

**ESTUDO DA METANIZAÇÃO DE
RESÍDUOS ALIMENTARES COMO
FONTE DE ENERGIA NO RESTAURANTE
UNIVERSITÁRIO DA UFSC**

Júlia Caroline da Silva



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

da Silva, Júlia Caroline
Estudo da metanização de resíduos alimentares como
fonte de energia no Restaurante Universitário da
UFSC / Júlia Caroline da Silva ; orientadora,
Carina Malinowsky, 2018.
119 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Energia
Renovável. 3. Digestor Anaeróbio. 4. Resíduos
Orgânicos. 5. Biogás. I. Malinowsky, Carina . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Júlia Caroline da Silva

**ESTUDO DA METANIZAÇÃO DE RESÍDUOS
ALIMENTARES COMO FONTE DE ENERGIA NO
RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFSC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do Grau de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Msc. Carina Malinowsky

Florianópolis
Novembro de 2018

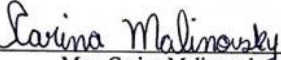
Júlia Caroline da Silva

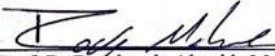
**ESTUDO DA METANIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES COMO FONTE DE
ENERGIA NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFSC**

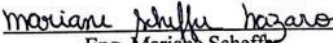
Trabalho de conclusão de curso submetido a banca examinadora como parte dos requisitos para
conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 28 de novembro de 2018.

Banca Examinadora:


Msc. Carina Malinowsky
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina


Eng. Mariane Scheffer
Membro da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

“Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu.”

(Érico Veríssimo)

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo suporte e ensinamentos. Em especial minha mãe pelo carinho e dedicação em todos os momentos da minha vida. Por ser a minha maior fã e incentivadora, além de acreditar em mim muitas vezes mais do que eu mesma. Obrigada por tudo!

A minha vó pelo apoio, conversas e carinho, que sem dúvida contribuíram na formação da pessoa que sou hoje. Obrigada por sempre estar ao meu lado.

Ao meu namorado pelo companheirismo, cumplicidade e paciência, que sem medir esforços sempre me ajudou em todos os momentos que precisei. Obrigada por ser o melhor namorado do mundo!

Aos meus colegas que dividiram comigo alegrias, angústias e histórias vividas, muito obrigada pela parceria boa!

A minha orientadora Carina, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, além da paciência e dedicação em solucionar os problemas que surgiram.

Ao LARESO e sua equipe pelas contribuições nesse trabalho, obrigada pela ajuda!

Ao Restaurante Universitário e sua equipe, com vocês aprendi muito! Obrigada pela gentileza durante as pesagens realizadas neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelos conhecimentos a mim transmitidos e contribuição na minha formação profissional.

A UFSC por ter sido uma grande escola de vida e ter me ensinado muito mais do que Engenharia.

RESUMO

A digestão anaeróbia é uma técnica muito eficiente no tratamento e valorização dos resíduos orgânicos, com vistas ao seu aproveitamento energético. O biogás é uma mistura de gases altamente combustível, obtido pela digestão anaeróbia e que possui grande aplicabilidade, como a queima e a geração de energia elétrica. Diante da possibilidade de aproveitamento do biogás, a digestão anaeróbia apresenta-se como um processo viável economicamente, além de benéfico ao meio ambiente. Dentre os benefícios, é possível citar a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e a redução da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, proporcionando, assim, um aumento do tempo de vida útil dos mesmos, e fornecendo uma destinação correta aos resíduos. Desse modo, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás a partir de resíduos alimentares provenientes do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Santa Catarina e apresentar uma análise econômica da metanização desses resíduos como fonte de energia. Através de pesagens locais, obteve-se o valor da média diária de geração de resíduos do RU de 486 kg, com possibilidade de geração de 84,20 m³/dia de biogás. A utilização do biogás como gás de cozinha através de combustão direta cobre a demanda necessária para funcionamento do restaurante por 18 dias do mês, representando uma economia mensal de R\$ 9.000,00. Se utilizado como energia elétrica o mesmo representa o equivalente a 160,15kWh/dia, aproximadamente R\$ 2.414,18. Foi proposta a concepção de um sistema de digestão anaeróbia em reator de fluxo contínuo com agitação (CSTR) em escala real, para metanização dos resíduos alimentares do RU e geração de energia para o funcionamento do restaurante. Concluiu-se, então, que a biodigestão dos resíduos alimentares do restaurante universitário se mostrou promissora economicamente, além de fomentar a utilização das energias renováveis e a diversificação da matriz energética do país.

Palavras-chave: Energia Renovável, Digestor Anaeróbio, Resíduos Orgânicos, Biogás.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a very efficient technique of treatment and valorization of organic waste, with objective its energy utilization. The biogas is a mixture of gases highly combustible, obtained by anaerobic digestion and has great applicability, such as burning and as electric energy generation. Given the possibility of using biogas, the anaerobic digestion has shown to be a viable process economically, as well as beneficial to the environment. Among the benefits, it is possible to mention the decrease of the greenhouse gases emission, and the reduction of urban solid waste disposal in landfills, thus, increasing their useful life, and providing a correct waste destination. This study aims to evaluate the potential of biogas production by food waste from the University Restaurant of the Federal University of Santa Catarina and to show an economic analysis of the methanization of this waste as an energy source. Through local weighing was obtained the daily average of waste generated by the university restaurant that represents 486 kg per day, totalizing 84.20 m³/day of biogas. The use of biogas as cooking gas through direct combustion covers the demand required to operate the restaurant for 18 days of the month, representing a monthly saving of R\$ 9,000.00. If used as electric energy, it would represent 160,15kWh per day, almost R\$ 2.414,18. It was proposed the design of an anaerobic digestion system in a Continuous Flow Stirred Tank Reactor (CSTR) for the methanization of food waste from the university restaurant and energy generation for the restaurant operation. The present study concluded that the biodigestion of food waste from the university restaurant showed to be economically promising, and it promotes the use of renewable energies and the diversification of the country's energy matrix.

Keywords: Renewable energy, Anaerobic Digester, Organic Waste, Biogas.

LISTA DE ABREVIATURAS

Abiogás - Associação Brasileira de Biogás e de Biometano
ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
COMCAP – Companhia de Melhoramentos da Capital
CSTR – Continuous Flow Stirred-Tank Reactor
DA – Digestão Anaeróbia
DQO - Demanda Química de Oxigênio
EBA - Associação Europeia de Biogás
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
ETEs – Estações de tratamento de esgoto doméstico
FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura
g – grama
GEE – Gases de Efeito Estufa
GNV - Gás Natural Veicular
IBGE – Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística
IEA – International Energy Agency
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
J – Joule
kg – quilograma
kWh – quilowatt-hora
L – Litro
MCI - Motores de Combustão Interna
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME - Ministério de Minas e Energia
m³ _ metro cúbico
PCH – Pequenas centrais hidrelétricas
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROBIOGAS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
RPM – Rotações por Minuto
RSO - Resíduo Sólido Orgânico
RSU – Resíduo Sólido Urbano
RU – Restaurante Universitário
ST – Sólidos totais
SV – Sólidos voláteis
TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

UE – União Europeia

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Unica – União da Indústria de Cana de Açúcar de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biodigestor vertical (modelo indiano).....	58
Figura 2 - Biodigestor vertical (modelo chinês)	59
Figura 3 - Esquema de uma usina de cogeração de energia elétrica	66
Figura 4 - Setores de produção de Biogás da União Europeia.....	72
Figura 5 - Números do setor de biogás do Brasil.....	74
Figura 6 - Fluxograma de metodologia desenvolvida.....	77
Figura 9 - Imagem de satélite da localização do RU	78
Figura 8 - Representação esquemática do sistema de metanização	79
Figura 9 - Reator acidogênico.....	80
Figura 10 - Medidor de biogás.....	80
Figura 11 - Reator metanogênico.....	81
Figura 12 - Contentores de separação dos resíduos do RU.....	83
Figura 13 - Gaiola de lixo	84
Figura 14 - Balança responsável pelas pesagens dos resíduos do RU	85
Figura 15 - Fluxograma da rota dos resíduos orgânicos do RU.....	86
Figura 16 - Medidor de volume de biogás	88
Figura 17 - Analisador de gases.....	89
Figura 18 - Digestor Anaeróbio CSTR com misturador central	92
Figura 19 - Central de gás do RU	100
Figura 20 - Botijões de gás do RU.....	100
Figura 21 - Sistema de digestão dos Resíduos Alimentares.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento de Biogás através da Digestão Anaeróbia	61
Tabela 2 - Variação do poder calorífico em relação a composição do Biogás	63
Tabela 3 - Comparação entre os poderes caloríficos de variadas fontes energéticas.....	64
Tabela 4 - Necessidade de remoção de compostos do Biogás	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes de energia e seus tipos de poluentes emitidos	36
Quadro 2 - Técnicas de purificação de Biogás.....	69
Quadro 3 - Composição de sólidos voláteis dos resíduos alimentares...	87
Quadro 4 - Composição de sólidos totais dos resíduos alimentares	93
Quadro 5 - Massa dos resíduos alimentares gerados no RU	97
Quadro 6 - Análises do biogás	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz Energética Brasileira.....	32
Gráfico 2 - Matriz energética mundial	33
Gráfico 3 - Comparação da utilização de fontes renováveis e não renováveis entre Brasil e o Mundo	35
Gráfico 4 - Evolução da capacidade de geração de energia instalada....	37
Gráfico 5 - Índice de cobertura da coleta de RSU (%)	48
Gráfico 6 - Fases da Digestão Anaeróbia.....	55
Gráfico 7 - Evolução da produção de biogás da União Europeia (em Ktoe)	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1 OBJETIVOS	28
1.1.1 Objetivo geral.....	28
1.1.2 Objetivos específicos.....	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	31
2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	34
2.2.1 Hidrelétricas.....	37
2.2.2 Energia eólica.....	38
2.2.3 Energia solar	40
2.2.4 Biomassa.....	41
2.3 PANORAMA DA GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	44
2.4 RESÍDUOS ORGÂNICOS	49
2.5 BIOMETANIZAÇÃO.....	50
2.5.1 Princípios da digestão anaeróbia.....	50
2.5.2 Codigestão	56
2.5.3 Relação inóculo/substrato	56
2.6 DIGESTORES ANAERÓBIOS.....	57
2.7 BIOGÁS.....	61
2.7.1 A energia elétrica.....	64
2.7.2 A energia térmica.....	66
2.7.3 Injeção na rede de gás natural.....	67
2.7.4 Combustível para veículos	67
2.8 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	68
2.9 PANORAMA MUNDIAL DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	70
2.10 CENÁRIO BRASILEIRO E CATARINENSE DE BIOGÁS	73
3. MATERIAIS E MÉTODOS	77
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	78
3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL	78
3.2.1 Configuração reator acidogênico	79
3.2.2 Configuração reator metanogênico.....	81
3.3 INVENTÁRIO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RU DA UFSC, CAMPUS TRINDADE.....	82
3.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DOS RESÍDUOS ALIMENTARES DO RU	87

3.5 MONITORAMENTO DO VOLUME DE BIOGÁS E DETERMINAÇÃO DO TEOR DE METANO	87
3.6 PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	89
3.6.1 Cenário 1: utilização como gás de cozinha	89
3.6.2 Cenário 2: conversão em energia elétrica	90
3.7 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO EM ESCALA REAL.....	91
3.7.1 Escolha do reator	91
3.7.2 Cálculo do volume de água inserido no reator	
3.7.3 Cálculo do volume do reator	94
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES NO RU	97
4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS ALIMENTARES DO RU	98
4.3 ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS GERADO PELO SISTEMA EXPERIMENTAL	99
4.4 PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	100
4.4.1 Cenário 1: utilização do biogás como gás de cozinha	100
4.4.2 Cenário 2: conversão do biogás em energia elétrica	102
4.5 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO EM ESCALA REAL.....	102
4.5.1 Cálculo do volume de água inserido no reator	102
4.5.2 Cálculo do volume do reator	104
4.5.3 Componentes do sistema de digestão	106
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
REFERÊNCIAS	111

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energias renováveis tendem, nos próximos anos, a assumir uma participação relevante na matriz energética global, à medida que cresce a preocupação da sociedade com as questões ambientais. Tal preocupação concerne, de modo especial, ao desenvolvimento dos países periféricos, tendo em vista a necessidade de uma sociedade global equitativa. Assim, sobem os preços do petróleo, os custos políticos, sociais e ambientais do uso de combustíveis fósseis, mostrando que a questão energética e do desenvolvimento já é, e continuará sendo, centro de inúmeras interações e dinâmicas no cenário das relações internacionais globais (GUERRA; YOUSSEF, 2012).

No âmbito das energias renováveis, o Brasil apresenta situação privilegiada. No país, 43,6% da Oferta Interna de Energia (OIE) é renovável, enquanto a média mundial é de 14%, e nos países desenvolvidos, é de apenas 6%. Dentre as fontes renováveis de energia, o Brasil tem destaque para as Pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), biomassa e energia eólica (COLDEBELLA et al., 2006).

O aumento na taxa de produção de resíduos sólidos, no Brasil e no mundo, ocasionado pelo aumento populacional e as atividades industriais, tem se tornado um problema gravíssimo de saneamento básico e até mesmo de saúde pública. Atualmente, a maioria das cidades brasileiras gera quantidades de resíduos que vão além da capacidade de coletar e acondicionar racionalmente (SILVA, 2006).

O mais recente panorama nacional de geração de resíduos realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) para o ano de 2016 constatou que 3.331 municípios brasileiros apresentaram destinação incorreta do Resíduo Sólido Urbano (RSU), totalizando mais de 29,7 milhões de toneladas de resíduos, correspondentes a 41,6% do coletado em 2016. Ou seja, quase metade do total coletado no ano de 2016 foi enviado para lixões ou aterros controlados que não possuem nenhum conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, além de se apresentarem como grande risco à saúde humana.

O aproveitamento energético disponível nos resíduos contribui para o enfrentamento da problemática mundial do acúmulo crescente do RSU e suas formas de disposição final, além de favorecer a geração de energia de maneira sustentável. A fração orgânica do RSU, por exemplo, pode ser degradada e estabilizada em biorreatores anaeróbios,

produzindo biogás e biossólido com valor econômico e agrônômico (SCHULZ, 2015).

A digestão anaeróbia, especialmente da fração orgânica putrescível do RSU, é de grande importância no manejo de resíduos sólidos. Essa digestão, também conhecida como biometanização, é um processo natural que ocorre na ausência de oxigênio e envolve a decomposição bioquímica da matéria orgânica realizada por um grupo específico de microrganismos. Esse processo resulta na produção de um gás rico em energia, o biogás, e um efluente rico em nutrientes. Portanto, trata-se de uma alternativa viável e que vem sendo aceita com relevante aplicabilidade, visando a estabilização da matéria orgânica e o aproveitamento energético desses resíduos (REIS, 2012).

O Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos (LARESO), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), conta com sistema piloto de reatores anaeróbios para tratamento dos resíduos alimentares do Restaurante Universitário (RU). Aliado ao objetivo de estimar o potencial de geração de biogás através dos resíduos alimentares do RU, foram realizadas análises do biogás gerado pelo sistema experimental do laboratório.

Diante do exposto, o presente estudo surgiu a fim de contribuir para solucionar a problemática dos resíduos sólidos no Brasil, além de trazer uma tecnologia viável para valorização dos resíduos e aproveitamento energético. A implantação de um digestor em escala real para tratamento dos resíduos alimentares gerados pelo Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é de extrema relevância para o contexto atual, uma vez que Universidades são grandes difusores de conhecimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo sobre o uso do biogás, gerado a partir da digestão anaeróbia dos Resíduos Alimentares do Restaurante Universitário (RU), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como fonte de energia no próprio Restaurante.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar qualitativamente e quantitativamente a produção de biogás no sistema piloto de digestão anaeróbia;
- Analisar comparativamente as fontes de energia calorífica (Gás Liquefeito de Petróleo) e energia elétrica com o potencial do uso do biogás no RU;
- Determinar a capacidade de produção de metano pelos Resíduos Alimentares do RU;
- Dimensionar um digestor em escala real para tratamento dos Resíduos Alimentares do RU.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

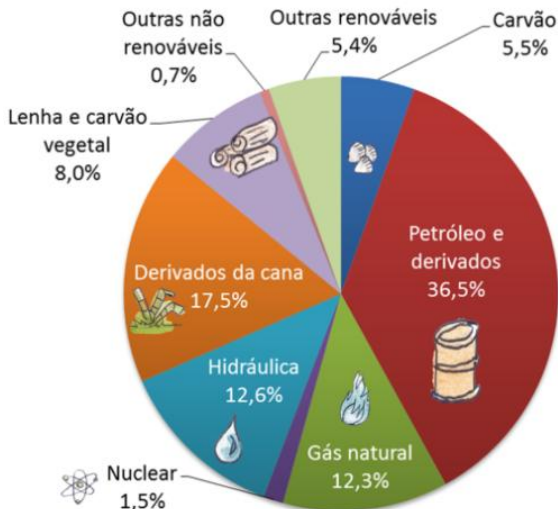
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O uso de energia no Brasil começou a apresentar incrementos elevados a partir do término da II Guerra Mundial (1939-1945), impulsionado pelo expressivo crescimento demográfico, por uma urbanização acelerada, pelo processo de industrialização e pela construção de uma infraestrutura de transporte rodoviário de característica energointensiva. Entre 1940 e 1950, com uma população de cerca de 41 milhões de habitantes, dos quais 69% se concentravam no meio rural, o consumo brasileiro de energia primária era de apenas 15 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Em 1970, com uma população de mais de 93 milhões de habitantes, esse consumo já se aproximava de 70 milhões de tep. Em 2000, a população já ultrapassava 170 milhões de habitantes e o consumo de energia se elevava a cerca de 190 milhões de tep, de modo que o crescimento quase triplicou (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

A matriz energética brasileira até a década de 1970 era dependente de apenas duas fontes de energia, o petróleo e a lenha, que juntas respondiam por 78% do consumo. Desse modo, o Brasil aparece como o quinto país que mais investe em energia renovável, de acordo com Relatório da Conferência das Nações Unidas para o Comércio e Desenvolvimento (2011), mas atua praticamente em setores já consolidados como o biocombustível e as hidrelétricas (SOUZA; SILVA, 2012).

A matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial. No Brasil, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usamos mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras fontes renováveis, totalizam 41,1%, quase metade da matriz energética brasileira, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018).

O Gráfico 1, a seguir, apresenta a Matriz Energética Brasileira no ano de 2016, ilustrando a porcentagem que cada fonte de energia ocupa na Matriz Energética do País.

Gráfico 1 - Matriz Energética Brasileira

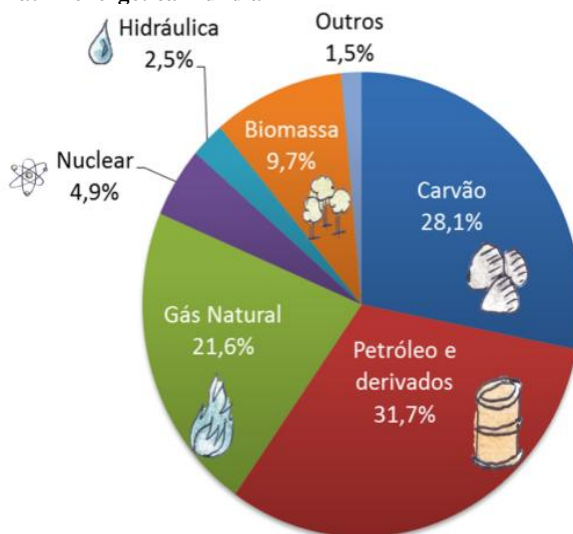
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018).

Tolmasquim (2012) afirma que a continuidade do aproveitamento do potencial hidrelétrico nacional, associada à expansão de outras fontes renováveis de produção de eletricidade, como centrais eólicas e a bioenergia – tanto para produção de energia elétrica quanto para a oferta de combustíveis líquidos –, são elementos que permitem ao Brasil preservar limpa sua matriz. Além disso, a expansão da produção doméstica de petróleo e gás natural permitirá que o país se consolide como importante *player* no cenário energético internacional. Nessas condições, têm-se reunidos os ingredientes essenciais para que o Brasil se torne uma potência ambiental e energética do século XXI.

O mundo possui uma matriz energética composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e gás natural. Fontes renováveis, como a solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 1,40% da matriz energética mundial. Somando à participação da energia hidráulica, as renováveis totalizam 3,8% (EPE, 2018).

O Gráfico 2, que segue, apresenta a Matriz Energética Mundial para o ano de 2015, a qual é possível comparar a porcentagem de fontes de energia mais utilizadas em relação à Matriz Energética Mundial.

