

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Graduação em Engenharia Química

D
E
Q



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM BIODIGESTOR
ANAERÓBIO DO TIPO CANADENSE A PARTIR DE
RESÍDUOS ALIMENTARES DO RESTAURANTE DE
UMA INDÚSTRIA E DO LODO DA ETE**

Paulo Cesar Almeida Santos

Orientadora:

Maria de Los Angeles Perez F. Palha

Departamento de Engenharia Química
Cidade Universitária- Recife – PE
CEP. 50640-901
Telefax: 0-55-81- 21267289

Recife/PE

Novembro/2021

PAULO CEZAR ALMEIDA SANTOS

DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM
BIODIGESTOR ANAERÓBIO DO TIPO CANADENSE A PARTIR DE RESÍDUOS
ALIMENTARES DO RESTAURANTE DE UMA INDÚSTRIA E DO LODO DA ETE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Química.
Orientadora: Profª. Drª. Maria de Los Angeles
Perez Fernandez Palha.

Recife,
Novembro de 2021.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Santos, Paulo Cezar Almeida.

DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO
DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DO TIPO CANADENSE A PARTIR
DE RESÍDUOS ALIMENTARES DO RESTAURANTE DE UMA
INDÚSTRIA E DO LODO DA ETE / Paulo Cezar Almeida Santos. - Recife,
2021.

60 p : il., tab.

Orientador(a): Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química -
Bacharelado, 2021.

1. Biogás. 2. Metano. 3. Resíduos orgânicos. 4. Lodo de esgoto. 5.
Biodigestão anaeróbia. I. Palha, Maria de Los Angeles Perez Fernandez.
(Orientação). II. Título.

“Não deixe o barulho da opinião dos outros abafar sua voz interior. E mais importante, tenha a coragem de seguir seu coração e sua intuição. Eles de alguma forma já sabem o que você realmente quer se tornar.”

Steve Jobs

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por toda a força a mim concedida e por ter me orientado nos momentos necessários, por ter me proporcionado saúde a mim e minha família, pois sem isso não conseguiria chegar ao fim do curso.

À minha mãe Katia Maria de Almeida, minha tia Sandrea de Almeida Barbosa e minhas avós Maria Augusta de Arruda e Cícera Francisca dos Santos, por todo amor e carinho que foram fundamentais por me fazer acreditar nos meus objetivos e ter forças pra seguir em frente durante todos os anos desde o ensino fundamental até a graduação.

A minha namorada e futura esposa Kassia Farias Silva por toda paciência, compreensão e apoio durante minhas maratonas de estudo durante a graduação e trabalho, assim como nos dias e noites dedicados a esse trabalho.

Agradeço a minha professora e orientadora, Maria de Los Angeles, a qual se mostrou bastante acessível, até no final de semana, diante aos vários compromissos que ela possui em sua agenda. Sou grato a ela, por aceitar ser minha orientadora e pelo interesse em meu projeto.

Agradeço também aos meus amigos que surgiram durante a graduação, Aline Assaka, Diogo Felipe, Henrique Farias, Lilian Calado, Luan Alves, Mariana Melo e Mariana Veras, assim como diversos outros que foram fundamentais para eu chegar até aqui. Eles, que em alguns momentos passaram mais horas comigo na universidade do que em suas casas. Nunca mediram esforços para me auxiliar no que fosse preciso. Foram essenciais para mim na graduação e eu sou eternamente grato a cada um deles por tudo, levarei para toda a vida

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e em especial ao Departamento de Engenharia Química (DEQ), que foi um local no qual me proporcionou condições de realizar um curso de graduação de forma gratuita no qual nem eu nem minha família teríamos condições de arcar com os custos. Agradeço também por me fornecer os meios para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O tratamento de efluentes em estações de tratamento de esgoto industriais são fundamentais para remoção de substâncias contaminantes, de modo que não sejam despejados no meio ambiente. Este processo de tratamento tem como predominante resíduo o lodo de esgoto e a destinação desse resíduo é um desafio para os órgãos responsáveis regulatórios. O biogás é um biocombustível formado por uma mistura constituída principalmente por CH_4 e CO_2 produzida pela digestão anaeróbia, a partir de lodo de esgoto, dejetos animais, resíduo orgânico doméstico, resíduos agrícolas e efluentes industriais. Para que seja usado como combustível é necessário ser purificado, não produzir gases tóxicos durante a sua queima, aproveitamento do resíduo orgânico e liberar como efluente um biofertilizante. Dessa forma, a utilização do biodigestor como fonte renovável de energia, vem sendo muito utilizada em todo o mundo, com uma ótima oportunidade para investimento dessa tecnologia em ambientes industriais. Diante do aproveitamento energético desses resíduos e a redução da poluição, o presente trabalho tem como propósito avaliar o processo de biodigestão de resíduos orgânicos de um restaurante industrial somado ao lodo de esgoto oriundo de ETE, avaliando a composição do biogás produzido no que se refere ao metano (CH_4). A eficiência foi estimada através do potencial de produção de gás metano a partir do percentual dos sólidos voláteis (SV) que compõem a biomassa, constituída pelos restos de alimentos e o lodo de ETE, utilizado como inóculo. A quantidade dos resíduos alimentares gerados, em média, é de 240 kg por dia. Considerando que a fração de SV dos restos de alimentos são de 27,60% e o SV do inóculo como 89,30% em sua composição, estimou-se uma geração de biogás de $431,67\text{ Nm}^3\text{.dia}^{-1}$, com o volume total do biodigestor de $28,88\text{ m}^3$. Esse volume de gás gerado pode gerar diariamente o equivalente a $1.066,62\text{ kWh.dia}^{-1}$. Foi possível calcular o tempo de retorno para o investimento realizado na implementação do biodigestor, obtendo-se um resultado de, aproximadamente, 20 meses.

Palavras-chave: Biogás. Metano. Resíduos orgânicos. Lodo de esgoto. Biodigestão anaeróbia.

ABSTRACT

The treatment of effluents in industrial sewage treatment plants is essential for removing contaminating substances, so that they are not discharged into the environment. This treatment process has sewage sludge as its predominant waste and the disposal of this waste is a challenge for the responsible regulatory bodies. Biogas is a biofuel formed by a mixture consisting mainly of **CH₄** and **CO₂** produced by anaerobic digestion, from sewage sludge, animal waste, domestic organic waste, agricultural residues and industrial effluents. In order for it to be used as fuel, it must be purified, not produce toxic gases during its burning, use organic waste and release a biofertilizer as effluent. Thus, the use of the biodigester as a renewable energy source has been widely used all over the world, with an excellent opportunity for investment in this technology in industrial environments. In view of the energy use of these wastes and the reduction of pollution, this work aims to evaluate the biodigestion process of organic waste from an industrial restaurant added to sewage sludge from ETE, evaluating the composition of the biogas produced in relation to the methane (**CH₄**). Efficiency was estimated through the potential of methane gas production from the percentage of volatile solids (SV) that make up the biomass, consisting of food waste and ETE sludge, used as an inoculum. The amount of food waste generated, on average, is 240 kg per day. Considering that the SV fraction of food waste is 27.60 % and the SV of the inoculum as 89.30 % in its composition, a biogas generation of 431.67 Nm³.day⁻¹ was estimated, with the total volume of the biodigester of 28.88 m³. This volume of gas generated can generate daily the equivalent of 1,066.62 kWh.day⁻¹. It was possible to calculate the payback time for the investment made in the implementation of the biodigester, obtaining a result of approximately 20 months.

Keywords: Biogas. Methane. Organic waste. Sewage sludge. Anaerobic Biodigestion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema Representando as principais etapas do processo da biodigestão anaeróbica.....	23
Figura 2.	Reator de metanização de câmara única de resíduos orgânicos.....	31
Figura 3.	Biodigestor de duas câmaras.....	31
Figura 4.	Biodigestor tipo indiano.....	34
Figura 5.	Biodigestor tipo chinês.....	35
Figura 6.	Biodigestor tipo canadense.....	36
Figura 7.	Parâmetros bases utilizados nos modelos.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Composição do biogás.....	15
Tabela 2.	Teores de nutrientes das frações, calculados para os processos de tratamento por meio de modelos matemáticos.....	20
Tabela 3.	Avaliação dos processos para o tratamento de biofertilizantes.....	21
Tabela 4.	Classificação dos micro-organismos de acordo com a temperatura de crescimento.....	27
Tabela 5.	Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor do tipo canadense.....	41
Tabela 6.	Dimensões adotadas para o “r”, “p” e “L”	47
Tabela 7.	Valores dos parâmetros calculados para o biodigestor.....	47
Tabela 8.	Tempo de retorno financeiro do investimento no biodigestor.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás liquefeito de petróleo
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de efluentes
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
FIEP	Federação das Indústrias do Paraná
CCE	Centro para a conservação de Energia
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ICLEI	Local Environmental Initiatives
SV	Sólidos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
COV	Carga Orgânica Volumétrica
GPR	<i>Gas Production Rate</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
Cntp	Condições Normais de Temperatura e Pressão
FP	Fator de potência

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>CH₄</i>	Metano
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>H₂O</i>	Água
<i>N₂</i>	Nitrogênio
<i>H₂S</i>	Ácido Sulfídrico
<i>O₂</i>	Oxigênio
<i>H₂</i>	Hidrogênio
<i>NH₃</i>	Amoníaco
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>H₂S</i>	Sulfeto de hidrogênio
<i>m³</i>	Metro cúbico
<i>MJ</i>	Megajoules
<i>ppm</i>	Partes Por Milhão
<i>NADP</i>	Nicotinamida adenina Dinucleotídeo Fosfato
<i>ATP</i>	<i>Adenosina Trifosfato</i>
<i>PVC</i>	Policloreto de Vinila

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 BIOGÁS.....	15
2.1.1 História do biogás.....	16
2.1.2 Tratamento de resíduos.....	17
2.1.3 Utilização do biogás.....	17
2.1.4 Biofertilizantes.....	19
2.2 GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	22
2.2.1 Formação do biogás.....	22
2.2.2 Processo microbiológico.....	23
2.2.2.1 Hidrólise.....	24
2.2.2.2 Acidogênese.....	24
2.2.2.3 Acetogênese.....	24
2.2.2.4 Metanogênese.....	25
2.3 PARÂMETROS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DO BIOGÁS.....	26
2.3.1 Acidez e alcalinidade.....	26
2.3.2 Temperatura.....	26
2.3.3 Características, composição e concentração da biomassa.....	28
2.3.4 Presença de inibidores na digestão anaeróbica.....	28
2.4 BIODIGESTORES.....	29
2.4.1 Classificação dos biodigestores.....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO ALIMENTAR NO RESTAURANTE..	38
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS GERADOS NA ETE.....	38
3.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR.....	38
3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	39

3.4.1 Tempo de detenção hidráulica.....	39
3.4.2 Carga orgânica volumétrica (COV).....	40
3.4.3 Taxa de produção de biogás (Gas Production Rate – GPR)	40
3.4.4 Volume do biodigestor.....	41
3.4.5 Cálculo da caixa de entrada e saída.....	43
3.4.6 Alimentação do biodigestor.....	44
3.4.7 Estimativa do potencial energético do biogás produzido.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 PREPARAÇÃO DO REATOR.....	45
4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR.....	45
4.2.1 Volume Diário Ocupado pela Mistura.....	45
4.2.2 Volume do Biodigestor.....	46
4.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DO GÁS METANO E POTENCIAL ENERGÉTICO GERADO.....	48
4.4 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	49
4.5 CUSTO DO INVESTIMENTO.....	49
4.6 RETORNO FINANCEIRO.....	50
4.7 TEMPO DE RETORNO FINANCEIRO.....	50
5. CONCLUSÃO.....	52
6. REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

As questões energéticas no mundo estão passíveis a mudanças e adaptações em função da situação econômica, política e climática que esteja enfrentando. A produção e consumo de energia sempre são associadas como base do desenvolvimento de qualquer civilização pelo mundo. No final do século XIX, a humanidade passou por um processo de modernização após a Revolução Industrial, que foi ocasionado por uma necessidade de obtenção de novas fontes de energia em substituição à energia térmica, que até então era a mais utilizada na época. Nas últimas décadas, devido ao desencadeamento da crise do petróleo, fez-se necessária uma reorganização na cadeia energética dos países, levando em consideração sobretudo a disponibilidade dos recursos não renováveis e qual o impacto ambiental provocado a partir dos processos de produção de energia.

