



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica
- Mestrado e Doutorado -

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS E A
APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE
EXERGONECONÔMICA PARA UM SISTEMA DE
COGERAÇÃO USANDO BIOMETANO**

Por

Davi Brito Nunes Oliveira

*Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para a obtenção do grau de Mestre.*

DAVI BRITO NUNES OLIVEIRA

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS E A
APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE
EXERGONECONÔMICA PARA UM SISTEMA DE
COGERAÇÃO USANDO BIOMETANO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Doutor Carlos Antônio Cabral dos Santos

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

O48e Oliveira, Davi Brito Nunes.

Estudo da produção do biogás e a aplicação de uma análise exergoeconômica para um sistema de cogeração usando biometano / Davi Brito Nunes Oliveira. - João Pessoa, 2023.

93 f. : il.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos Santos. Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Biogás. 2. Análise exergoeconômica. 3. Biometano.
4. Biodigestor. I. Santos, Carlos Antônio Cabral dos.

UFPB
/BC

II. Título.

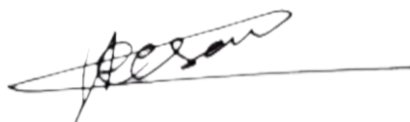
CDU
662.767.2(043)

ESTUDO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS E A APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA PARA UM SISTEMA DE COGERAÇÃO USANDO BIOMETANO

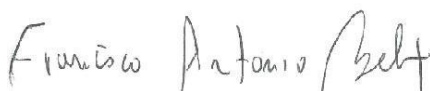
por

DAVI BRITO NUNES OLIVEIRA

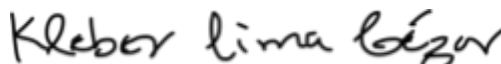
Dissertação aprovada em 29 de setembro de 2023



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO CABRAL DOS SANTOS
Orientador – UFPB



Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. KLEBER LIMA CEZAR
Examinador Externo – UFPI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e às pessoas especiais que Ele colocou na minha vida para tornar a minha jornada mais tranquila. Em especial, destaco minha mãe, meu pai, meu irmão e minha namorada, os quais sempre se mostraram presentes nos momentos bons e ruins da minha existência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força, sabedoria e inteligência para concluir essa etapa tão importante, repleta de desafios e que me ensinou muito.

Agradeço aos meus pais, Gilma e Eli, por terem investido na minha educação e estarem presentes, demonstrando o amor e carinho que eles têm por mim.

Agradeço a meu irmão, Jônatas, por todo o companheirismo que sempre demonstrou nos momentos difíceis.

Agradeço a minha namorada, Ana Beatriz, pelo seu amor notado em atitudes e pelo seu empenho em me ver feliz.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Carlos Cabral, o qual sempre me ajudou e ensinou a ser um pesquisador melhor.

Agradeço aos examinadores da minha banca: o professor Dr. Francisco Belo, o professor Dr. Kléber Lima e o professor Dr. Álvaro Ochoa, os quais se empenharam em dar orientações valiosas para a realização da minha dissertação.

Agradeço aos meus colegas do mestrado, em especial Neto, Igor, Merques e Caroline, os quais enfrentaram comigo os desafios que a pós-graduação ofereceu e ajudaram grandemente na execução dos experimentos.

Agradeço à UFPB e à Capes por todo o suporte intelectual e financeiro que me foi fornecido.

ESTUDO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS E A APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA PARA UM SISTEMA DE COGERAÇÃO USANDO BIOMETANO

RESUMO

O presente trabalho aborda a análise energética e exergoeconômica de um sistema de cogeração que utiliza biometano para a geração de energia e refrigeração por absorção. Este sistema é composto por biodigestores, um grupo gerador Leon Heimer com potência de 100 kW e um refrigerador por absorção ACF60-00 da marca ROBUR. Dois tipos de biodigestores foram desenvolvidos para a produção de biometano: um com 5 recipientes em série e outro utilizando uma bombona de 200 litros. O último demonstrou capacidade de produzir biogás, enquanto o primeiro não apresentou essa capacidade; ambos foram avaliados ao longo de um período de dois meses. Além disso, foram implementados filtros purificadores conectados aos biodigestores para a conversão do biogás em biometano. Para aferir a eficácia dos purificadores, foi realizada a medição da temperatura nas regiões sólidas da chama utilizando uma câmera térmica 20A800G Cativ 12V 640X480 FLKTI480PRO9HZBR Fluke, aferindo uma temperatura média de 33°C, que propicia a atividade dos microrganismos anaeróbios mesofílicos no processo de metanogênese, contribuindo para o aumento da concentração de metano no biogás. A estimativa teórica demonstrou que, a partir de 133,33 kg de matéria orgânica introduzida no biodigestor, 95,6% dos resíduos foram aproveitados, resultando em 17.471,748 litros de biogás e 292,47 kg de biofertilizante. Em relação à análise energética e exergoeconômica, constatou-se a produção de 32,0396 kWh de energia elétrica e 23,9093 kWh de frio. Finalmente, com a finalidade de diminuir o período de retorno sobre o investimento (ROI) do sistema de cogeração, foi realizada a análise exergoeconômica considerando um volume 50 vezes maior do biodigestor, tendo como resultado o ROI de 7 anos.

Palavras-chave: análise exergoeconômica; biogás; biometano; biodigestor.

STUDY OF BIOGAS PRODUCTION AND THE APPLICATION OF AN EXERGoeconomic ANALYSIS FOR A COGENERATION SYSTEM USING BIOMETHANE

ABSTRACT

The present work addresses the energetic and exergoeconomic analysis of a cogeneration system that uses biomethane for energy generation and absorption refrigeration. This system consists of biodigesters, a Leon Heimer generator set with a power of 100 kW and an ACF60-00 absorption refrigerator from the ROBUR brand. Two types of biodigesters were developed for the production of biomethane: one with 5 containers in series and the other using a 200-liter drum. The latter demonstrated the capacity to produce biogas, while the former did not demonstrate this capacity; both were evaluated over a two-month period. Furthermore, purifying filters connected to the biodigesters were implemented to convert biogas into biomethane. To assess the effectiveness of the purifiers, the temperature was measured in the solid regions of the flame using a 20A800G Cativ 12V 640X480 FLKTI480PRO9HZBR Fluke thermal camera, measuring an average temperature of 33°C, which promotes the activity of mesophilic anaerobic microorganisms in the methanogenesis process, contributing to increase the concentration of methane in biogas. The theoretical estimate demonstrated that, from 133.33 kg of organic matter introduced into the biodigester, 95.6% of the waste was used, resulting in 17,471.748 liters of biogas and 292.47 kg of biofertilizer. In relation to the energy and exergoeconomic analysis, the production of 32.0396 kWh of electrical energy and 23.9093 kWh of cold energy was found. Finally, in order to reduce the period of return on investment (ROI) of the cogeneration system, an exergoeconomic analysis was carried out considering a volume 50 times greater than the biodigester, resulting in an ROI of 7 years.

Keywords: exergoeconomic analysis; biogas; biomethane; biodigester.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	18
INTRODUÇÃO	18
1.1- CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2- MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	19
1.3- OBJETIVO GERAL	20
1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
CAPÍTULO II	22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
CAPÍTULO III	24
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1- RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E BIOGÁS	24
3.1.1- Resíduos sólidos urbanos	24
3.1.2- Resíduos hortifruti em feiras livres e restaurantes universitários	25
3.1.3- Composição do biogás	25
3.1.4- Produção do biogás no Brasil e no mundo	27
3.1.5- Aplicações do biogás	28
3.2- PROCESSO DE BIODIGESTÃO E BIODIGESTORES	29
3.2.1- Digestão anaeróbia	29
3.2.2- Tipos de biodigestores	30
3.3- TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	32
3.3.1-Contaminantes que afetam o potencial energético do biogás	32
3.3.2- Métodos de remoção de água	35
3.3.3- Métodos de remoção do ácido sulfídrico	36
3.3.4- Método de remoção da amônia	38
3.3.5- Métodos de remoção dos siloxanos	39
3.3.6- Métodos de remoção do gás carbônico	39
3.3.7- Aspectos a se considerar nos processos de limpeza e purificação	41

3.4- COGERAÇÃO	41
3.4.1- Introdução	41
3.4.2- Motor do ciclo Otto	42
3.4.3- Motor do ciclo Diesel	43
3.4.4- Grupo motogerador	44
3.4.5- Turbina a vapor	45
3.4.6- Turbina a gás	45
3.4.7- Trocador de calor	46
3.4.8- Refrigerador por absorção	47
3.5- ANÁLISE TERMODINÂMICA	48
3.5.1- Definição de sistema e volume de controle	48
3.5.2- Primeira lei da Termodinâmica	49
3.5.3- Segunda lei da Termodinâmica	50
3.5.4- Conceito de estado morto	51
3.5.5- Conceito de exergia	51
3.5.6- Cálculo da exergia	52
3.6- EXERGONOMIA	53
3.6.1- Método SPECO	56
CAPÍTULO IV	57
METODOLOGIA	57
4.1- DESCRIÇÃO DO SISTEMA A SER ESTUDADO	57
4.2- CONFECÇÃO DOS BIODIGESTORES E DOS FILTROS PURIFICADORES	59
4.3- PARÂMETROS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	63
4.3.1- Concentração de sólido total e concentração dos sólidos voláteis antes do processo de biodigestão	63
4.3.2- Tempo de retenção hidráulica	64
4.3.3- Carga orgânica volumétrica	65
4.3.4- Temperatura da digestão anaeróbia	66
4.3.5- Potencial hidrogeniônico (pH)	67