Gráfico 2 - Matriz energética mundial



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018).

Dado que as reservas mundiais de petróleo, segundo Santos (2009, p. 22), “totalizam 1.147,80 bilhões de barris e o consumo anual desse combustível fóssil está estimado em 80 milhões de barris/dia, chega-se à conclusão que as reservas mundiais de petróleo se esgotarão por volta do ano de 2046”. Além disso, é basilar ressaltar que nesse cálculo não foi contabilizada a tendência do crescimento no consumo, o que leva a conclusão de que, não havendo novas descobertas de reservas de petróleo, esse tempo ainda diminuiria. Por outra parte, é de se prever que antes do esgotamento das reservas, o preço do petróleo ficará tão elevado que sua utilização como combustível não seria mais interessante, denotando uma necessidade da obtenção de alternativas de recursos energéticos que permitam a substituição do petróleo (RATHMANN, 2005).

O crescimento e modernização das atividades agrícolas e industriais, somado ao crescimento populacional, demandam um volume cada vez maior da capacidade de geração de energia elétrica. A exaustão dos recursos naturais e a crescente agressão ao meio ambiente para suprir tal demanda vem sendo apontados como um fator importante de desequilíbrio ao ecossistema. Nesse contexto, as formas alternativas de produção e aproveitamento de energia limpa vem se mostrando apropriadas para agregar ao modelo energético em vigor.

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energia renovável são aquelas em que os recursos que são usados não se esgotam, ou seja, possuem capacidade de regeneração. As fontes solar e hídrica entre outras, situam-se nesta categoria. No entanto, muitos países são extremamente dependentes de uma ou algumas poucas fontes de energia e precisam encontrar alternativas para diversificar suas fontes (BORGES; BARAÚNA; CHOTOE, 2015).

A necessidade de atender a demanda energética nas diversas áreas causando o mínimo de impacto, seja ele social ou ambiental, faz surgir a busca e a exploração de fontes energéticas alternativas. As tecnologias que convertem a energia disponível na natureza, sejam elas do vento, da água, do sol ou dos combustíveis fósseis, permitem que o homem aumente sua capacidade de trabalho (GADANHA et al., 1991).

De acordo com Guerra e Youseff (2012, p. 68):

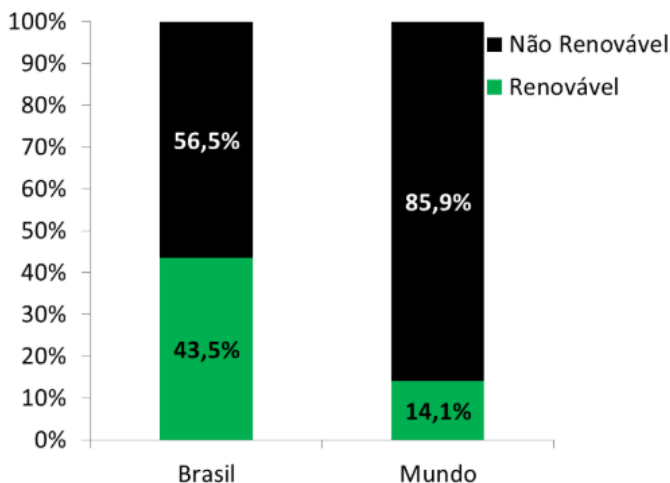
As fontes de energia renovável tenderão, nos próximos anos, a assumir uma participação relevante na matriz energética global, à medida que cresce a preocupação da sociedade com as questões ambientais. Tal preocupação concerne de modo especial ao desenvolvimento dos países da periferia, tendo em vista a necessidade de uma sociedade global equitativa e justa. Sobem os preços do petróleo, os custos políticos, sociais e ambientais do uso de combustíveis fósseis, mostrando que a questão energética e do desenvolvimento já é, e continuará sendo, centro de inúmeras interações e dinâmicas no cenário das relações internacionais globais.

Segundo o Ministério de Minas e Energia do Brasil:

[...] existe um debate sobre o aumento da segurança no fornecimento de energia, impulsionado por efeitos de ordem ambiental e social, para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Esse debate pode contribuir com o interesse global por soluções sustentáveis por meio da geração de energia extraída de fontes limpas e renováveis. (GUERRA; YOUSSEF, 2012, p. 71).

Os padrões atuais de produção e consumo de energia, para Goldemberg e Lucon (2007, p. 7) são fundados nas fontes fósseis, “o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento de longo prazo no planeta. É preciso mudar esses padrões estimulando as energias renováveis, e, nesse sentido, o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo”. O Gráfico 3 apresenta o consumo de energia provenientes de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo, o qual podemos perceber que a matriz energética brasileira se apresenta mais renovável que o padrão mundial.

Gráfico 3 - Comparação da utilização de fontes renováveis e não renováveis entre Brasil e o Mundo



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018).

Essa característica da nossa matriz é muito importante, pois as fontes não renováveis de energia são as maiores responsáveis pela emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). Desse modo, “como consumimos mais energia das fontes renováveis que em outros países, dividindo a emissão de gases de efeito estufa pelo número total de habitantes no Brasil, veremos que nosso país emite menos GEE por habitante que a maioria dos outros países” (EPE, 2018).

Simioni (2006) ressalta que, dentre as fontes de energia elétrica, o carvão é o que mais emite agentes poluentes. Além disso, a exploração de carvão é uma das maiores causas de acidentes e mortes em minas. Só na China, no ano de 2005, conforme se observou em diversas notícias da

imprensa, mais de seis mil trabalhadores morreram em diversas explosões e/ou soterramentos (SIMIONI, 2006).

Goldemberg (1998) apresenta no Quadro 1 as emissões de poluentes para cada 1000 MW de eletricidade gerada e compara algumas fontes de energia entre si.

Quadro 1 - Fontes de energia e seus tipos de poluentes emitidos

FONTE DE ENERGIA	TIPOS DE POLUENTES (ton./ano)					
	Óxido de enxofre	Óxido de nitrogênio	Dióxido de Carbono	Metano	Monóxido de Carbono	Emissões Particuladas
Carvão	70 000	25 000	1 600 000	40	500	120
Gás natural	-	15 000	800 000	23	1 000	-
Petróleo residual	30 000	14 000	1 400	50	1 000	5
Madeira	1 000	6 000	1 400	700	60 000 000	40
Nuclear	3 000	2 000	2 000	22	100	5

Fonte: Goldemberg (1998).

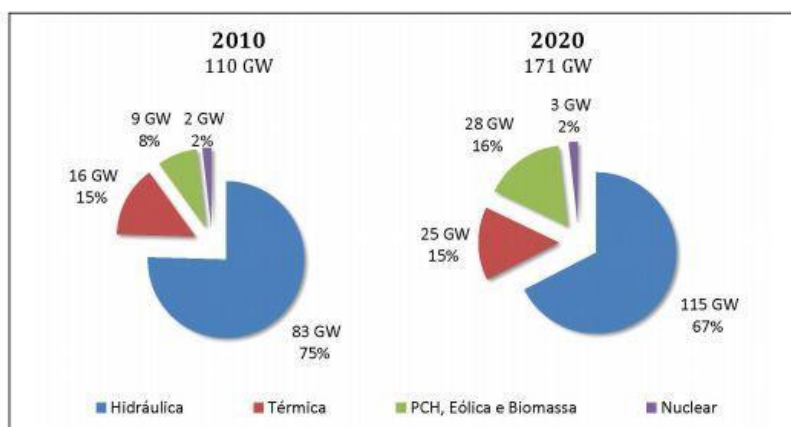
Nessa perspectiva, as fontes renováveis de geração de energia elétrica devem estar sempre alinhadas à ideia do desenvolvimento sustentável. Os impactos causados pelo uso de determinadas fontes de geração de energia ocasionam perdas sociais e ambientais que comprometem de maneira irreversível a qualidade de vida de muitas populações (BORGES; BARAÚNA; CHOTOE, 2015).

Guerra e Youssef (2012, p. 102) inferem que, em se tratando de políticas energéticas, dois fatores vêm mudando os rumos tomados a partir de 2005:

- O primeiro fator é a percepção que vem sendo disseminada dos maus efeitos causados ao meio ambiente pela queima de combustíveis fósseis, ocasionando as mudanças climáticas e o efeito estufa; e,
- O segundo, que alterando os rumos das políticas energéticas, são os elevados preços do petróleo; além do que, tal recurso se encontra concentrado em alguns poucos países membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), os quais estão reafirmando a questão da segurança energética.

O Gráfico 4, realizado por Tolmasquim (2012), representa a utilização de fontes renováveis para geração de energia elétrica no Brasil em 2010 e a sua tendência de crescimento até o ano de 2020. Sendo assim, podemos observar um aumento na utilização de recursos renováveis, o que indica maior consciência sobre a utilização da energia limpa. O gráfico também nos indica que a produção de energia gerada através de PCH, Eólica e Biomassa irá dobrar em 10 anos, ressaltando, portanto, a importância e o mercado promissor das suas fontes de geração de energia.

Gráfico 4 - Evolução da capacidade de geração de energia instalada



Fonte: Tolmasquim (2012).

Feita essas considerações, a seguir apresentamos as principais fontes de energia renovável utilizadas no Brasil, e um panorama geral sua situação atual e do seu potencial de geração de energia no País.

2.2.1 Hidrelétricas

A energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento do fluxo das águas em uma usina, na qual as obras civis – que envolvem tanto a construção quanto o desvio do rio e a formação do reservatório – são tão ou mais relevantes que os equipamentos instalados. Por isso, para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), ao contrário do que ocorre com as usinas termelétricas (cujas instalações são mais simples), para a construção de uma hidrelétrica é imprescindível a contratação da chamada indústria da construção pesada.

Historicamente, “o setor elétrico brasileiro foi desenvolvido com base no grande potencial hidroelétrico do país. Tal expansão foi possível devido ao grande número de rios e bacias com regimes hidrológicos complementares” (GUERRA; YOUSSEF, 2012, p. 111).

Tolmasquim (2012) afirma que a hidroeletricidade é um elemento diferencial da Matriz Energética Brasileira, pois é a principal fonte de geração de eletricidade no país e, em 2010, respondeu por 81% do total produzido. Além disso, o Brasil capta 10% do potencial hidráulico técnico mundial e o aproveitamento desse potencial é estratégico para o país.

Segundo dados da ANEEL de 2002, o potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em cerca de 260 GW, dos quais 40,5% estão localizados na Bacia Hidrográfica do Amazonas; entre as demais bacias, destacam-se a do Paraná, com 23% desse potencial, a do Tocantins (10,6%) e a do São Francisco (10%); já as bacias do Uruguai e do Atlântico Leste representam cerca de 5% cada uma e as demais (Atlântico Sudeste e Atlântico Norte/Nordeste) somam juntas apenas 5% do referido potencial.

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são as usinas com potência instalada superior a 1 MW e igual ou inferior a 30 MW, que, para entrarem em funcionamento, devem atender as exigências da ANEEL, pois geralmente procuram atender demandas próximas aos centros de carga. Atualmente, de acordo com a Agência, tem-se autorização para 3.669,30 MW em PCHs no país. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil tem potencial para 9.800 MW em pequenos aproveitamentos hidráulicos (COLDEBELLA et al., 2006).

Ao contrário das grandes e médias hidrelétricas, as PCHs não causam impactos socioambientais da mesma magnitude. A menor área alagada e a menor necessidade de deslocamento de populações reduz drasticamente os problemas geralmente enfrentados em grandes projetos. Outras vantagens são custos menores, acarretando em preço de energia também menor, e também a utilização do reservatório por populações adjacentes (SIMIONI, 2006).

2.2.2 Energia Eólica

A energia eólica, gerada pela força dos ventos serve tanto para produção de energia elétrica, através das turbinas eólicas, como para realização de trabalhos mecânicos (bombeamento e moagem de grãos), através de cata-ventos. Em nosso país, as atividades relacionadas ao

potencial eólico tiveram início nos anos 1990 no Ceará e em Fernando de Noronha (PE). De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, o potencial do país para o setor é de 143.000 MW, sendo que 7.694,05 MW já foram autorizados, porém, apenas 26,8 MW estão em operação, o qual 65% deste total está concentrado no Ceará (COLDEBELLA et al., 2006).

Guerra e Youssef (2012, p. 19) assinalam que no Brasil, particularmente na região Nordeste, “a energia eólica é uma alternativa para complementar a hidroeletricidade, já que o período com maior regime de ventos ocorre quando há baixa precipitação de chuvas”. Além do mais, o maior potencial eólico brasileiro encontra-se nessa região. O litoral do Estado do Rio Grande do Sul é também considerado bastante favorável, assim como o litoral norte do Estado do Rio de Janeiro.

Segundo Tolmasquim (2012), a energia eólica tem ganhado grande espaço no cenário brasileiro de energias renováveis, e apresentado significativa redução de custo ao longo dos últimos anos. O mercado de geração de energia eólica tem surpreendido e ganhará patamar de destaque, para o autor, aumentando de 1% para 7% de participação até 2020.

O mercado de energia eólica é o que ostenta o maior potencial de crescimento dentre as chamadas fontes alternativas de energia, a uma taxa média anual de 40% no mundo. Atualmente, com os avanços tecnológicos e produção em larga escala, essa tecnologia já é considerada economicamente viável para competir com as fontes tradicionais de geração de eletricidade em países como Alemanha, Dinamarca, EUA, Portugal e Espanha. Outrossim, ainda é grande o potencial eólico a ser explorado em diversos países, principalmente no Brasil (GUERRA; YOUSSEF, 2012).

A maior vantagem da energia eólica é o seu menor custo socioambiental, que acarreta poucos impactos, pois não emite gases poluentes, a não ser indiretamente, na produção de equipamentos e materiais. Assim, contribui para a redução de emissões de GEE. Cada 10 MW de energia eólica, produzida com a tecnologia já disponível, evita a emissão de mais de 20 mil toneladas de carbono por ano (SIMIONI, 2006).

Segundp Tolmasquim (2003, p. 2180, “o aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica apresenta, como toda tecnologia de produção de energia, algumas características ambientais desfavoráveis como, por exemplo: impacto visual, ruído audível, interferência eletromagnética, ofuscamento e danos à fauna, ainda que em pequena escala”.

Sendo assim, o alto custo está sendo rompido por uma tecnologia que proporciona, hodiernamente, turbinas com vida de 20 anos a custos cada vez mais acessíveis, transformando a energia eólica numa forma altamente competitiva de geração de energia, indicando, assim, “uma prova clara do amadurecimento que a tecnologia de turbinas eólicas atingiu” (MONTENEGRO, 2000).

2.2.3 Energia Solar

Ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte da energia solar manifesta-se sob a forma de luz visível de raios infravermelhos e de raios ultravioleta. Assim, é possível captar essa luz e transformá-la em alguma forma de energia utilizada pelo homem: térmica ou elétrica. São os equipamentos utilizados nessa captação que determinam qual será o tipo de energia a ser obtida (ANEEL, 2008).

De acordo com Simioni (2006), há três formas de uso de energia solar: 1) o uso direto, vinculado, sobretudo, ao uso doméstico, como aquecimento de piscinas, caixas d’água, luminosidade (arquitetura solar) – esta é denominada energia solar passiva; 2) a energia solar ativa, que pode ser térmica (ou heliotérmica), onde, de forma direta aquece a água, gerando vapor, que, por sua vez, movimentará geradores; 3) a fotovoltaica, onde se produz eletricidade a partir de placas coletoras, que pode ser utilizada diretamente ou armazenada em baterias.

Para a produção de energia elétrica existem dois sistemas: o heliotérmico e o fotovoltaico. No primeiro, a irradiação solar é convertida em calor, que é utilizada em usinas termelétricas para a produção de eletricidade. O processo completo compreende quatro fases: coleta da irradiação, conversão em calor, transporte e armazenamento e, finalmente, conversão em eletricidade. Para o aproveitamento da energia heliotérmica é necessário um local com alta incidência de irradiação solar direta, o que implica em pouca intensidade de nuvens e baixos índices pluviométricos, como ocorre no semiárido brasileiro (ANEEL, 2008).

O segundo incide diariamente sobre a superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta em todo um ano. Assim, por meio de efeito fotovoltaico a energia contida na luz do sol pode ser convertida diretamente em energia elétrica. Para Montenegro (2000, p. 13):

Este método de conversão energética apresenta como grandes vantagens sua extrema simplicidade, a inexistência de qualquer peça mecânica móvel, sua característica modular (desde mW até MW ou até mesmo GW), os curtos prazos de instalação e posta em marcha envolvidos o elevado grau de confiabilidade dos sistemas e sua baixa manutenção. Além disto, sistemas solares fotovoltaicos representam uma fonte silenciosa, não poluente e renovável de energia elétrica bastante adequada à integração no meio urbano, reduzindo quase que completamente as perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumo. (MONTENEGRO, 2000, p. 13).

O silício, conforme Guerra e Youssef (2012, p. 22), “é o material predominantemente utilizado em sistemas fotovoltaicos no mundo e o país possui 90% das reservas mundiais economicamente aproveitáveis. A tecnologia hoje é baseada em ‘bolachas de silício’ (silicon wafers), mas já existe uma segunda geração de filmes finos (thin films PV technologies)”.

Montenegro (2000) apresenta alguns dados, onde para cada 1 m³ de coletor solar instalado, é possível:

- Economizar 55 kg de GLP/ano;
- Economizar 66 litros de diesel/ano;
- Evitar a inundação de cerca 56 m² para geração elétrica;
- Eliminar anualmente o consumo de 215 kg de lenha.

2.2.4 Biomassa

O termo biomassa refere-se a uma série de produtos e subprodutos agrícolas e florestais, assim como resíduos diversos de origem animal e humana (RSU – resíduos sólidos urbanos, e lodo de ETEs – estações de tratamento de esgoto; gás de aterro, de ETEs e de reatores de resíduos alimentares). Pode ser utilizada em termoelétricas de forma direta, através de combustão, ou de forma indireta, através de processos de gaseificação, liquefação ou na forma de biocombustíveis (SIMIONI, 2006). Sganzerla (1983) afiança que todos os materiais que têm propriedade de se decomporem por efeito biológico, isto é, pela ação de diferentes bactérias, são considerados biomassas.

Até o início do século XX, a biomassa era tida como a principal fonte energética, a partir da chamada “era do petróleo” que a biomassa energética ficou praticamente esquecida (ROSILLO-CALLE, 2000).

Sendo assim, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (ANEEL, 2008).

Conforme Coldebella et al. (2006), estima-se a existência de dois trilhões de toneladas de biomassa no globo terrestre, ou seja, cerca de 400 toneladas per capita, o que corresponde a oito vezes o consumo de energia primária no mundo, atualmente de 400 EJ/ano. A biomassa pode ser utilizada diretamente em fornos ou caldeiras, porém sua utilização em sistemas de cogeração de eletricidade vem sendo bastante difundida (COLDEBELLA et al., 2006).

De acordo com estimativas da União da Indústria de Cana de Açúcar de São Paulo (Unica), em 2020 a eletricidade produzida pelo setor poderá representar 15% da matriz brasileira, com a produção de 14.400 MW médios (ou produção média de MWh ao longo de um ano), levando-se em conta tanto o potencial energético da palha e do bagaço quanto a estimativa de produção da cana, que deverá dobrar em relação a 2008, e atingir 1 bilhão de toneladas. Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, o maior potencial de produção de eletricidade encontra-se na região Sudeste, particularmente no Estado de São Paulo, e é estimado em 609,4 milhões de gigajoules (GJ) por ano; na sequência estão Paraná (65,4 milhões de GJ anuais) e Minas Gerais (63,2 milhões de GJ anuais) (ANEEL, 2008).

Em relação às tecnologias de conversão energética da biomassa, Goldemberg (2009, p. 582-583) salienta que:

Existe um grande número de tecnologias de conversão energética da biomassa, adequadas para aplicações em pequena e grande escalas. Elas incluem gaseificação, métodos de produção de calor e eletricidade (cogeração), recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos e gás de aterros sanitários além dos biocombustíveis para o setor de transportes (etanol e biodiesel).

Dessa maneira, o uso de combustíveis derivados da biomassa traz potencialmente algumas vantagens: as eficiências de conversão da biomassa em eletricidade poderiam ser maiores devido à maior eficiência de combustão e à maior eficiência dos equipamentos que podem ser empregados na geração de potência em si – motores de combustão interna (MCI), turbinas a gás (TG), e, no futuro, as células à combustível. Devido à melhor combustão, as emissões atmosféricas absolutas podem ser menores, enquanto, também, em virtude da maior eficiência de geração elétrica menores emissões por unidade de energia elétrica gerada, devem ser verificadas (TOLMASQUIM, 2003).