O consumo total de energia elétrica no Brasil em maio de 2021 foi de 40.290GWh, representando um aumento de 11,7% em relação ao consumo de maio de 2020 que foi de 36.070GWh e a demanda deve crescer continuamente nas próximas décadas com uma expectativa de aumento de 35% até 2040, atingindo um patamar de consumo aproximado de 54.472GWh, nesse mesmo período (EPE, 2021). Alguns combustíveis fósseis não renováveis estão atingindo o primeiro estágio de esgotamento, como o óleo (LUTZ; LEHR; WIEBE, 2012). Além disso, os combustíveis fósseis são prejudiciais ao meio ambiente, o que justifica a implementação de políticas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa de diversas aplicações (IPCC, 2014).

Diante desse cenário, a busca pela utilização de energias renováveis ganhou força no panorama energético, favorecendo assim seu desenvolvimento e aplicação pelo mundo, tornando-se uma alternativa factível para a atual escassez de recursos, sendo o biogás uma fonte de destaque (SILVA et al., 2015).

O biogás é uma mistura de gases, formada majoritariamente por metano (**CH₄**) e dióxido de carbono (**CO₂**). Esse processo de formação do biogás acontece pela ação de bactérias na ausência de oxigênio, ou seja, o biogás é originado pela decomposição de matéria orgânica em um ambiente anaeróbio. Na natureza, esse processo é muito comum como por exemplo nos pântanos, fundo de lagos, esterqueiras e rúmen de animais ruminantes (FNR, 2010).

O local onde é introduzido a biomassa e a mistura de lodo, é chamado biodigestor. Este reator é constituído de uma câmara hermeticamente fechada, de modo que o oxigênio não entre e o biogás não saia, e um gasômetro. À medida que a biodigestão anaeróbica prossegue, o biogás formado acumula-se no gasômetro, e os resíduos sólidos que são formados são canalizados para uma caixa de saída. Este resíduo sólido origina o biofertilizante, que posteriormente é retirado para ser reaproveitado (MARQUES et al., 2014).

Assim, o uso do biodigestor como fonte renovável de energia, vem sendo muito utilizada em todo o mundo, com uma ótima oportunidade para investimento dessa tecnologia em ambientes industriais.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é dimensionar e analisar o potencial energético da construção um biodigestor anaeróbio do tipo canadense para a produção de biogás a partir de resíduos de alimentos proveniente de um restaurante inserido numa indústria de grande porte e pelo lodo gerado pela ETE da mesma indústria.

1.1.1 Objetivos específicos

- Dimensionar o biodigestor anaeróbio do tipo canadense.
- Avaliar o uso do biogás gerado como fonte de energia.
- Avaliar a viabilidade econômica da implementação do projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Brasil produziu em um ano um total de 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo registrado um índice de coleta de 91,2% para o país, no qual foi evidenciado que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram coletados e, por consequência, tiveram destino impróprio. Deste total, 42,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, ou 59,1% do que foi coletado, foram destinados a aterros sanitários e o restante, equivalente a 40,9% dos resíduos coletados, foi destinado para lixões a céu aberto (ABRELPE, 2017).

No mundo, 1,3 bilhão de toneladas de alimento é desperdiçado ou perde-se ao longo do percurso das cadeias produtivas de alimentos, volume que representa 30% de toda a comida produzida anual no planeta (FAO, 2017). Dessa forma, as unidades de alimentação merecem foco especial, tendo em vista a utilização permanente dos recursos e o aumento da produção de resíduos, fatos esses que acentuam os impactos ambientais. As sobras alimentares, decorrentes da quantidade de alimentos que foram produzidos e não distribuídos, pode apontar falhas na programação das quantidades de alimentos preparados em relação à quantidade de refeições servidas.

Entre as dificuldades enfrentadas na atualidade pela sociedade, o tratamento desses resíduos sólidos carece de uma atenção especial, devido a seu potencial de contaminação e degradação do meio ambiente, quando não ocorre uma gestão adequada (SILVA et al., 2015).

Em relação à transmissão de energia elétrica, um quinto da energia produzida no Brasil é desperdiçada durante o processo de transmissão para os locais de consumo. Em 2008, as perdas na distribuição de energia elétrica foram de aproximadamente 16% do total que foi produzido por seu sistema de geração. Grandes perdas ocasionam tarifas mais altas, que influenciam diretamente o crescimento econômico de uma região (BERMANN et al., 2012).

Diante de uma situação de alto desperdício de alimento e de dificuldades na distribuição energética em industriais localizadas em regiões mais afastadas dos centros comerciais, a implementação de biodigestores é de grande relevância pois se mostra uma solução simplificada ao sistema de saneamento local, assim como ao suprimento autônomo de energia elétrica.

A implementação de um biodigestor anaeróbio para tratamento dos resíduos sólidos gerados por um restaurante industrial se justifica uma vez que às indústrias tem alta representatividade e impacto social e ambiental aos moradores de bairros próximos, já que as consequências de imprudências ambientais são percebidas primeiramente por essas pessoas.

Portanto, é de grande importância que indústrias sejam precursoras de iniciativas sustentáveis como estas e sirvam de exemplo não apenas no local de atuação como para todo o país.

2.1 BIOGÁS

O biogás é uma mistura de dióxido de metano (CH_4), carbono (CO_2), amônia (NH_3) e sulfeto de hidrogênio (H_2S) resultantes da degradação bioquímica de matéria orgânica mediada por micro-organismos em um ambiente livre de oxigênio, conhecida por digestão anaeróbica (ZANETTI et al., 2014). Pode ser formado a partir de dejetos animais, lodo de esgoto, resíduos agrícolas, lixo doméstico e efluentes industriais. Esta mistura gasosa pode ser usada como combustível, não produz gases tóxicos durante a queima após sua purificação, aproveita o lixo orgânico e gera como resíduo um biofertilizante. Esse gás possui essas características devido ao metano, presente em uma maior quantidade (CURRY; PILLAY, 2012). A composição do biogás está mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás

<i>Constituinte</i>	<i>Composição</i>
Metano (CH_4)	55 – 75 %
Dióxido de carbono (CO_2)	30 – 45 %
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	1 – 2 %
Nitrogênio (N_2)	0 – 1 %
Hidrogênio (H_2)	0 – 1 %
Monóxido de carbono (CO)	0 – 1 %
Oxigênio (O_2)	0 – 1 %
Amônia (NH_3)	0 – 1 %

Fonte: Adaptado de BLEY (2015).

2.1.1 História do biogás

Acredita-se que o biogás foi descoberto no ano de 1667, mas a presença do metano no gás dos pântanos, como era conhecido o biogás, apenas foi reconhecida por Alessandro Volta, aproximadamente um século depois. Em 1857, foi empreendida a primeira experiência de utilização do biogás em Bombaim, na Índia e em 1890 foi a vez da Europa, empregando o biogás para iluminação. Até a década de 60 do século XX, a recuperação do biogás não era considerada nos países mais desenvolvidos devido à relativa abundância das fontes energéticas tradicionais. Mas, na China e na Índia o biogás teve maior importância devido à escassez de recursos e de energia. Logo após a crise energética, na década de 70 do século passado, os outros países passaram a demonstrar interesse pelo metano obtido através da digestão anaeróbia, mas não tanto como na China e na Índia (KUNZ; PAULILLO, 2017).

A história da exploração do biogás e sua aplicação na China abrange um período de mais de 50 anos. As primeiras unidades de exploração do biogás foram construídas na década de 40 por famílias mais prósperas da região. Desde a década de 70, pesquisas sobre tecnologias relacionadas ao biogás foram desenvolvidas de forma rápida. Tais tecnologias foram fortemente promovidas pelo governo chinês. Nas áreas rurais, mais de 4 milhões de pequenos digestores de biogás foram produzidos e, na atualidade, mais de 20 milhões de pessoas utilizam o biogás como um combustível. Na Índia, o desenvolvimento de simples plantas de biogás para as famílias rurais começou na década de 50. O aumento em massa do número de unidades de biodigestores aconteceu na década de 70 através de um vigoroso apoio do governo. Portanto, mais de um milhão de unidades de biodigestores existem atualmente na Índia (HOERZ et al., 2014).

As experiências históricas na China, Alemanha, Índia e EUA mostram claramente a maneira como o desenvolvimento do biogás responde a condições favoráveis. Na Alemanha, a divulgação do biogás fortaleceu-se através da necessidade de fontes energéticas alternativas em uma economia devastada pela guerra e durante uma crise energética ou mais tarde pela mudança do preço da eletricidade. Na Índia e na China, foram fortes programas de governo que promoveram a disseminação massiva da tecnologia do biogás (HOERZ et al., 2014).

2.1.2 Tratamento de resíduos

A destinação de resíduos sólidos sempre foi uma questão importante para sociedade, em geral. Nas últimas décadas, devido ao elevado crescimento da população e da política de consumo que foi iniciada com a industrialização e com a cultura do capitalismo, esse problema de destinação desses resíduos está aumentando. Dessa forma, a necessidade de recolher e afastar dos meios familiares os resíduos descartados torna-se uma demanda sanitária visando um bem-estar socioambiental e a preservação da saúde de toda a sociedade.

As modificações da economia e transformações tecnológicas influenciam o modo de vida nos centros urbanos, e o lixo urbano acompanha essas modificações. A quantidade de resíduos aumenta e a sua composição muda com o surgimento de novas matérias-primas nos processos de produção, observando-se maior ocorrência de sobra de materiais industrializados como papéis, metais, plásticos e vidros nos países mais desenvolvidos, devido ao alto grau de fabricação e ao maior poder aquisitivo de sua população. Desta forma, o gerenciamento para resíduos sólidos, ocorre de acordo com a Lei 12.305/2010 onde é citado que deve ser observada a seguinte ordem de priorização: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos e disposição final adequada dos rejeitos (KASTNER et al., 2012).

O Projeto de Lei 639/2015 altera a Lei 12.305/2010 para que seja incluído no plano municipal de gestão integrada, a queima de resíduos sólidos para geração energética, assim como, conceder incentivo tributário para as empresas constituídas para esta finalidade.

2.1.3 Utilização do biogás

O interesse na utilização do biogás no dia a dia é por ele gerar renda, aumentar a economia, e reduzir os potenciais impactos ambientais. Por isso, tem sido bastante disseminado o seu emprego de diversas formas, dependendo do grau de tratamento e da sua qualidade. Dessa forma, os usos mais predominantes são: geração de energia térmica, matéria prima para indústria, geração de energia elétrica, combustível veicular e utilização dos resíduos como fertilizantes (FNR, 2010).

- Geração de energia térmica

Indústrias que implantam o processo de digestão anaeróbia a partir dos resíduos gerados pela própria fábrica para gerar vapor em suas caldeiras e aquecedores e com isso substituindo a utilização de óleo combustível e carvão mineral/vegetal, enquanto sua utilização doméstica permite substituir o gás de cozinha e os sistemas de aquecimento de água.

- Geração de energia elétrica

O biogás produzido pode ser fonte de energia mecânica para turbinas e motores, que acoplados a geradores elétricos podem fornecer energia elétrica. Essa energia pode ser consumida dentro da própria indústria ou então estocada e comercializada para outros pontos, havendo uma boa viabilidade econômica.

- Matéria-prima para a indústria

O metano, principal produto durante a produção do biogás, pode ser utilizado como matéria prima para a produção de diversos outros compostos orgânicos. Dentre as mais recorrentes, está a obtenção do metanol.

- Combustível veicular

A purificação do biogás torna-o uma alternativa perfeita ao gás natural em todas as suas utilidades (principalmente em combustível veicular), para que seja possível, o gás carbônico e o gás sulfídrico, subprodutos do biogás, devem ser retirados. O gás carbônico diminui o poder calorífico do biogás e o gás sulfídrico tem propriedades corrosivas que podem causar problemas na parte interna do motor.

O principal espaço de comercialização do biometano estaria na sua interiorização, ou seja, no atendimento às regiões não acobertadas pela pequena rede de distribuição de gás natural do país, pois, nas regiões atendidas por gasodutos, o biometano não apresenta atualmente custos competitivos em relação ao gás natural (MILANEZ et al., 2018). Dessa forma, o biometano, produto da purificação do biogás, poderia substituir o diesel em máquinas agrícolas e veículos

urbanos ou rodoviários que circulam nas regiões não acobertadas pela rede de gasodutos. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que, até 2027, o biometano possa substituir quase metade desse mercado (EPE, 2017).