4.3.6- Inoculação e fase de arranque	67
4.3.7- Quantidade de biogás produzida	68
4.4- GRUPO GERADOR A GÁS	69
4.5- REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO	69
4.6- ANÁLISE ENERGÉTICA	70
4.7- ANÁLISE EXERGoeCONÔMICA	71
4.7.1- Grupo gerador	72
4.7.2- Refrigerador por absorção	73
4.7.3- Análise de custos	73
CAPÍTULO V	75
RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1- PRODUÇÃO REAL DOS BIODIGESTORES DESENVOLVIDOS	75
5.2- ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE BIODIGESTÃO	76
5.3- ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGoeCONÔMICA	81
CAPÍTULO VI	85
CONCLUSÃO	85
Sugestões para trabalhos futuros	86
REFERÊNCIAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Produção de biogás na Europa	28
Figura 3.2: Biodigestor do modelo indiano	31
Figura 3.3: Biodigestor do modelo chinês	32
Figura 3.4: Bioscrubber	37
Figura 3.5: Sistema de purificação por absorção	40
Figura 3.6: Motor do ciclo Otto de 4 tempos	43
Figura 3.7: Unidade básica de refrigeração por absorção	48
Figura 4.1: Ciclo de cogeração em estudo	59
Figura 4.2: Sistema de biodigestores em série confeccionados	60
Figura 4.3: Biodigestor produzido no Laboratório de Cogeração	62
Figura 4.4: Filtros purificadores e biodigestor	63
Figura 4.5: Grupo gerador Leon Heimer	69
Figura 4.6: Refrigerador por absorção ROBUR	70
Figura 5.1: Medição das imediações sólidas na saída do biogás	76
Figura 5.2: Chama produzida pela queima do biogás	76
Figura 5.3: Sistema envolvendo biodigestores e filtros	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Poder calorífico dos componentes do biogás	26
Tabela 3.2: Remoção de componentes em diferentes aplicações do biogás	29
Tabela 3.3: Contaminantes do biogás e seus impactos sobre o biogás	33
Tabela 4.1: Composição do biogás obtido no aterro sanitário de João Pessoa	57
Tabela 4.2: Custo dos materiais utilizados na confecção dos biodigestores em série	60
Tabela 4.3: Custo dos materiais utilizados na confecção do segundo biodigestor	61
Tabela 4.4: Custo dos materiais utilizados na confecção dos filtros	62
Tabela 4.5: Parâmetros para diferentes tipos de substrato	64
Tabela 4.6: Custos monetários do sistema	71
Tabela 5.1: Estimativa dos parâmetros de digestão nos biodigestores desenvolvidos	80
Tabela 5.2: Parâmetros obtidos nos testes experimentais	81
Tabela 5.3: Análise das propriedades no sistema de cogeração	81

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Símbolos

β	Coeficiente de desempenho do refrigerador por absorção
ϵ	Força eletromotriz (V)
ε	Eficiência exergética
η	Rendimento
φ	Fator de manutenção
c	Custo médio por unidade de exergia (R\$/GJ)
$\dot{C}$	Taxa de custo (R\$/h)
$c(T)$	Calor específico em função da temperatura (J/kg.°C)
C_{CH_4}	Concentração de metano esperada no biogás produzido (%)
COV	Carga orgânica volumétrica (kg _{VS} /(m ³ x d))
E	Quantidade de energia elétrica gerada (kWh)
$\overline{ex}_i^{CH,0}$	Exergia padrão (kJ/kg)
Ex	Exergia (kJ)
ex	Exergia específica (kJ/kg)
$\dot{Ex}$	Taxa de exergia (kW)
F	Quantidade de frio produzido (kWh)
f_k	Fator exergoeconômico
G_{BG}	Custo associado à produção de biogás (R\$)
G_T	Custo associado ao transporte da matéria prima (R\$)

h	Entalpia específica (kJ/kg)
i	Taxa de juros (%)
KE	Energia cinética (J)
$\dot{m}$	Vazão mássica (kg/s)
n_{ano}	Vida útil (anos)
p	Pressão (Pa)
PE	Energia potencial gravitacional (J)
PGY_i	Rendimento potencial do gás ($m^3_{biogás}/ton_{VS}$)
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor (kW)
$Q_{biogás}$	Quantidade de biogás produzida (m^3)
r_k	Diferença relativa do custo
S	Entropia (kJ/K)
s	Entropia específica (kJ/kg x K)
$\dot{S}_{gen}$	Taxa de geração de entropia em relação ao tempo (kW/K)
TRH	Tempo de retenção hidráulica (dias)
TS_i	Concentração de sólido total antes da digestão (%)
u	Energia interna específica (kJ/kg)
U	Tensão útil (V)
v	Volume específico (m^3/kg)
VS_i	Concentração de sólidos voláteis referentes a TS_i (%)
W	Trabalho (kJ)
$\dot{W}$	Taxa de trabalho (kW)

y	Fração molar
z	Altura (m)
$\dot{Z}$	Taxas de despesas (R\$/ano)

Subscritos e sobrescritos

CH	Química
D	Destruída
e	Entrada
EG	Esterco de gado
f	Combustível
GE	Gases de escape
GG	Grupo gerador
HF	Hortifruti
KN	Cinética
O	Ambiente ou padrão
p	Produto
PH	Física
q	Transferência de calor
RA	Refrigerador por absorção
s	Saída
sub	Substrato
tot	Total
w	Potência

Siglas

<i>CFC</i>	Clorofluorcarbonetos
<i>COP</i>	Coefficiente de Performance
<i>CRF</i>	Fator de recuperação de Capital
<i>PCI</i>	Poder Calorífico Inferior
<i>ROI</i>	Retorno sobre o investimento
<i>SPECO</i>	Specific Exergy Costing

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1- CONTEXTUALIZAÇÃO

O Acordo de Paris foi firmado em 12 de dezembro de 2015, durante a COP21 (21ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas). No total, 195 países assinaram esse acordo que entrou em vigor em 4 de novembro de 2016, com o intuito de combater a crise climática que o mundo está enfrentando.

Tal crise está sendo causada pela queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás e petróleo, e, com o aumento da demanda energética, essa situação deve piorar, caso medidas não sejam devidamente tomadas. Segundo a EPE (2014), é estimado que a demanda energética no Brasil eleve um pouco mais que duas vezes até 2050, com prevalecimento do consumo dos derivados de petróleo em relação às energias renováveis.

Para mudar essa situação, o governo brasileiro firmou algumas metas no Acordo de Paris, como: elevar o uso de fontes renováveis de energia, aumentar a participação de bioenergias sustentáveis na matriz energética para aproximadamente 18% até o ano de 2030; usar tecnologias que não afetem demasiadamente o meio ambiente nas indústrias, aperfeiçoar a infraestrutura dos transportes, diminuir o desmatamento e restaurar e reflorestar cerca de 12 milhões de hectares (EULER, 2016).

Porém, segundo a Conferência do Clima de 2021, realizada em Glasgow, na Escócia, o Brasil não está alinhando suas ações com as metas estabelecidas no Acordo de Paris. De acordo com o Observatório do Clima (2021), o país teve um aumento de 9,5% de gases nocivos ao ambiente em 2020, maior montante desde 2006; enquanto no mundo inteiro as emissões reduziram cerca de 7%, devido à paralisação de muitas atividades em virtude da pandemia.

Diante de dados tão alarmantes, medidas de combate ao desmatamento e ao incentivo de energias renováveis tinham que ser tomadas. Dentre elas, a mais relevante foi o Programa Nacional Metano Zero, criado em 2022, o qual tem por objetivo a redução de

gases de efeito estufa, por meio do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e agrícolas.

Essa medida se mostra bastante plausível, pois o Brasil pode produzir aproximadamente 120 milhões de m³ de biometano por dia, originado totalmente por resíduos orgânicos, um volume maior que a produção diária de gás do pré-sal (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022).

Ainda segundo o Ministério do Meio Ambiente (2022), linhas de crédito e financiamento aos agentes públicos e privados estão sendo fornecidas com o intuito de desenvolver atividades para a produção do biogás, como:

- a) Compra de biodigestores;
- b) Implementação de sistemas de produção, purificação de biogás e compressão de biometano;
- c) Abastecimento de veículos pesados movidos a biometano através da elaboração de pontos e corredores verdes;
- d) Implantação, em motores de combustão interna de ciclo Otto ou Diesel, de tecnologias que permitam o uso de combustíveis sustentáveis, como o biometano, para atender as normas fixadas pelos órgãos competentes.
- e) Desoneração tributária para infraestruturas que possuam projetos de biogás e biometano ou estejam relacionadas a eles.

Um dos locais ideais para aplicar esse programa é em feira livre, pois esse comércio ao ar livre produz muitos resíduos hortifruti, os quais várias vezes são mal alocados. Segundo a iniciativa “Sem Desperdício” (2019), realizada pela WWF-Brasil, FAO e Embrapa, o maior percentual de descarte de produtos perecíveis em mercados e feiras é de frutas e hortaliças, representando 55% do total.

1.2- MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A busca por soluções dos problemas ambientais e da crise energética tem se intensificado muito nos últimos anos. Cientistas do mundo inteiro vem estudando e trabalhando ao máximo para resolver dilemas que, há alguns anos, pareciam ser praticamente inexplicáveis.