Montenegro (2018) destaca como grande vantagem o uso da biomassa ter a possibilidade de aproveitar resíduos de baixo ou nenhum custo para geração de energia, além de apresentar aspecto ambiental favorável, já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera geralmente é compensada pela absorção no plantio da nova biomassa.

Rererente à biomassa de cana-de-açúcar, estima-se que para o Brasil atender à futura demanda mundial por etanol em 2025 (para substituir 10% da demanda por gasolina) “seriam necessários 35 milhões de hectares de novos canaviais, cuja expansão se daria sem substituição de culturas, sem necessidade de irrigação, apenas utilizando a disponibilidade existente de terras segundo critérios do estudo elaborado pelo Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp” (GUERRA; YOUSSEF, 2012, p. 18).

Segundo a ANEEL (2008), a cana-de-açúcar é um recurso com grande potencial dentre as fontes de biomassa para geração de eletricidade existente no país, por meio da utilização do bagaço e da palha. A participação é basilar não só para a diversificação da matriz elétrica, mas também porque a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. A eletricidade fornecida nesse período auxilia, portanto, a preservação dos níveis dos reservatórios das UHEs.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também outros países. Considerado um dos principais causadores de problemas ambientais no agronegócio, os dejetos gerados da criação de animais estão sendo aproveitados para a geração de gás combustível e fertilizante, onde esta matéria orgânica é utilizada como substrato pelas Arqueas metanogênicas (bactérias formadoras de gás metano), responsáveis pela produção de biogás (COLDEBELLA et al., 2006).

Farret (1999) relata que o uso dos resíduos e dejetos animais em biodigestores pode prover a energia necessária para iluminação, aquecimento e a movimentação de motores. Essa energia se dá através do aproveitamento do biogás, que é originado da decomposição do material orgânico, com alto poder de combustão, podendo ser utilizado para movimentar geradores de energia elétrica. Após ser digerido, o material orgânico processado no biodigestor pode ser empregado como adubo. Isto é, tal alternativa não só é viável do ponto de vista econômico, já que proporciona economia e gera novas receitas para o agricultor, como possuem um potencial de redução de 80% das cargas poluentes que hoje são lançadas *in natura* no meio ambiente.

2.3 PANORAMA DA GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

A Norma Técnica nº 10.0042004¹, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004, p. 1).

A intensa industrialização e a urbanização crescente no Brasil nas últimas décadas acarretaram múltiplos problemas de degradação

¹ Posteriormente, a Lei nº 12.305, de 2010, instui Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual indica resíduo sólido é: “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

ambiental. Destaca-se, assim, o acelerado crescimento quantitativo e a multiplicidade qualitativa dos resíduos sólidos urbanos como uma das consequências importantes desse fenômeno. Apesar da consciência da população e das técnicas de valorização e de tratamento dos resíduos urbanos, os problemas de gerenciamento desses materiais no Brasil são substanciais (CASTILHOS et al., 2010).

Segundo relatório do Banco Mundial (2012)², a quantidade de RSU, subproduto intrínseco ao estilo de vida urbano, cresce mais rápido do que a taxa de urbanização. Em 2002, 2,9 bilhões de pessoas habitavam os centros urbanos, onde a geração per capita de RSU era de 0,64 kg por dia. Já em 2012, eram três bilhões habitantes com geração de 1,2 kg por pessoa por dia. A estimativa para o ano de 2025 é de que o número de habitantes nos grandes centros aumente para 4,3 bilhões de pessoas, com geração per capita de 1,42 kg de RSU por dia (FERREIRA, 2015).

O conhecimento sobre os tipos e fontes de resíduos sólidos, além da composição e taxa de geração, é básico para o projeto e operação das unidades que integram o sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos. Assim, numa dada comunidade, as fontes de resíduos sólidos, via de regra, estão relacionadas ao uso do solo e zoneamento, e a classificação das categorias de resíduos se enquadra, comumente, nas seguintes fontes: residencial, comercial, institucional, resíduos da limpeza pública, de construção e demolição, resíduos das estações de tratamento e resíduos agrícolas (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

Dessa maneira, os resíduos sólidos urbanos são um dos maiores problemas ambientais, pois a sua má disposição causa enchentes, entope bueiros e diminui a vazão de água. Além disso, faltam locais para disposição desses resíduos e o recolhimento e alocação correta representam um gasto público que não gera retorno financeiro. Entretanto, a geração de resíduos é intrínseca à existência humana, de forma que se faz necessário buscar alternativas e mecanismos que amenizem o problema de forma mais saudável, limpa e sustentável (OLIVIERA, 2011).

No contexto de gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos, a Lei nº 12.305, de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e prevê a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente,

² Disponível em:

<http://siteresources.worldbank.org/EXTANNREP2012/Resources/8784408-1346247477142/AnnualReport2012_Pt.pdf>.

citado pela Fundação Nacional do Meio Ambiente (2001 apud OSCO et al., 2013, p. 220):

[...] o plano de gerenciamento é um documento que apresenta a situação atual do sistema de limpeza urbana, com a pré-seleção das alternativas mais viáveis, com o estabelecimento de ações integradas e diretrizes sob os aspectos ambientais, econômicos, financeiros, administrativos, técnicos, sociais, elegais para todas as fases de gestão dos resíduos sólidos, desde a sua geração até a destinação final.

Um dos objetivos fundamentais estabelecidos pela Lei é a ordem de prioridade para a gestão dos resíduos, que deixa de ser voluntária e passa a ser obrigatória: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Desse modo, institui-se a diferença entre resíduo e rejeito, a saber: “resíduos devem ser reaproveitados e reciclados; e apenas os rejeitos devem ter disposição final” (BRASIL, 2010).

O último panorama realizado pela ABRELPE (2016) apresenta números referentes à geração RSU no país e revela um total anual de quase 78,3 milhões de toneladas de resíduos gerados, resultando uma queda de 2% no montante em relação a 2015. O índice de cobertura de coleta do montante gerado foi registrado em 91% para o país, resultando em um montante coletado de 71,3 milhões de toneladas. O índice apresentou um pequeno avanço comparado ao ano anterior, porém evidencia que 7 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio.

Segundo Schalch et al. (2002, p. 7-8):

Essa enorme quantidade de resíduos não constitui somente um problema de ordem estética, mas representa também uma séria ameaça ao homem e ao meio ambiente, diminuindo consideravelmente os espaços úteis disponíveis. No Brasil, os inúmeros episódios críticos de poluição, relacionados com a ausência de tratamento e má disposição dos resíduos, registram principalmente a contaminação do solo e dos recursos hídricos por metais pesados, solventes orgânicos halogenados e resíduos de defensivos agrícolas. O

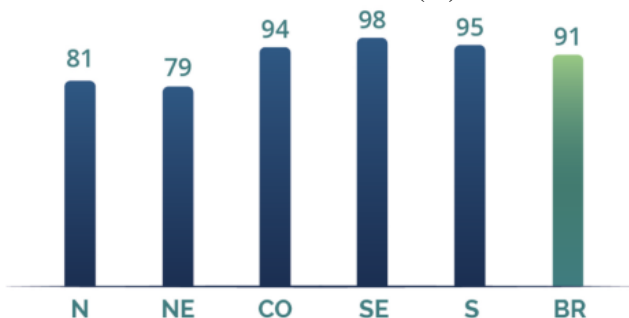
autor afirma que a ausência de definições e diretrizes nos três níveis de governo associa-se à escassez de recursos técnicos e financeiros para o equacionamento do problema, além das dificuldades na aplicação das determinações legais.

Os índices de disposição final de RSU apresentaram retrocesso no encaminhamento ambientalmente adequado dos RSU coletados, passando de 58,7% em 2015 para 58,4% do montante anual ou 41,7 milhões de toneladas enviadas para aterros sanitários em 2016. Segundo a ABRELPE (2016), o caminho da disposição inadequada continuou sendo trilhado por 3.331 municípios brasileiros, que enviaram mais de 29,7 milhões de toneladas de resíduos, correspondentes a 41,6% do coletado em 2016, para lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, o que representa 81 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde, sendo depositados de maneira inadequada no país.

A concepção tradicional dos aterros sanitários permite um confinamento seguro dos RSU em termos de controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública. Contudo, além da promoção de um adequado confinamento, há, nos dias atuais, um crescente interesse em se estabelecer a aceleração e o controle da biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, já que traz vantagens econômicas, operacionais e ambientais (CASTILHOS JUNIOR, 2006).

O panorama realizado pela ABRELPE (2016) destaca que a cobertura de coleta nas regiões e no Brasil indicou um ligeiro avanço. Contudo, a região Nordeste ainda apresenta o menor índice, de 79%; já a região Sudeste continua respondendo por cerca de 52,7% do total resíduos coletados no Brasil e apresenta o maior índice de cobertura de coleta do país, com 98%, conforme Gráfico 5.

Gráfico 5 - Índice de cobertura da coleta de RSU (%)



Fonte: ABRELPE (2016).

A pesquisa direta realizada pela ABRELPE (2016) permitiu projetar que 3.878 municípios apresentam alguma iniciativa de coleta seletiva, porém, muitas dessas atividades se resumem à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, não abrangendo toda a população do município.

Posto isso, de acordo com Leite e Povinelli (1999, p. 230):

O tratamento ou industrialização dos resíduos sólidos, é o conjunto de atividades e processos que objetiva promover a reciclagem de alguns de seus componentes, como plástico, papelão, metal e vidro, e a transformação da matéria orgânica putrescível, que é o seu maior constituinte em compostos orgânicos com características de agente condicionador de solo e fonte alternativa de energia. (LEITE; POLVINELLI, 1999, p. 230).

Assim, o tratamento dos RSU, sob um ponto de vista ambiental, continua sendo um desafio, pois a disposição final em aterro sanitário está sendo cada vez mais reservada àquela fração dos resíduos que já foram pré-tratados ou que não tenham alternativa de reutilização. Restrições ao aterramento de resíduos, como a normativa europeia – Diretiva 1999/31/EC³, de 29 de abril de 1999 –, têm levado ao desenvolvimento de tecnologias para recuperação de certas frações e a produção de outras que possam ser aterradas com mais segurança. Essas tecnologias incluem a compostagem, a pirólise e gaseificação em

³ Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>>.

combinação com a coleta com separação na fonte, a triagem manual ou mecânica e a digestão anaeróbia (DA). Esta última, segundo Reichert (2005), é um dos tratamentos que mais tem evoluído nos últimos 15 anos, principalmente na Europa.

Os RSU no Brasil são compostos, conforme Leite e Polvinelli (1999), essencialmente, por umidade, matéria orgânica putrescível, plástico, papel e papelão. Para os autores, “o percentual de umidade gira em torno de 50% (em peso), dependendo da época do ano e dos hábitos e costumes da população, enquanto os 50% restantes que correspondem à fração sólida, estão presentes nos demais constituintes físico-químicos” (LEITE; POVINELLI, 1999, p. 230).

Feitas essas considerações, no próximo item refletiremos sobre os resíduos orgânicos.

2.4 RESÍDUOS ORGÂNICOS

Os resíduos sólidos orgânicos constituem a parte putrescível e não putrescível dos resíduos sólidos urbanos, dos resíduos sólidos rurais ou agrícolas, de alguns tipos de resíduos industriais e resíduos provenientes de estações de tratamento de água (ETAs), estações de tratamento de esgoto doméstico (ETEs), da coleta e processamento de resíduos recolhidos nas áreas urbanas, como restos de alimentos, papel, papelão, cortes de gramado, podas de árvores, resíduos gerados de indústrias de alimentos e resíduos gerados de atividades agrícolas, como ração, adubos, restos de colheita, entre outros (SILVA, 2006).

Ao analisar a composição percentual média do teor de umidade de determinados tipos de resíduos sólidos, Leite et al. (2009, p. 191) assinala que:

[...] o percentual de umidade é quantitativamente mais representativo em resíduos sólidos originados de restos de alimentos e de papel. Os resíduos advindos das atividades domiciliares apresentam significativo percentual de umidade, favorecendo a sua utilização no processo de bioestabilização aeróbia ou anaeróbia.

Dessa maneira, no decorrer o processo de biodecomposição de matéria orgânica a presença de água favorece a condução de enzimas e de outros metabólitos microbianos, colaborando, então, para o

metabolismo dos microrganismos, evidenciando-se, sobretudo, como fator de importância na otimização da relação custo/benefício dos processos de tratamento de RSU resíduos sólidos orgânicos (LEITE et al, 2009), em que o teor de umidade é função da biodecomposição da fração orgânica putrescível, das condições climáticas e do tipo de coleta (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

Estima-se que no Brasil os resíduos sólidos orgânicos putrescíveis constituem, em média, 55% (percentual em peso) dos resíduos sólidos urbanos produzidos. Esse material orgânico quando lançado no meio ambiente gera percolado, que é responsável pela contaminação dos corpos aquáticos e do solo, o qual apresenta uma elevada concentração de demanda química de oxigênio (DQO) e, em muitos casos, dependendo do tipo de resíduo, a presença de metais pesados. Os resíduos orgânicos são também responsáveis pela poluição do ar através da geração de gases tóxicos provenientes da degradação do material orgânico na digestão anaeróbia (SILVA, 2006).

Segundo relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO) de 2013, cerca de um terço dos alimentos produzidos para consumo humano, aproximadamente 1,3 bilhão de toneladas, são desperdiçados anualmente. Avalia-se que a emissão de GEE seja equivalente a 3,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono. De acordo com os preços de produção, calcula-se ainda a perda de 750 bilhões de dólares, o desperdício de 250 quilômetros cúbicos de água e a supressão de 1,4 bilhão de hectares de ecossistemas naturais em função da agropecuária (FERREIRA, 2015).

Uma das alternativas para resolver o problema da disposição dos resíduos de forma sustentável é o aproveitamento do gás proveniente de sua decomposição anaeróbia, onde o subproduto gerado pode representar uma importante opção de matriz energética. Trata-se, então, do biogás, proveniente da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos (OLIVIERA, 2011).

2.5 BIOMETANIZAÇÃO

2.5.1 Princípios da digestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbia, ou digestão anaeróbia, é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio molecular livre, no qual diversas espécies de microrganismos interagem para converter compostos orgânicos complexos em CH₄, compostos inorgânicos como

CO₂, N₂, NH₃, H₂S e traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular (LEITE et al., 2009).

Esse processo é muito comum na natureza e ocorre, por exemplo, em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais. Por meio de diversos microrganismos, a matéria orgânica é convertida em biogás quase por completo. Além disso, são produzidas certas quantidades de energia (calor) e nova biomassa.

A digestão anaeróbia é um processo fermentativo a que são submetidos diversos tipos de resíduos orgânicos (urbanos, rurais ou industriais), com uma ou mais das seguintes finalidades: tratamento dos resíduos (remoção da matéria orgânica poluente e dos microrganismos patogênicos), produção de biogás e produção de biofertilizantes mais estáveis, mais ricos em nutrientes assimiláveis e com melhores qualidades sanitárias em relação ao material original. Esse processo envolve a decomposição de materiais orgânicos e inorgânicos na ausência de oxigênio e vem sendo utilizado por mais um século para a estabilização de sólidos provenientes de águas residuárias e resíduos industriais (SOUZA, 1984; METCALF; EDDY, 1979; GRADY JUNIOR et al., 1998).

Segundo Goldember (2009, p. 584):

A energia do biogás da degradação anaeróbia em aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto e terrenos de tratamento de estrume é considerada uma opção de baixo custo, uma vez que pode se beneficiar de créditos de carbono disponíveis através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Essa forma de energia de biomassa não só substitui a combustão de combustíveis fósseis, mas reduz as emissões de metano, um gás de efeito estufa mais potente do que o dióxido de carbono (GOLDEMBERG, 2009, p. 584).

Entre as diversas características favoráveis da tecnologia anaeróbia é possível mencionar: a baixa produção de sólidos; baixo consumo de energia; baixos custos de implantação e operação; menores exigências de nutrientes; tolerância a elevadas cargas orgânicas; e possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos e baixos tempos de detenção hidráulica, conferem aos reatores anaeróbios um grande potencial de aplicabilidade (CHERNICHARO, 1997; GRADY JUNIOR et al., 1998).

Chernicharo (1997, p. 25) afirma que em sistemas anaeróbios constata-se que:

[...] em grande parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em metano (cerca de 50 a 70%), que é removido da fase líquida e deixa o reator na forma gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), vindo a se constituir no lodo excedente do sistema. Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se, via de regra, mais concentrado e com melhores características de desidratação. O material não convertido em biogás, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (10 a 30%).

Dessa forma, a digestão anaeróbia representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, onde cada microrganismo tem uma função essencial. As arqueas metanogênicas, para o autor, desempenham duas funções primordiais: elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção do carbono orgânico do ambiente anaeróbio, além de utilizarem o hidrogênio, favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, o qual é convertido a metano (CHERNICHARO, 1997).

O processo de conversão da matéria orgânica é normalmente considerado um processo de dois estágios. No primeiro, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias, denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, convertem os orgânicos complexos, de maior peso, em compostos orgânicos de menor peso, adequados para uso como fonte de energia e carbono celular. Compostos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, são hidrolisados, fermentados e biologicamente convertidos em materiais orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis (CHERNICHARO, 1997; METCALF; EDDY, 1979).

No segundo estágio, ocorre a conversão dos ácidos orgânicos, gás carbônico e hidrogênio em produtos finais gasosos: o metano e o gás carbônico. Essa conversão é efetuada por um grupo especial de bactérias, denominadas formadoras de metano, as quais são estritamente anaeróbias. As arqueas metanogênicas dependem do substrato fornecido pelas bactérias acidogênicas, configurando, portanto, uma interação

comensal. Uma vez que as arqueas metanogênicas são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, a sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo (CHERNICHARO, 1997; METCALF; EDDY, 1979).

Embora o processo de digestão anaeróbia seja simplificada considerada como duas fases, este pode ser subdividido em quatro fases principais, como apresenta Chernicharo (1997) (Gráfico 6):

1) Hidrólise:

O primeiro estágio da degradação anaeróbia é a hidrólise, em que compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em substâncias menos complexas, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos. Essa conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é realizada através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Na anaerobiose, a hidrólise dos polímeros usualmente ocorre de forma lenta, sendo vários os fatores que podem afetar o grau e a taxa em que o substrato é hidrolisado (CHERNICHARO, 1997).

2) Acidogênese:

Os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são, então, excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas. Os tipos de compostos formados nesse estágio dependem da concentração do hidrogênio intermediário (CHERNICHARO, 1997).

Segundo Silva (2006), no processo de acidogênese a maioria das bactérias são anaeróbias obrigatórias, existindo, também, espécies facultativas, onde metabolizam o material orgânico pela via oxidativa. A população acidogênica representa cerca de 90% da população bacteriana total dos digestores anaeróbios e apresentam reduzidos tempos de duplicação, o que faz com que essa etapa, ao contrário da hidrólise, não seja uma etapa limitante, no que diz respeito à duração do processo de digestão (ROCHA, 2014).

3) Acetogênese:

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as arqueas metanogênicas. Isso posto, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato (CHERNICHARO, 1997).

O acetato pode ser produzido pela fermentação de compostos orgânicos, mas também pela acetogênese, em que ocorre um fenômeno chamado de transferência interespecie de hidrogênio, que é a simbiose entre os dois grupos de microrganismos, as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio e as arqueas metanogênicas consumidoras de hidrogênio.

Nesse ponto, a pressão parcial do hidrogênio é decisiva. Por razões de cunho energético, uma concentração de hidrogênio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogênese. A consequência é o acúmulo de ácidos orgânicos que inibem a metanogênese, tais como o ácido propiônico, ácido isobutírico, ácido isovalérico e ácido capríco. Por essa razão, as bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) têm de estar estreitamente associadas às arqueas metanogênicas.

4) Metanogênese:

A metanogênese é a etapa final do processo de conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono. As bactérias responsáveis por essa conversão são estritamente anaeróbias e chamadas de metanogênicas. Coletivamente, elas são identificadas na literatura como “formadoras de metano”. Muitos dos organismos metanogênicos identificados nos digestores anaeróbios são semelhantes aos encontrados nos estômagos dos animais ruminantes e nos sedimentos orgânicos retirados de lagos e rios. Os principais microrganismos identificados incluem as *methanobacterium*, *methanobacillus*, *methanococcus* e *methanosarcina* (METCALF; EDDY, 1979).