2.1.4 Biofertilizantes

O biofertilizante consiste no resíduo não orgânico originado no processo de biodigestão, que pode ser diluído em água para ser utilizado diretamente nas lavouras (fertilização) ou passar por processos de secagem/compostagem para ser armazenado ou vendido na forma sólida (MILANEZ et al., 2018). Ao sair do biodigestor, o biofertilizante formado não pode ser descartado diretamente nos corpos d'água por ainda apresentar forte potencial poluidor, por isso fica armazenado em tanques ou lagoas até a estabilização, mantendo-o em repouso até o momento de sua utilização, por um tempo mínimo de cerca de 30 a 40 dias (FIEP, 2016).

O biofertilizante pode ser utilizado em pequenos cultivos em áreas urbanas, áreas rurais ou até mesmo estocado para ser comercializado posteriormente. Essa comercialização do produto pode ser na forma sólida ou líquida (utilizando a própria energia térmica oriunda do biogás). O processo de digestão anaeróbica preserva em até 99% o nutriente do nitrogênio presente no biofertilizante, na forma orgânica ou de amônia.

A biodigestão anaeróbia não reduz a capacidade fertilizante dos resíduos, os seus nutrientes não são degradados e se o líquido relacionado ao material digerido não for separado antes de ser levado ao solo, o teor de amônia também se mantém.

Além de ter nutrientes para o solo, como fósforo, nitrogênio e potássio, o biofertilizante melhora a eficácia de retenção de água nos terrenos, bem como ajuda na proteção das plantas contra pragas e doenças. Alguns estudos mostram que o fósforo presente nos adubos minerais sofre uma maior e mais veloz lavagem (lixiviação) quando comparado àquele integrado ao biofertilizante (FIEP, 2016).

Dessa forma, é observado que o produto ainda possui como vantagens: uma matéria orgânica mais disponível; a ausência de odor forte; característico dos dejetos antes da biodigestão; natureza não poluente; incapacidade de atração de moscas.

É importante acentuar que se deve conhecer todas as características do biofertilizante antes de definir onde e qual a sua aplicação no solo, pois essas características dependem muito do tipo de substrato que for utilizado. É também importante avaliar a qualidade do terreno, as características do cultivo e a produtividade que se deseja obter.

É possível visualizar os teores dos nutrientes após o biofertilizante passar pelos principais processos de tratamento posterior da fase líquida, para que ocorra o enriquecimento de nutrientes e redução de volume, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Teores de nutrientes das frações, calculados para os processos de tratamento por meio de modelos matemáticos

<i>Processo de Tratamento</i>	<i>Fração</i>	<i>Concentração em Massa (%)</i>	<i>N_{org} (Kg.t⁻¹)</i>	<i>NH₄ – N (Kg.t⁻¹)</i>	<i>P₂O₅ (Kg.t⁻¹)</i>	<i>K₂O (Kg.t⁻¹)</i>
Sem Tratamento	Líquida	-	2,0	3,6	2,1	6,2
Separação	Sólida	12	4,9	2,6	5,5	4,8
Secador de Esteira	Líquida	88	1,6	3,7	1,6	6,4
	Sólida	5	13,3	0,7	14,9	12,9
	Exaustão	7	-	-	-	-
Membrana	Sólida	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Líquida	37	2,8	7,4	2,1	14,4
	Efluentes	44		Valores Limites Atingidos		
Evaporação	Sólida	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Líquida	31	3,4	8,9	2,5	17,3
	Águas Residuárias	50		Inadequadas para descarte em cursos d'água		
Esgotamento (stripping)	Sólida	27	6,8	3,5	7,5	21,7
	Líquida (SA)	3	0,0	80,6	0,0	0,0
	Águas Residuárias	70		Inadequadas para descarte em cursos d'água		

SA: Solução de sulfato de amônio

Fonte: FNR (2010).

A avaliação dos processos de tratamento do biofertilizante está representada na Tabela 3. Eles são bem distintos quanto à sua popularidade e confiabilidade operacional e embora que provoque aumento na concentração de nutrientes muitas indústrias optam por não utilizar os biofertilizantes devido ao seu alto custo de implantação.

Tabela 3 – Avaliação dos processos para o tratamento de biofertilizantes

	<i>Separação</i>	<i>Secagem</i>	<i>Processos de separação por membranas</i>	<i>Evaporação</i>	<i>Esgotamento (stripping)</i>
Confiabilidade operacional	++	+/O	+	O	O
Grau de disseminação	++	+	+	O	O
Custos	+	+/O	O/-	O	+/O
Aproveitamento dos produtos	-	-	-	-	-
Fase Sólida	O	+/O	O	O	O
Líquida (rica em nutrientes)	O	O	+	+	++
Líquida (pobre em nutrientes)	-	-	+	O	O

++ = Muito bom. + = Bom, O = Médio, - = Insuficiente

Fonte: FNR (2010).

2.2 GERAÇÃO DE BIOGÁS

A digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos tem aumentado, nos últimos anos, por seu potencial tecnológico para produção de biogás rico em metano e/ou hidrogênio e para redução na utilização de energia fóssil. O aumento na produção de metano tem como finalidade otimizar a receita de geração energética, construindo instalações mais rentáveis e realizando uma otimização do processo. Combina, principalmente, as vantagens de recuperação de energia, redução na poluição e produção de produtos mais estáveis que podem ser melhorados como adubo para aplicações de uso na terra (ZESHAN; KARTHIKEYAN; VISVANATHAN, 2012).

2.2.1 Formação do biogás

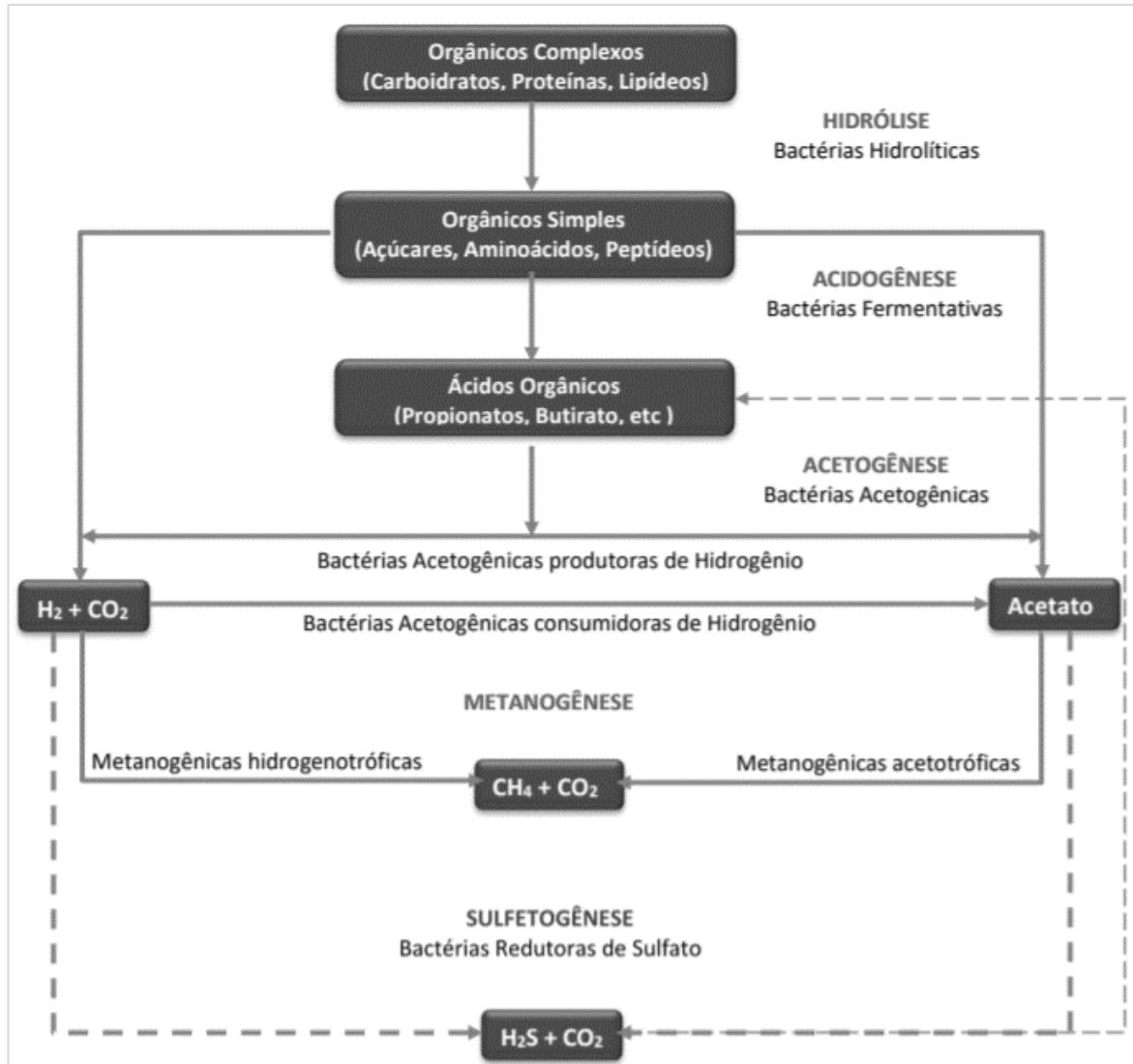
A digestão anaeróbica é uma degradação bioquímica da matéria orgânica complexa até compostos orgânicos complexos e nutrientes dissolvidos, que é mediada por micro-organismos em um ambiente livre de oxigênio (MARKOWSKI et al., 2014). Ao final do processo, a matéria orgânica é degradada até metano (**CH₄**), dióxido de carbono (**CO₂**), amônia (**NH₃**) e sulfeto de hidrogênio (**H₂S**). Essa mistura constitui assim, o biogás (BALDACIN; PINTO, 2015).

A decomposição dessa matéria orgânica, na ausência de ar é provocada por processos físicos ou químicos em alta temperatura e/ou pressão ou através da utilização de micro-organismos a temperatura ambiente e pressão atmosférica. No entanto, independentemente do método, o gás que é produzido é considerado como resultado da ação de micro-organismos sobre resíduos orgânicos, sendo considerado um subproduto dessa decomposição biológica (ZAHEDI et al., 2013).

2.2.2 Processo microbiológico

O processo de decomposição anaeróbia ocorre em quatro etapas (BALDACIN; PINTO, 2015). Este processo é apresentado com as etapas descritas a seguir, conforme Figura 1.

Figura 1 – Esquema Representando as principais etapas do processo da biodigestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997), Barros (2012).

2.2.2.1 Hidrólise

Com a redução da quantidade de oxigênio durante o processo anaeróbio os micro-organismos anaeróbios facultativos predominam convertendo os compostos orgânicos complexos, tais como proteínas, carboidratos e lipídios em compostos dissolvidos (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos). As bactérias que atuam nesse sistema são as hidrolíticas, e liberam enzimas que decompõem o material através de reações bioquímicas. Nessa fase, é produzida uma grande quantidade de hidrogênio (ZAHEDI et al., 2013).

2.2.2.2 Acidogênese

Os compostos intermediários formados durante a etapa da hidrólise são de compostos, por bactérias fermentativas acidogênicas em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos propiônico, acético e butírico), dióxido de carbono, ácido lático, hidrogênio e álcoois.

2.2.2.3 Acetogênese

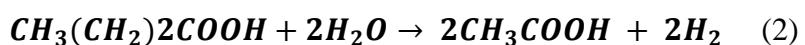
Os metabólitos finais são excretados por essas bactérias hidrolíticas acidogênicas e entram em solução no meio, são substratos para essas bactérias acetogênicas que produzem ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (precursores do biogás), como metabólitos obrigatórios (OHPA – Obligate Hydrogean Producing Acetogenic). Nesta fase, a pressão parcial do hidrogênio é de fundamental importância, pois uma alta concentração de hidrogênio impossibilita a conversão dos compostos intermediários da acidogênese, resultando na acumulação de ácidos orgânicos inibidores da metanogênese (ácidos isobutírico, propiônico, isovalérico e caprônico).

As bactérias acetogênicas estão associadas às arqueas metanogênicas, porque elas consomem o hidrogênio e o dióxido de carbono durante a formação do metano.

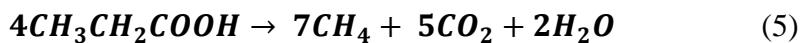
2.2.2.4 Metanogênese

Nesta fase, as arqueas metanogênicas estritamente anaeróbias convertem o hidrogênio, ácido acético e o dióxido de carbono em metano. As arqueas metanogênicas são as responsáveis por grande parte da produção de metano, principalmente a partir do ácido acético (MARKOWSKI et al., 2014). Os metanógenos hidrogenotróficos convertem dióxido de carbono e hidrogênio em metano e os metanógenos acetoclásticos produzem metano a partir da redução de ácido acético.