Contudo, nem todos os temas recebem a devida consideração que merecem para mitigar os impactos ambientais. É importante ressaltar que, no contexto brasileiro, existem

escassos estudos científicos concernentes à produção de biometano a partir de resíduos hortifruti. A título de ilustração, uma pesquisa no Google Acadêmico utilizando os termos "biometano" e "resíduos hortifruti" resultou em apenas 11 trabalhos acadêmicos, nenhum dos quais foi conduzido na Paraíba.

Diante disso, este trabalho adquire extrema relevância para o contexto local no qual está sendo conduzido, apresentando uma solução viável para os desafios contemporâneos e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população.

1.3- OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é realizar a análise exergoeconômica do sistema que utiliza biometano produzido a partir de resíduos hortifruti provenientes do Restaurante Universitário (RU) e esterco de gado, de forma a determinar a quantidade de eletricidade e frio que pode ser gerada e seu impacto econômico.

1.4- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o levantamento teórico acerca dos resíduos hortifruti, da produção e purificação do biogás, da quantificação de biogás produzido e da análise energética e exergoeconômica;
- Confeccionar os biodigestores com 5 recipientes em série e o biodigestor com uma bombona de 200 litros;
- Fazer a coleta, armazenamento e transporte dos resíduos hortifruti e do esterco de gado;
- Definir os parâmetros da biodigestão, como: concentração de sólido total e de sólidos voláteis, tempo de retenção hidráulica, carga orgânica volumétrica, temperatura da digestão anaeróbia, pH, inoculação e fase de arranque;
- Inserir água nos biodigestores e, através de testes hidrostáticos, verificar se não há vazamentos;
- Inserir matéria orgânica e água nos biodigestores e, através da medição da temperatura e dos testes de chama, verificar a pureza do biometano;

- Determinar teoricamente a quantidade de biogás, biometano e biofertilizante produzidos nos biodigestores;
- Determinar teoricamente quantidade de eletricidade e frio gerada pelo sistema de cogeração que utiliza o biometano como combustível;
- Aplicar a análise exergoconômica do sistema realizada por Alves (2020);
- Dimensionar o sistema de biodigestores para que o retorno do investimento seja menor que 10 anos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi feita de forma a buscar trabalhos realizados recentemente, nos últimos 5 anos, que envolvam algum dos objetivos citados anteriormente, de forma a elucidar melhor o conhecimento sobre biogás, biodigestores, resíduos hortifruti e da análise exergoeconômica.

Neto (2018) analisou um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série através do estudo comparativo entre duas metodologias exergoeconômicas: Custo Exergético Específico (SPECO) e Teoria de Custo Exergético (TCE). Observou-se que o custo exergético unitário e monetário da metodologia TCE é maior do que o do método SPECO, por causa da dificuldade de alocar custos relacionados a equipamentos dissipativos.

Leite (2019) realizou a análise energética, exergoeconômica e exergoambiental pelo método SPECO em um refrigerador por absorção de simples efeito, um de duplo efeito e dois trocadores de calor propostos para um resort localizado no litoral do Piauí. Foi constatado que o sistema funcionaria por 2 horas com uma taxa de ocupação do resort superior ou igual a 50%.

Alves (2020) realizou a análise energética, exergoeconômica e exergoambiental de um sistema de trigeriação, composto pelo grupo gerador elétrico a gás, o refrigerador por absorção e a usina de biodiesel, utilizando o gás natural. Além disso, ele fez testes nesse sistema de trigeriação usando o biogás, e chegou a conclusão que é necessário a instalação de um sistema de controle de rotação do motor e um sistema eletrônico capaz de controlar a vazão do gás.

Da Silva (2021) utilizou o biodigestor denominado Homebiogas com reator de 1,2 m³ e capacidade de armazenamento de biogás em um gasômetro de 0,7 m³. O experimento foi dividido em três fases: na primeira utilizou-se os resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário como substrato; na segunda fase, após o consumo da matéria

orgânica, o substrato foi suplementado com óleo residual; na terceira etapa se retornou a alimentação com os resíduos orgânicos.

Foi constatado que a taxa de metano na composição do biogás gerado foi, em média, de 64,34%. Além disso, observou-se que a conversão do óleo residual em biogás não foi significativa e que quanto maior a temperatura ambiente, maior a temperatura do reator e, consequentemente, melhor efetividade dos resíduos orgânicos em biogás.

Oliveira e Gattamorta (2021) avaliaram em seus trabalhos a capacidade de produção de metano e geração de energia por meio da análise de resíduos orgânicos descartados em duas feiras livres do Bairro Bela Vista, na cidade de São Paulo. A estimativa de metano gerada no ano foi de 1059,67 à 1412,89 m³, que é capaz de abastecer de 6 a 8 casas anualmente.

Ainda segundo Oliveira e Gattamorta (2021), é possível aproveitar os resíduos de hortifruti para a produção do biogás por meio de um biodigestor autônomo de baixa e média escala, denominado Homebiogas. Esse dispositivo pode ser colocado no caminhão que coleta resíduos da feira e ser transportado para as escolas, gerando um biogás que pode ser utilizado como gás de cozinha e fertilizante líquido para projetos sustentáveis, como horta e compostagem.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1- RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E BIOGÁS

3.1.1- Resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos urbanos podem estar no estado sólido ou semissólido e resultam de atividades de origem doméstica, industrial, hospitalar, agrícola e comercial. Isso inclui resíduos gerados em equipamentos e instalação de controle de poluição e resíduos provenientes de sistemas de tratamento de esgoto e água (ABNT, 2004).

No Brasil, o gerenciamento desses resíduos sólidos urbanos representa um enorme desafio, pois afeta direta e indiretamente a população, quer seja pelos impactos na saúde dos indivíduos, ou pela transformação prejudicial do meio ambiente. Pode-se destacar também que parte do povo brasileiro não é atendido pelo serviço de coleta de lixo e, conseqüentemente, descarta os resíduos sólidos urbanos em locais inadequados. Além disso, parte do lixo coletado é descartado de forma inapropriada em aterros controlados e lixões (GARCILASSO et al., 2018).

Nos lixões, a descarga de resíduos sólidos urbanos de baixa periculosidade (domiciliares e comerciais) e de alta periculosidade (hospitalares e industriais) é feita a céu aberto, sem apresentar nenhum critério técnico para o descarte dos resíduos. Isso acaba gerando vários problemas, como o prejuízo à saúde de catadores que moram no local; em que há uma grande proliferação de animais, como insetos, urubus e ratos; e a grande emissão de gases de efeito estufa ao meio ambiente (LEITE et al., 2019)

Já nos aterros controlados, são utilizadas técnicas para que o lixo não fique exposto ao ar, o que ameniza o odor do lixo e a proliferação de animais. Porém, não ocorre a impermeabilização dos solos ou o controle dos gases provenientes da decomposição, tornando esse tipo de solução para o depósito do lixo inadequada ambientalmente (DIAS, 2022).

Por fim, outro local para o descarte do lixo é o aterro sanitário. Segundo Leite et al. (2019), ocorre o confinamento e a compactação dos resíduos no aterro, reduzindo-os a um menor volume, e também é realizada a impermeabilização do solo por meio de argila e de polietileno de alta densidade, de forma evitar a contaminação do solo pela infiltração do

chorume. Dessa forma, o aterro sanitário atende normas operacionais e ambientais, sendo a melhor solução para de destinar o lixo.

3.1.2- Resíduos hortifruti em feiras livres e restaurantes universitários

No Brasil, é possível encontrar várias feiras livres, quer seja em capitais ou cidades interioranas, em que são vendidos diversos tipos de alimentos, como verduras, frutas e legumes. Elas têm uma grande importância para a sociedade brasileira, porque apresentam preços mais acessíveis que os de supermercado, na sua maioria, além de gerar mais empregos e abastecer a população carente.

Contudo, é preciso destacar que esse tipo de comércio ao ar livre produz muitos resíduos hortifruti, os quais muitas vezes são destinados para locais inapropriados. Segundo a iniciativa “Sem Desperdício” (2019), realizada pela WWF-Brasil, FAO e Embrapa, o percentual de descarte de produtos perecíveis é de 20% para leguminosas oleaginosas, 40% para raízes e tubérculos, 55% para frutas e hortaliças, 20% para produtos lácteos e 33% para pescados, tanto em feiras livres como em mercados.

Outro fato importante a se destacar é a produção de resíduos hortifruti em restaurantes coletivos. Segundo Picciafuoco (2013), a cada refeição servida no restaurante universitário da UNESP são gerados aproximadamente 35 gramas de resíduos orgânicos da fase inicial de preparo, que incluem vegetais, cascas, talos e folhas.

Além disso, segundo a Coordenação de Assistência e Promoção Estudantil da Prape (UFPB) , são servidas 1200 refeições no almoço diariamente, apenas para os alunos assistidos por auxílios estudantis no campus I da UFPB. Isso implica dizer que a quantidade mínima de resíduos orgânicos da fase inicial de preparo dos alimentos é de 42 kg, os quais podem ser utilizados para outros fins, como a produção de biogás e a compostagem.

3.1.3- Composição do biogás

O biogás é uma mistura de gases composta principalmente por metano e dióxido de carbono, que compõe aproximadamente 95% do biogás, e por outros elementos, como: hidrogênio, vapor de água, oxigênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono e

aminas voláteis. É importante destacar que o gás carbônico e o metano são grandes causadores do efeito estufa, tendo o metano um potencial poluidor 21 vezes superior ao CO₂, o que intensifica o aquecimento global (GARCILASSO et al., 2018).