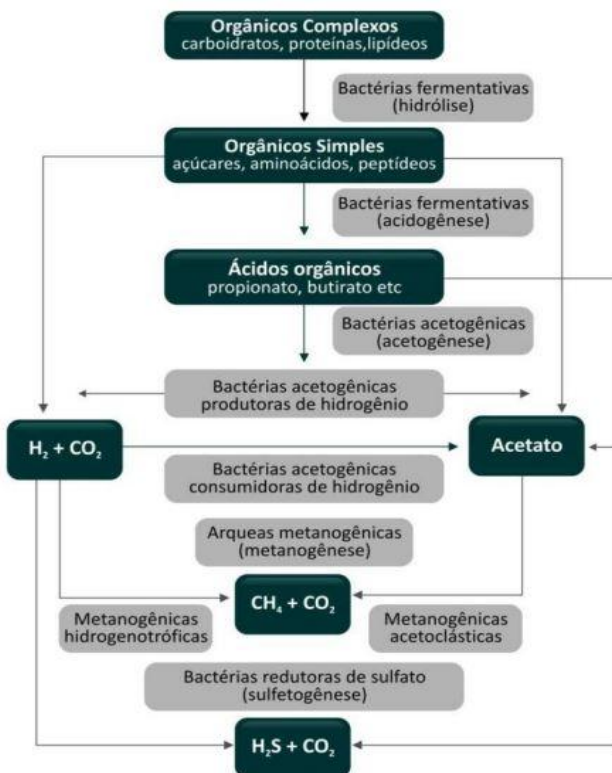
Chernicharo (1997) infere que as metanogênicas utilizam apenas um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético

ou metanol, e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono, como a seguir:

- Bactérias utilizadoras de acetato (acetoclásticas);
- Bactérias utilizadoras de hidrogênio (hidrogenotróficas).

Segundo Metcalf e Eddy (1979), as bactérias mais importantes do grupo metanogênico são aquelas que degradam o ácido acético e o ácido propiônico. Eles têm taxas de crescimento muito lentas, como resultado seu metabolismo é, geralmente, considerado limitante na taxa de tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos. É nesse passo que a estabilização real dos resíduos é realizada pela conversão dos ácidos orgânicos em metano e dióxido de carbono. Assim, o gás metano é altamente insolúvel e sua saída da solução representa uma estabilização real dos resíduos.

Gráfico 6 - Fases da Digestão Anaeróbia



Fonte: Chernicharo (1997).

2.5.2 Codigestão

A codigestão é um processo no qual dois ou mais resíduos são misturados e tratados ao mesmo tempo. O objetivo principal é acelerar o processo de degradação de ambos os resíduos, ou de algum que, especificamente, seja mais resistente. Esse método é muito utilizado para melhorar o rendimento da digestão anaeróbia de resíduos sólidos através da mistura de diferentes cossubstratos, estabelecendo um equilíbrio nutricional. A codigestão pode se dar pela diluição do RSU, a mistura com outro substrato ou ambos (GOMES, 2014; MATA-ALVAREZ; MACÉ; LIBRES, 2000).

Segundo Braun e Wellinger (2002), as vantagens em termos processuais da codigestão se refletem, particularmente, nos seguintes aspectos:

- aumento na produção de metano: a digestão de diversos substratos ao invés de um único se reflete na produção de metano de várias formas. Por um lado, tende-se a equilibrar a razão C:N:P (Carbono/Nitrogênio/Fósforo) e as necessidades de minerais e metais. Por outro, as características dos cossubstratos podem se complementar, de forma a minimizar efeitos inibidores ou tóxicos que ocorreriam na degradação de um único substrato.
- otimização das qualidades reológicas da mistura a digerir: agregados de partículas, materiais flutuantes, resíduos com propriedades dinâmicas pouco favoráveis podem ser mais facilmente digeridos depois de misturados com outros substratos. A mistura será mais homogênea se existirem substratos líquidos ou substratos com elevado teor de água como lodos ou chorumes.

2.5.3 Relação Inóculo/Substrato

A produção de biogás depende diretamente das condições de manutenção e operação do biodigestor e do resíduo (CERVI; ESPERANCINI; BUENO, 2010). De acordo com Malinowsky (2016, p. 39):

O ecossistema anaeróbio em um reator não se instala imediatamente após a inserção dos resíduos, por isso a importância da inoculação para reduzir o tempo de bioestabilização do reator. A inoculação consiste em inserir certa quantidade de determinada comunidade microbiana com

atividade metanogênica conhecida em um reator a fim de acelerar o processo de digestão anaeróbia, como por exemplo, lodo de reator anaeróbio ativo de ETEs. (MALINOWSKY, 2016, p. 39).

Barcelos (2009) também afirma que uma das desvantagens relacionadas ao uso de biodigestores se refere ao longo tempo necessário para bioestabilização do material. Nesse sentido, a adição de inóculos tem mostrado resultados satisfatórios, já que propicia o equilíbrio da relação Carbono/Nitrogênio, melhora a estrutura física do substrato, a densidade microbiana, o percentual de umidade, além de incorporar diversos outros tipos de agente tamponantes, proporcionando redução significativa do tempo de retenção de sólidos. Além disso, a digestão com inóculo melhora substancialmente a rentabilidade de produção de biogás.

Quanto aos tipos de substratos, são considerados vantajosos ao meio ambiente àqueles que não implicam custos extras, razão pela qual o uso deve ser incentivado. Como exemplo é o esterco líquido: seu uso para gerar biogás não apenas racionaliza o aproveitamento da biomassa disponível, mas também evita as emissões que ocorreriam em seu armazenamento convencional. Por isso, em vez de utilizar culturas energéticas, deve-se privilegiar, principalmente, as misturas de resíduos e restos orgânicos (p. ex. dejetos animais, resíduos da indústria alimentícia). Do ponto de vista ecológico, os resíduos e restos orgânicos também podem ser um bom complemento à digestão de biomassas dedicadas.

2.6 DIGESTORES ANAERÓBIOS

Um biodigestor ou, simplesmente, digestor, pode ser definido como uma câmara de fermentação, onde a biomassa sofre a digestão pelas bactérias anaeróbicas, produzindo gás. Trata-se de um recipiente fechado, construído de alvenaria, concreto ou outros materiais, onde é colocado o material a ser digerido. Existem vários tipos de digestores, destacando-se o Chinês e o Indiano, porém todos eles visam basicamente criar condição anaeróbica, isto é, total ausência de oxigênio na biomassa a ser digerida. Tanto o digestor Indiano como o Chinês apresentam vantagens e desvantagens, mas o mais importante é que ambos são de tecnologia conhecida e de fácil operação. Como resultado dessa fermentação, ocorre a liberação de biogás e a produção de

biofertilizante. É possível, portanto, conceituar biodigestor como um aparelho destinado a conter a biomassa e seu produto: o biogás (ANDRADE et al., 2012; COMASTRI FILHO, 1981).

Os indianos foram os primeiros a usar a energia do biogás em grande escala. A literatura aponta que o primeiro digestor posto em funcionamento naquele país foi em 1900, na cidade de Bombaim (SGANZERLA, 1983). Segundo França Junior (2008), no modelo indiano (Figura 1 - **Biodigestor vertical (modelo indiano)**) a cúpula geralmente é feita de ferro ou fibra e se movimenta para cima e para baixo de acordo com a produção de biogás. Nesse tipo de biodigestor, o processo de fermentação acontece mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo, que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias; ocupa pouco espaço e a construção pode ser subterrânea, além disso, dispensa o uso de reforços, tais como cintas de concreto. Caso a cúpula seja de metal, deve-se fazer uso de uma boa pintura com um antioxidante. Por ser um biodigestor que fica no subsolo, é preciso ter cuidado para evitar infiltração no lençol freático. Desse modo, existem biodigestores feitos em concreto ou metal, coberto com lona vedada, a qual deve ter duas saídas, com duas válvulas, nas quais restos orgânicos são despejados.

Figura 1 - Biodigestor vertical (modelo indiano)



Fonte: França Junior (2008).

Já o modelo Chinês (Figura 2) é apresentado por Andrade et al. (2012) como sendo constituído quase que totalmente em alvenaria, dispensando o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo os custos, contudo, podem ocorrer problemas com vazamento de biogás, caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada. Assim, funciona com base no princípio de prensa hidráulica, onde há aumento da pressão do gás no interior do biodigestor, deslocando a biomassa, em sentido contrário, da câmara de fermentação para a caixa de saída, quando há descompressão.

Figura 2 - Biodigestor vertical (modelo chinês)



Fonte: França Junior (2008).

Há dois sistemas básicos de biodigestores: o contínuo e o intermitente. O primeiro, apropriado para a maioria das biomassas, recebe cargas diárias ou periódicas e descarrega a massa já fermentada automaticamente por vasos comunicantes em pleno funcionamento. O biodigestor de sistema intermitente, específico para materiais orgânicos de decomposição lenta e longo período de produção, recebe a carga total, retendo-a até complementar o processo de biodigestão, sendo, então, esvaziado e recarregado novamente. Este é construído geralmente com grandes dimensões (SGANZERLA, 1983).

Conforme Ferreira (2015, p. 32):

O regime de alimentação dos reatores é conduzido por fluxo contínuo ou por bateladas aplicadas ao reator. Via de regra, os reatores operados com fluxo contínuo, resultam em processos mais estáveis e com maior taxa de conversão de matéria orgânica em biogás, contudo, requerem maiores custos com a operação e a manutenção do conjunto de bombas e demandam mais energia em relação ao processo regido por bateladas. Os processos por batelada, apesar de suportarem maiores cargas orgânicas em relação ao fluxo contínuo, resultam em condições ambientais menos estáveis, reduzindo os rendimentos de produção de metano. (FERREIRA, 2015, p. 32).

Comastri Filho (1981) apresenta os seguintes tipos de digestores anaeróbios:

- *Digestores de batelada*: nesses tipos de digestores, a matéria-prima a ser fermentada é colocada no seu interior e, logo após, é feito o seu isolamento do ar para que seja realizada a digestão; o gás produzido é armazenado no próprio recipiente que serve de digestor ou em um gasômetro acoplado a este. Uma vez cessada a produção de gás, o digestor é aberto e retiram-se os resíduos (material não assimilado pelo processo); após a sua limpeza, é colocada nova quantidade de substrato.
- *Digestores contínuos*: nesse tipo de digestor, as matérias-primas usadas são líquidas ou semi-líquidas, que possuam decomposição relativamente fácil e que seja sempre disponível nas suas proximidades. A produção de gás e de resíduos é contínua. Existem vários modelos de digestores contínuos de acordo com o seu formato. De modo geral, os digestores contínuos se encontram divididos em dois tipos: vertical e horizontal, consoante ao seu posicionamento sobre o solo.
- *Digestor Vertical*: é um tanque cilíndrico, em alvenaria, concreto ou outros materiais. A matéria-prima é colocada na sua parte inferior com a saída do gás na parte superior, funcionando como acumulador de gás e como instrumento de vedação do digestor. Existem dois modelos básicos de digestores verticais: com uma câmara e com dupla câmara.

- *Digestor Horizontal*: consiste de uma câmara, com qualquer formato, desde que a altura ou profundidade seja inferior as outras dimensões (comprimento e largura), a qual é enterrada no solo ou não. A matéria-prima é colocada periodicamente em um dos lados do digestor. É frequentemente utilizado em regiões onde o lençol freático é muito superficial ou há afloramento de rochas, dificultando a construção.

Além de diversos modelos de digestores anaeróbios, os mesmos podem ser subdivididos conforme o seu sistema de digestão, em digestão anaeróbia seca e úmida.

Segundo FNR (2010), na digestão úmida, o substrato líquido pode ter um teor de matéria seca de até 12% (em massa). Como regra empírica, é válido o limite de 15% em massa para a bombeabilidade do meio. O aumento de matéria seca acima de 16% no biodigestor inviabiliza o bombeamento do material, sendo o processo denominado de digestão seca.

2.7 BIOGÁS

Conforme Hosseini e Wahid (2014), o biogás é uma mistura de gases oriunda da digestão anaeróbia de matéria orgânica, constituído por: CH_4 , CO_2 e pequena quantidade de outros gases como nitrogênio (N_2), gás sulfídrico (H_2S), monóxido de carbono (CO), gás amônia (NH_3), gás hidrogênio (H_2), gás oxigênio (O_2), vapor de água (H_2O) e, ocasionalmente, siloxanos.

O componente principal do biogás é o CH_4 . Este não tem cheiro, cor ou sabor, mas outros gases presentes no biogás lhe conferem um ligeiro odor de vinagre ou de ovo podre. Para o seu uso como combustível, deve-se estabelecer uma relação entre o biogás, com determinado teor de metano, e o ar, de modo a possibilitar uma queima eficiente (LIMA, 2007).

A produção total de biogás está ligada à quantidade de substrato consumido pelas bactérias durante o processo, sendo o substrato expresso através da DQO e pelos sólidos voláteis. A Tabela 1 - Rendimento de Biogás através da Digestão Anaeróbia, que segue, apresenta o rendimento de biogás obtido da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (MARTINS, 2017).

Tabela 1 - Rendimento de Biogás através da Digestão Anaeróbia

Substrato	Rendimento de CH₄ (L/kg de SV)	Referência
Frutas e vegetais	850	Forster-Carneiro et al. (2008)
RSU	530	Forster-Carneiro et al. (2008)
RSU	360	Vogt et al. (2002)
Restos de alimentos	396	Zhang et al. (2011)
Resíduos domiciliares	350	Ferrer et al. (2011)
Dejetos suínos	337	Ahn et al. (2009)
Resíduos ricos em lignina	200	Jayasinghe et al. (2011)

Fonte: Martins (2017).

O estudo da viabilidade de emprego do biogás normalmente se inicia pela avaliação de equivalência energética entre o biogás e o combustível a ser substituído. Além do poder calorífico, é basilar que se observem outras propriedades, como presença de contaminantes, acidez e pressão. Tais considerações contribuem para uma previsão adequada das adaptações necessárias ao emprego do biogás, quer seja como único recurso energético ou como combustível complementar (COSTA, 2006).

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado à concentração de metano existente na sua mistura gasosa, isto é, quanto maior a porcentagem de metano presente no biogás, maior será o seu potencial de geração de energia. Assim, tratando-se de uma mistura cuja composição é muito variável, importa conhecer as propriedades que lhe estão associadas e como estas podem influenciar o seu rendimento. Pela sua importância, destacam-se as seguintes propriedades do biogás (CCE, 2000 apud MONTE, 2010):

- Poder calorífico inferior (PCI): corresponde à energia libertada, de uma massa de combustível, sob a forma de calor, não incluindo a energia dispendida na vaporização da água presente no combustível. Esse parâmetro permite estimar a medida exata do conteúdo energético útil do combustível.
- Limites de inflamabilidade: correspondem às percentagens mínima e máxima de um combustível numa mistura ar/combustível para as quais essa mistura se inflama. São um parâmetro crítico na combustão com biogás devido à diluição do CH₄ com CO₂ e outros gases inertes.

Segundo Leite (2016), o poder calorífico é uma das características mais importantes de um combustível. A definição do poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor que é liberada pela combustão de uma unidade de massa. No Sistema Internacional, o poder calorífico é expresso em joules por grama (J/g) ou quilojoules por quilograma (kJ/kg), mas é comumente expresso em quilocaloria por quilograma (kcal/kg). O poder calorífico é dividido

entre superior e inferior: o primeiro, o superior, é aquele em que a combustão acontece a volume constante e a água formada na combustão é condensada e o calor que é derivado da condensação é recuperado; já o inferior, é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após a dedução das perdas com a evaporação da água (Tabela 2).

Tabela 2 - Variação do poder calorífico em relação a composição do Biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm ³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Avellar (2001).

A Tabela 3, que sucede, expõe comparações dos poderes caloríficos de diferentes fontes energéticas.

Tabela 3 - Comparação entre os poderes caloríficos de variadas fontes energéticas

Combustível	Massa Específica	Poder Calorífico	
	kg/Nm ³	Inferior kcal/kg	Superior kcal/kg
Petróleo	867	10.200	10.900
Carvão vapor	n.d.	4.000	4.460
Carvão metalúrgico	n.d.	7.425	7.700
Lenha	390	2.530	3.300
Cana de açúcar	n.d.	917	1.030
Óleo Diesel	851	10.180	10.750
Óleo combustível	999	9.547	10.900
Gasolina	738	10.556	11.230
GLP	552(liq.) 2,29(gás)	11.026	11.750
Nafta	704	10.462	11.320
Querosene	787	10.396	11.090
Gás canalizado	n.d.	4.230	4.700
Gás de coqueria	n.d.	4.400	4.500
Coque de carvão mineral	n.d.	6.900	7.300
Lixívia	2.100	n.d.	3.030
Carvão vegetal	250	6.115	6.800
Álcool anidro	791	6.400	7.090
Álcool hidratado	809	5.950	6.650
Bagaço de cana	n.d.	1.777	2.257
Gás de refinaria	0,78	8.272	8.800
Gás natural	n.d.	8.554	9.400

Fonte: Alves (2000).

As aplicações mais comuns para o biogás são o aquecimento e a geração de eletricidade. Além dessas aplicações, a utilização como combustível veicular e a injeção na rede de gás natural são aplicações que vêm atraindo interesse cada vez maior (ZANETTE, 2009), como assinalamos a seguir.

2.7.1 A Energia Elétrica

O aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica é feito a partir da sua utilização como combustível em motores de combustão interna e em turbinas a gás. Os motores de combustão interna geralmente apresentam maior eficiência de conversão do que as turbinas a gás. Entretanto, quando utilizadas em sistemas de cogeração (calor e

eletricidade), as turbinas a gás podem apresentar um aumento na sua eficiência pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração (MARTINS, 2017).

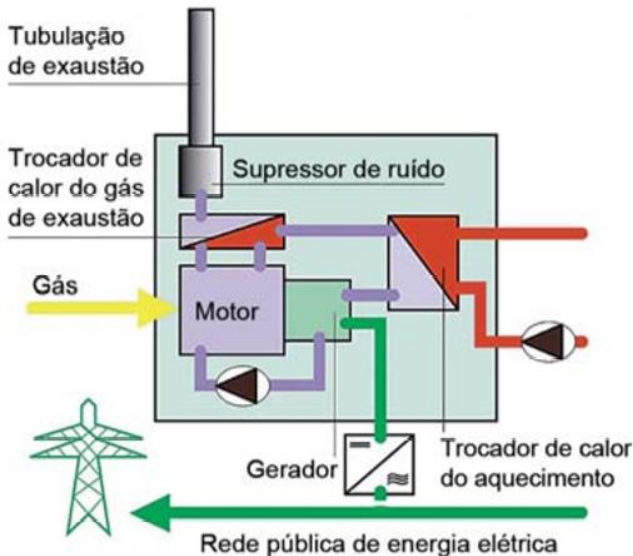
Nas turbinas a gás, o ar é sugado do ambiente e comprimido por um compressor. Esse ar atinge a câmara de combustão, que recebe o biogás e onde ocorre a queima, que provoca o aumento da temperatura e, por conseguinte, a expansão do volume. Os gases quentes atingem uma turbina, onde, então, dilatam-se e isso libera, consideravelmente, mais energia do que o necessário para movimentar o compressor. Esse excedente de energia não utilizado pelo compressor é dirigido a um gerador de energia elétrica (FNR, 2010).

Lobato (2011) destaca que, no âmbito do aproveitamento energético, os motores de combustão interna (MCI) têm sido utilizados com sucesso, dada sua flexibilidade de uso combustível e a possibilidade do aproveitamento do calor gerado pelos componentes do motor. Visto que, por mais eficiente que seja o processo de transformação do biogás em eletricidade, a maior parte da energia gerada é transformada em calor e perdida para o ambiente. Além disso, o autor ressalta quatro fontes de liberação de calor em motores de combustão interna que podem ser utilizadas:

- i. gás de exaustão;
- ii. água/ar do sistema de arrefecimento do motor;
- iii. água/ar do sistema de arrefecimento do óleo de lubrificação;
- iv. resfriamento do ar de sobrealimentação.

A cogeração é a geração simultânea de eletricidade e calor. Conforme as suas características, as usinas de cogeração se dividem em dois tipos: aquelas que produzem principalmente calor e aquelas com ênfase na produção de eletricidade. A variante para a produção prioritária de calor é preferível em função da sua maior eficiência. Na maioria dos casos, são utilizadas usinas de cogeração com motores de combustão acoplados a um gerador. Os motores operam a uma rotação constante, de forma que o gerador acoplado possa fornecer energia elétrica compatível com a frequência da rede. Para acionar o gerador ou gerar eletricidade, pode-se utilizar também microturbinas a gás, motores Stirling ou células de combustível como alternativas aos motores do ciclo Diesel (ignição por compressão) ou ciclo Otto (ignição por centelha) (FNR, 2010) (Figura 3).