As reações dominantes durante a metanogênese são as seguintes (SACHS et al., 2003):



Considerando que não há nenhum enriquecimento de hidrogênio nesse sistema, têm-se as seguintes reações globais para a degradação dos ácidos butírico e propiônico:



Em outras palavras, o hidrogênio formado a partir dos Ácidos Graxos Voláteis (AGV) nas reações (1) e (2) é totalmente consumido na reação (4).

As bactérias hidrolíticas-acidogênicas (HAB's), acetogênicas e metanogênicas não as diferentes apenas na nutrição e o pH requerido, diferem em sua fisiologia, cinética de crescimento, absorção de nutrientes e na adaptação ao meio. Os micro-organismos metanogênicos crescem de forma mais lenta que as HAB's com uma taxa de crescimento próxima da acetogênese (3,6 dias). O pH ótimo para a metanogênese e acetogênese é entre 6,5 e 8,5 (ZAHEDI et al., 2013).

2.3 PARÂMETROS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DO BIOGÁS

2.3.1 Acidez e alcalinidade

A maior parte das espécies de micro-organismos cresce em uma variação estreita de pH, mas coletivamente eles cobrem uma variação de pH consideravelmente ampla, necessitando de um meio que auxilie o seu desenvolvimento e atuação (OLIVEIRA, 2012).

As bactérias e arqueas metanogênicas, que são necessárias no processo de produção do biogás na digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, se desenvolvem e funcionam com o seu metabolismo de maneira mais eficiente quando o pH do meio está numa faixa ótima entre 6,5 e 7,6 (LIU et al., 2008).

2.3.2 Temperatura

Os micro-organismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica são divididos em psicrofílicos (abaixo de 25°C), mesofílicos (entre 25°C e 50°C) e termofílicos (entre 50°C e 60°C). Abaixo dos 25°C, a decomposição é lenta e a produção do biogás é reduzida. Em condições mesofílicas, estão os picos de crescimento da maior parte dos micro-organismos, sendo estas temperaturas mais comumente utilizadas em plantas de biogás. As condições termofílicas são mais adequadas nos processos que precisam da eliminação de germes nocivos do substrato. Apesar disso, não existem limites rigorosos entre as faixas de temperatura e o que mais prejudica os micro-organismos são bruscas variações na temperatura, pois os micro-organismos metanogênicos, por exemplo, podem adaptar-se a distintos níveis de temperatura quando variam de forma lenta (ROHSTOFFE et al., 2010).

Tabela 4 - Classificação dos micro-organismos de acordo com a temperatura de crescimento.

<i>Classificação</i>	<i>Descrição</i>
Psicrófilos	Micro-organismos que se desenvolvem em baixas temperaturas. Crescem melhor a temperaturas de 15 a 20°C, embora possam se desenvolver em temperaturas mais baixas.
Mesófilos	Micro-organismos que se crescem bem em temperaturas moderadas. Desenvolvem a temperaturas de 25 a 40°C. Essa classificação inclui a maioria das bactérias.
Termófilos	Micro-organismos que se desenvolvem em altas temperaturas, na faixa de 45 a 85°C, porém crescem melhor a temperaturas de 50 a 60°C.

Fonte: Adaptado de CHO (2013).

Dessa forma, a temperatura influencia na atividade enzimática dos micro-organismos ativos na biodigestão, principalmente das bactérias que são responsáveis pela metanogênese da biomassa. Quando estão em baixas temperaturas (abaixo dos 20°C) a atividade microbiana é reduzida, e quando a temperatura está acima dos 60°C, as bactérias têm suas enzimas desativadas/destruídas pelo calor (CRUZ, 2015).

De modo geral, a digestão anaeróbia acontece de forma mais eficiente na faixa termofílica, contudo na faixa mesofílica também acontece a produção do biogás e o consumo da matéria orgânica. Na faixa termofílica, além de ter maior produção de biogás, há o controle de patógenos que possam prejudicar o rendimento da biodigestão e diminuir os teores de gases que são gerados. Apesar da necessidade de aumentar o custo operacional pela necessidade de manutenção das temperaturas mais altas, ainda assim esse aumento da temperatura é favorável (OLIVEIRA, 2012).

2.3.3 Características, composição e concentração da biomassa

A composição da biomassa influencia diretamente na produção do biogás e no processo de degradação da matéria orgânica que compõe. Dentre algumas das características que facilitam essa digestão anaeróbia da carga orgânica presente na biomassa, que é utilizada no processo fermentativo com a produção de biogás e biofertilizante, estão a granulometria e o teor de sólidos que servem como nutrientes para o desenvolvimento dos micro-organismos.

A granulometria do material que é utilizado tem influência na reação de hidrólise da matéria orgânica, desejando-se partículas de menor dimensão, com tamanho entre 0,6mm a 2,0mm, pois estas são mais facilmente hidrolisadas que as partículas maiores, o que favorece a rápida passagem para as fases seguintes do processo de digestão anaeróbia (TEIXEIRA et al., 2009).

O teor de sólidos na biomassa, principalmente quando composto por maiores teores de sólidos voláteis, tem relação direta com a quantidade de biogás produzido, pois quanto maior a disponibilidade de matéria orgânica no decorrer do processo de degradação, maior será a quantidade de gases gerados. Dentre a composição dos sólidos voláteis à disposição no meio, a carga nutricional de fosfatos, nitratos e sulfatos auxilia na degradação da biomassa, pois estes compostos são fundamentais para a fase metanogênica (OLIVEIRA, 2012).

2.3.4 Presença de inibidores na digestão anaeróbica

Os inibidores são substâncias químicas (ou fatores operacionais do sistema) que podem diminuir a velocidade da reação em baixas concentrações ou chegam até mesmo a inibir totalmente o processo em concentrações maiores.

A alimentação excessiva de substrato dentro do biodigestor também pode ser uma causa de inibição nessa digestão, pois qualquer substância em elevadas concentrações em um substrato pode influenciar de forma negativa a atividade bacteriana, além também de que concentrações muito elevadas dos micronutrientes pode ser tóxico para as bactérias existentes.

Não se pode ter um limite exato da situação, pois as bactérias são micro-organismos que se adaptam muito bem ao meio em que vive (FNR, 2010).

Concentrações de amônia relativamente baixas também prejudicam a ação bacteriana. Da mesma forma, não se pode ter um aumento muito grande no pH nem na temperatura do

biodigestor, pois provocaria também um aumento da amônia livre, assim é valido novamente acentuar a importância do controle desses fatores operacionais dentro do biodigestor.

2.4 BIODIGESTORES

O biodigestor é composto por um tanque que deve estar adequadamente lacrado para que o processo de digestão ocorra na ausência do oxigênio (anaerobiose) e uma câmara para captação e armazenamento dos gases que forem liberados durante o processo. Dessa forma, têm-se como produtos da digestão a formação do biogás e fertilizante sem a necessidade de adição de produtos químicos.

Há vários modelos de biodigestores que podem ser utilizados nos processos de digestão anaeróbia, os quais podem caracterizar-se por ter fluxo contínuo ou não, apresentarem variadas demandas de volume de biomassa e biogás produzido e distintos custos e facilidades na sua implantação (OLIVEIRA, 2012).

O modelo de biodigestor que é mais utilizado no Brasil, e vem sendo cada vez mais difundido para as outras regiões, é o modelo canadense, devido às suas características de implementação que demandam baixos custos e maior facilidade (MACHADO; THEIS, 2010).

O biodigestor caracteriza-se por ser um reservatório fechado, no qual a matéria orgânica sofre a digestão anaeróbia, ou seja, na ausência do oxigênio. O biodigestor é uma câmara hermeticamente fechada onde essa matéria orgânica é diluída em água e sofre um processo conhecido como fermentação anaeróbica, resultando na formação do gás metano, que pode ser utilizado como combustível na geração de energia térmica e energia elétrica, pode ser utilizado como matéria-prima para a indústria e até como combustível veicular. Além do metano, também é gerado um efluente líquido (biofertilizante) que pode ser usado na adubação de culturas produtoras de grãos, pastagem, fruticultura, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas (LIMA, 2015).

A finalidade principal do biodigestor não é produzir o biogás, mas criar um ambiente com condições ideais para que ocorra o desenvolvimento da cultura microbiana, que é responsável pela degradação anaeróbia da biomassa (LIMA, 2015).

2.4.1 Classificação dos biodigestores

Em relação ao teor de sólidos, os biodigestores classificam-se em:

- Baixo teor de sólidos: de 10% a 15% (porcentagem em peso) de sólidos totais (ST);
- Alto teor de sólidos: em torno de 20% a 40% de ST.

A presença de água facilita a condução das enzimas e de outros metabólitos microbianos e, dessa forma, o metabolismo dos micro-organismos, durante o processo de biodecomposição.

Assim sendo, a umidade pode ser considerada como um fator muito importante nos processos de tratamento de resíduos sólidos orgânicos (LEITE et al., 2009).

Já os tratamentos com baixa umidade, que acontecem nos reatores de digestão anaeróbia seca, têm destaque no tratamento de grandes volumes de substratos com pouca umidade, como os resíduos sólidos municipais e industriais, além deles serem menos vulneráveis à presença de impurezas (PROBIOGÁS, 2015).

Em relação ao número de estágios, os biodigestores podem ser:

- Sistemas de um estágio;
- Sistemas de dois estágios;
- Sistemas multi-estágios.

A biometanização dos resíduos orgânicos ocorre por uma série de transformações bioquímicas, que podem ser, de forma grosseira, separadas em duas etapas, onde na primeira ocorre a hidrólise, a acidificação e a liquefação e na segunda tem a transformação do acetato, do hidrogênio e do óxido de carbono em metano. Nos sistemas de um único estágio (Figura 2), todas essas reações acontecem simultaneamente em um único reator. (FERREIRA, 2015).

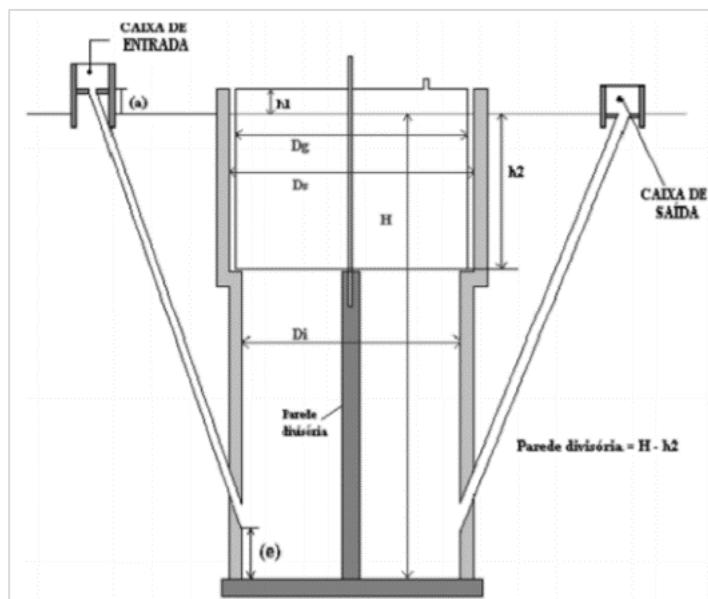
Figura 2 - Reator de metanização de câmara única de resíduos orgânicos



Fonte: FERREIRA (2015).

Em sistemas com mais de um estágio, as etapas da digestão anaeróbia acontecem sequencialmente em digestores separados. O sistema com dois estágios (Figura 3) possui dois reatores, havendo no primeiro a predominância da ação dos micro-organismos hidrolíticos e que são formadores de ácidos e no segundo reator a ação das bactérias acetogênicas e metanogênicas (FERREIRA, 2015). As distintas câmaras podem ser constituídas de câmaras construídas separadamente ou se tratar de uma única câmara separada internamente por paredes.

Figura 3 – Biodigestor de duas câmaras



Fonte: DEGANUTTI et al. (2008).

Em sistemas de um estágio ocorre a vantagem de apresentarem projetos mais enxutos que sofrem menos com possíveis falhas técnicas e exigem menor custo de investimento por sua simplicidade se comparado à sistemas com mais de um estágio (FERREIRA, 2015).

Em relação aos sistemas com dois estágios, a separação das reações da digestão anaeróbia em diferentes fases e reatores possibilita que as reações não compartilhem necessariamente as mesmas condições. Desta forma, é possível se ajustar o meio de acordo com as fases, o que pode levar a uma melhor taxa de reação geral e produção do biogás (FERREIRA, 2015).