Além disso, é importante destacar o poder calorífico dos componentes. Essa propriedade se refere a quantidade de energia por unidade de massa que é liberada após a combustão de um combustível; caso toda a água resultante esteja na fase líquida, isso irá representar o poder calorífico superior, porém se toda água estiver na fase vapor, será denominado de poder calorífico inferior. Na tabela 3.1 é possível analisar o poder calorífico dos componentes do biogás.

Tabela 3.1: Poder calorífico dos componentes do biogás

Componentes	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
Metano	13249	11940
Carbono	7819	7819
Monóxido de carbono	2412	2412
Amônia	5364	4439
Gás sulfídrico	3939	3631
Hidrogênio	33900	28642

Fonte: Autor

O dióxido de carbono, substância presente em significativa proporção na composição do biogás, não exibe propriedades caloríficas, uma vez que se configura como um subproduto da combustão. Dessa maneira, torna-se evidente, por meio da apresentação tabular, que o poder calorífico do metano supera o dos demais constituintes. Assim, é imperativo adotar medidas apropriadas visando elevar a percentagem de metano no referido gás, propiciando, por conseguinte, uma liberação mais substancial de energia durante o processo de combustão.

Ressalta-se a importância de salientar que, na ausência de aproveitamento energético do metano, torna-se essencial submetê-lo à queima em flare para sua conversão em dióxido de carbono, mitigando, assim, seu impacto ambiental.

3.1.4- Produção do biogás no Brasil e no mundo

O biogás é uma fonte de energia renovável que cresce de forma considerável no mundo, juntamente com a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. Grande parte da produção mundial desse gás se encontra nos Estados Unidos e na Europa, porém essa fonte energética tem crescido bastante na África e na Ásia. É importante considerar que na América Latina grande parcela da biomassa é utilizada para a produção de bioetanol, logo, o potencial de uso direto para produção do biogás é restringido (MILANEZ et al., 2018).

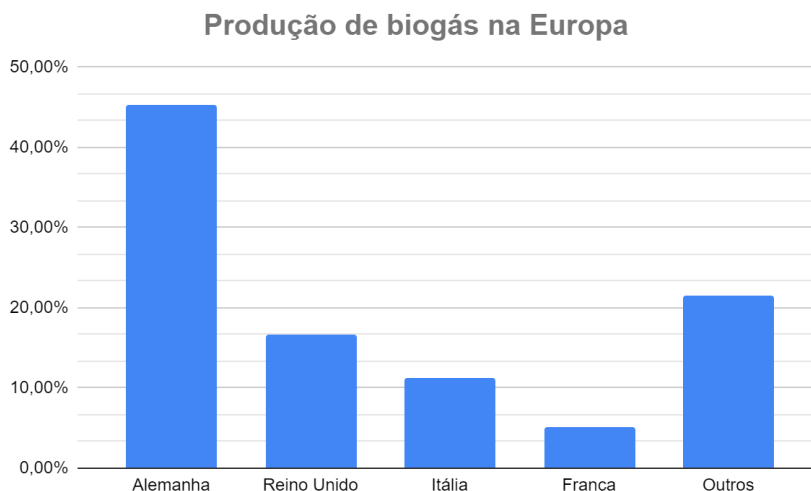
Na Europa, entre 2009 e 2015, o número de plantas de produção do biogás cresceu de 6 mil para aproximadamente 17 mil, porém, ainda que o crescimento tenha sido grande, o biogás representa apenas 1,9% da geração de energia elétrica total da União Europeia, o que ainda está muito abaixo do ideal (EBA, 2015).

Um caso a ser destacado na Europa é a Alemanha, pois no país foram realizadas leis de incentivo para a criação de plantas de produção de biogás. Dentre elas, tinha-se o *Stromeinspeisungsgesetz* (StrEG), implementado em 1991, o qual estabelecia uma tarifa mais vantajosa para as centrais geradoras elétricas que utilizassem fontes de energia renovável por 20 anos, a qual foi denominada de tarifa FiT.

Além disso, entrou em vigor a Lei de Energia Renovável (*Erneuerbare Energien Gesetz*) em 2000, de forma a garantir a tarifa FiT para eletricidade renovável, assim como um fator redutor para essa mesma tarifa, entre 1% e 1,5% ao ano. Também foi incorporado um incentivo para uso do calor residual, promovendo plantas que fizessem a cogeração, produzindo calor e energia e, dessa forma, sendo mais eficientes.

Porém, foi constatado que 75% da matéria prima utilizada para a produção do biogás era de milho, o que representava aproximadamente 8% das terras aráveis alemãs para a produção dessa energia renovável. Diante desse fato, o governo removeu os incentivos em 2014, porém, o país continua sendo o maior produtor de biogás da Europa, conforme a figura 3.1 ilustra.

Figura 3.1: Produção de biogás na Europa



Fonte: Adaptado de Truenumbers (2018)

Nos Estados Unidos, a Califórnia se destaca por proporcionar vários subsídios para a produção de biogás. Dentre eles, pode-se citar o programa nacional *Renewable Fuel Standard* (RFS), o qual subsidia a produção da energia renovável, e a *California's Sustainable Freight Action Plan*, criada em 2015, que pretende elevar consideravelmente o número de veículos de carga com emissão baixa de poluentes e equipamentos movidos a energia renovável até 2030 (SCHEITRUM et al., 2017, p. 356).

Já no Brasil, observa-se um elevado aumento da capacidade instalada do biogás, que subiu de 20 MW em 2007 para 119 MW em 2016, utilizando como principal fonte de matéria prima os resíduos sólidos urbanos (FRANQUETO e DA SILVA, 2020). Além deles, são utilizados como matéria prima para o biogás no Brasil: rejeitos da produção de cana de açúcar, dejetos da pecuária suína, bovina e avícola, descarte de restaurantes, resíduos da produção de alimentos e efluentes sanitários.

3.1.5- Aplicações do biogás

O biogás pode ser utilizado em aplicações específicas, porém ele necessita de tratamentos de limpeza e purificação, que serão abordadas mais profundamente durante o trabalho. O motor do ciclo Otto de combustão interna a biogás e gerador converte a energia química proveniente da combustão do biogás em energia mecânica, e posteriormente converte a energia mecânica em energia elétrica.

Outra aplicação bastante difundida do biogás é no abastecimento dos sistemas de ciclo a vapor, que operam com o ciclo Rankine. Nesse ciclo, o calor gerado pela combustão do gás é aproveitado na caldeira para a geração de vapor d'água, o qual expande em uma turbina, produzindo trabalho mecânico (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

O biogás também pode ser usado em veículos, nas redes de gás natural e a água residuária dos biodigestores pode ser convertida em biofertilizante. Para isso, a tabela 3.2 mostra os elementos a serem removidos para que o biogás possa ser utilizado em cada uma das aplicações citadas.

Tabela 3.2: Remoção de componentes em diferentes aplicações do biogás

Aplicação	Remoção de componentes
Grupo gerador a gás	Ácido sulfídrico e vapor d'água
Microturbina	Ácido sulfídrico e vapor d'água
Sistema de ciclo a vapor	Ácido sulfídrico e vapor d'água
Redes de gás natural	Ácido sulfídrico, vapor d'água e gás carbônico
Combustível veicular	Ácido sulfídrico, vapor d'água e gás carbônico
Biofertilizante	Nitrogênio e fósforo

Fonte: Autor

3.2- PROCESSO DE BIODIGESTÃO E BIODIGESTORES

3.2.1- Digestão anaeróbia

A biodigestão ou digestão anaeróbia é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica presente no substrato a ser degradado, que envolve um conjunto de diferentes microrganismos e ocorre na ausência do oxigênio. O processo é dividido em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KARLSSON et al., 2014).

A primeira etapa da biodigestão é a hidrólise. Nela, as bactérias hidrolíticas liberam enzimas, as quais decompõem compostos orgânicos complexos em compostos dissolvidos. Logo, as proteínas são degradadas por peptídios para formar aminoácidos, os carboidratos

se transformam em açúcares solúveis e os lipídios são convertidos em ácidos graxos de longa cadeia e glicerina.

Em seguida, ocorre a acidogênese, processo no qual os compostos dissolvidos são absorvidos nas células das bactérias fermentativas acidogênicas e são convertidos em ácidos graxos voláteis de cadeias curtas, álcoois, ácido lático e compostos minerais como o gás carbônico, o hidrogênio, o gás sulfídrico e a amônia.

Após isso, ocorre a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para a produção de metano, como o acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Essa fase é chamada de acetogênese e desempenha um importante papel entre a acidogênese e a metanogênese.

Por fim, a metanogênese é o processo que ocorre na ausência de oxigênio, ou seja, as bactérias anaeróbias convertem os compostos obtidos na acetogênese em metano, o qual é o principal constituinte do biogás. Pode-se observar que alguns fatores são fundamentais para a melhor produção do biogás, como: a composição do substrato, a temperatura (grandes variações de temperatura causam perda de potencial de produção) e o pH do meio, considerado ótimo na faixa entre 6,5 e 8 (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022).

3.2.2- Tipos de biodigestores

O biodigestor do tipo batelada é aquele em que há períodos específicos em que ele funciona, ou seja, ele não é contínuo. Na alimentação dele, é realizada a inserção de muita matéria orgânica e depois é fechado o sistema, para que não ocorra a entrada de oxigênio e a formação de metano no biogás não seja comprometida. Quando for decomposta a matéria orgânica até que chegue a 20% do volume do biodigestor, é realizada uma nova alimentação.