Figura 3 - Esquema de uma usina de cogeração de energia elétrica



Fonte: Guia Prático do Biogás, 2010.

2.7.2 A Energia Térmica

A combustão do biogás tratado para a disponibilização de calor pode ser facilmente realizada, já que os queimadores utilizados são normalmente equipamentos universais que podem ser ajustados a qualquer tipo de gás (FNR, 2010).

O biogás pode ser empregado na produção direta de calor, sendo realizado por meio da sua queima direta. Esse processo pode ser utilizado em diferentes escalas de produção de gás, com sistemas de combustão adequados a esse combustível. Em casos mais específicos, como em algumas indústrias, o biogás pode ser utilizado como substituto do gás natural, porém é importante ressaltar que são necessários estudos para que essa substituição ocorra, uma vez que a composição dos gases é diferente (THIEME et al., 2015).

Como destacado por Ferreira (2015), a emissão direta de metano na atmosfera tem potencial poluidor cerca de 25 vezes superior ao CO_2 . Em função das reações químicas de combustão, o CH_4 é oxidado a CO_2 e água, o que implica em emissões neutras em carbono, ou seja, apenas é emitido o CO_2 , intrínseco ao ciclo biogeoquímico do carbono.

Também é comum utilizar o calor gerado a partir da queima do biogás em processos industriais, como caldeiras, turbinas a vapor e secadores térmicos.

2.7.3 Injeção na rede de gás natural

O biogás pode ser injetado e distribuído na rede de gás natural, já que o biogás, assim como o gás natural, é composto, sobretudo, de metano. Existem diversas vantagens para o uso da rede de gás natural para o transporte e distribuição do biogás. Uma delas é que a rede conecta os locais de produção com as áreas mais populosas, o que permite que o gás alcance novos consumidores. Também é possível aumentar a produção em locais remotos, aproveitando todo o gás produzido. Adicionalmente, a injeção do biogás na rede de gás natural aumenta a segurança do abastecimento local. As especificações do gás natural devem ser atendidas para a injeção na rede, o que pode ser realizado, na maioria das vezes, com os processos de tratamento existentes (ZANETTE, 2009).

Essa aplicação requer um tratamento de gás para remover CO₂ e impurezas relativamente intensivas. De acordo com Tolmasquim (2003, p. 104):

Em adição, as companhias de gás requerem que as injeções de gás em seus sistemas de gasodutos atendam a exigentes padrões de qualidade, o que pode requerer controles de qualidade adicionais. De qualquer forma, esta pode ser uma opção atrativa para proprietários de aterros sanitários, desde que seja possível utilizar todo o gás recuperado. A depuração do gás exigirá significante compressão a fim de atender a pressão no gasoduto no ponto de conexão. Gasodutos de alta pressão requerem de 300 a 500 psig, enquanto os de média e baixa podem requerer de 10 a 30 psig.

2.7.4 Combustível para veículos

Segundo Zanette (2009), o biogás pode ser purificado para atingir as especificações do gás natural e ser utilizado nos veículos que utilizam o gás natural veicular (GNV).

O uso do biogás como combustível para veículos exige o seu tratamento para satisfazer os atuais requisitos de qualidade dos motores convencionais. Isso envolve a remoção das substâncias corrosivas aos motores, tais como o sulfeto de hidrogênio, e a eliminação do dióxido de

carbono (CO_2) e do vapor d'água do biogás. Uma vez que os veículos disponíveis no mercado são preparados para operar com gás natural, recomenda-se que o biogás seja tratado até a qualidade equivalente (FNR, 2010).

2.8 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. Assim, essas substâncias entram no lugar do combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. Pode ocorrer combustão incompleta, falha de alimentação, perda de potência e corrosão precoce provocada pela presença do ácido sulfídrico (H_2S), diminuindo tanto o rendimento quanto a vida útil do motor térmico (COSTA, 2006)

Conforme Zanette (2009, p. 20), há três motivos basilares para o tratamento do biogás:

[...] atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico do gás e padronizar o gás produzido. Para muitas aplicações a qualidade do biogás deve ser melhorada. Os principais parâmetros que podem requerer remoção em um sistema de tratamento são H_2S , H_2O , CO_2 e compostos halogenados.

A Tabela 4, a seguir, destaca a necessidade de remoção de alguns compostos do biogás conforme a sua utilização.

Tabela 4 - Necessidade de remoção de compostos do Biogás

Aplicação	H_2S	CO_2	H_2O
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Co-geração	<1000 ppm	Não	Condensação do vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: IEA (2005 apud ZANETTE, 2009).

Diversos mecanismos básicos estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos, que podem incluir: a

absorção física ou química, a adsorção em uma superfície sólida, a separação em membranas, separação criogênica e a conversão química (ZANETTE, 2009).

O Quadro 2 apresenta técnicas de purificação de Biogás, indicando os compostos a serem removidos e os respectivos procedimentos.

Quadro 2 - Técnicas de purificação de Biogás

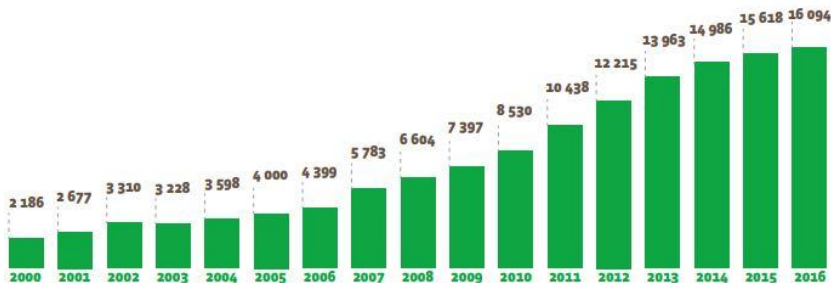
Impureza	Descrição	Detalhes
Umidade	Adsorção	Sílica Gel
		Peneira Molecular
	Absorção	Alumina
		Etileno Glicol
Hidrocarbonos	Adsorção	Selexol
		Carvão ativado
	Absorção	Óleo leve
		Etileno Glicol e Selexol
Combinação	Refrigeração com Etileno Glicol e adsorção em carvão ativado	
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
		Soluções de sais alcalinos
		Potássio
		Alcalonaminas
	Adsorção	Mono, di-tri-etanol amina
		Peneiras Moleculares
		Óxido de ferro
	Separação por membranas	Carvão ativado
Membrana de fibra oca		
Siloxina	Adsorção	Carvão ativado
		Sílica Gel
	Absorção	Ácido Nítrico
		Ácido Sulfúrico

Fonte: Anerousis e Whitman (1985), Alves (2000).

2.9 PANORAMA MUNDIAL DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

De acordo com os dados da EurObserv'er⁴, atualmente a maior parte da produção de biogás da União Europeia (UE) é proveniente de usinas de metanização. Elas variam em tipo e capacidade e incluem pequenas usinas de metanização agrícola, usinas de maior capacidade, com sistemas de codigestão, grandes usinas industriais de processamento de alimentos, e algumas usinas de metanização de resíduos domésticos. Em 2016, a produção de energia primária da UE a partir do biogás continuou em crescimento, como indica Gráfico 7.

Gráfico 7 - Evolução da produção de biogás da União Europeia (em Ktoe)



Fonte: EurObserv'ER. Disponível em: <<https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2017/>>.

Em nível de UE, mais de metade da eletricidade obtida a partir do biogás é registrada na Alemanha (54%), Itália (13%) e o Reino Unido (12%). A produção de eletricidade é o principal método de utilização do biogás e, em 2016 foi responsável por 62,5 TWh da produção, o que representa um crescimento de 2,5% em relação ao ano anterior. O biogás pode ser totalmente utilizado para a produção de calor, como também pode ser purificado para conversão em biometano, sob a forma de eletricidade em centrais de cogeração e também utilizado para veículos a GNV ou mesmo injetado em redes de gás natural. Segundo a Associação Europeia de Biogás (EBA), existiam pelo menos 17.376 unidades de biogás na Europa no final de 2015, o que representa um aumento de 3% em 2016. A eletricidade produzida por essas usinas é

⁴ Informação disponível em: <<https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2017/>>.

suficiente para suprir as necessidades de consumo de mais de 14 milhões de domicílios europeus.

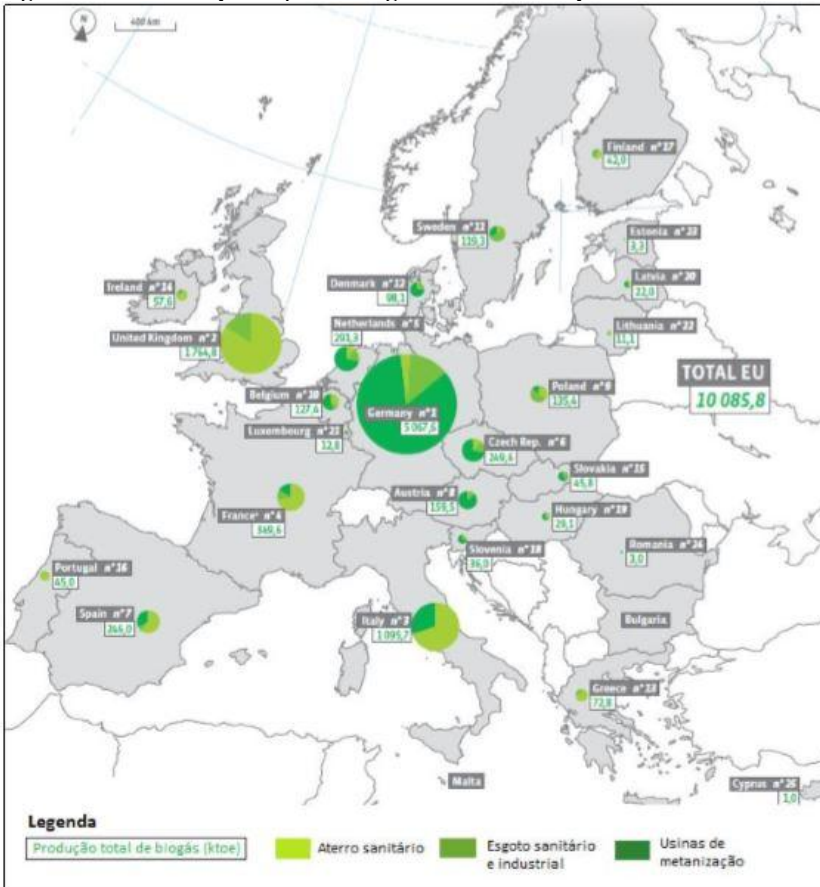
O modelo internacional, principalmente europeu, de negócios com biogás consiste em concentrar dejetos e resíduos de vários produtores em um único biodigestor de alta tecnologia. Além de ganho em escala, que proporciona altas concentrações de biogás monitoradas, isto é feito para compensar a influência do clima frio e da escassa biodiversidade encontrados nos países do Hemisfério Norte. Além disso, a estrutura fundiária nesses países promove grande proximidade entre os produtores agrícolas, o que favorece uma logística de transporte de dejetos brutos ao biodigestor de alta tecnologia, o mesmo ocorre com o transporte do digestato (efluente do biodigestor para ser usado como fertilizante orgânico) para as lavouras dos produtores envolvidos (PNBB, 2015).

Para a EurObserver (2017), a Alemanha é o país número 1 em produção de biogás. No final de 2016, o país já contava com 9.346 unidades de metanização, equivalentes a 4.497 MW de capacidade elétrica. Desde que a Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG) entrou em vigor, no ano 2000, o número de usinas de biogás vem aumentando em ritmo crescente. Esse avanço foi promovido pelo Programa de Incentivo ao Mercado (MAP), mantido pelo governo alemão e por diversos programas de fomento ao investimento em nível estadual. A alteração da EEG, em 2004, teve um papel fundamental na aceleração da construção de novas usinas. Desde então, o uso de culturas energéticas para a produção de biogás tem sido atraente do ponto de vista econômico (FNR, 2010).

O grande atrativo da lei é o pagamento pela eletricidade injetada, que varia conforme a capacidade instalada da planta, a data de início de operação e o substrato utilizado no processo. Os bônus previstos na EEG constituem um sofisticado sistema de incentivos que visam proporcionar a geração de eletricidade, a partir da biomassa, de forma eficiente e que garanta a proteção climática e ambiental (FERREIRA, 2015).

A partir do que exposto anteriormente, a maior contribuição para produção de biogás da União Europeia é proveniente de usinas de metanização, isso se aplica principalmente à Alemanha, Itália, Áustria, Holanda, Bélgica e República Tcheca. Já o biogás proveniente de aterro sanitário possui mais vantagens em países onde a metanização agrícola e industrial são mais recentes, como no Reino Unido, França, Espanha, Portugal, Finlândia, Grécia, Irlanda e Estônia, conforme exposto na Figura 4.

Figura 4 - Setores de produção de Biogás da União Europeiaia



Fonte: EurObserv'ER. Disponível em: <<https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2017/>>.

Nos Estados Unidos, a utilização de biogás se apresenta bastante desenvolvida. Na Universidade de Wisconsin Oshkosh, a usina de energia renovável produz aproximadamente 8% da demanda energética da Instituição e converte 10.000 toneladas de resíduos alimentares e de jardinagem em até 3300 MW de energia elétrica por ano (UNIVERSITY OF WINCONSIN OSHKOSH, 2014). A planta é de aproximadamente 1800 m², dos quais 640 m² são utilizados para a produção de biogás. Também na área de digestão anaeróbia, a Universidade da Califórnia, elaborou um digestor anaeróbio que converte até 50 toneladas de

resíduos orgânicos em 12.000 kWh de energia renovável por dia, através de geradores de última geração, evitando que cerca de 20.000 toneladas por ano de resíduos sejam encaminhados a aterros sanitários. A Universidade espera reduzir cerca de 13.500 toneladas por ano de emissões de gases de efeito (UC DAVIS, 2014).

2.10 CENÁRIO BRASILEIRO E CATARINENSE DE BIOGÁS

Em vários momentos da história recente do Biogás no Brasil ocorreram iniciativas para produzir e utilizar o biogás. Nos anos 1970, o combustível chegou a integrar o modelo da “revolução verde”, paradigma da atual economia mundial de produção de alimentos. Entretanto, ao contrário de outras tecnologias, o biogás não prosperou. As razões para isso são diversas e vão desde o atrelamento do biogás aos preços do petróleo, que ao despencar desestimularam o uso do biogás como fonte alternativa de energia, até o mau emprego dos dejetos animais, que na época eram manejados sem nenhum critério.

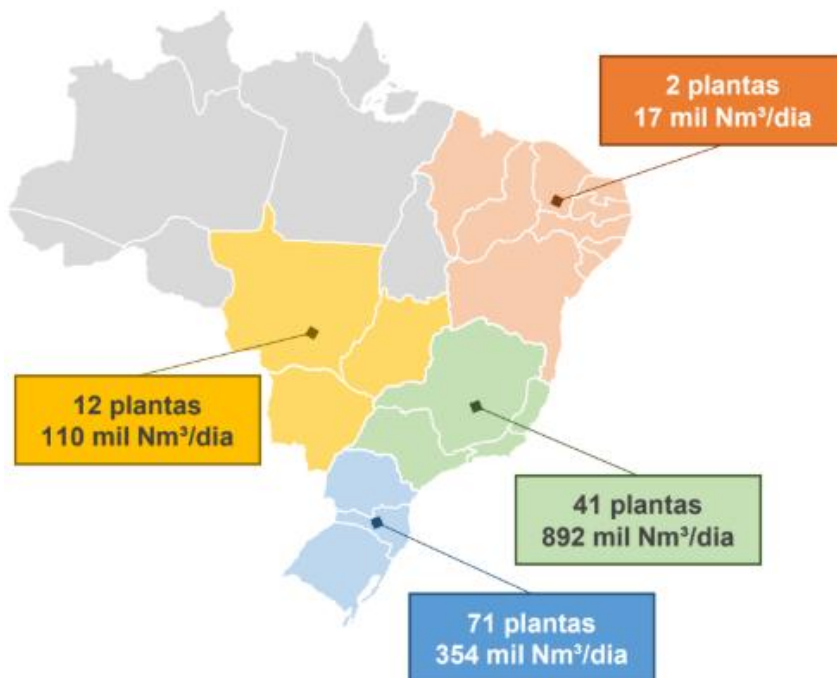
Assim, passaram-se 30 anos sem que o biogás voltasse a interessar os sistemas produtivos, mesmo fazendo parte deles como subproduto. Então, reaparece no cenário das iniciativas motivadas pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo proposto pelo Protocolo de Quioto, porém em projetos concebidos de forma a simplesmente queimar o biogás sem nenhum aproveitamento energético. Ao longo dos tempos, o biogás acumulou frustrações e o seu valor econômico simplesmente foi e é desperdiçado, queimado ou emitido para a atmosfera na forma bruta, o qual devido à presença de metano (CH_4), que possui potencial de impacto de efeito estufa 21 vezes maior do que o do gás carbônico (CO_2), traz sérias consequências para o aquecimento global e as mudanças climáticas (PNBB, 2015).

A Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (Abiogás) estima o potencial de produção de biogás de maneira conservadora no Brasil em 23 Bilhões de m^3 /ano, sendo 12 bilhões de cana-de-açúcar, oito bilhões de alimentos e três bilhões de resíduos. Esse montante equivale a aproximadamente 11 milhões de tep ao ano, ou 12 bilhões de litros equivalente de diesel. Considerando-se uma presença média de 60% de metano no biogás, e sendo este gás 21 vezes mais impactante do que o gás carbônico equivalente, o Brasil poderia contar com um potencial de 190 milhões de toneladas de CO_2 eq, caso viesse a se utilizar do biogás como fonte de energia (PNBB, 2015).

O Brasil apresenta oportunidades únicas para a utilização energética do biogás, se comparado ao restante do mundo, que representa um combustível estratégico para os desafios econômicos e de infraestrutura, ao mesmo tempo em que reduz os passivos ambientais no gerenciamento de resíduos. Estudos da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) apontam um potencial teórico de produção de biometano de 4,3 milhões de m^3/dia a partir de resíduos sólidos urbanos, 13,8 milhões de m^3/dia a partir de vinhaça, 35,4 milhões de m^3/dia a partir de resíduos agropecuários e de 47,8 milhões de m^3/dia a partir de resíduos agrícolas. Esse potencial sumaria 101,3 milhões de m^3/dia de biometano, quase o dobro do atual consumo de gás natural no Brasil (58 milhões de m^3/dia) (FNR, 2016).

Segundo dados da EPE, apresentados no IV Fórum do Biogás (2017) para o ano de 2015, havia um total de 126 plantas pertencentes ao setor de biogás do Brasil, com uma produção média de biogás de 1373 mil Nm^3/dia (Figura 5).

Figura 5 - Números do setor de biogás do Brasil



Fonte: EPE (2017).

Santa Catarina deu o pontapé inicial nos seus avanços para produção de biogás, com a Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018, que instituiu a Política Estadual do Biogás em Santa Catarina. Assim, o estado consolida-se como a primeira região brasileira a ter uma política de biogás e uma legislação própria sobre o assunto. O Marco Legal reúne um conjunto de princípios que apontam as diretrizes para a exploração, gerenciamento e comercialização do biogás.

O objetivo principal da Lei é servir como uma orientação para que os dejetos (fezes e urina) produzidos na pecuária e também os resíduos orgânicos produzidos na área urbana, sejam aproveitados na produção de energia, por meio de biodigestores (SANTA CATARINA, 2018). Além de resolver um passivo ambiental – a poluição causada pelos dejetos dos animais –, a política pretende oferecer uma nova fonte de renda ao homem do campo e diversificar a matriz energética catarinense. De acordo com relatório do Marco Legal do Biogás, Santa Catarina possui um potencial estimado de produção de 5,2 mil metros cúbicos por dia de biogás.

De acordo com o Programa Catarinense de Energias Limpas – SC Energia:

No estado de Santa Catarina ocorre a produção de expressivos volumes de biomassas residuais de base úmida da atividade pecuária, da indústria de alimentos, de orgânicos urbanos e dos lodos de estações de tratamento de esgoto, que têm grande potencial para a produção de energias renováveis e biofertilizantes, quando processadas por biodigestão anaeróbia. Igualmente, a captura dessas biomassas contribui para a qualidade ambiental e para a saúde humana, permite a criação e a expansão de novos mercados econômicos e, conseqüentemente, a geração de emprego e renda. Para o desenvolvimento do setor, faz-se necessário a criação e a implantação de mecanismos de políticas públicas que favoreçam a produção de biogás em escala comercial, o desenvolvimento desse setor econômico e o conhecimento científico. O processo de biodigestão reduz a carga orgânica da matéria prima, entretanto, não reduz a carga de minerais do efluente biodigerido, rico em nitrogênio, fósforo e potássio, componentes nobres para a fertilização do solo. Portanto, o

controle sobre o destino desses efluentes biodigeridos é economicamente e ambientalmente importante. Se transformado em biofertilizante, permite a geração de renda e reduz eventuais danos ambientais. (SC ENERGIA, 2018).

