de Janeiro**, 2004. [26](#)
- ALMEIDA, C.; ALVES, A.; OLIVEIRA, S.; ZANG, J.; CALIXTO, W.; DOMINGUES, E. Study of parameters for the design of a continuous flow laboratory biogas reactor. 2011. [62](#), [65](#)
- ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. et al. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002. [39](#), [45](#)
- ANEEL, A. N. d. E. E. **ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**. [S.l.]: ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008. 236 p. [30](#)
- AQUINO, S. F. d.; CHERNICHARO, C. A. Build up of volatile fatty acids (vfa) in anaerobic reactors under stress conditions: causes and control strategies. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 10, n. 2, p. 152–161, 2005. [35](#)
- BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência-ACSA**, v. 2, n. 1, p. 87–96, 2011. [39](#)
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. de. Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura. **Embrapa Meio Ambiente-Livros científicos (ALICE)**, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006., 2006. [49](#), [85](#)
- BMELV MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO, A. e. D. d. C. d. A. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. [S.l.]: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2010. [29](#), [32](#), [34](#), [36](#), [38](#), [46](#)
- BOHRZ, G. I. **Geração de Metano em Lagoa Anaeróbia: Um Estudo de Caso em Abatedouro de Bovinos**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2010. [37](#)
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 185–193, 2007. [29](#)

CAMPOS, J. et al. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo: Coletânea de trabalhos técnicos. **São Carlos-SP: PROSAB**, p. 183, 2000. [43](#)

CARON, C. F. **Geração de energia no campus a partir da biodigestão anaeróbica**. Tese (Doutorado) — Universidade Tuiuti do Paraná, 2010. [41](#)

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. d.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2010. [23](#)

CASSINI, S. T. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. **Sanepar/Prosab, Curitiba, ABES-Rj**, 2003. [46](#)

CATAPAN, A.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A. Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: uma abordagem do custo de geração da energia. **Custos e Agronegócio**, p. 25–37, 2011. [45](#), [46](#)

CATARINO, R.; GONZÁLEZ, A.; OLIVEIRA, L. Otimização da produção de metano na biodigestão da cama de frango. **I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais e Geração de Energia a partir de Resíduos Animais. Santa Catarina**, 2009. [33](#)

CHENG, C.-Y. Energia alternativa na indústria láctea: a produção e aproveitamento de biogás numa pequena queijaria minhota. **Jornada de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente**, 2007. [48](#)

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **Reatores anaeróbios**, v. 5, p. 379, 2007. [32](#), [34](#), [35](#), [36](#), [37](#), [38](#)

COELHO, S. Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e rurais. **Florianópolis: CENBIO—Centro Nacional de Referência em Biomassas. 12f.(Nota Técnica 7)**, 2001. [45](#)

CORREA, T.; COSTA, C. da; HENEINE, M. de S.; RIBEIRO, P. E. A.; SANTANA, D. P. Operação, monitoramento e manutenção da estação de tratamento de esgotos na empresa milho e sorgo. 2007. [35](#)

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. **Campinas, Editora da Unicamp**, p. 29, 2008. [30](#), [31](#)

COSTA, D. F. d. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006.** Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Energia)—Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. [34](#)

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2002. [83](#)

DCR, D. d. C. R. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis.** [S.l.]: Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis, 2013. [24](#)

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. d. C. J. P.; ROSSI, M. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002. [40](#), [41](#), [42](#), [43](#)

DEMIREL, B.; SCHERER, P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, Springer, v. 7, n. 2, p. 173–190, 2008. [23](#), [33](#), [37](#)

FERNANDES, F. Uso e manejo do lodo de esgotos na agricultura. **Curitiba: SANEPAR**, 1999. [49](#)

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C.; JÜRGENSEN, D. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. **Sanepar/Prosab, Curitiba**, 1999. [45](#)

GOLDEMBERG, J. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. **São Paulo em perspectiva**, SciELO Brasil, v. 14, n. 3, p. 91–97, 2000. [23](#)

_____. Biomass and energy. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 32, n. 3, p. 582–587, 2009. [30](#)

IANNICELLI, A. L. Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. 2008. [46](#), [47](#), [48](#)

JUNIOR, A. T. d. F. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto.** Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008. [24](#)