Esse tipo de biodigestor é formado de forma simples por uma câmara de biodigestão feita de alvenaria e um medidor de gás. Logo, esse sistema é de fácil manutenção e usado em locais em que há uma periodicidade da produção da biomassa, como em granjas de aves de corte (EMAS Jr., 2021).

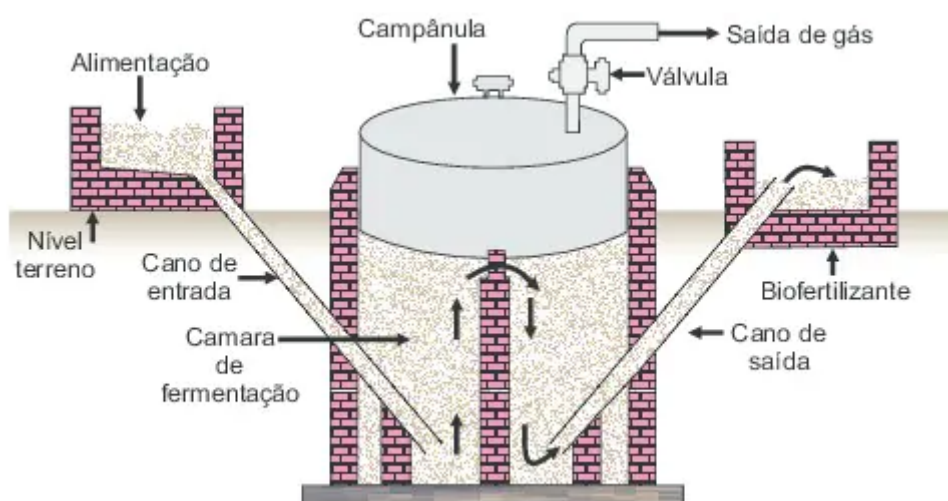
O biodigestor do tipo contínuo é alimentado de forma contínua por dutos de alimentação, como no caso dos biodigestores do modelo indiano, chinês e canadense. Ele pode ser de forma vertical, em que a alimentação é feita por baixo e a saída do biogás

ocorre na parte de cima; ou então de forma horizontal, na qual a alimentação e a saída são efetuadas nas laterais.

É recomendado a utilização desse tipo de biodigestor em áreas onde há a presença de lençóis freáticos, para evitar a contaminação, e que a matéria orgânica inserida nele seja dissolvida e triturada a fim de evitar o entupimento da tubulação, prejudicando dessa forma a produção do biogás.

O biodigestor de modelo indiano é aquele em que tem uma parede no meio a qual garante uma melhor movimentação do substrato pelo sistema, de forma a renovar a matéria orgânica e aumentar o potencial de produção do gás. Além disso, o sistema conta com uma campânula móvel de metal, que torna o equipamento mais caro e é responsável por manter a pressão interna do biodigestor, como pode ser observado na figura 3.2.

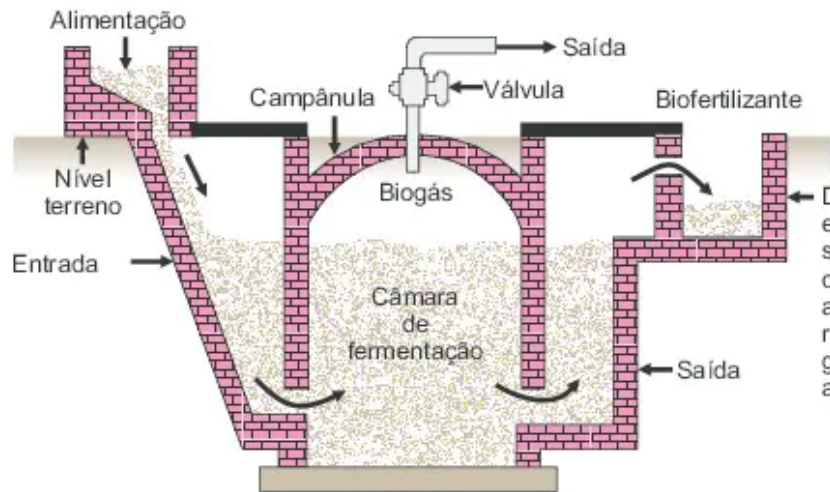
Figura 3.2: Biodigestor do modelo indiano



Fonte: Fonseca et al. (2009)

Já no biodigestor de modelo chinês a campânula não é de metal, sendo o teto impermeável para não ocorrer o vazamento do gás. Outra diferença para o modelo indiano é que no sistema chinês a pressão varia de acordo com a produção do biogás, o qual vai contribuir para que a matéria orgânica se desloque da câmara de fermentação para a caixa de saída, como mostra a figura 3.3. A grande limitação é que esse sistema não é utilizado em aplicações de grande porte, pois parte do gás gerado na caixa de saída é desperdiçado.

Figura 3.3: Biodigestor do modelo chinês



Fonte: Fonseca et al. (2009)

O biodigestor do modelo canadense utiliza o princípio de que quanto maior a exposição da matéria orgânica ao sol, maior será a produção do biogás e menor será o risco de entupimento de tubulações. Logo, é feita uma caixa de alvenaria muito larga e pouco profunda, coberta por uma campânula feita de lona de PVC, sendo o modelo mais barato e mais utilizado no Brasil, principalmente em fazendas (TABATABAEI, GHANAVATI, 2018).

3.3- TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

3.3.1-Contaminantes que afetam o potencial energético do biogás

Como já visto no trabalho, o biogás é composto por metano, dióxido de carbono, hidrogênio, vapor de água, oxigênio, amônia, ácido sulfídrico, siloxanos, monóxido de carbono e aminas voláteis. Dentre esses componentes, os mais prejudiciais ao potencial energético do biogás são o ácido sulfídrico, o gás carbônico e a amônia.

De acordo com Kunz, Steinmetz, Amaral (2022), o sulfeto de hidrogênio (H_2S) é um gás tóxico, corrosivo e com mau odor. Quando o ser humano é exposto a baixas concentrações de H_2S (15 ppm - 50 ppm), pode ser provocado irritações na mucosa, dores de cabeça, náusea e tontura; já quando o indivíduo é exposto a concentrações elevadas, acima de 200 ppm, pode causar parada respiratória e levar até a morte caso inale o gás por muito tempo.

Há de se destacar que a presença do ácido sulfídrico causa deteriorização na infraestrutura de produção do biogás, como a corrosão de tubulações metálicas, motores de combustão, tanques de armazenamento e compressores. Logo, o biogás deve passar por algum tratamento para que esse elemento possa ser eliminado parcial ou totalmente.

Com relação ao dióxido de carbono, que é o componente que possui a 2ª maior concentração no biogás, percebe-se que devido a esse gás ser inerte e ocupar um grande volume no biogás, acarreta em uma diminuição do potencial energético do gás (KARLSSON et al., 2014).

Na combustão incompleta da amônia nos motores, ocorre a liberação de óxidos de nitrogênio para a atmosfera, que são causadores da formação de chuvas ácidas e podem provocar graves problemas respiratórios. Além disso, a amônia apresenta propriedades corrosivas e tóxicas. A tabela 3.3 mostra os principais contaminantes, os problemas que eles podem causar e o que é necessário ser realizado no biogás para ele ser aproveitado energeticamente.

Tabela 3.3: Contaminantes do biogás e seus impactos sobre o biogás

Contaminantes	Problemas	Requisitos de aproveitamento energético
Sulfeto de hidrogênio	Formação de óxidos de enxofre pela combustão incompleta, concentrações acima de 5 cm ³ /m ³ são tóxicas e provocam corrosão de motores, tanques de combustível e motores	Concentração menor que: 2800 ppm para geradores, 10000 ppm para turbinas e microturbinas, 250 ppm para aquecimento em caldeiras e 5 ppb para combustível veicular. A concentração deve estar entre 545 a 1742 ppm para motores de combustão interna, 2 a 15 ppb para injeção na rede de biogás e de 1 a 5 ppb para células de combustível.
Dióxido de carbono	Possui baixo poder calorífico	Concentração deve ser menor que 2% para a conversão em biometano

Amônia	Corrosão proveniente da dissolução em água	Remover componentes para melhor funcionamento de equipamentos, conversão à biometano
Água	Condensação ou congelamento por pressão, acumulação de água nos dutos e corrosão de motores, tanques de combustível e compressores pela formação de ácido sulfídrico, amônia e gás carbônico	
Oxigênio	Perigo de explosão pela elevada concentração do elemento	
Material particulado	Acúmulo desse material em compressores, tanques de combustível e motores gera entupimento	
Halogênios não gerados por resíduos agrícolas	Corrosão em motores de combustão	Concentração deve se ser menor que 1 ppm para células de combustível
Siloxanos	Deposição em cilindros, válvulas e velas de ignição e formação de quartzo monocristalino e óxido de silício pela combustão	Concentração deve estar entre 9 a 44 ppm para motores de combustão interna e entre 0,05 a 0,08 ppm para turbinas e microturbinas. Além disso, a concentração deve ser menor que 0,42 ppm para geradores e inferior a 100 ppb para células de combustível

Fonte: Adaptado de Rykebosch et al. (2011) e Sun et al.(2015)

3.3.2- Métodos de remoção de água

O processo de condensação consiste em submeter o biogás úmido ao processo de compressão, posteriormente resfriá-lo e, por fim, separá-lo em parte condensada e biogás com umidade reduzida. Esse tipo de processo pode ser aplicado como pré-tratamento em todos os sistemas de geração de biogás e pode reduzir o vapor de água em até 0,15% do seu volume inicial. Além disso, ele remove material particulado, hidrocarbonetos e óleo do biogás e é um processo bem simples e conhecido (GARCILASSO et al., 2018).