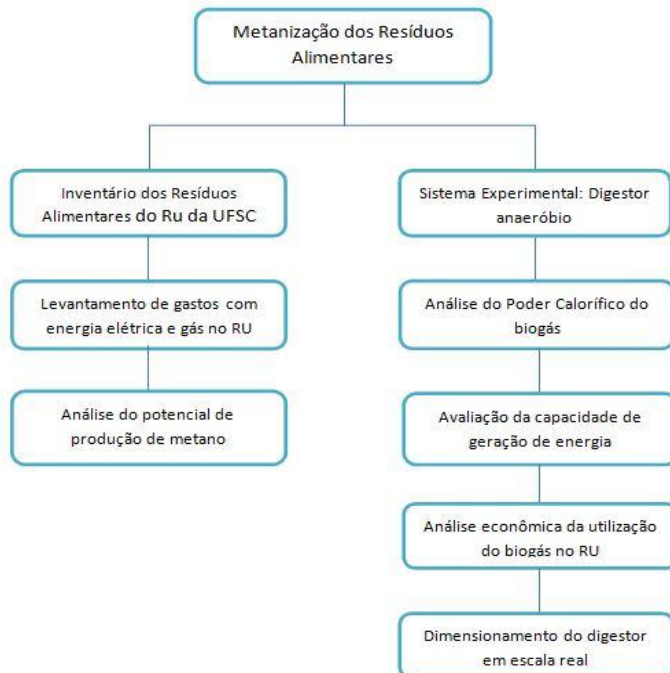
Feita essas considerações, sobre a revisão bibliográfica, em que refletimos sobre a matriz energética brasileira, as energias renováveis, realizamos um panorama da geração e destinação de resíduos sólidos urbanos no Brasil, apresentamos os conceitos de resíduos orgânicos, biometanização, os princípios da digestão anaeróbia, a relação inóculo/substrato, os digestores anaeróbios, e também ressaltamos a importância o biogás, a sua purificação e o seu panorama mundial da produção e utilização, no próximo capítulo abordaremos sobre os materiais e métodos empregados neste trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente neste capítulo, cabe destacar que o presente projeto tem como objetivo realizar um estudo sobre a utilização do biogás gerado a partir dos Resíduos Alimentares do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) como fonte de energia no Restaurante. Para tanto, foram necessários levantar dados sobre a quantidade de resíduos alimentares gerados pelo RU, através de pesagens diárias. Além de dados referentes aos gastos para manter o funcionamento do restaurante, como gás e eletricidade. Como complemento, foi realizado um dimensionamento para o sistema de metanização em escala real.

Das análises experimentais, foram escolhidas como metodologia: avaliações do volume de biogás gerado no reator piloto e poder calorífico do biogás através de análises de porcentagem de metano. Assim, a Figura 6, a seguir, apresenta o fluxograma da metodologia aplicada para o alcance dos resultados almejados.

Figura 6 - Fluxograma de metodologia desenvolvida



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo delimitada para a realização desta pesquisa foi o Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizado no campus Trindade, no município de Florianópolis, no estado de Santa Catarina (Figura 9).

Figura 7 - Imagem de satélite da localização do RU



Fonte: Google Earth, 2018.

O RU da UFSC foi inaugurado em setembro de 1965. Desde então vem atendendo a comunidade universitária, servindo aproximadamente nove (9) mil refeições por dia, indicando, assim, um papel muito importante na vida dos estudantes e servidores da UFSC.

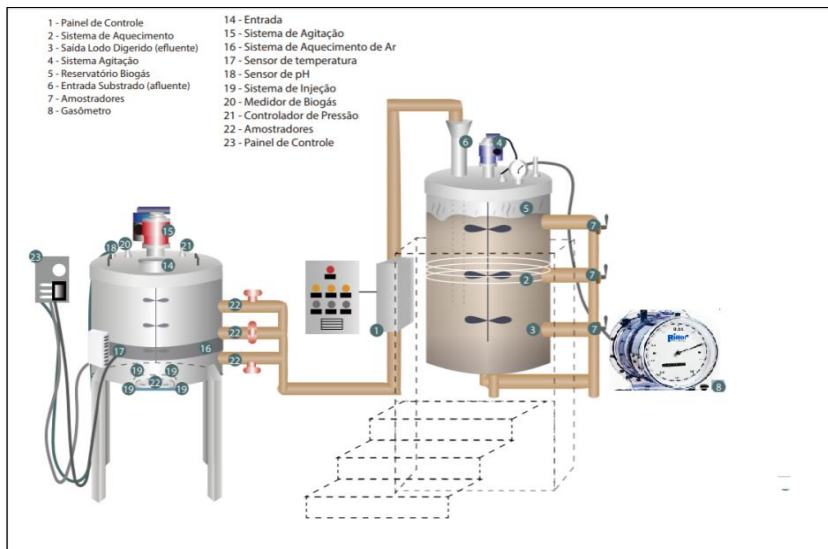
3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental está localizado nas dependências da UFSC, mais precisamente na sala de pré-preparo, atualmente desativada, do Restaurante Universitário.

Assim, o presente estudo foi realizado em um sistema de digestão anaeróbia de duas fases, que consiste em dois reatores separados fisicamente, onde em cada um ocorre uma fase bioquímica, a acidogênica e a metanogênica. O regime de alimentação adotado para o

sistema é o semicontínuo (uma vez ao dia). A representação esquemática dos pilotos pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática do sistema de metanização⁵



Fonte: Malinowsky (2018).

3.2.1 Configuração reator acidogênico

O reator piloto acidogênico (Figura 9) foi construído em aço inoxidável e possui volume total de 85L. O piloto conta com um sistema de aquecimento, composto por uma resistência externa localizada na parte central do reator, o qual poderá operar em temperatura mesofílica ou termofílica, e sistema de homogeneização mecânica, constituído de três pás giratórias e acionamento automático com frequência de 38 rpm, a agitação será de 15 minutos por hora. O reator possui 1 amostrador (DN 150 mm) localizado na parte inferior e 3 amostradores laterais (DN 75 mm) distribuídos em 3 alturas de forma a coletar amostras representativas da biomassa interna. Na parte inferior, o reator conta com um sistema de insuflação de gases composto por 4 orifícios conectados por mangueiras de 1mm.

⁵ Esta representação faz parte da pesquisa de doutoramento ainda em andamento de Carina Malinowsky, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, na UFSC.

Figura 9 - Reator acidogênico

Fonte: Acervo da autora, 2018.

A medição do biogás é realizada por um medidor automático de gases. Assim, o biogás produzido é armazenado em um cilindro de 100ml até atingir a pressão de 0,5 bar, o medidor (Figura 10) registra a quantidade de gás produzida e envia remotamente a informação para controle do usuário. Em seguida, o gás é liberado para que seja realizada nova medição.

Figura 10 - Medidor de biogás

Fonte: Acervo da autora, 2018.

3.2.2 Configuração reator metanogênico

O reator metanogênico (Figura 11) tem volume total e útil de 115L e 100L, respectivamente, construída em aço inoxidável, medindo 0,4 m de diâmetro e 1,0 m de altura. A unidade apresenta um sistema de aquecimento, composto por uma resistência elétrica tipo baioneta localizado na região central interna do digestor e ainda por um sistema de homogeneização mecânica, constituído por um agitador dotado de três hélices, acionado por moto-redutor que garante, nessa ordem, o aquecimento e a mistura substrato-biomassa dentro do digestor. A mistura no interior do reator será de 30 min a cada 3 horas com potência de 30 RPM.

Figura 11 - Reator metanogênico



Fonte: Acervo da autora, 2018.

O dispositivo de alimentação do resíduo orgânico está instalado na tampa do reator, parte superior, e imerso 0,3m no interior do piloto, o que garante a entrada afogada do afluente, evitando a entrada e oxigênio. Para a retirada do efluente, o reator conta com três amostradores laterais inferiores e saída de fundo com DN 100mm. Na parte superior externa estão instaladas as mangueiras, ligando o piloto

ao gasômetro e uma válvula de pressão para o alívio em casos de excessos na produção de biogás. Nessa mesma região um manômetro analógico mostra a pressão exercida pelo biogás na superfície interna do digestor.

3.3 INVENTÁRIO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RU DA UFSC, CAMPUS TRINDADE

A maior fonte de geração de resíduos da UFSC é o Restaurante Universitário, sendo ele responsável por aproximadamente 5 toneladas de resíduos semanalmente, somente no Campus Trindade. Os resíduos gerados pelo RU são divididos em orgânicos, rejeitos e recicláveis: os orgânicos são compostos pelos resíduos alimentares, como restos de comida, cascas e ossos; já os rejeitos são os resíduos originados de guardanapos e papel toalha, gerados no salão de refeição; e os resíduos recicláveis do RU nem sempre são gerados diariamente, visto que os mesmos são originados de embalagens de iogurtes oriundos da sobremesa, e como o restaurante alterna o seu cardápio, nem sempre se tem esse tipo de resíduo.

Desse modo, para esta pesquisa o tipo de resíduo de interesse são os resíduos alimentares, por possuírem potencial de geração de biogás e valoração como fonte de energia.

A partir da pesquisa com as nutricionistas responsáveis pelo RU e levantamento acerca da geração de resíduos sólidos no RU, foi possível se ter maior conhecimento a respeito da dinâmica do local. Assim, foi identificado que a coleta é realizada duas vezes ao dia, geralmente no final de cada refeição (almoço e jantar): a coleta do almoço ocorre por volta das 14h e da janta por volta das 20h. Em dias em que o Restaurante está muito cheio e, conseqüentemente, há um grande acúmulo de resíduos, a coleta é realizada também durante o expediente.

Os resíduos alimentares coletados da preparação do almoço são compostos basicamente por cascas de legumes, verduras e alimentos que não serão mais utilizados, caracterizados como desperdício. Já os resíduos oriundos do salão são compostos pelos restos de alimentos deixados pelos frequentadores nos pratos ao fim das refeições, e são compostos por arroz, feijão, carne, legumes, verduras, entre outros. Além dos resíduos alimentares, no salão também são gerados rejeitos, oriundos de papel toalha e guardanapos, utilizados pelos frequentadores, e recicláveis, quando na sobremesa são servidos iogurtes (Figura 12).

Figura 12 - Contentores de separação dos resíduos do RU



Fonte: Acervo da autora, 2018.

Em relação à estrutura e operação do RU, a maioria dos funcionários é composta por trabalhadores terceirizados, contratados pelas empresas Orbenk e Provac. Os terceirizados trabalham em um sistema de dias alternados, com duas equipes de revezamento. Cada equipe trabalha 12 horas por dia, e folga no dia seguinte. Além disso, o Restaurante também conta com servidores técnico-administrativos da UFSC.

Cada equipe possui um responsável que coordena as atividades dos funcionários. Os funcionários da empresa Orbenk são responsáveis pelas atividades referentes à cozinha, como o manejo dos alimentos, preparo das refeições, cozimento, limpeza da cozinha e destinação dos resíduos gerados pela cozinha. Já os funcionários da empresa Provac são incumbidos pelas atividades do salão, que envolvem abastecimento das cubas do buffet, limpeza das mesas e do salão e destinação dos resíduos gerados no salão.

Ao fim dos expedientes, os resíduos são levados até a parte externa do restaurante, onde os contentores são depositados na chamada “gaiola de lixo” (Figura 13), local em que é feita a coleta externa pela

empresa municipal Comcap, responsável pela execução dos trabalhos de limpeza pública e coleta de resíduos sólidos na cidade de Florianópolis.

Figura 13 - Gaiola de lixo



Fonte: Acervo da autora, 2018.

Dos resíduos orgânicos, uma parte é utilizada como adubo pela empresa Comcap, o restante, juntamente com os rejeitos, são encaminhados ao aterro sanitário no município de Biguaçu, operado pela empresa Veolia. Observa-se que boa parte dos resíduos orgânicos não recebe nenhuma forma de valorização, sendo encaminhados diretamente a aterros sanitários, sem nenhum aproveitamento.

Sabendo-se dessa dinâmica, foram realizadas duas pesagens diárias, nos horários de geração, a fim de se quantificar o resíduo. Essa ação foi realizada durante um mês, totalizando 20 dias (40 pesagens por 20 dias úteis), com intuito de se obter material representativo da variação de cardápio e hábitos de geração. O valor amostral de 20 dias úteis reflete para 4 semanas de pesagens, o número de dias úteis disponíveis no período de projeção. A quantidade de dias de pesagens necessários foi obtida a partir do cálculo do tamanho de uma amostra, utilizando uma expressão de 1ª aproximação com um erro amostral de 2%. Sendo assim, obtem-se 19,84 dias de pesagens, a qual se optou pelo arredondamento para 20 dias.

As pesagens foram realizadas de segunda a sexta, nos horários: 14h, para resíduos do almoço; e 20h, para os resíduos da janta. A média diária de geração de resíduos alimentares do RU foi obtida através dos valores diários de geração de resíduos, divididos pelo número de dias de pesagens.

Os funcionários das empresas Provac e Orbenk encaminhavam os resíduos para a parte externa do Restaurante, onde ocorriam as pesagens. Os sacos plásticos de lixo eram colocados em uma balança (Figura 14) localizada nas dependências externas do RU, onde foi possível fazer a análise quantitativa da geração de resíduos.

Figura 14 - Balança responsável pelas pesagens dos resíduos do RU

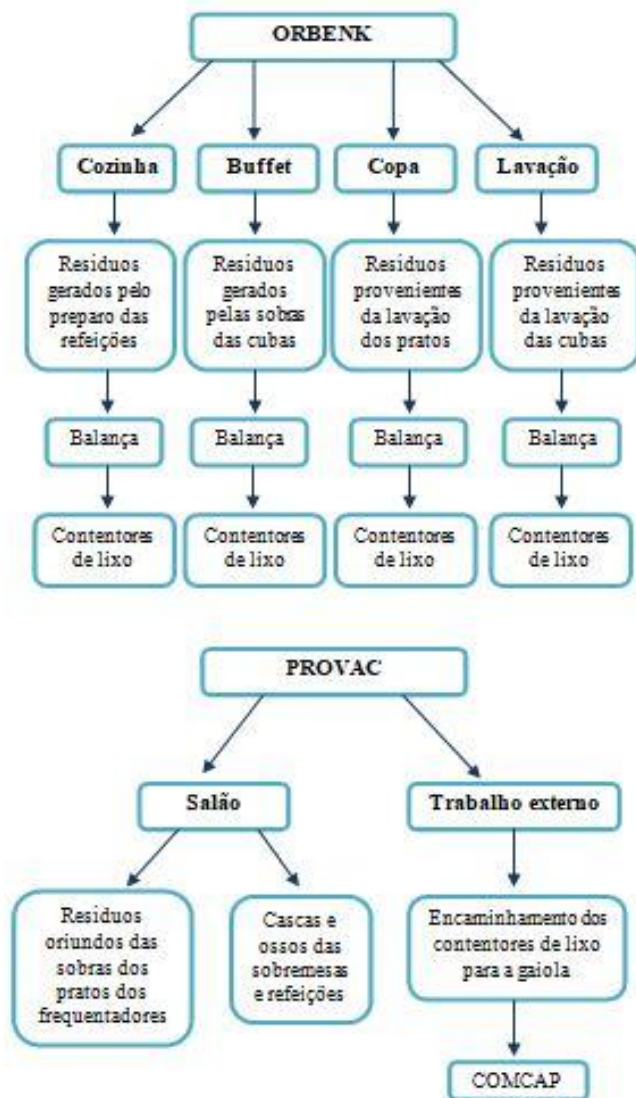


Fonte: Acervo da autora, 2018.

A partir dos dados obtidos através das pesagens foi possível identificar a fração de resíduo alimentar disponível para produção de metano, contabilizando-se o seu potencial de geração de energia.

O fluxograma a seguir esquematiza a rota dos resíduos durante o período das pesagens e a empresa responsável por cada tarefa (Figura 15).

Figura 15 - Fluxograma da rota dos resíduos orgânicos do RU



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

3.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS DOS RESÍDUOS ALIMENTARES DO RU

A metodologia utilizada para a avaliação do potencial de geração de biogás através dos resíduos alimentares do RU se baseou na bibliografia apresentada por diversos autores, que sugerem que a porcentagem de Sólidos Voláteis (SV) que compõem os resíduos alimentares variam na faixa de 21,0% a 26,4% (Quadro 3).

Quadro 3 - Composição de Sólidos Voláteis dos Resíduos Alimentares

Autor	Zhang <i>et al</i> (2007)	Carrilho (2012)	Zhang <i>et al</i> (2013)	Malinowsky (2016)
SV (%)	26,4	25,0	21,0	22,4

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Segundo Ferreira (2015), uma tonelada de sólidos voláteis de substratos provenientes de resíduos alimentares, produz, em média, um volume de 400 m³ de CH₄. Já Zhang, Lee e Jahng (2011) apresenta que um quilograma de sólidos voláteis produz 0,460 m³ de CH₄, enquanto que, para Lissens et al. (2004), esse valor é de 0,525 m³CH₄.kgSV⁻¹.

Com os valores obtidos através das pesagens diárias no RU, foi possível obter a quantidade de resíduos alimentares gerados diariamente e disponíveis para valoração como fonte de energia. Sendo assim, tendo conhecimento da média diária de geração de resíduos, obtém-se o valor de SV disponíveis e sua produção de metano.

3.5 MONITORAMENTO DO VOLUME DE BIOGÁS E DETERMINAÇÃO DO TEOR DE METANO

Um dos objetivos específicos do presente estudo é a análise quantitativa e qualitativa do biogás gerado pelo digestor anaeróbio piloto com o escopo de se ter conhecimento do volume disponível de biogás e a qualidade do mesmo para ser empregado como fonte de energia no RU.

Para a medição do volume de biogás gerado pelo digestor, utilizamos o gasômetro Ritter modelo TG 05 (Figura 19), o qual mede o volume de biogás através de conexões por mangueiras entre o digestor e o gasômetro. Os medidores de gás do tipo tambor são universalmente aplicáveis para medir o volume de gases e extremamente eficazes quando as medições exigem a mais alta precisão.

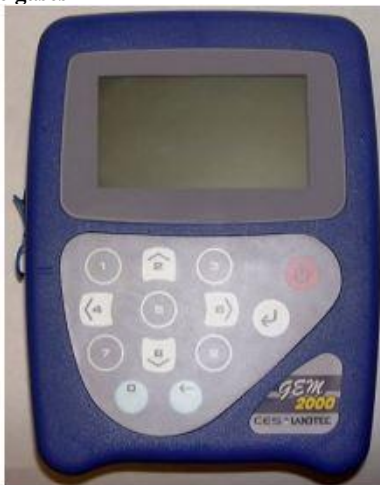
Figura 16 - Medidor de volume de biogás

Fonte: Catálogo Ritter.

O gasômetro funciona de acordo com o princípio do deslocamento: o fluxo de gás provoca uma rotação do tambor de medição do aparelho, localizado em um fluido de enchimento, assim o tambor de medição mede o volume de gás através de movimentos periódicos de enchimento e esvaziamento das câmaras rígidas de medição.

Para caracterização do biogás, foram feitas análises qualitativas do teor de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), e análises quantitativas das porcentagens de CH_4 , CO_2 , O_2 e o balanço (BAL, mistura dos demais gases presentes) através do analisador de gases portátil da marca LANDTEC modelo GEM 2000 (Figura 17). O equipamento possui uma bomba interna que retira amostras de gases com uma vazão mínima de 10^{-3} L/s, através de uma mangueira posicionada na válvula específica de saída de gases do digestor e conectada ao aparelho. Com esse equipamento foi possível realizar as leituras de biogás, que são exibidas na tela do aparelho, podendo ser armazenadas no instrumento ou baixado para um computador pessoal para relatórios, análises e arquivamento.

Figura 17 - Analisador de gases



Fonte: Manual de operação GEM 2000.

3.6 PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

Nesta etapa foi avaliada a rentabilidade da utilização do biogás produzido no digestor anaeróbio a partir do potencial de produção de metano do mesmo. Dessa maneira, foram realizados levantamentos de dados a respeito de gastos com energia elétrica e gás para manter o funcionamento do RU. Com os dados obtidos através de entrevistas com a administração do restaurante foi possível realizar uma análise econômica referente à utilização do biogás como fonte de energia no Restaurante.