Outra vantagem nos sistemas bifásicos é o bom desempenho diante de variações de carga orgânica volumétrica, alimentação descontínua, ou excesso de substâncias inibidoras nos resíduos, como, por exemplo, a presença de nitrogênio, como explicado anteriormente. Esse sistema com dois estágios é ideal para degradar os substratos complexos, como a celulose e a lignina, que em muitos casos podem ser fatores limitantes da degradação anaeróbia, além de possibilitarem um melhor controle operacional para substratos com alto valor energético (PROBIOGÁS, 2015).

Em relação à forma de alimentação, os biodigestores podem ser:

- Contínuo;
- Descontínuo.

Em sistemas de alimentação contínua há introdução de substratos de forma constante e regular dentro dos reatores. E ao mesmo tempo que ocorre essa alimentação, um volume igual ao de entrada é retirado como resíduos tratados, o que resulta numa produção contínua do biogás. Esse sistema apresenta como uma desvantagem a possibilidade de que parte do resíduo, que é removida continuamente do digestor, não se encontre completamente estabilizado (REIS, 2012). Tal possibilidade existirá caso o biodigestor não seja projetado de forma correta e possua um tempo de detenção hidráulica inadequado, não possibilitando que as etapas da biodigestão aconteçam completamente.

Esses reatores de mistura contínua, também conhecidos como CSTR (Continuous Flow Stirred Tank Reactor), são considerados a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos que são mais densos, ou seja, possuem o teor de sólidos totais em torno de 15% e que possuem características favoráveis para o bombeamento e mistura. São mais usados nos setores de agropecuária, da indústria alimentícia e tratamento de lodos sanitários. Exigem

substratos quase livres de impurezas e suficientemente úmidos, uma vez que o substrato necessita ter características que facilitem seu bombeamento. Como o substrato precisa de uma homogeneização e mistura, a presença de impurezas pode danificar o equipamento (PROBIOGÁS, 2015).

Em sistemas de alimentação descontínua, ou em batelada, há o preenchimento total do biodigestor em uma única vez com os resíduos frescos, podendo ou não ser adicionado um inóculo na mistura. A introdução de inóculos no meio tem apresentado resultados satisfatórios, uma vez que promove a redução do tempo necessário para a bioestabilização anaeróbia dos resíduos, já que contribui para o aumento da densidade microbiana (PROBIOGÁS, 2015).

Sistemas em batelada costumam ser mais simples e de pequena exigência operacional, sendo mais indicados para locais onde a disponibilidade do substrato ocorre entre longos períodos, por esse motivo a produção de biogás não ocorre diariamente (BONTURI; VAN DIJK, 2012). Possibilitam a passagem dos resíduos por todas as fases da digestão em modo seco, isto é, com um teor de sólidos totais entre 20% a 40%, o que tira a necessidade de um pré-tratamento para o substrato.

Com o término do período de tratamento, os resíduos já estabilizados, são retirados e uma nova batelada de resíduos é introduzida para que seja iniciado um novo ciclo. Uma vez iniciado, esse processo em batelada não exige que o substrato seja homogeneizado ou misturado, o que possibilita a presença de impurezas no substrato sem que o equipamento esteja sujeito a desgastes (PROBIOGÁS, 2015).

Esses sistemas em batelada assemelham-se a o processo de um aterro sanitário compactado em um tanque, porém com uma produção de biogás de 50 a 100 vezes maior do que aquela que é observada em aterro sanitário (PROBIOGÁS, 2015). Isto se dá pelo fato de que o percolado produzido no processo em batelada ser constantemente recirculado, o que possibilita a dispersão de inóculo, nutrientes e ácidos, análogos a uma mistura parcial, além do que sistemas em batelada podem operar em temperatura mais elevadas do que normalmente se observa em aterros sanitários (FERREIRA, 2015).

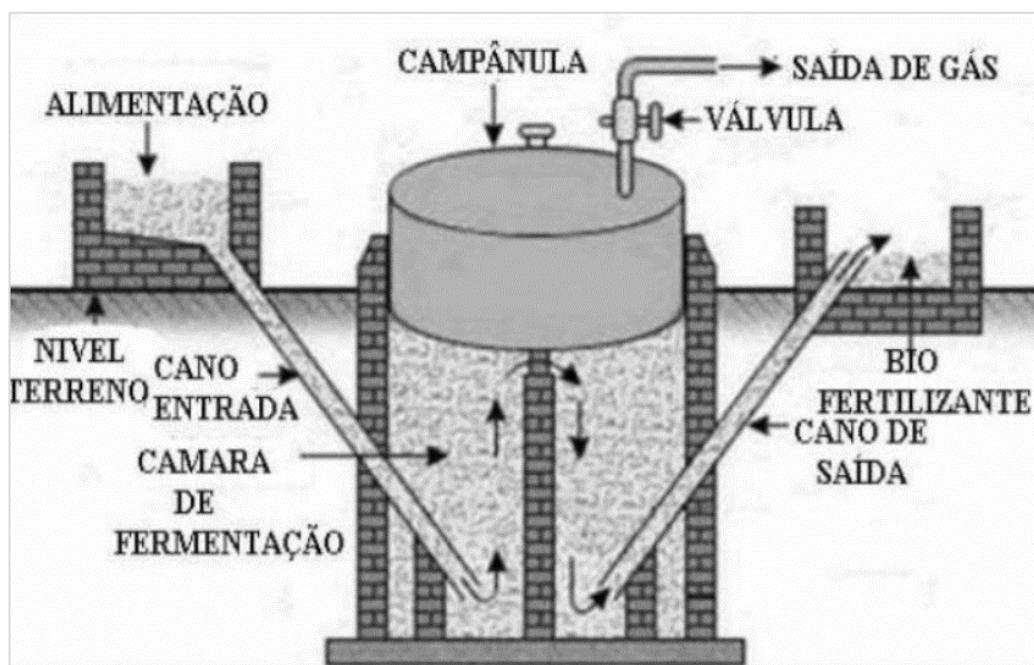
O reator contínuo de digestão seca é ideal para trabalhar com substratos que possuem um teor de sólidos totais em torno de 25% a 35%. Pode ser construído horizontalmente, com o deslocamento do substrato efetuado através de misturadores, ou ainda, ser construído verticalmente, contendo ou não um sistema de mistura, onde o deslocamento ocorre via recirculação do material ou por agitação via biogás comprimido. (PROBIOGÁS, 2015).

Biodigestores padronizados:

Atualmente, o Brasil possui experiência com o tratamento anaeróbio do esgoto doméstico, dos resíduos da indústria e da agropecuária, ainda que sem o aproveitamento do biogás que é gerado. O setor de resíduos sólidos ainda tem muito que pode ser desenvolvido e o aproveitamento da energia e do efluente gerado, pode auxiliar na valorização do investimento nessas tecnologias (PROBIOGÁS, 2015).

O modelo de biodigestor indiano é caracterizado por possuir uma campanula flutuante como gasômetro que pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em um selo de água externo, o que reduz as perdas ocasionadas durante o processo de produção do gás. Possui ainda uma parede central, fazendo do tanque de fermentação um tanque de câmara dupla, como pode ser visualizado na figura 4. À medida que esse volume de gás produzido não é imediatamente consumido, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, provocando um aumento de seu volume e mantendo a pressão de operação constante. O substrato utilizado neste modelo deve conter uma concentração de ST que não seja superior a 8%, de modo que sua circulação pelo interior da câmara possa ser viabilizada e para evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material e o abastecimento que deve ser contínuo (DEGANUTTI et al., 2008).

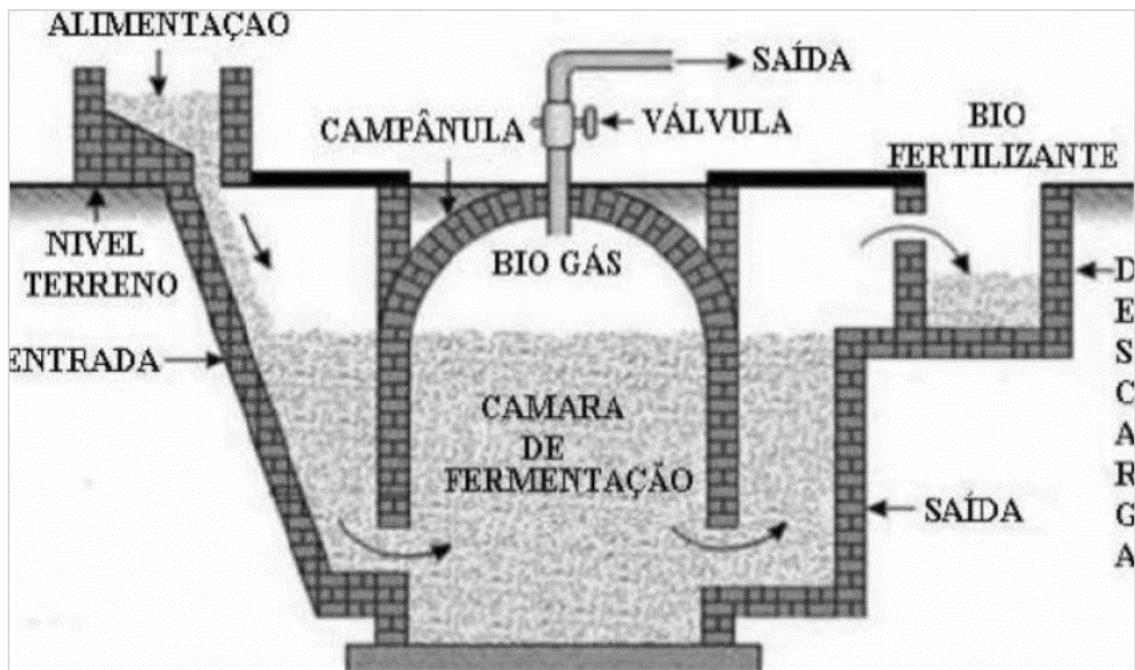
Figura 4 – Biodigestor tipo indiano



Fonte: FONSECA; ARAUJO; HENDGES, 2009.

O modelo de biodigestor chinês é composto por uma câmara de fermentação cilíndrica em alvenaria, com teto abobado (Figura 5), que é impermeável e armazena o biogás gerado. Seu funcionamento é baseado no princípio de prensa hidráulica, de modo que ao ter a pressão aumentada no seu interior resultante do acúmulo de biogás, o deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída irá ocorrer. O deslocamento ocorre em sentido contrário quando ocorrer a descompressão. Neste tipo de biodigestor, uma parte do gás formado na caixa de saída é liberado para a atmosfera, o que reduz parcialmente a pressão interna do gás. Por esta razão, este tipo de biodigestor não é utilizado em instalações de grande porte. Assim como no modelo indiano, o modelo chinês necessita de um substrato com teor de ST por volta de 8% para evitar entupimentos no seu sistema de entrada e a facilitar a circulação do material, e a alimentação deve ser contínua (DEGANUTTI et al, 2008).

Figura 5 – Biodigestor tipo chinês



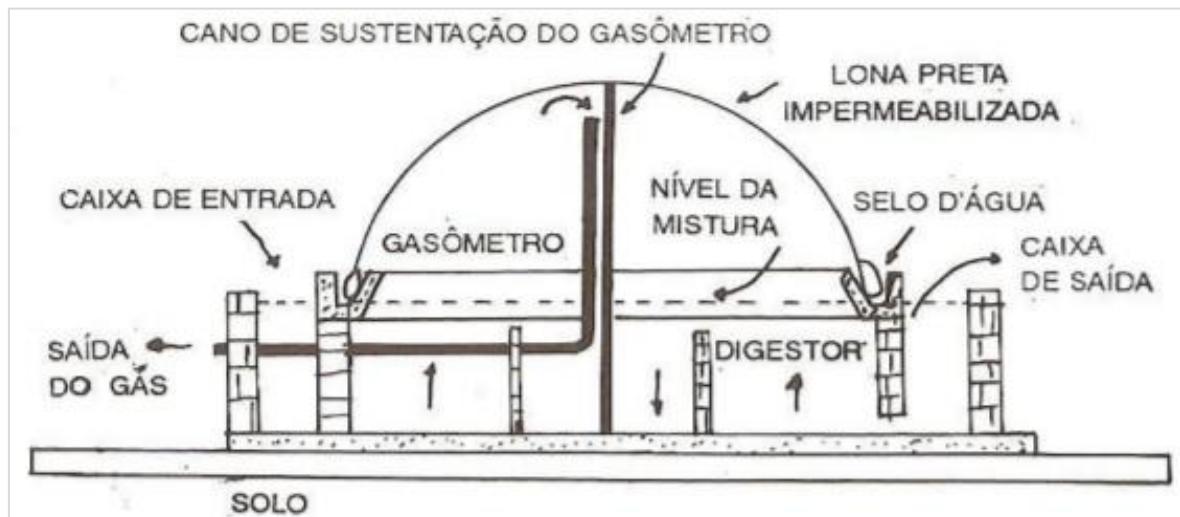
Fonte: FONSECA; ARAUJO; HENDGES, 2009.