Algumas técnicas para a remoção de água por condensação são: tubulação com sistema de purga do vapor de água, desembaçadores separadores de silicone e sistemas de troca de calor na tubulação. As desvantagens pertinentes a esse processo são que as tubulações devem ser longas, inclinadas para permitir a purga do vapor d'água e resistentes ao congelamento, ou seja, mais caras.

Outro processo conhecido para a retirar a água do biogás é por refrigeração, no qual o gás é arrefecido a 2°C, o que aprimora a condensação e torna esse processo, geralmente, o mais eficiente para a remoção da umidade. A desvantagem dele é o alto custo de energia para manter a refrigeração do sistema em funcionamento.

De acordo com Kunz, Steinmetz, Amaral (2022), no processo de adsorção, as colunas de adsorção devem estar operando entre 6 a 10 bar de pressão e a regeneração do leito deve ser realizada com baixas pressões e temperaturas entre 120°C a 150°C. O projeto da secagem por adsorção deve levar em conta duas colunas, sendo uma para adsorção e outra para regeneração.

O elemento de adsorção mais utilizado é a sílica em gel, porém existem outros tipos, como: carvão ativado, zeólitos, óxidos de alumínio e peneiras moleculares. A secagem por adsorção apresenta materiais que podem ser regenerados e ser destinados a qualquer uso do biogás, tendo um baixo custo.

Na remoção da umidade por absorção, o vapor d'água é absorvida por substâncias como o selexol, etileno glicol e sais higroscópicos, na qual a temperatura do processo é a ambiente e a pressão de operação é na faixa de 20 a 40 bar. Para a regeneração da solução absorvedora, a pressão e temperatura devem ser altas, o que encarece o processo; sendo ele indicado apenas para vazões superiores a 10 Nm³/h (GARCILASSO et al., 2018)

As vantagens desse procedimento é que ele possui eficiência alta de remoção simultânea de partículas, hidrocarbonetos e vapor d'água, os materiais absorventes podem

ser regenerados e não são tóxicos. Apesar de todas essas vantagens, é um processo não tão utilizado quanto a condensação e a adsorção por ser mais caro.

3.3.3- Métodos de remoção do ácido sulfídrico

Para se escolher o melhor método para a remoção do sulfeto de hidrogênio, é necessário levar em consideração a concentração de H_2S , o uso final da energia renovável, a composição e a variabilidade do volume do biogás. A depender da concentração final necessária para a aplicação do biogás, pode-se realizar dois ou mais processos para se obter a remoção desejada.

Os procedimentos para remoção do gás sulfídrico podem ser classificados de acordo com o tempo de aplicação, podendo ser ela *in situ*, ou seja, durante o processo de biodigestão, ou ocorrendo após a produção do biogás. Além do mais, as tecnologias podem ser divididas em físico-químicas, as quais são as mais utilizadas no mercado, e biotecnológicas, as quais possuem eficiências semelhantes dos processos físico-químicos, porém apresentam um custo inferior (AMIDPOUR, MANESH, 2021)

De acordo com Garcilasso et al. (2018), o processo de dessulfurização biológica é aeróbio, pois requer a injeção de oxigênio na faixa de 8 a 12% do fluxo do gás. Para que esse procedimento obtenha a maior eficácia possível, é necessário controlar alguns fatores que impactam diretamente na produção de biogás, como o pH, a temperatura, a umidade e os nutrientes e micronutrientes presentes no gás.

Esse processo possui as vantagens de ter um custo e demanda energética inferior aos processos físico-químicos, o que diminui o impacto ambiental. Porém, os resultados obtidos na dessulfurização biológica não são capazes de atender a qualidade requerida para o biometano, apenas para a utilização do biogás para queima direta.

A biodessulfurização *in situ*, a qual ocorre durante o processo de biodigestão, deve ser realizada com a disponibilidade de nutrientes, turbulência do biodigestor, superfície de fixação das bactérias e tempo de retenção apropriado na zona de dessulfurização para que as reações aconteçam.

É importante destacar que a biodigestão é anaeróbia e a biodessulfurização ocorre na presença de oxigênio. Logo, este processo pode diminuir o rendimento daquele, pois os microrganismos metanogênicos irão ser afetados pelo O_2 da atmosfera. Normalmente, essa

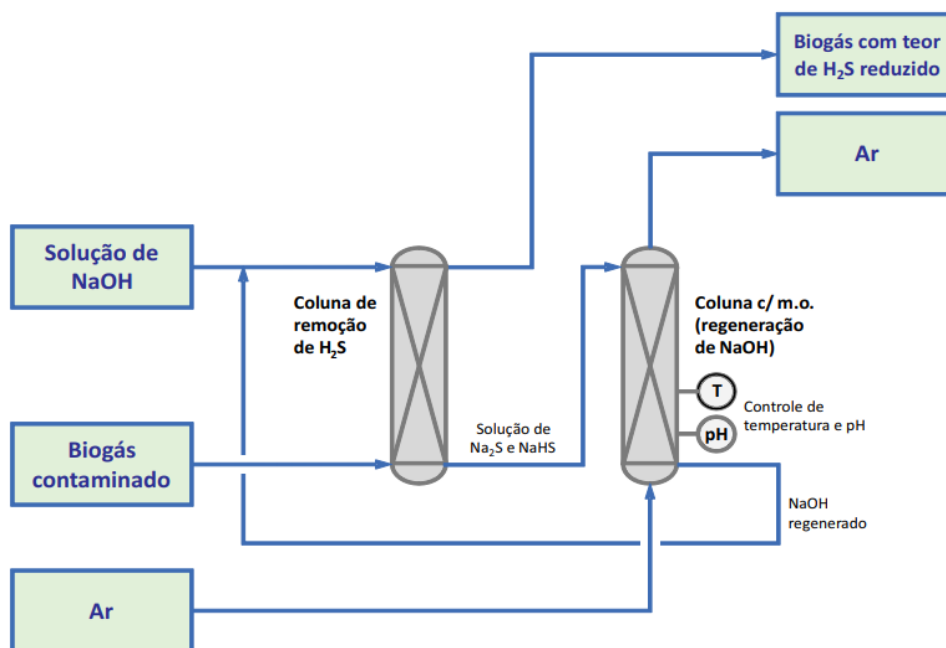
tecnologia *in situ* pode atingir rendimentos de 80 a 99% (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022).

Outra tecnologia que está tendo relevância no cenário atual são os filtros biológicos percoladores, os quais possuem uma coluna recheada com material sintético de elevada área superficial específica, no qual passa o biogás através desta coluna. Também vale destacar que antes de alimentar o biogás na coluna, é necessário misturá-lo com ar.

Outro fato interessante desse processo é que a amônia também é removida do biogás e o material coletado após a filtragem pode ser utilizado como fertilizante, pois é rico em enxofre. Segundo GARCILASSO et al. (2018), o filtro biológico percolador pode reduzir a concentração de ácido sulfídrico de 3000 ppmv para 50 ppmv.

O bioscrubber usa de sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e da soda cáustica ou hidróxido de sódio (NaOH) para remover o ácido sulfídrico. Primeiramente, o gás passa por uma coluna que contém $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ou NaOH , formando compostos de sódio, enxofre e água; depois, uma coluna que contém lodo ativado é alimentada pela solução aquosa resultante, a fim de regenerar o sulfato férrico e a soda cáustica, como se pode ver na figura 3.4.

Figura 3.4: Bioscrubber



Fonte: Garcilasso et al. (2018)

Pode-se afirmar ainda que esse processo, quando utiliza o hidróxido de sódio, consegue resolver parcialmente o dióxido de carbono, o qual reage com o NaOH formando carbonatos e bicarbonatos. Portanto, é importante enfatizar que o processo pode ser

utilizado para a conversão do biogás em biometano e atinge eficiência alta de remoção de ácido sulfídrico.

Com relação ao procedimento de adsorção para remoção do H_2S pode utilizar vários tipos de material, dentre eles, uns dos principais são o carvão ativado e os zeólitos. O carvão ativado deve ser unido a composto à base de potássio, que tem um papel de catalisador e aumenta a capacidade de remoção do sulfeto de hidrogênio.

A utilização do carvão ativado é ideal para o biogás com umidade relativa entre 30% a 80% e para uma elevada remoção do H_2S . Porém, o processo apresenta um custo operacional alto, pois o carvão tem que ser regenerado com vapor a $450^{\circ}C$ e, depois que ocorre a regeneração, o carvão perde parte do seu poder adsorativo (GARCILASSO et al., 2018).

Na adsorção com zeólitas, as quais são materiais com a propriedade de separar compostos distintos em correntes gasosas, ocorre a remoção não apenas do ácido sulfídrico, mas também da água, do dióxido de enxofre e da amônia. É importante destacar que o custo desse processo em comparação com o carvão ativado é alto e a sua capacidade inicial é limitada.

Outro método bastante utilizado para a remoção do gás sulfídrico é a absorção, a qual pode acontecer tanto física ou quimicamente em meio líquido. A absorção química utilizava o hidróxido de sódio (NaOH) para realização do seu processo, porém outras técnicas mais eficientes e baratas foram usadas em detrimento dessa.