3.6.1 Cenário 1: Utilização como gás de cozinha

Segundo Salomon (2007), 1 m³ de biogás equivale a 0,92 kg de GLP. Tendo isso em vista, foram realizadas entrevistas com funcionários do Restaurante para se obter dados de consumo de gás para o funcionamento do RU, como quantidade de botijões consumidos mensalmente e o peso dos mesmos.

Com os dados de consumo de GLP e considerando a equivalência apresentada, foi possível se obter os resultados da demanda mensal necessária em termos de biogás para o funcionamento da cozinha do RU, através da equação:

Demanda mensal de biogás

$$= \text{Consumo mensal de GLP(kg)} \times \frac{1\text{m}^3 \text{ de biogás}}{0,92\text{kg de GLP}}$$

Para avaliar a economia obtida com a utilização do biogás como gás de cozinha no RU, utilizou-se os dados de consumo de GLP e o preço de cada botijão de gás:

$$\text{Valor economizado} = \text{Consumo de GLP} \times \text{Preço de cada botijão}$$

3.6.2 Cenário 2: Conversão em energia elétrica

Para estimar a geração de energia elétrica a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos do RU, considera-se o poder calorífico inferior do metano obtido através dos resultados qualitativos do biogás.

Quando o biogás é utilizado como combustível em um motogerador de eletricidade, por exemplo, o rendimento teórico esperado é da ordem de 30%, ou seja, a energia elétrica gerada tem o potencial de apenas 30% do combustível original. Esse baixo rendimento se deve à limitação das tecnologias de conversão de energia (GOMES, 2014).

A utilização do biogás como recurso energético se deve, principalmente, ao metano (CH_4), que, quando puro e em condições normais (PTN) de pressão (1atm) e temperatura (0°), tem um poder calorífico inferior (PCI) de $9,9 \text{ kWh/m}^3$. O biogás com um teor de metano entre 50% e 80% terá um poder calorífico inferior, entre $4,95$ e $7,92 \text{ kWh/m}^3$ (COLDEBELLA et al., 2006).

Através do valor obtido do poder calorífico do biogás, foi possível determinar a capacidade de conversão em eletricidade, porém não conseguimos estipular a demanda de geração de energia elétrica do RU, pois a UFSC não possui medidores de energias individuais e separados por edifícios. Sendo assim, a divisão ocorre por unidades consumidoras (UC). No caso RU, ele está na mesma UC em que a Reitoria, CCE, Centro de Eventos, entre outros, denominada de UC Cidade Universitária.

Portanto, tem-se que:

$$\begin{aligned} \text{Potencial energético} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \\ = \text{Produção diária de metano} \\ \times \text{Poder Calorífico inferior} \end{aligned}$$

Como o rendimento de motogeradores é na ordem de 30%, tem-se que a produção real de energia é equivalente a:

$$\begin{aligned} \text{Produção real de energia } \left(\frac{kWh}{\text{dia}} \right) \\ = \text{Potencial energético } \left(\frac{kWh}{\text{dia}} \right) \times 30\% \end{aligned}$$

3.7 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO EM ESCALA REAL

3.7.1 Escolha do reator

A escolha da tecnologia mais apropriada a ser utilizada deve levar em conta diversos fatores, como o teor de sólidos totais do substrato, os objetivos do tratamento, os custos de projeto, o local de instalação da planta, entre outros. Segundo Rocha (2014), “a tecnologia e tipologia usadas nos sistemas de digestão anaeróbia variam de país para país, dependendo também das condições climáticas e da própria legislação em vigor. Outros fatores que influenciam a tipologia dos sistemas são a disponibilidade e acesso à energia”.

No Brasil, devido à quase inexistência de coleta seletiva dos resíduos urbanos, as tecnologias de digestão seca são mais apropriadas, pois são menos sensíveis à presença de impurezas. Caso haja segregação na fonte dos resíduos orgânicos ou coleta exclusiva de grandes geradores, pode-se utilizar a digestão úmida. (PROBIOGÁS, 2015).

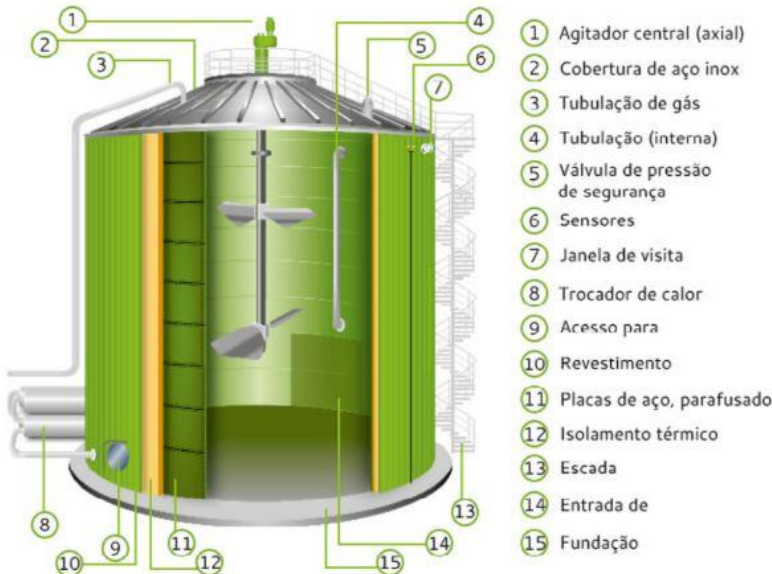
A digestão úmida, em comparação à digestão seca, apresenta, em geral, maior taxa de produção de biogás e maior estabilidade do processo, além de maior controle das emissões de metano e a possibilidade de se utilizar o material digerido na agricultura como fertilizante. Porém, a digestão úmida requer que o substrato seja submetido a um pré-tratamento (umidificação), de modo que se obtenha teor de sólidos totais de 15%, além de homogeneização da mistura para transporte pelo reator (PROBIOGÁS, 2015).

Assim, neste estudo, o Digestor Anaeróbio promove o tratamento dos resíduos alimentares provenientes do Restaurante da UFSC, com vistas à utilização do biogás para o seu funcionamento. Conforme apresentado anteriormente, o RU apresenta um sistema de segregação de resíduos, sendo destinado para o reator apenas resíduos alimentares. Dessa forma, como o resíduo é proveniente de um grande gerador e

praticamente isento de impurezas (pedras, metais, plásticos), optou-se pelo modelo de Reator Anaeróbio CSTR, atuando em via úmida, dado teor natural de umidade do resíduo. Além disso, foi levado em consideração o custo benefício do sistema, já que a operação das tecnologias de metanização seca apresentam maiores dificuldades, além da necessidade de importação dos equipamentos, o que encareceria a instalação.

Os reatores de mistura contínua, também conhecidos como Continuous Flow Stirred Tank Reactor (CSTR), são considerados a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos, ou seja, com teor de sólidos totais em torno de 15% e que possuem características favoráveis para bombeamento e mistura (Figura 18). São mais utilizados nos setores de agropecuária, da indústria alimentícia e no tratamento de lodos sanitários, pois exigem substratos praticamente livres de impurezas e suficientemente úmidos (PROBIOGÁS, 2015).

Figura 18 - Digestor Anaeróbio CSTR com misturador central



Fonte: Probiogás (2015).

Devido às características dos resíduos sólidos (30% – 40% ST), é necessário um pré-tratamento para que sejam utilizados na digestão úmida, por meio da umidificação e posterior homogeneização, atingindo um teor máximo de ST de 15%, importante também para a mistura e o

transporte mediante bombeamento. O CSTR é mais indicado para resíduos que são previamente separados, como restos de alimentos de restaurantes ou mercados com coleta seletiva (PROBIOGÁS, 2015).

Geralmente, esse sistema utiliza um processo bifásico, que se inicia com uma hidrólise com detenção hidráulica de 2 a 5 dias. Em seguida, ocorrem as reações (acidogênese, acetogênese, metanogênese) de geração de biogás no reator central, sendo que o material digerido deve ser aerado e desidratado depois da digestão anaeróbia, podendo haver variação na ordem dos processos. A aeração normalmente acontece com a inserção de ar por meio de um aerador, como no tanque de aeração de uma estação de tratamento de esgoto e, em seguida, o efluente da digestão é desidratado em duas etapas: por meio do decantador, e de um secador de esteira ou de tambor. Os restos desidratados são tratados aerobiamente em compartimentos ou túneis de compostagem (PROBIOGÁS, 2015).

3.7.2 Cálculo do volume de água inserido no reator

A descrição do dimensionamento do reator CSTR em escala real utiliza parâmetros propostos por Frias (2016).

Conforme indicado pela Probiogás e mencionado anteriormente, para se utilizar a tecnologia de reatores contínuos em digestão úmida, o substrato deve passar por umidificação de modo que contenha 15% de sólidos totais.

Segundo valores obtidos em bibliografia e apresentados no Quadro 4, a porcentagem de sólidos totais que compõem os resíduos alimentares varia na faixa de 18,1 % a 30,9%.

Quadro 4 - Composição de sólidos totais dos resíduos alimentares

Autor	Zhang <i>et al</i> (2007)	Zhang <i>et al</i> (2011)	Malinowsky (2016)
ST (%)	30,9	18,1	25,5

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

A partir de um valor adotado para ST, a Carga de Sólidos Totais pode ser obtida através da equação:

$$Cst = \frac{Pd \times STi}{100}$$

Onde:

Cst = Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente no biodigestor (kg/dia);

Pd = Produção diária de resíduo (kg/dia);

STi = Fração sólida do substrato inicial (%).

De acordo com esses parâmetros é possível concluir a carga de sólidos totais que são adicionados ao reator diariamente. Como via de regra, o substrato deve apresentar 15% de ST. Portanto, a massa total de alimentação diária deve seguir a equação:

$$Mt = \frac{Cst \times 100}{STf}$$

Onde:

Mt = Massa total de alimentação diária (kg/dia);

Cst = Carga de Sólidos Totais adicionada diariamente no biodigestor (kg/dia);

STf = Fração sólida do substrato final (%).

Com o valor da quantidade de resíduos alimentares diariamente adicionados ao reator, o restante da massa total será a composição de água. Considerando a densidade da água 1000 kg/m³, o volume de água a ser adicionado ao reator pode ser obtido através da equação:

$$Va = \frac{Mt - Pd}{\rho_{\text{água}}}$$

Onde:

Va = Volume de água (m³);

Mt = Massa total de alimentação diária (kg/dia);

Pd = Produção diária de resíduo (kg/dia);

$\rho_{\text{água}}$ = Massa específica da água (kg/m³).

3.7.3 Cálculo do volume do reator

De acordo com Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), a massa específica dos resíduos alimentares está na faixa de 131,0 kg/m³ a 481,0 kg/m³, sendo 291,0 kg/m³ um valor típico. Segundo Carrilho (2012), o valor é 500 kg/m³ para esse parâmetro.

A partir de um valor adotado para massa específica dos resíduos alimentares gerados pelo RU, calculou-se o volume de resíduos a serem processados no reator diariamente, a partir da seguinte equação:

$$V_{resíduos} = \frac{Pd(kg/dia)}{massa\ específica\ (\frac{kg}{m^3})}$$

Somando-se o volume de água a ser adicionado ao sistema com o volume de resíduos a serem digeridos diariamente, obteve-se a vazão total de entrada:

$$Qa = V_{resíduos} + Va$$

O Tempo de Detenção Hidráulico (TDH) constitui o tempo médio de permanência dos resíduos no interior do digestor anaeróbio. Esse parâmetro é muito importante no dimensionamento do digestor anaeróbio e durante a operação do mesmo, dado que influencia diretamente o processo (CARRILHO, 2012).

Segundo Carrilho (2012), para faixa mesofílica (20 a 35 °C) de digestão anaeróbia, o TDH deve ser de 10 a 40 dias. Além disso, a taxa de saída deve ser 1, visto que a saída do reator é constante. Optou-se, então, pelo sistema de digestão anaeróbia bifásica. Sendo assim, foram dimensionados dois reatores, um para fase de hidrólise e outro para fase metanogênica. Dessa forma, o volume do reator CSTR é definido segundo a equação a seguir:

$$V = \frac{Qa \times TDH}{(-ra)}$$

Onde:

V = volume do reator;

Qa = vazão de entrada do efluente;

TDH= Tempo de detenção hidráulica;

-ra = fator de saída.

Considerando os aspectos construtivos, optou-se pelo digestor de formato cilíndrico reto, tendo seu volume definido pela equação:

$$v = \pi \times h \times r^2$$

Onde:

v = volume do cilindro;

h = altura do cilindro;

r = raio da base do cilindro.

Sabendo-se o valor do volume e que no cilindro reto diâmetro (D) = (h) altura, encontram-se, assim, os valores de h (altura) e r (raio), que foram arredondados a fim de facilitar aspectos construtivos, conforme as equações:

Volume do reator:

$$V = \pi \times 2r \times r^2$$
$$V = 2\pi r^3$$

Raio do reator:

$$r = \left(\frac{V}{2 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

A partir do indicado neste capítulo sobre materiais e métodos, passamos à discussão sobre a análise econômica da metanização de resíduos alimentares como fonte de energia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES NO RU

No Restaurante Universitário da UFSC são servidas em média nove mil refeições por dia, de segunda a sexta, e duas mil nos finais de semana.

Foram realizadas pesagens dos resíduos alimentares do RU entre os dias 24 de setembro de 2018 e 19 de outubro de 2018, totalizando 20 dias de pesagens. Sendo assim, os resultados obtidos são apresentados no Quadro 5, que segue.

Quadro 5 - Massa dos resíduos alimentares gerados no RU

Data	Almoço (kg)	Janta (kg)	Total dia (kg)
24/09/18	349,90	164,20	514,10
25/09/18	272,40	140,20	412,60
26/09/18	275,20	116,30	391,50
27/09/18	346,30	143,00	489,30
28/09/18	510,80	231,40	742,20
01/10/18	350,10	204,00	554,10
02/10/18	270,60	205,30	475,90
03/10/18	309,10	209,50	518,60
04/10/18	314,70	116,50	431,20
05/10/18	211,20	133,70	344,90
08/10/18	237,80	129,50	367,30
09/10/18	350,10	191,70	541,80
10/10/18	334,10	189,30	523,40
11/10/18	291,40	127,50	418,90
12/10/18	64,30	62,10	126,40
15/10/18	240,20	203,50	443,70
16/10/18	702,80	240,80	943,60
17/10/18	423,10	217,40	640,50
18/10/18	308,00	133,90	441,90
19/10/18	178,30	213,30	391,60
Total médio (kg/dia) =			485,68

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

De acordo com o Quadro 6, no RU são gerados, em média, 486 kg/dia de resíduos alimentares, sendo a maior parte é proveniente do

salão, ou seja, restos de alimentos deixados pelos frequentadores, fazendo com que o descarte de sobras seja bastante significativo.

Os resultados apresentam a necessidade de ações de conscientização da comunidade acadêmica para redução de desperdícios, além de conscientização ambiental.

4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS ALIMENTARES DO RU

Os resíduos alimentares possuem em média 24% de sólidos voláteis em sua composição, conforme exposto no item 3.4 sobre a avaliação do potencial de geração de biogás dos resíduos alimentares do RU. Considerando a quantidade diária de 486 kg de resíduos alimentares gerados pelo Restaurante, obteve-se o valor equivalente de sólidos voláteis igual a:

116,64 kg SV/dia.

Utilizando a média dos valores de potencial metanogênico dos resíduos alimentares, apresentados por diversos autores, obteve-se o valor de $0,462 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{kgSV}^{-1}$. Portanto, a produção diária de metano gerada pelos resíduos alimentares do RU é igual a:

53,89 m³ CH₄/dia.

Segundo os estudos de Malinowsky (2016), para COV de 2Kg SVT/m³/dia aplicados no sistema experimental, atingiu-se altos níveis de produção de biogás, com concentração de metano de 64%. Assumiu-se, então, que a porcentagem de metano na composição do biogás oriundo da biodigestão dos resíduos orgânicos do RU seja equivalente a 64%. Sendo assim, obteve-se que o volume de biogás gerado é igual a:

84,20 m³/dia.

O que equivale a **2.526 m³** de biogás por mês.

4.3 ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS GERADO PELO SISTEMA EXPERIMENTAL

Foram realizadas análises qualitativas e quantitativas com o intuito de se ter conhecimento a respeito do biogás gerado no sistema experimental. Os dados obtidos são da partida dos reatores, não sendo ainda valores finais do sistema experimental, portanto, não foram utilizados nos cálculos de dimensionamento do sistema e na avaliação de potencial de geração de biogás.

As análises foram realizadas durante o período de 45 dias, 15 dias para cada Carga Orgânica Aplicada (COA), com medição diária do volume de biogás, e uma vez por semana foram realizadas análises da característica do biogás e sua porcentagem de metano. Utilizando os aparelhos citados no item 3.5, em relação ao monitoramento do volume de biogás e determinação do teor de metano, e seguindo a metodologia apresentada, encontraram-se os valores indicados no Quadro 6, a seguir.

Quadro 6 - Análises do biogás

Qualitativo e Quantitativo do biogás						
Carga:	1 kg STV/ m ³ /dia		2 kg STV/m ³ /dia		3 kg STV/m ³ /dia	
Dias	L de metano/kg de STV adicionados	% Metano	L de metano/kg de STV adicionados	% Metano	L de metano/kg de STV adicionados	% Metano
1	15,3	65	23,5	68	15,3	69
2	52,5	65	43,3	68	18,8	69
3	105,0	65	125,0	68	97,3	69
4	150,5	65	183,0	68	178,3	69
5	168,8	65	216,8	68	226,8	69
6	172,8	65	229,8	68	267,8	69
7	202,5	65	252,0	68	297,5	69
8	161,8	65	231,0	64	316,0	69
9	164,8	68	220,5	64	338,0	69
10	140,0	68	192,0	64	311,0	69
11	136,3	68	176,0	64	268,5	69
12	89,8	68	83,3	64	258,5	69
13	67,5	68	84,8	64	133,0	69
14	102,0	68	137,0	64	172,8	69
15	115,3	68	160,3	64	211,3	69

Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

A porcentagem média de metano no biogás gerado pelo sistema experimental para carga de 1 kg STV/m³/dia foi de 66,5% e volume diário de 123 L/kg de STV adicionados. Para carga de 2 kg STV/m³/dia, a porcentagem média de metano foi de 66% e volume de 157,2 L/kg de

STV adicionados. Já para carga de 3 kg STV/m³/dia, a porcentagem média de metano no biogás gerado pelo sistema experimental foi de 69% e volume médio diário de 207,4 L/kg de STV adicionados.

4.4 PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

4.4.1 Cenário 1: utilização do biogás como gás de cozinha

Através de pesquisas com a Administração do Restaurante Universitário foram identificados que atualmente o restaurante conta com seis botijões de 190 kg de GLP, localizados nos fundos do estabelecimento, conforme indicados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 - Central de gás do RU



Fonte: Acervo da autora, 2018.

Figura 20 - Botijões de gás do RU



Fonte: Acervo da autora, 2018.

De acordo com documentos fornecidos pela administração do RU, o Restaurante apresenta contrato com a empresa Ultragas, a qual abastece os botijões de gás com 480 kg de GLP a cada quatro dias, esse sistema ocorre porque os botijões estão operando apenas com 40% da sua capacidade, devido a problemas técnicos com pressurizador. Em contrato está estipulado o valor de R\$3,89 por kg de GLP.

Como a cada quatro (4) dias os botijões de gás do RU são abastecidos, podemos estimar que em média o RU é abastecido 8 vezes por mês com 480 kg. O consumo mensal de GLP pode, então, ser calculado através da equação:

$$480 \text{ kg} \times 8 \text{ vezes no mês} = 3.840 \text{ kg de GLP}$$

Através da informação em contrato do valor de R\$3,89 a cada kg de GLP, obteve-se o valor de gastos com GLP para funcionamento do RU:

$$480 \text{ kg} \times 8 \text{ vezes por mês} \times \text{R\$}3,89 = \text{R\$}14.937,60 \text{ por mês}$$

Para se ter a demanda mensal de biogás necessária para funcionamento do RU, utilizou-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned} &\text{Demanda mensal de biogás} \\ &= \text{Consumo mensal de GLP(kg)} \times \frac{1\text{m}^3 \text{ de biogás}}{0,92\text{kgGLP}} \end{aligned}$$

$$3.840 \text{ kg de GLP} \times \frac{1\text{m}^3 \text{ de biogás}}{0,92\text{kg de GLP}} = 4.174 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

Como os Resíduos alimentares do RU podem gerar 2.526 m³ de biogás, observou-se que cobre a demanda necessária para funcionamento do restaurante por 18 dias do mês, podendo ser utilizado como gás de cozinha através da combustão direta. Além disso, representa uma economia de aproximadamente R\$9.000,00 por mês.