A crise energética da década de 70 fez a utilização de biodigestores ser uma opção adotada tanto por países mais desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. Com base em um relatório técnico da FAO, a EMBRATER (Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural) instalou o primeiro biodigestor modelo chinês, na Granja do Torto, em Brasília, em 1979 (KUNZ; PAULILLO, 2017).

A crise resultante do segundo choque de preços do petróleo, que ocorreu em 1979, levou o governo a adotar algumas medidas para reduzir a dependência deste insumo, aumentando o interesse na tecnologia dos biodigestores. Em 1980, teve início o Programa de Mobilização Energética – PME, que tinha como um objetivo investir na substituição e conservação dos derivados de petróleo. Desta forma, entre 1980 e 1984, a instalação de biodigestores recebeu vários estímulos. Os primeiros modelos utilizados no Brasil foram vindos da China e Índia, e os principais modelos de biodigestores rurais utilizados são o indiano, o chinês e também o canadense (KUNZ; PAULILLO, 2017).

O biodigestor de modelo canadense apresenta uma tecnologia que é mais moderna, ainda que possua uma construção relativamente mais simples. Possui uma câmara de digestão escavada no solo e um gasômetro inflável feito de material plástico ou similar. É um biodigestor do tipo horizontal, com uma caixa de entrada em alvenaria, como pode ser observado na Figura 6. À medida que há produção do biogás, a cúpula plástica maleável infla e o biogás é acumulado, podendo ser ainda enviado para um gasômetro separado com a finalidade de que se obtenha um maior controle operacional (JUNQUEIRA, 2014).

Figura 6 – Biodigestor tipo canadense



Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho, de cunho teórico, consistiu na elaboração de um biodigestor direcionado a atender a demanda de uma fábrica de grande porte, localizada no município de Vitória de Santo Antão. A fábrica tem uma média de 2000 funcionários ativos, possui uma alta demanda energética para o funcionamento de suas operações e há a necessidade de ter um refeitório para seus funcionários que atenda as três refeições básicas diárias (café da manhã, almoço e jantar). Isto se deve ao fato de que a fábrica funciona 24 horas por dia, com jornada de trabalho dividida em três turnos.

Diante desse cenário, foi observado um problema a respeito dos resíduos sólidos orgânicos oriundos da produção das refeições e do descarte dos restos que ficam nos pratos dos funcionários. O restaurante produz uma grande quantidade de resíduo sólido orgânico, que pode ser uma fonte alternativa de energia. Todo esse material orgânico geralmente é destinado para um aterro sanitário, provocando um impacto ambiental. Dessa forma, o material orgânico descartado no restaurante pode ser aproveitado em um biodigestor anaeróbio para a produção de biogás. Este, por sua vez, pode ser utilizado nos processos da indústria, quer próprio restaurante, como complemento ao gás liquefeito de petróleo (GLP), quer na geração de energia elétrica.

Os dados coletados de períodos anteriores, mostram que em média, há uma quantidade de 7.200 kg de resíduo alimentar por mês no restaurante da fábrica, sendo esta quantidade dividida entre as refeições do café da manhã, almoço, jantar e ocorrência de lanche entre as refeições principais. Dessa forma, o biodigestor será dimensionado baseado nessa quantificação de sobras fornecida pela empresa de Refeições da unidade.

A utilização do biodigestor Canadense é considerada como mais adequada para este processo, uma vez que a geração de resíduos alimentícios no restaurante nem sempre acontece de forma contínua, pois ocorrem paradas programadas no plano de produção da fábrica. A escolha desse modelo de biodigestor também deve-se às condições favoráveis de clima da região e à facilidade na obtenção e instalação do mesmo no local.

Também foi levado em consideração que fábrica localiza-se em uma região isolada, sem acesso de pessoas externas e com amplitude de terreno, facilitando a construção em área próxima ao ponto de coleta dos resíduos.

3.1 GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO ALIMENTAR NO RESTAURANTE

Os resíduos sólidos orgânicos do restaurante são gerados principalmente das sobras das refeições dos usuários aliado ao descarte de resíduos a partir do processo de manipulação e produção dos alimentos. Nesta etapa, ocorre uma prévia seleção dos alimentos impróprios para consumo e retirada dos resíduos alimentares que são descartados.

A determinação do peso dos resíduos sólidos foi realizada após o acompanhamento do funcionamento diário do restaurante ao longo de um período de um ano, considerando que há um funcionamento do restaurante durante todo o ano em função da necessidade de operação da fábrica. Durante o processo de descarte das sobras de alimento ocorre a coleta seletiva, fazendo-se possível uma fácil obtenção apenas da matéria orgânica descartada. Com base nos dados obtidos, foi identificado uma geração média de 240 kg de resíduos sólidos descartada pelo restaurante por dia.

Estima-se um percentual médio de 27,60% de sólidos voláteis M/M em resíduos alimentares, baseando-se em pesquisa realizada sobre caracterização de resíduos alimentares de refeitórios (BROWNE; MURPHY, 2013).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS LODOS GERADOS NA ETE

Para efetuar os cálculos, foi considerado um percentual de 89,30% de sólidos voláteis para um volume de lodo proveniente de uma estação de tratamento de efluentes de caráter industrial, baseando-se em pesquisa realizada sobre caracterização de lodo úmido composto por rejeitos de material fecal e papel úmido (WAN et al., 2013).

3.3 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Antes da instalação de um biodigestor em um determinado local, deve-se levar em consideração alguns fatores: condições locais do solo; facilidade na obtenção, preparo e no armazenamento da biomassa; facilidade de remoção e utilização do biofertilizante produzido; distância para utilização do biogás.

É importante que o local seja de fácil acesso, e distante de animais e pessoas que circulem no local, principalmente de crianças pois estas podem tocar no biodigestor podendo danificá-lo. Também é fundamental que não fique próximo de árvores, pois as raízes podem perfurar a manta pelo solo. Em biodigestores canadenses, o biogás tem pouca pressão e por isso só poderá ser conduzido até, no máximo, 50 metros (OLIVER et al., 2008).

3.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS

Diante da confirmação dos fatores iniciais de favorecimento na construção do biodigestor, faz-se necessário realizar o cálculo de alguns parâmetros para sua construção.

3.4.1 Tempo de detenção hidráulica

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é o tempo em que o substrato permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do biodigestor. Ele pode ser obtido através da relação entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação, como mostrado na Equação 1. No Brasil, o TDH mais adotado para resíduos bovinos situa-se em 40 dias (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Quanto maior esse tempo de detenção, maior o tamanho do reator necessário para tratar uma determinada quantidade de biomassa, o que pode encarecer o processo. Na otimização da biodigestão, procura-se reduzir o tempo de retenção, mantendo a eficiência do processo (SANTOS, 2017).

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Onde:

TDH: Tempo de detenção hidráulica, em (dias);

V: Volume útil do reator, em (m^3);

Q: Vazão afluente do substrato, em ($m^3 \cdot dia^{-1}$).

3.4.2 Carga orgânica volumétrica (COV)

A carga orgânica volumétrica apresenta quantos quilos de matéria orgânica seca devem ser carregados no biodigestor diariamente por m³ de volume, como apresentado na Equação 2. A concentração do substrato pode ser dada pela DQO, ST ou STV. Assim, pode-se escrevê-la como:

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad (2)$$

Onde:

COV: Carga orgânica volumétrica, em (kg substrato) / (m³xdia);

Q: Vazão afluente de substrato, em (m³.dia⁻¹);

S: Concentração do substrato no afluente, em (kg.m⁻³);

V: Volume útil do reator, em (m³).

3.4.3 Taxa de produção de biogás (*Gas Production Rate – GPR*)

Esse parâmetro descreve a razão entre o gás produzido por unidade de volume de reator, em um determinado espaço de tempo, como mostrado na Equação 3.

$$GPR = \frac{Q_{biogás}}{V} \quad (3)$$

Onde:

GPR: Taxa de produção de gás, em (m³ biogás) / (m³ reator x dia);

Q_{biogás}: Vazão de biogás, em (m³.dia⁻¹);

V: Volume útil do reator, em (m³).

3.4.4 Volume do biodigestor

O tamanho do biodigestor pode ser calculado multiplicando-se a carga diária e o tempo de detenção hidráulica, conforme mostrado na Equação 4.

$$VB = VC \times TDH \quad (4)$$

Onde:

VB: volume do biodigestor, em (m³);

VC: Volume da carga diária (biomassa + água), em (m³.dia⁻¹);

TDH: Tempo de detenção hidráulica, em (dias).

Desse modo, o volume do biodigestor depende do tipo da biomassa que será introduzida na caixa de entrada, pois o TDH varia com a matéria orgânica utilizada.

Os parâmetros operacionais descritos permitem dimensionar o biodigestor desejado. A partir das fórmulas descritas na Tabela 5 e tendo o volume do biodigestor é possível determinar o biodigestor a ser utilizado (RIBEIRO, 2011).

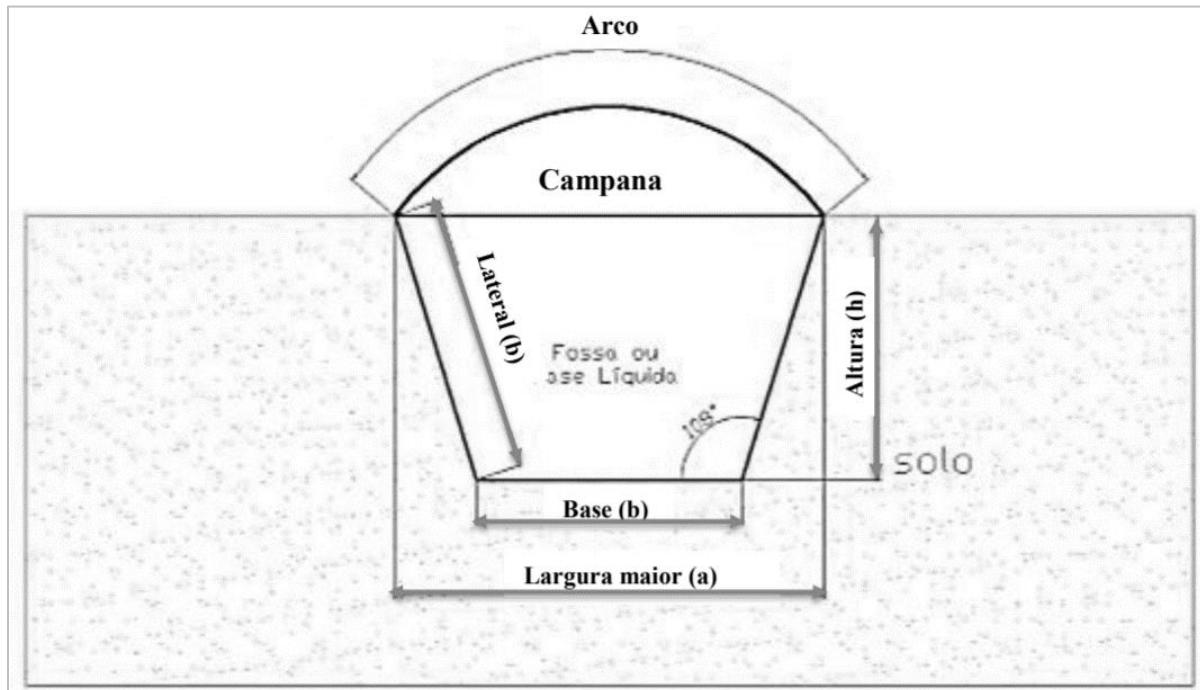
Tabela 5 - Equações utilizadas para dimensionar um biodigestor do tipo canadense

<i>Fórmula</i>	<i>Descrição</i>
	P = perímetro total transversal (campana mais fossa)
$P = C = 2r\pi$	C = circunferência da bolsa r = raio da bolsa plástica
	A% = porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco
$A\% = 0,621p^2 - 0,042p + 0,352$	p = proporção da fase gasosa desejada (p≤0,4)
$b = \left(-\frac{1}{3}A\% + \frac{1}{3}\right)P$	b = lateral, base ou largura menor da fossa
$a = 1,618b$	a = largura maior da fossa
$h = 0,951b$	h = profundidade da fossa
$Af = 0,4755(a + b)b$	Af = área transversal da fossa
$At = \frac{Af}{1 - p}$	At = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana
	Ag = área total transversal ou área transversal da fossa mais área transversal da campana menos a área transversal da fossa
$Vt = AtL$	Vt = volume total do biodigestor (campana mais gás) L = comprimento do biodigestor
$Vf = AfL$	Vf = volume total da fossa
$Vg = AgL$	Vg = volume total do gás

Fonte: Adaptado de RIBEIRO (2011).