Dentre as substâncias que se utiliza na absorção química atualmente estão os compostos orgânicos e os íons de ferro Fe^{2+} . Nesse procedimento, ocorre a regeneração do material a fim de evitar custos maiores e se produz biogás com uma eficiência de remoção de H_2S de 99% (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022).

3.3.4- Método de remoção da amônia

A remoção da amônia pode ser efetuada por meio dos processos de remoção de dióxido de carbono e água, os quais simultaneamente eliminam a presença de amônia. Ademais, é possível controlar o pH do material contido no biodigestor de maneira a prevenir a acidificação e, conseqüentemente, a formação de amônia.

3.3.5- Métodos de remoção dos siloxanos

Para remover os siloxanos do biogás, pode-se utilizar o método de lavagem com solventes orgânicos e ácidos. Esse procedimento possui alta eficiência de remoção, porém fatores como a corrosão do equipamento e a nocividade ao meio ambiente são as grandes desvantagens do processo.

Outra técnica utilizada é a do resfriamento e congelamento, pois a redução de temperatura intensifica a separação dos siloxanos. Estudos apontam que para uma temperatura de -25°C, a eficiência de remoção dos siloxanos é de 26%, para -30°C, chega ser de 27%, e para -70°C, a capacidade de remoção é de 99% (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

3.3.6- Métodos de remoção do gás carbônico

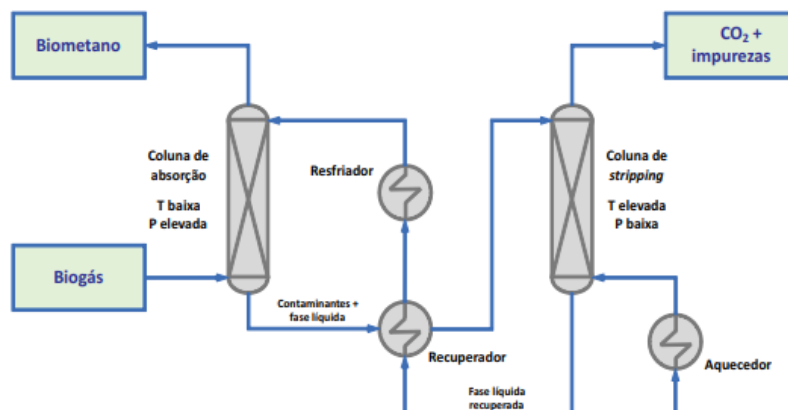
Os métodos citados anteriormente consistem na limpeza do biogás, de contaminantes que apareciam em menor quantidade nessa energia renovável. Para a remoção do dióxido de carbono, o qual juntamente com o metano constituem os principais componentes do biogás, é necessário realizar a purificação do gás.

Esse processo de purificação é realizado em sistemas que necessitam de uma alta taxa de metano na composição do biogás, como no uso veicular e na rede de distribuição de gás natural. Seu objetivo através da remoção do CO₂ é aumentar o poder calorífico e, conseqüentemente, o índice de Wobbe, o qual compara a energia produzida pela combustão do gás em um certo equipamento.

De acordo com Garcilasso et al. (2018), a purificação por absorção ocorre com uma faixa de pressão entre 4 a 10 bar e através da diferença de solubilidade entre um composto de fase gasosa e líquida. A separação do dióxido de carbono no biogás é feita em uma coluna de absorção com “leito recheado”, que funciona a altas pressões e baixas temperaturas.

Como resultado, obtém-se que o biometano sai pela passagem no topo da coluna e o líquido com impurezas sai pela passagem inferior, sendo conduzido para a coluna de *stripping*, na qual ocorre a desabsorção das impurezas para a atmosfera, pois essa coluna opera com baixas pressões e altas temperaturas. Após isso, o fluido retorna a coluna de absorção, como pode ser visto na imagem a seguir.

Figura 3.5: Sistema de purificação por absorção



Fonte: Garcilasso et al., 2018

O processo de absorção em água acontece devido a grande diferença de solubilidade do CO_2 e do CH_4 , pois a solubilidade do gás carbônico em água é aproximadamente 26 vezes maior que a do metano. Além de remover dióxido de carbono, o procedimento é reversível e elimina gases alcalinos e ácidos.

Outro tipo de absorção é em solventes orgânicos, que podem ser: metanol e *Genosorb* 1753, que é uma mistura de dimetil éter, polietilenoglicol e éteres. Esse procedimento possui uma vantagem com relação a lavagem com água, pois o dióxido de carbono tem uma maior solubilidade em solventes orgânicos, o que implica em uma operação de purificação que utiliza menos fluido de absorção. Porém, é importante remover o ácido sulfídrico antes do início do processo, pois esse elemento dificulta a regeneração do fluido (KUNZ, STEINMETZ, AMARAL, 2022).

Também se destaca a lavagem por aminas, a qual envolve a reação química entre o gás carbônico e a amina. Segundo Garcilasso et al. (2018), o processo possui grandes vantagens como a alta eficiência de remoção de CO₂, que é acima de 99%, baixo consumo de energia pelo procedimento ocorrer em temperatura ambiente e a baixa perda de metano. Porém, é importante levar em consideração antes de adotar esse tipo de lavagem o alto consumo de energia térmica e a toxicidade das aminas.

A adsorção com modulação de pressão é um método que utiliza sólidos adsorventes como os zeólitos, carvões ativados e peneiras moleculares e utiliza-se do princípio que o CO_2 tende a ser adsorvido em meio sólido a altas pressões e dessorvido em baixas pressões do meio. Vale salientar que é recomendada a remoção de água e sulfeto de hidrogênio antes da realização do processo, pois esses elementos diminuem a eficiência de remoção do CO_2 .

A grande desvantagem do processo é a perda de metano no processo, que, segundo Leme e Seabra (2017), chega a ser de 8% da composição do metano antes do tratamento. Porém, o processo apresenta a vantagem de remover o oxigênio e o nitrogênio do metano, elementos que estão presentes em gases de aterro e diminui o poder calorífico do gás.

A purificação através da separação por membranas utiliza materiais poliméricos, como o acetato de celulose e a poliamida, e se baseia na diferença de permeabilidade dos componentes do biogás. Os materiais poliméricos apresentam baixa permeabilidade ao metano e alta permeabilidade ao CO_2 , O_2 , NH_3 e H_2S .

Assim como na adsorção por modulação de pressão, o sulfeto de hidrogênio e a água são removidos previamente para não diminuir a eficiência do processo. Também pode-se afirmar que ocorre alta perda de metano devido às altas pressões na fase inicial do processo e para se atingir uma alta capacidade de remoção do CO_2 , é necessário a efetuação de vários estágios.

3.3.7- Aspectos a se considerar nos processos de limpeza e purificação

De acordo com uma análise minuciosa desse capítulo, é possível identificar que não existe o melhor método de limpeza e purificação, mas sim aquele que melhor se adequa ao projeto estabelecido. No caso, dentre as várias variáveis que estão inclusas no projeto, é necessário estabelecer as que são essenciais e os níveis mínimos e máximos de cada uma delas.

Como exemplo, pode-se definir as impurezas do biogás, pressão, temperatura e concentrações mínimas e máximas de cada componente, faixa de valor a ser investido, aplicação do biogás e eficiência de remoção das impurezas dos processos de limpeza e purificação. Através dessa análise, pode-se escolher o método que tenha o melhor custo-benefício.

3.4- COGERAÇÃO

3.4.1- Introdução

A cogeração é o processo de produção combinada de energia térmica e energia mecânica. A energia mecânica gerada é utilizada para acionar equipamentos mecânicos, como compressores e geradores, e a energia térmica produzida é utilizada para

resfriamento e aquecimento. Os sistemas de cogeração representam um grande avanço tecnológico e ambiental, pois podem fornecer vários tipos de energia e utilizam fontes de energia fósseis ou renováveis, como a biomassa, a energia eólica e a energia solar.

De acordo com Amidpour e Manesh (2021), esses sistemas possuem a grande vantagem de possuírem uma alta eficiência térmica, de aproximadamente 80%, pois aproveitam os gases de exaustão do motor. Além disso, são uma grande solução para comunidades remotas, as quais possuem disponibilidade limitada de água doce e combustíveis fósseis, pois essas usinas de cogeração produzem energia, resfriamento, calor e água doce.