4.4.2 Cenário 2: conversão do biogás em energia elétrica

Segundo Coldebella et al. (2006), o biogás com um teor de metano entre 50% e 80% terá um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m³.

Assim, através da caracterização do biogás no aparelho GEM 2000, obteve-se um teor de metano de 64% para os resíduos alimentares do RU, que representa em média um Poder Calorífico de 6,34 kWh/m³. Dessa forma, tem-se a produção de:

533,83kWh/dia.

Sendo, portanto, 16.014,84kWh/mês.

Porém, como a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de aproximadamente 30%, a produção real de energia é equivalente a:

160,15kWh/dia.

Sendo assim, 4.804,45kWh/mês.

Segundo o estudo de Maragno (2017), 90,70% do consumo de energia elétrica da UFSC para o ano de 2017 se deu no segmento de alta tensão fora ponta. Através de cálculos tarifários apresentados pelo site da companhia elétrica CELESC, foi possível obter o preço cobrado pelo kWh ao grupo a qual a Universidade está incluída. O valor obtido é de R\$ 0,50249 por kWh consumido.

Sendo assim, o biogás gerado pelos resíduos alimentares do RU, representa aproximadamente R\$ 2.414,18.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO DIGESTOR ANAERÓBIO EM ESCALA REAL

4.5.1 Cálculo do volume de água inserido no reator

Para determinação da carga de sólidos totais adicionada diariamente ao reator, foi considerada a média dos valores observados na literatura e apresentados no Quadro 3. Portanto, foi utilizado o valor de 25% de ST, para uma quantidade média de substrato produzida diariamente de 486 kg (Item 4.1). Assim, a partir do cálculo se obteve:

$$Cst = \frac{Pd \times STi}{100}$$

$$Cst = \frac{486 \times 25}{100}$$

$$Cst = 121,5 \text{ kg/dia}$$

Em vista disso, conclui-se que diariamente são adicionados ao reator anaeróbio 121,5 kg de Sólidos Totais. Conforme mencionado anteriormente, é necessário que o substrato apresente no sistema 15% de ST diluídos para o seu ideal funcionamento. Desse modo, será necessário que ocorra umidificação através da adição de água. Assim, a massa total de alimentação diária do reator que se obteve é:

$$Mt = \frac{Cst \times 100}{STf}$$

$$Mt = \frac{121,5 \times 100}{15}$$

$$Mt = 810 \text{ kg/dia}$$

Logo, a massa total que deve ser inserida diariamente ao reator é de 810 kg. Como deste montante, 486 kg são resíduos alimentares gerados pelo RU, o restante do valor é a quantidade de água para funcionamento de seu sistema. Dessa forma, o volume de água necessário é:

$$Va = \frac{Mt - Pd}{\rho_{\text{água}}}$$

$$Va = \frac{810 - 486}{1000}$$

$$Va = 0,32 \text{ m}^3 = 320 \text{ L}$$

4.5.2 Cálculo do volume do reator

Conforme apresentado anteriormente na literatura, adotou-se o valor 400 kg/m³ para massa específica dos resíduos alimentares gerados pelo Restaurante Universitário. Sendo assim, obteve-se o volume de resíduos a serem processados no reator diariamente:

$$V_{\text{resíduos}} = \frac{Pd(\text{kg}/\text{dia})}{\text{massa específica} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$V_{\text{resíduos}} = \frac{486}{400}$$

$$V_{\text{resíduos}} = 1,22 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Tem-se, então, que diariamente são inseridos no reator 1,22 m³ de resíduos alimentares do RU. Adicionando o volume de água ao volume de resíduos, obtém a-se vazão total de entrada (Qa):

$$Qa = V_{\text{resíduos}} + Va$$

$$Qa = 1,22 + 0,32$$

$$Qa = 1,54 \text{ m}^3$$

Para se alcançar o melhor controle operacional para substratos com alto valor energético, a Probiogás sugere a utilização de reatores de dois estágios, nos quais o processo anaeróbio ocorre separadamente em duas etapas: uma opção é realizar a fase de hidrólise em um reator; e a fase de metanogênese no reator principal.

Para tanto, foi adotado 30 dias como Tempo de Detenção Hidráulico (TDH) para a presente pesquisa, conforme indicado por Carrilhos (2012). Optou-se, em vista disso, pela digestão bifásica, sendo 5 dias destinados para a fase de hidrólise do sistema, e 25 para a fase de metanogênese. Dessa forma, o volume do reator CSTR é definido segundo a equação:

Reator 1 - Hidrólise:

$$V1 = \frac{Qa \times TDH}{(-ra)}$$

$$V1 = \frac{1,54 \times 5}{1}$$

$$V1 = 7,7 \text{ m}^3$$

Reator 2 – Metanogênese:

$$V2 = \frac{Qa \times TDH}{(-ra)}$$

$$V2 = \frac{1,54 \times 25}{1}$$

$$V2 = 38,5 \text{ m}^3$$

Como mencionado anteriormente, para facilidade de aspectos construtivos, optou-se por um digestor de formato cilíndrico reto. As dimensões dos reatores podem ser definidas de acordo com as seguintes equações:

Dimensões do reator 1:

$$r1 = \left(\frac{V}{2 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r1 = \left(\frac{7,7}{2 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r1 = 1,07 \text{ m}$$

Portanto, $D = h = 2,14 \text{ m}$.

Dimensões do reator 2:

$$r_2 = \left(\frac{V}{2 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

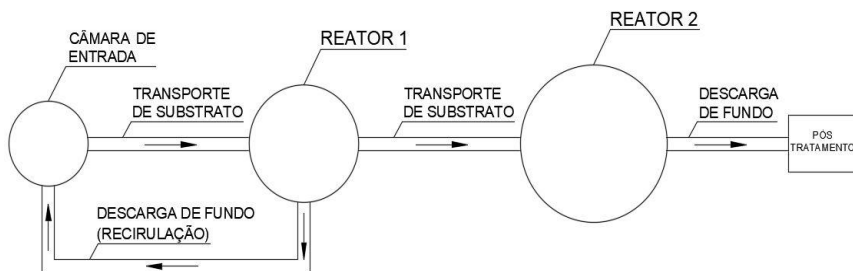
$$r_2 = \left(\frac{38,5}{2 \times \pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r_2 = 1,83 \text{ m}$$

Portanto, $D = h = 3,66 \text{ m}$.

Dessa maneira, a Figura 21 apresenta o esquema do sistema de digestão proposto.

Figura 21 - Sistema de digestão dos Resíduos Alimentares



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

A valorização dos resíduos alimentares do RU em digestão anaeróbia se mostrou um processo promissor para geração de energia no Restaurante da UFSC. Assim, com a implantação do sistema proposto, os resíduos deixariam de ser um passivo ambiental e se tornariam alternativa energética. A ação não só beneficiaria economicamente a Instituição, mas também ambientalmente, contribuindo para a diversificação da matriz energética no âmbito sustentável.

4.5.3 Componentes do sistema de digestão

O sistema de digestão anaeróbia proposto conta com os seguintes componentes:

- Câmara de entrada: onde ocorre o tratamento de umidificação do substrato, ou seja, local onde se efetua a mistura dos resíduos

orgânicos com água. Está localizado no sistema anterior ao Reator 1, onde o substrato será diluído de forma que apresente 15% de ST. A câmara de entrada também é responsável pela trituração e equalização do substrato, de modo que alimente o reator de forma contínua e ordenada. O triturador é um aparelho acoplado à câmara de entrada que irá triturar os resíduos alimentares do RU. Além disso, a câmara de entrada conta com agitadores, para que se homogeneize o sistema, aumentando a eficiência do reator.

- **Tanque Digestor:** é o reator propriamente dito, local onde se processa a digestão anaeróbia dos resíduos. O projeto é composto por dois reatores atuando no processo de digestão anaeróbia bifásica. No Reator 1 ocorre a fase de hidrólise do sistema, por um período de 5 dias. Já no Reator 2, que é o principal, ocorre a metanogênese, em 25 dias de processo. A digestão ocorrerá em sistema contínuo, visto que o gerador de resíduos, o Restaurante Universitário, produz diariamente substrato em quantidade significativa. Dessa maneira, à medida que o substrato é adicionado ao reator, o material é digerido e encaminhado ao reator principal.
- **Gasômetro:** câmara onde se acumula o biogás gerado pelo sistema de digestão anaeróbia. O projeto conta com um gasômetro tipo membrana dupla, com membrana externa fixa, para proteção da membrana interna contra intempéries e radiações UV.
- **Descarga de fundo:** tem como objetivo a retirada do resíduo líquido, que, após a perda do excesso de água, transforma-se em um material fertilizante, podendo ser utilizado para fins agrícolas. O projeto contará com tubulações acopladas na lateral do Reator 1 e na parte inferior do Reator 2. A descarga de fundo do Reator 1, onde ocorre a hidrólise, deve ser feita a cada 30 dias para se evitar a colmatação do equipamento e os sólidos retirados podem ser recirculados ao sistema. Já a tubulação de descarga de fundo do Reator 2 é responsável por encaminhar o material fertilizante para uma posterior utilização, visto que possui uma elevada carga de nutrientes, como Fósforo e Nitrogênio.

A partir do exposto, apresentamos em seguida as conclusões e recomendações deste estudo, que teve como finalidade avaliar o potencial de produção de biogás a partir de resíduos alimentares provenientes do RU da UFSC e apresentar uma análise econômica da metanização desses resíduos como fonte de energia

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados apresentados no presente estudo, pode-se concluir que o processo de digestão anaeróbia com vistas ao aproveitamento energético dos resíduos alimentares do RU da UFSC se mostrou bastante satisfatório e uma excelente opção de utilização de energia renovável.

Diariamente, o Restaurante Universitário gera em média 486 kg de resíduos alimentares, que, através dos resultados aqui, apresentam capacidade de geração mensal de 2.526 m³ de biogás. Se utilizado como gás de cozinha em combustão direta, o biogás poderá suprir a demanda de GLP do Restaurante por 18 dias do mês, representando uma economia de aproximadamente R\$ 9.000,00. Já em termos de energia elétrica, se aproveitado em geradores de conversão, a capacidade de geração é de 4.804,45kWh/mês, o que representa R\$ 2.414,20 em energia elétrica. Portanto, empregado como gás de cozinha, o biogás destaca como mais viável economicamente do que convertido em energia elétrica.

Para a valorização dos resíduos alimentares do RU, foi dimensionado um sistema de reatores anaeróbios para metanização desses resíduos e aproveitamento do biogás. Para tanto, sugere-se a construção do modelo de reator de fluxo contínuo com agitação (CSTR), visto que o mesmo apresenta simples operação e características hidráulicas compatíveis com a do substrato. Além do aproveitamento do biogás, o biofertilizante rico em nutrientes, obtido da digestão, pode ser utilizado como adubo para as áreas verdes do campus ou para uso na agricultura.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que sejam feitas medidas de controle de desperdício para os funcionários do RU e projetos de educação ambiental para os frequentadores do Restaurante, visando a diminuição do desperdício de alimentos. Já no âmbito do sistema de metanização, recomenda-se que a planta seja construída e aplicada em escala real, de modo a valorizar e tratar os resíduos gerados pelo RU, além de conferir os valores de eficiência e produção de biogás obtidos neste estudo. Por fim, sugere-se que seja realizada a avaliação dos custos de implementação da planta dimensionada no projeto e estudos para diferentes configurações de reatores.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR 10004: resíduos sólidos*. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. São Paulo: Grappa, 2016.

ALVES, J. W. S. *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. 2000. 164f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANDRADE, Hytalo de Oliveira et al. Aspectos teóricos na produção de biogás e biofertilizante pelo mecanismo de biodigestão e geração de energia elétrica limpa através de um gerador específico. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. *Anais...* Palmas, TO: IFTO, 2012.

ANEROUSIS, J. P.; S. K. WHITMAN . Iron Sponge: Still a Top Option for Sour Gas Sweetening. *Oil and Gas Journal*, Tulsa,. v. 18, p. 71-76, feb. 1985.

AVELLAR, L. H. N. *A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental*. 2001, 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2001.

BARCELOS, B. R. *Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos*. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

BORGES, F. Q.; BARAÚNA, N. C.; CHOTOE, J. R. Fontes renováveis de energia elétrica e qualidade de vida em comunidades na Ilha do Marajó, Pará. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Curitiba, v. 33, 2015.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 3 ago. 2010.

BRASIL. *Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação*. Brasília, DF: MMA; ICLEI, 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/182/_arquivos/manual_de_residuos_solidos3003_182.pdf>.

BRAUN, R.; WELLINGER, A. *Potential of co-digestion*. [S.l.]: IEA Bioenergy, 2003. (IEA Bioenergy, v. 37).
CARRILHO, N. F. Q. *Valorização de bio-resíduos alimentares por digestão anaeróbia descentralizada—caso de estudo: Campus da FCT/UNL*. 2012. 126f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova Lisboa, Lisboa, PT, 2012.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. *Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários*. Florianópolis: ProSab, 2006.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; DALSSASSO, R. L.; ROHERS, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 4, p. 385-392, out./dez. 2010.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v. 30, n. 5, p. 831-844, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. v. 5.

COLDEBELLA, A. et al. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006. Campinas. *Anais...* Campinas: AGRENER, 2006.

COMASTRI FILHO, J. A. Biogás: independência energética do Pantanal Mato-Grossense. **Embrapa Pantanal**: Circular Técnica (INFOTECA-E), Corumbá, MS, 1981.

COSTA, D. F. *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*. 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Impactos da participação do Biogás e do Biometano na matriz brasileira. In: FÓRUM DO BIOGÁS, 4., 2017, São Paulo. *Anais...* São Paulo: EPE, 17 out. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf>>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. *Empresa de Pesquisa Energética*, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.

FARRET, F. A. *Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica*. Santa Maria: Editora da UFSM, 1999.

FERREIRA, B. O. *Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás*. 2015. 124f. Dissertação (Mestrado em Neamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FRANÇA JUNIOR, A. T. *Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto*. 2008. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Olha da Soleira, SP, 2008.

FRIAS, J. F. *Proposta de um biodigestor para geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário – Campus A. C. Simões*. 2016; Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

GADANHA, C. D. et al. *Máquinas e implementos agrícolas do Brasil*. São Paulo: IPT, 1991.

GOLDEMBERG, J. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: Edusp, 1998.

GOLDEMBERG, J. Biomass and energy. *Química nova*, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOMES, J. N. C. *Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do câmpus Pampulha da UFMG*. 2014. 94f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) –Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GRADY JUNIOR, C. P. L. et al.. *Biological wastewater treatment, revised and expanded*. New York: Crc Press, 1998

GUERRA, J. A.; YOUSSEF, A. Y. *As Energias Renováveis no Brasil: entre o mercado e a universidade*. Palhoça: Unisul, 2012.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Malaysia, p. 868-875, 2014.

LEITE, C. B. *Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Aproveitamento Energético: avaliação econômica entre as tecnologias de digestão anaeróbica e incineração*. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, 2016.

LEITE, V. D. et al. Tratamento anaeróbico de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999.

LIMA, P. C. R. *Biogás da suinocultura: uma importante fonte de geração de energia*. Lisboa: Consultoria Legislativa, 2007.

LISSENS, G. et al. Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste. *Environmental Science & Technology*, v. 38, n. 12, p. 3418-3424, 2004.

LOBATO, L. C. S. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2011. 184f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MALINOWSKY, C. *Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio*. 2016. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

MARAGNO, P. V. S. et al. *Como suprir o consumo energético da UFSC com energia solar fotovoltaica*. 2017. 124p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.

MARTINS, K. A. *Atividade metanogênica da fração orgânica de resíduos sólidos gerados em um restaurante universitário*. 2017. 64p. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2017.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LIBRES, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes: an overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 74, n. 1, p. 3-16, aug. 2000.

METCALF, L.; EDDY, H. *Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse*. New York: McGraw-Hill Education, 1979.

MONTE, M. M. D. *Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais*. 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Nova de Lisboa, 2010.

MONTENEGRO, A. A. *Fontes não-convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa*. Florianópolis, SC: UFSC/Labsolar/NCTS, 2000.

OLIVIERA, M. M. M. et al. Análise ambiental na indústria do biogás em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: a geração de energia a partir de resíduos. *Revista Geográfica de América Central*, Heredia, v. 2, p. 1-11, 2011.

OSCO, L. P. Et al. Proposta de gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos no comando de polícia interior: CPI-8. *Colloquium Exactarum*, Presidente Prudente, SP, v. 5, n. especial, p. 220-228, jul./dez. 2013. Disponível em:
<<http://www.unoeste.br/site/enepe/2013/suplementos/area/Exactarum/Engenharia%20Ambiental/PROPOSTA%20DE%20GERENCIAMENTO%20DOS%20RES%20C3%84DUOS%20S%20C3%93LIDOS%20PRODUZIDOS%20NO%20COMANDO%20DE%20POL%20C3%84DCIA%20INTERIOR%20CPI-8.pdf>>.

PNBB. Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano. Curitiba: Abiogás, 2015.

PROBIOGÁS. Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético no Brasil. Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil. Substratos, Digestores e uso do Biogas. Brasília, 2015.

PROBIOGÁS. Projeto Brasil - Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil. Brasília, 2016.

SC ENERGIA. Programa Catarinense de Energias Limpas - SC Energia. *Biomassa*. Florianópolis, SC: SC Energia, 2018. Disponível em:
<<http://www.scmaisenergia.sc.gov.br/sds/?p=136>>. Acesso em: 24 set. 2018.

RATHMANN, R. et al. Biodiesel: uma alternativa estratégica na matriz energética brasileira. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO DE NEGÓCIOS, 2., 2005, Curitiba. *Anais...* Curitiba: UNIFAE, 2005.

REICHERT, G. A. Aplicação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos: uma revisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23a ed., 2005, Campo Grande. *Anais...* Campo Grande: ABES, 2005.

REIS, A. S. *Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio*. 2012. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

ROCHA, A. J. S. *Produção descentralizada de energia a partir de resíduos orgânicos e análise do ciclo de vida*. 2014. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, PT, 2014.

ROSSILO-CALLE, F. The role of biomass energy in rural development. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., Campinas, 2000. *Anais...* Campinas, SP: Unicamp, 2000.

SANTA CATARINA. Lei nº 17.542, de 12 de julho de 2018. Institui a Política Estadual do Biogás e estabelece outras providências. *Diário Oficial do Estado de Santa Catarina*, Florianópolis, 13 jul. 2018. Disponível em:
<http://leis.alesec.sc.gov.br/html/2018/17542_2018_lei.html>.

SANTOS, F. F. P. *Produção de biodiesel assistida por ultra-som*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SALOMON, K. R. *Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade*. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

SCHALCH, V. et al. *Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2002.

SCHULZ, F. *Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos*. 2015. 114f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2015.

SGANZERLA, E. *Biodigestor: uma solução*. Porto Alegre, Agropecuária, 1983.

SILVA, W. R. *Estudo Cinético do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Vegetais*. 2009. 175f. Tese (Doutorado em Química Analítica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2009.

SIMIONI, C. A. *O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis*. 2006. 314f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, A.; SILVA, C. L. Energia e meio ambiente: o trade off entre as matrizes energéticas de fontes renováveis e não renováveis no Brasil. *Revista Terceiro Incluído*, Joãoânia, v. 2, n. 2, p. 63-84, 2012.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*, v. 44, n. 137, p. 88-94, 1984.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, 1993.

THIEME, E. et al. Catálogo de tecnologias e empresas de biogás. *Probiogás*, 2015.

TOLMASQUIM, M. T (Org.). *Fontes renováveis de energia no Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência; UFRJ, 2003.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R.. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos estudos-CEBRAP*, São Paulo, n. 79, p. 47-69, 2007.

UC DAVIS. Biodigester turns campus waste into campus energy. 2014. Disponível em: <<https://www.ucdavis.edu/news/biodigester-turns-campus-waste-campus-energy/>>. Acesso em: nov. 2018

UNIVERSITY OF WISCONSIN. University of Wisconsin Oshkosh Urban Anaerobic Dry Digester (BD1). 2014. Disponível em: <<https://www.americanbiogascouncil.org/projectProfiles/oshkoshWI.pdf>>. Acesso em: nov. 2017.

ZANETTE, A. L. *Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil*. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZHANG, L.; LEE, Y.; JAHNG, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements. *Bioresource technology*, New York, v. 102, n. 8, p. 5048-5059, 2011.

ZHANG, C. et al. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system. *Bioresource technology*, New York, v. 145, p. 10-16, 2013.

ZHANG, R. et al. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, New York, v. 98, p. 929-935, 2007.