Para iniciar o modelo conceitual, buscou-se relacionar os parâmetros iniciais detalhados na Figura 7: Arco, Lateral (b), Altura (h), Base (b), Largura maior (a) com a proporção gás/fase líquida desejada (RIBEIRO, 2011). Portanto, relacionar quanto do corte transversal da bolsa de plástico será destinada à formação do Arco da campana (Figura 7) para as possíveis proporções gás/fase líquida. Com as informações definidas anteriormente, já é possível realizar o processo de definição das equações para calcular as dimensões da fossa.

Figura 7 - Parâmetros bases utilizados nos modelos



Fonte: RIBEIRO, 2011.

Para utilização dessas equações, deve-se selecionar os parâmetros iniciais, comprimento (L), raio da bolsa (r) e a proporção de fase gasosa (p), que deve ser menor que 0,4. Esses parâmetros são escolhidos condicionados ao volume estimado do biodigestor da equação (RIBEIRO, 2011).

3.4.5 Cálculo da caixa de entrada e saída

As dimensões da caixa de entrada necessitam ser suficientes para que seu volume suporte o volume de carga por dia e para a caixa de saída o dimensionamento é feito para um volume, de no mínimo, três vezes o volume da caixa de entrada, para que dessa forma o biofertilizante seja armazenado (OLIVER, 2008).

3.4.6 Alimentação do biodigestor

A alimentação inicial do biodigestor se dá pela introdução do inóculo, que neste caso, é uma mistura de lodo de esgoto sanitário, oriundo da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da própria indústria considerando-se uma produção otimizada de metano no biogás, uma proporção de 30% de resíduo orgânico para 70% de lodo de esgoto (NEVES; CARNEIRO; BERNI, 2015). Após esse início, é colocado na caixa de entrada, os resíduos alimentares provenientes do restaurante triturados e misturados com água, respeitando a proporção definida de 15% (PROBIOGÁS, 2015).

3.4.7 Estimativa do potencial energético do biogás produzido

Em posse da quantidade teórica de biogás gerado por dia, há como estimar o potencial energético do biogás que vai ser gerado como descrito na Equação 16.

$$Pot_b = Q_{Biogás} \times PCI_{Biogás} \times \eta \quad (16)$$

Onde:

Pot_b: Potencial energético do biogás, em kWh/dia;

Q_{Biogás}: Quantidade de biogás gerado por dia, em m³.dia⁻¹;

PCI_{Metano}: Poder calorífico inferior, em kWh.m⁻³;

η: Eficiência de conversão, em %.

A geração de energia depende do poder calorífico do biogás e do rendimento do conjunto motor-gerador, que será utilizado para fazer a conversão do biogás em energia elétrica. O poder calorífico inferior (PCI) do metano, em condições normais de temperatura e pressão (CNTP) é de 9,88 kWh.m⁻³ (LIMA; PASSAMANI, 2012), e a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica do conjunto motor-gerador (motores ciclo-Otto) é de aproximadamente 25%, (CCE, 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sob posse dos valores teóricos das composições dos resíduos alimentares, do lodo da ETE e das fórmulas dos cálculos dimensionais da estrutura de um biodigestor do tipo canadense foi possível realizar algumas estimativas.

4.1 PREPARAÇÃO DO REATOR

Para garantir uma condição otimizada do percentual de sólidos voláteis ao realizar a alimentação do biodigestor, sendo composto pela mistura dos resíduos alimentares do restaurante e do lodo gerado pela ETE, estima-se que um percentual de sólidos voláteis na mistura seja na faixa de 15%, pois a presença excessiva de impurezas pode ocasionar danos ao equipamento (PROBIOGÁS, 2015).

4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Para se determinar a viabilidade do projeto, é necessário saber o volume do biodigestor e suas dimensões. A fim de realizar o dimensionamento deste biodigestor foram adotados parâmetros de projeto estimando-se que serão tratados os resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Industrial e do lodo da ETE. Assim o gás gerado na decomposição destes resíduos alimentares poderá ser utilizado na geração elétrica.

4.2.1 Volume diário ocupado pela mistura

Para a determinação do volume ocupado pela mistura (resíduo sólido orgânico + água) considerou-se a densidade de cálculo no valor de 1 kg.L^{-1} (densidade da água). Como a densidade da mistura é superior ao valor considerado, o valor obtido será superior ao calculado, fazendo com que esse volume adicional seja utilizado como margem de utilização e demanda do biodigestor.

Para a quantidade diária de 240 kg de resíduos alimentares e o percentual de 27,6% M/M de sólidos voláteis, tem-se o seguinte peso diário de sólidos voláteis:

Peso Diário de Sólidos Voláteis

$$\begin{aligned}
 &= \text{Peso diário de resíduos alimentares} \times \text{Percentual} \\
 &= 240\text{kg} \times 0,276 = 66,2 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Considerando o valor de sólidos voláteis e levando-se em consideração o percentual estimado de 15% na mistura total para evitar danos na estrutura interna do biodigestor (PROBIOGÁS, 2015), faz-se necessário adicionar o seguinte volume de água na mistura:

$$\begin{aligned}
 \text{Peso de Água Adicionado} &= \left(\frac{66,2 \text{ kg}}{15} \times 85 \right) - \text{Volume restante dos resíduos} \\
 &= \left(\frac{66,2 \text{ kg}}{15} \times 85 \right) - (240\text{kg} - 66,2\text{kg}) = 201,33 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Dessa forma, o volume diário de mistura adicionado diariamente no biodigestor é de:

$$\text{Volume Diário de Sólidos Voláteis} = \frac{240 \text{ kg} + 201,33 \text{ kg}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 0,441 \text{ m}^3$$

4.2.2 Volume do Biodigestor

Com o volume diário da mistura de resíduos, 0,268 m³, admitindo-se o tempo de detenção de 40 dias e utilizando a Equação (4), tem-se:

$$V_1 = TDH * Q = 40 * 0,441 = 17,65 \text{ m}^3$$

Considerando-se uma proporção de 30% de resíduo orgânico diário para 70% de lodo de esgoto, obtém-se o seguinte volume de lodo:

$$\text{Volume de Lodo abastecido} =$$

$$\frac{\text{Volume Diário da Mistura de Resíduos do Restaurante}}{30} \times 70 = \frac{0,441 \text{ m}^3}{30} \times 70 = 1,03 \text{ m}^3$$

Assim, o volume total será a base de comparação para o cálculo das dimensões do biodigestor.

$$V_t = 17,65 + 1,03 = 18,68 \text{ m}^3$$

Com as equações (5) até (15) da Tabela 5, calcula-se com o auxílio do Excel 2019, as dimensões que melhor se encaixam a fim de obter um volume próximo ao encontrado acima. Para início dos cálculos, adota-se os valores para o raio da bolsa plástica “r”, a proporção de fase gasosa desejada “p” e o comprimento do biodigestor “L”, indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões adotadas para a campânula do “r”, “p” e “L”.

<i>Dimensões Adotadas</i>	<i>Valores</i>
r	1,0 m
p	0,35
L	10 m

Fonte: Autor.

O raio “r” foi escolhido assim para que não ultrapassar a profundidade da fossa; a proporção “p” foi adotada com 35% utilizada para armazenar biogás e manter o biodigestor cheio de gás, já que não é prático e viável por condições físicas, uma instalação de biodigestores com proporção “p” que sejam maiores a 40%, pois o volume da fase líquida não será suficiente para manter a campânula cheia de gás, ou seja, elevada dentro do período de detenção, fazendo com que a campânula colapse sobre a fase líquida; e o comprimento “L” foi escolhido para garantir que o raio não ultrapasse a profundidade da fossa do biodigestor (BOTERO, 2008).

Tabela 7 - Valores dos parâmetros calculados para o biodigestor.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valores</i>
P	Perímetro total transversal (campânula mais fossa)	6,28m
A%	Porcentagem do perímetro transversal destinado ao arco	41,34%
b	Lateral, base ou largura menor da fossa	1,23m
a	Largura maior da fossa	1,99m
h	profundidade da fossa	1,17m
Af	Área transversal da fossa	1,88m ²
At	Área total transversal da fossa mais área transversal da campânula	2,89m ²
Ag	Área transversal da campânula	1,01m ²
Vt	Volume total do biodigestor (campânula mais gás)	28,88m ³
Vf	Volume total da fossa	18,77m ³
Vg	Volume total do gás	10,11m ³

Fonte: Autor.

4.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DO GÁS METANO E POTENCIAL ENERGÉTICO GERADO

Como uma tonelada de sólidos voláteis produz cerca de 400 Nm³ de CH_4 em condições normais de temperatura e pressão (CNPT), segundo Ferreira (2015), a produção diária de sólidos voláteis é de:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume de } CH_4 &= (\text{Peso de Resíduos} \times 0,276) + (\text{Peso de lodo} \times 0,893) \\
 &= [(240 \times 0,276) + (625 \times 0,893)] \times 0,4 = 259,00 \text{Nm}^3 \text{ de } CH_4
 \end{aligned}$$

Segundo (CETESB, 2011), há em média 60% de metano no biogás, portanto a produção diária de biogás no biodigestor é de:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume de Biogás} &= \frac{\text{Volume de } CH_4}{60} \times 100 = \frac{259}{60} \times 100 \\
 &= 431,67 \text{Nm}^3 \text{ de Biogás}
 \end{aligned}$$

4.4 ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como calculado anteriormente, o biodigestor produzirá, em média, 431,67m³ de biogás por dia. Tem-se que a estimativa da conversão de biogás em energia é:

$$\begin{aligned}
 Pot_d &= Q_{Biogás} \times PCI_{Biogás} \times \eta = 431,67 \text{ m}^3 \times \frac{9,8855 \text{ kWh}}{\text{m}^3} \times 25\% \\
 &= 1.066,82 \text{ kWh.dia}^{-1}
 \end{aligned}$$

Para saber a quantidade de energia elétrica que será gerada por mês, foi considerado que um mês tem, em média, 30 dias. Dessa forma, encontra-se:

$$Pot_m = Pot_b \times 30 = 1.066,82 \times 30 = 32.004,55 \text{ kWh.mês}^{-1}$$

Valor equivale a 221% do consumo médio mensal do restaurante, que é de 14.421kWh.mês⁻¹, sendo o restante da energia gerada utilizada nas instalações da fábrica que possui um consumo bem superior.

4.5 CUSTO DO INVESTIMENTO

A construção de um biodigestor do tipo canadense, com volume total entre 15m³ a 20m³, aliado a uma casa de alvenaria e estrutura de geração energética associada, com presença de motor gerador, demanda um investimento médio de R\$180.000,00 (CALZA, 2015).

Considerando uma conversão do valor do dólar em 2015, (R\$2,66), para o dólar em 2021 (R\$5,61), tem-se um custo de instalação de R\$379.624,10. É necessário que haja a manutenção do biodigestor periodicamente, visto que o principal risco que o biodigestor oferece são os rasgos na manta de PVC, pois se isso vier a acontecer, o biogás irá vazar e em contato com alguma centelha haverá risco de ocorrer uma explosão. Além disso, o motor-gerador requer constante manutenção para o seu funcionamento, como por exemplo a troca de óleo, filtros e velas. As manutenções representam, de modo geral, 4% do valor do investimento total realizado para construir e operar o biodigestor (ADVFN, 2017).

Sendo assim, o valor da manutenção anual a partir do segundo ano será de:

$$\begin{aligned} \text{Custo de Manutenção} &= \text{Custo inicial} \times 4\% = R\$379.624,10 \times 4\% \\ &= R\$15.184,96 \text{ ano}^{-1} \end{aligned}$$

4.6 RETORNO FINANCEIRO

A tarifa de energia elétrica em propriedades comerciais/serviços para consumo ativo (Grupo B3), cobrada pela CELPE (2021), é de R\$ 0,619 / kWh.