- KATO, M.; NETO, C. d. O. A.; CHERNICHARO, C. d. L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. Configurações de reatores anaeróbios. **Tratamento de esgotos Sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**, Projeto PROSAB São Carlos, 1999. 42
- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P. **Microbiologia de BROCK**. [S.l.]: Artmed, 2004. 35
- MME, M. d. M. e. E. **Resenha Energética Brasileira**. [S.l.]: MME, Ministério de Minas e Energia, 2013. 26 p. 30
- MONNET, F. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. **Final Report**. pp, p. 1–43, 2003. 32, 34
- NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: a review. **Engineering in Life Sciences**, Wiley Online Library, v. 12, n. 3, p. 258–269, 2012. 29
- OLIVER, A. P. M. **Manual de treinamento em biodigestão**. [S.l.: s.n.], 2008. 23 p. 44
- PALHARES, J.; MASSOTTI, Z.; SOUZA, L. d. Biodigestores modelo indiano: análise da transferência de tecnologia com base no perfil ambiental, produtivo e social. Concórdia, SC (Brazil), 2003. 24
- PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da usp—estudo de caso. **Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo**, 2006. 24, 25, 47
- PEREIRA, R. A. N.; FERREIRA, W. M.; GARCIA, S. K.; PEREIRA, M. N.; BERTECHINI, A. G. Digestibilidade do bagaço de cana-de-açúcar tratado com hidróxido de sódio em dietas para coelhos em crescimento. **Ciênc. agrotec.,(Impr.)**, v. 32, n. 2, p. 573–577, 2008. 31
- PICKBRENNER, K. **Uso de reator seqüencial em batelada (RSB) para pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 44

- RAMOS, A. C. L.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; COELHO, S. T. Proposal of technical and commercial arrangements for distributed generation from the use of biogas in a food industry. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, n. 12, 2014. [83](#)
- RAMOS, A. C. L.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; OLIVEIRA, S. B.; COELHO, S. T. Proposal of technical and commercial arrangements for distributed generation from the use of biogas in a food industry, international conference on renewable energies and power quality. n. 14, 2014. [83](#)
- SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2007. [42](#), [45](#), [46](#)
- SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no brasil. *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 1, p. 57–67, 2005. [47](#), [48](#)
- SANTANNA, J.; LIPPEL, G. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. **Rio de Janeiro, Editora Interciência**, SciELO Brasil, 2010. [34](#), [36](#), [45](#)
- SCHELLE, R.; SANDER, K. **Análise aprofundada do processo de secagem**. [S.l.]: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2008. [69](#)
- SCHOEN, E. J.; BAGLEY, D. M. Biogas production and feasibility of energy recovery systems for anaerobic treatment of wool-scouring effluent. *Resources, Conservation and Recycling*, Elsevier, v. 62, p. 21–30, 2012. [82](#)
- SILVA, W. T. L. da; NOVAES, A. P. de; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. de A.; JÚNIOR, L. M. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. *Quim. Nova*, SciELO Brasil, v. 35, n. 1, p. 35–40, 2012. [49](#)
- SUSTENTABILIDADE, I.-G. L. pela. Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. **ICLEI-Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo**, 2009. [34](#)

- TOMAZ, A. C.; ALMEIDA, F. F. d.; VIEIRA, L. R.; SILVA, P. H. D. O. **Estimativa para geração de energia elétrica com aproveitamento do biogás gerado por uma estação de tratamento de esgoto.** Tese (Doutorado) — Pontícia Universidade Católica de Goiás, 2011. [52](#)
- UNIDO, U. N. I. D. O. **Analysis of biogas and methane potential from organic materials in anaerobic bath experiments.** [S.l.]: University of Natural Resources and Life Siences, 2011. [62](#)
- VDI, V. D. I. **Fermentation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.** [S.l.: s.n.], 2006. [61](#), [66](#), [67](#)
- VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.** Tese (Doutorado) — Columbia University, 2002. [32](#)
- WALTER, L. C.; STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; KRÜGER, C. A. M. B. Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz. **Ciência Rural**, SciELO Brasil, v. 40, n. 11, p. 2411–2418, 2010. [23](#)
- WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource technology**, Elsevier, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 2008. [68](#)
- XAVIER, C. d. A.; JÚNIOR, J. d. L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inoculo. **Engenharia Agrícola**, 2010. [43](#)