Dessa forma, a geração mensal de energia elétrica representaria um retorno financeiro mensal de:

$$\text{Retorno Mensal (R\$)} = \frac{32.004,55 \text{ kWh}}{\text{mês}} \times 0,619 = 19.810,82 \text{ R\$.mês}^{-1}$$

4.7 TEMPO DE RETORNO FINANCEIRO

De acordo com os valores obtidos de investimento inicial do biodigestor, o custo mensal de manutenção e realizando a comparação com o retorno financeiro obtido mensalmente, foi possível comprovar o tempo de retorno do investimento do projeto em 20 meses de finalização da instalação, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Tempo de retorno financeiro do investimento no biodigestor

Meses	Custo Acumulado com o Biodigestor (R\$)	Retorno Financeiro Acumulado (R\$)
1	379.624	19.810
2	379.624	39.620
3	379.624	59.430
4	379.624	79.240
5	379.624	99.050
6	379.624	118.860
7	379.624	138.670
8	379.624	158.480

9	379.624	178.290
10	379.624	198.100
11	379.624	217.910
12	379.624	237.720
13	394.809	257.530
14	394.809	277.340
15	394.809	297.150
16	394.809	316.960
17	394.809	336.770
18	394.809	356.580
19	394.809	376.390
20	394.809	396.200

Fonte: Autor.

Dessa forma, foi possível verificar que a partir do mês 20 o retorno financeiro acumulado ultrapassa o investimento inicial realizado somado ao custo anual de manutenção do biodigestor.

5. CONCLUSÃO

A partir dessa pesquisa, foi possível concluir que, a utilização do biodigestor anaeróbio do tipo canadense em um Restaurante industrial de uma indústria de grande porte, local onde se concentra um número de aproximadamente 2.000 pessoas por dia, representa um final interessante para os resíduos de alimentos que são descartados, seja pelos consumidores ou as sobras da produção.

Foi possível definir, diante de considerações realizadas a partir da pesquisa de outros autores que a quantidade de resíduos alimentares gerados, em média, é de 240 kg por dia, proporciona uma geração de biogás de $431,67 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, com o volume total do biodigestor de $28,88 \text{ m}^3$. Esse volume de gás pode gerar o equivalente a $1.066,62 \text{ kWh}^3.\text{dia}^{-1}$ e o tempo de retorno para o investimento realizado na implementação do biodigestor, foi de, aproximadamente, 20 meses.

O biogás gerado será utilizado como alternativa energética, substituindo parcialmente, a energia elétrica utilizada pelo restaurante e demais instalações da fábrica. É importante salientar também, que esse projeto apresenta vantagens ao meio ambiente, pois ele diminui a emissão de gases de efeito estufa deixando de liberar CH_4 para a atmosfera, ao se realizar o devido tratamento da matéria orgânica presente nesses restos de alimentos, reduz a contaminação da água e do solo pelo aproveitamento do lodo de esgoto, que é introduzido no biodigestor como o inóculo, favorecendo assim para a diminuição de aterros sanitários e ainda ocorre a produção de biofertilizante como um subproduto final.

6. REFERÊNCIAS

ADVFN. **Indicadores Econômicos**, 2017. Disponível em: <<http://br.advfn.com/indicadores/ipca>>. Acesso em: 09 de outubro de 2021.

AMANI, T.; NOSRATI, M.; SREEKRISHNAN, T. R. Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects - a review. **Environmental Reviews**, Canadá, v. 18, p. 255-278, 2010.

ARTHUR, R.; BREW-HAMMOND, A. Potencial biogas production from sewage slugde: a case study of the sewage treatment plant at Kuame Nkrumah University of Science and Technology (KNUST). **International Journal of Energy and Environment**, Kumasi, v. 1, p. 1009-1016, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2018.

BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. **Revista Eletrônica FACP**, Brasil, v. 7, 2015.

BARROS, R. M. **Tratado Sobre Resíduos Sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciênciac, 2012.

BERMANN, C.; MOREIRA, P. F.; KISHINAMI, R.; REY, ORIANA.; FEARNSIDE, P. M.; MILIKAN, B.; JUNIOR, W. C. S. S.; BAITELLO, R.; RIBEIRO, L. P.; MOREIRA, C. F.; NETO, P. B.; ROSMARIN, H. **O setor elétrico brasileiro e a sustentabilidade no século XXI: oportunidades e desafios**. Brasília: International rivers network, 2012.

BLEY, C. J. Biogás: a energia invisível. **Revista CIBiogás**, Brasil, v2. 2015.

BONTURI, G. de L.; VAN DIJK, M. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. **Revista Ciências do Ambiente OnLine**, v. 8, p. 88-95, 2012.

BRASIL. Resolução 12.305 de 2 de agosto de 2010. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2010.

BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. **Applied Energy**, v. 104, p. 170-177, 2013.

CABRAL, K. V. G. Implementação e acompanhamento de uma planta de biodigestão para geração de energia elétrica. Trabalho de Conclusão de Curso. Recife, PE: UFPE, 2016.

CALZA, L. F.; LIMA C. B.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 990-997, 2015.

CENTRO PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. Guia Técnico do Biogás. Algés, 2000.

CHERNICHARO, C. A. de L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Segrac, 1997.

CHO, S.; IM, W.; KIM, D.; KIM, M.; SHIN, H.; OH, S. Dry anaerobic digestion of food waste under mesophilic conditions: Performance and methanogenic community analysis. **Bioresource Technology**. Elsevier, v. 131, p. 210-217, 2013.

CRUZ, A. D. Avaliação do biogás produzido em reatores UASB em termos de concentração de H₂S para fins de aproveitamento energético. Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis, SC: UFSC, 2015.

CURRY, N.; PILLAY, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. **Renewable Energy**. Elsevier, v. 41, p. 200-209, 2012.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; SANTOS, C. **Biodigestores rurais:** modelo indiano, chinês e batelada. Bauru, SP: UNESP, 2008.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. Statistical Report. Bruxelas, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Informe à imprensa:** Demanda da energia elétrica: 10 anos. Rio de Janeiro, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Statistical yearbook of electricity 2020.** Rio de Janeiro, 2021.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO PARANÁ. **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná.** Curitiba, 2016.

FONSECA, F. S. T.; ARAUJO, A. R. A.; HENDGES, T. L. Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso. In: congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural, 2009, São Luís, **Anais.** São Luís: SOBER, 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Food wasteg footprint:** impacts on natural resouces. Rome, 2017.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE. **Guia Prático do Biogás:** Geração e Utilização. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, 2010.

HIDAKA, T.; ARAI, S.; OKAMOTO, S.; UCHIDA, T. Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces. **Bioresource Technology.** Elsevier, v. 130, p. 667-672, 2013.

HOERZ, T.; KRAMER, P.; KLINGLER, B.; KELLNER, C.; WITTUR, T.; KLOPOTEK F. V.; KRIEG, A.; EULER, H. **Biogas digest. Information and Advisory Service on Appropriate Technology.** ISAT. Vol 2. Frankfurt, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC fifth assessment synthesis report. Rio de Janeiro, 2014.

JUNQUEIRA, SLCD. Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2014.

KASTNER, V.; SOMITSCH, W.; SCHNITZHOFER, W. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier, v. 34, p. 82-90, 2012.

KUNZ, A.; PAULILLO, G. **Curso de atualização em energias do biogás.** Módulo II –Linhas de base para a produção e conversão de energia do biogás. ASSESSORIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. ITAIPU Binacional, 2017.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R.; AMARAL, A. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera, 2019.

LEITE, V. D. LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campina Grande, v. 13, p. 190, 2009.

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

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES.** Trabalho de conclusão de curso. Vitória, ES: UFES, 2012.

LIMA, M. F. **Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas.** Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UFPE, 2015.

LIU, C.; YUAN, X.; ZENG, G.; LI, W.; LI, J. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Bioresource Technology**. Hunan, v. 99, p. 882–888, 2008.

LUTZ, C.; LEHR, U.; WIEBE, K. S. Economic effects of peak oil. **Energy Policy, Special Section: Frontiers of Sustainability**. Oslo, v. 48, p. 829–834, 2012.

MACHADO, R. B.; THEIS, G. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região das missões do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção, 6, 2010, Viçosa, **Anais**. Viçosa: UFV, 2010.

MARKOWSKI, M.; BIAŁOBRZELSKI, I.; ZIELINSKI, M.; DEBOWSKI, M. Optimizing low-temperature biogas production from biomass by anaerobic digestion. **Renewable Energy**. Elsevier, v. 69, p. 219-225, 2014.

MARQUES, S. M. A. de A.; SILVA, F. J. J.; MONTEIRO, M. K. D.; VIEIRA, A. S.; VENTURA, A. F. A.; VIEIRA, R. J. Produção de biofertilizante, adubo orgânico e biogás para agricultura familiar. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia eletrônica**. Santa Maria, v. 18, p. 990-999, 2014.

MILANEZ, A.Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. S.; SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro, v. 47, p. 221-276, 2018.

NEVES, G. N.; CARNEIRO, T. F.; BERNI, M. **Desempenho de reator anaeróbio mesofílico seco de resíduo alimentar como perspectiva de aproveitamento energético**. Porto Alegre: Agrener, 2015.

NKEMKA, V. N.; MURTO, N. Two-stage anaerobic dry digestion of blue mussel and reed. **Renewable Energy**. Elsevier, v. 50, p. 359-364, 2013.

PORTAL DE SERVIÇOS DA CELPE. **Tabela de tarifas de energia elétrica Grupo B, c2021.** Disponível em: <https://servicos.neoenergiaperenambuco.com.br/residencial-rural/Documents/Tarifas%20202021/01CELPE_TARIFAS_DE_ENERGIA_ELETTRICA_GRUPO_B%20_ABRIL_2021_REH_N2861.pdf>. Acesso em: 09 de outubro de 2021.

PROBIOGÁS, Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. Ministério das Cidades, Brasília, 2015.

OLIVEIRA, M. M. Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, RS: UFSM, 2012.

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A. S.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. Manual de treinamento em biodigestão. Winrock International Brasil, 2008.

REIS, A. S. Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio. Dissertação de Mestrado. Recife, PE: UFPE, 2012.

RIBEIRO, Deyvid da Silva. DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UM BIODIGESTOR EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO GÁS/FASE LÍQUIDA. HOLOS. Natal, v. 1, p. 49-56, 2011.

ROHSTOFFE, F. N.; PATERSON, M.; KUHN, W. Guia prático do biogás. 5^a edição. GÜLZOW, 2010.

SANTOS, T. N., Biodigestão anaeróbia de palma forrageira, vinhaça e resíduos alimentares para produção de biogás. Dissertação de Doutorado. Recife, PE: UFPE, 2017.

SILVA, F. M.; BERTINI, L. M.; ALVES, L. A.; BARBOSA, P. T.; MOURA, L. F.; MACÊDO, C. S. Implicações e possibilidades para o ensino a partir da construção de biodigestor no IFRN – Campus Apodi. HOLOS. Natal, v. 6, 315-327. 2015.

TEIXEIRA, A. R; CHERNICHARO, C. A. L; SOUTO, T. F. S; DE PAULA, F. S. Influência da alteração da distribuição do tamanho de partículas no desempenho de reator UASB tratando esgoto doméstico. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, v. 14, p.159-166, 2009.

WAN, S.; SUN, L.; DOUIEB, Y.; SUN, J.; LUO, W. Anaerobic digestion of municipal solid waste composed of food waste, wastepaper, and plastic in a single-stage system: Performance and microbial community structure characterization. **Bioresource Technology**. Elsevier, v. 146, p. 619-627, 2013.

ZAHEDI, S.; SALES, D.; ROMERO, L. I.; SOLERA, R. Optimization of single-phase drythermophilic anaerobic digestion under high organic loading rates of industrial municipal solid waste: Population dynamics. **Bioresource Technology**. Elsevier, v. 146, p. 109-117, 2013.

ZANETTI, A.; ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Estudo da composição ótima de diferentes resíduos orgânicos para a produção de biogás. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**. São Paulo, v. 1, p. 6217-6224, 2014.

ZESHAN, B.; KARTHIKEYAN, O. P.; VISVANATHAN, C. Effect of C/N ratio and ammonia accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. **Bioresource Technology**. Elsevier, v. 113, p. 294-302, 2012.

ZHANG, C.; SU, H.; TAN, T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system. **Bioresource Technology**. Elsevier, v. 145, p.10-6, 2013.