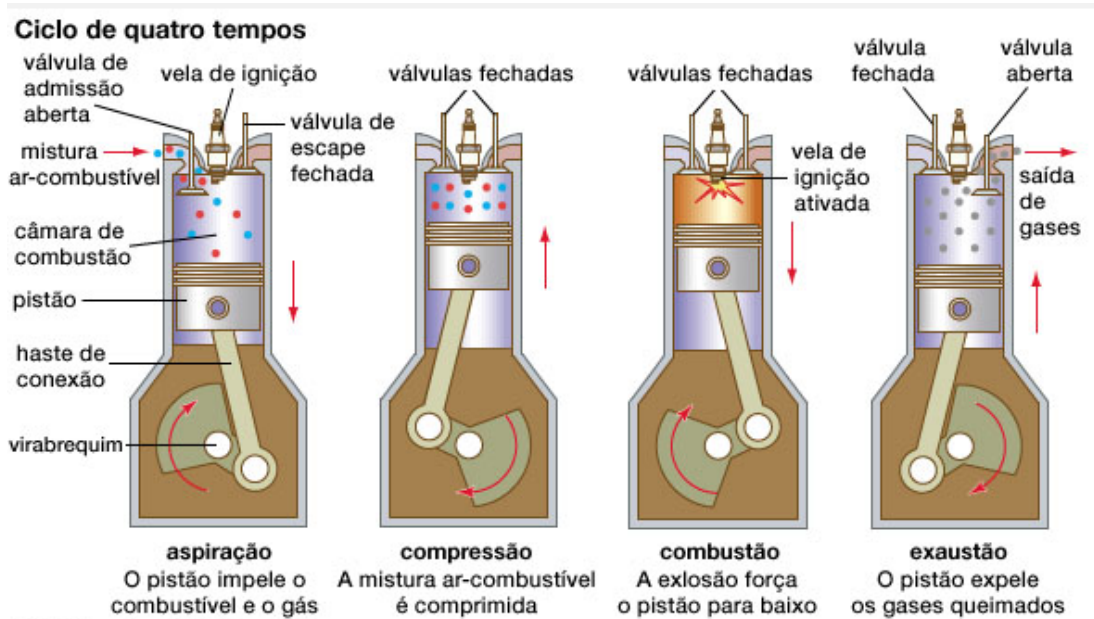
Apesar disso, as usinas de cogeração são pouco adotadas no mundo, pois representam apenas 10% da produção de energia. Em contrapartida, há países da União Europeia, como a Holanda, Dinamarca e Finlândia, que 50% das usinas adotam sistemas de poligeração, a fim de reduzir os custos de produção de energia e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

Pode-se citar alguns componentes do sistema de cogeração, como: motores de combustão interna, quer sejam eles do ciclo Otto ou do ciclo Diesel, turbina a vapor, turbina a gás, geradores elétricos, sistema de chillers por absorção, sistema de ciclo combinado (turbina a vapor e a gás) e trocadores de calor.

3.4.2- Motor do ciclo Otto

O motor que opera segundo o ciclo Otto é um motor de combustão interna que pode operar em 2 tempos ou 4 tempos. Este realiza o ciclo mecânico completo com duas voltas do virabrequim, já aquele apenas com uma volta. Os quatro tempos desse tipo de motor e suas respectivas características são identificadas abaixo, juntamente com a ilustração a seguir:

Figura 3.6: Motor do ciclo Otto de 4 tempos



Fonte: Educação Automotiva (2017)

De acordo com Martins (2006), o ciclo Otto ideal de quatro tempos funciona da seguinte forma: primeiro, na fase de admissão, a válvula de saída fica fechada, a válvula de entrada fica aberta e o pistão se move do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), admitindo ar e combustível.

Posteriormente, no tempo de compressão, as válvulas de entrada e saída permanecem fechadas e o pistão se move do PMI até o PMS, de forma a comprimir a mistura de ar e combustível. Um pouco antes do pistão atingir o PMS, a vela de ignição solta uma faísca e provoca uma combustão da mistura, o que gera uma grande quantidade de energia térmica que, posteriormente, é convertida parcialmente em energia mecânica. Depois disso, as válvulas permanecem fechadas e o pistão se movimenta do PMS ao PMI, ocorrendo fase de expansão.

Por fim, a válvula de admissão permanece fechada e a de escape se abre, de forma que o pistão se desloque do PMI ao PMS e os gases gerados sejam lançados para fora do cilindro, concluindo o processo de exaustão.

3.4.3- Motor do ciclo Diesel

O motor do ciclo Diesel apresenta uma maior eficiência em relação ao ciclo Otto, pois permite que o motor trabalhe com uma maior taxa de compressão e são apropriados

para veículos pesados que necessitam de um alto torque. De acordo com Martins (2006), o ciclo Diesel ideal de quatro tempos apresenta as seguintes fases e características:

Na admissão, a válvula de entrada é aberta e a de escape permanece fechada, admitindo apenas ar no cilindro e gerando um movimento do pistão do PMS ao PMI. Aqui está a primeira diferença entre os ciclos, enquanto o Otto admite a mistura de ar e combustível, o motor do ciclo Diesel admite apenas ar.

Após isso, as válvulas permanecem fechadas e o pistão se move do PMI ao PMS, processo o qual é designado como compressão. Um pouco antes do pistão atingir o PMS, o bico injetor injeta combustível no cilindro e ocorre a combustão por compressão com as válvulas fechadas. Depois, o pistão se movimenta do PMS ao PMI, ocorrendo a expansão.

Por último, acontece a exaustão, fase na qual a válvula de admissão permanece fechada e a de escape se abre, de forma que o pistão se desloca do PMI ao PMS e os gases gerados são lançados para fora do cilindro.

3.4.4- Grupo motogerador

O gerador elétrico é um equipamento responsável por converter energia química, mecânica e solar em energia elétrica. A maioria deles funciona por indução eletromagnética, em que um conjunto de espiras condutoras são colocadas entre ímãs e no interior dos geradores, de forma que a rotação das bobinas produz uma corrente elétrica, a qual é utilizada para alimentar sistemas elétricos.

Esse equipamento não atinge rendimento de 100% devido às forças de atrito e ao efeito Joule, o qual é o fenômeno em que ocorre o aquecimento do meio devido a o passagem de corrente elétrica. Além disso, os geradores produzem uma diferença de potencial chamada força eletromotriz (ϵ) e, quando ligados a circuitos elétricos, produzem a tensão útil (U), que é menor que a FEM. O rendimento pode ser calculado através da fórmula abaixo:

$$\eta = \frac{U}{\epsilon} \quad (3.1)$$

Os exemplos mais conhecidos de geradores elétricos são: pilhas, geradores elétricos movidos a diesel, placas fotovoltaicas, usinas hidrelétricas, nucleares e eólicas.

3.4.5- Turbina a vapor

A turbina a vapor é um equipamento que transforma a energia do vapor pressurizado em trabalho mecânico, que é um processo que ocorre em duas etapas: transformação da energia térmica do vapor em energia cinética, depois a conversão da energia cinética em energia mecânica e, por fim, a conversão da energia mecânica em energia elétrica, quando acionada por um gerador elétrico.

Para isso, é necessário que o vapor entre na turbina a uma determinada pressão e temperatura, posteriormente, o vapor é direcionado para o diafragma ou placa expansora, o qual direciona para as palhetas o fluxo de calor. Por fim, essas palhetas estão fixadas em rodas, as quais estão ligadas ao eixo da turbina.

As turbinas a vapor são divididas em dois tipos: turbina a vapor de condensação e de contrapressão. Na turbina de condensação, é aproveitado ao máximo a energia potencial do vapor e o vapor que sai da turbina, que possui pressão menor que a atmosférica, não pode ser mais aproveitado para gerar energia, pois está no estado líquido. Já na turbina de contrapressão, o vapor de saída, que tem pressão maior que a atmosférica, pode ser aproveitado em outros processos industriais, o que é denominado de cogeração.

Além disso, as turbinas a vapor podem ser classificadas de acordo seus estágios, ou seja, como o vapor é expandido no interior das turbinas. Há dois tipos de estágio: de ação, quando o vapor é acelerado no interior das turbinas e apenas o seu choque com as palhetas movimenta o rotor; e de reação, que ocorre quando o vapor que passa através das palhetas, o que gera uma força de reação que movimenta o rotor.

Na turbina de ação com roda do tipo Curtis, é realizado um estágio de velocidade em que é possível garantir um grande salto de entalpia, porém sua eficiência será reduzida consideravelmente. Já na turbina de reação com roda do tipo Rateau, há um diafragma seguido por um disco de palhetas móveis, sendo um estágio de pressão que garante um pequeno salto entálpico, porém sem perda considerável na eficiência da turbina.

3.4.6- Turbina a gás

A turbina a gás é um motor de combustão que funciona com os ciclos de admissão, compressão, expansão e escape, assim como os motores do ciclo Otto e do ciclo Diesel. Porém, a turbina a gás trabalha com combustão contínua, enquanto o motor de combustão

interna opera com combustão intermitente. Existem alguns tipos de turbinas, dentre as quais pode-se citar:

- Motor turbo a jato: opera usando um fluxo de jato para obter empuxo, sendo adequado para aviões de caças e supersônico.
- Motor turbo fan: a turbina opera uma hélice grande na frente do motor, a qual eleva o fluxo de ar e aumenta o empuxo, de forma a apresentar baixo consumo de combustível em velocidades subsônicas e baixo ruído.
- Turbina a gás de eixo único: a turbina e o compressor são acoplados em um eixo único, proporcionando potência para ativar o compressor e enviar para o eixo de saída, sendo adequada a sua aplicação em alternadores, por fornecer uma velocidade constante a uma determinada rotação.
- Turbina a gás de duplo eixo: a turbina de potência é colocada depois da turbina a gás e, quando ocorre a explosão, a energia é transmitida como força de rotação. Esse equipamento é adequado para acionar máquinas com grandes variações de rotação e velocidade.

Além disso, pode-se trabalhar com o sistema de ciclo combinado, ou seja, que utiliza turbina a gás e a vapor. Isso é realizado a fim de aumentar a eficiência do ciclo, pois a entrada de calor é a mesma para a turbina a gás, porém a saída de trabalho é maior, como pode ser visto através da fórmula abaixo:

$$\eta_{CC} = \frac{W_B + W_R}{Q_H} \quad (3.2)$$

Em que:

- η_{CC} : Rendimento do ciclo combinado;
- W_B : Trabalho do ciclo Brayton;
- W_R : Trabalho do ciclo Rankine;
- Q_H : Quantidade de calor recebido pela turbina a gás.

3.4.7- Trocador de calor

O trocador de calor é um equipamento responsável por realizar a transferência de calor de fluidos que se encontram em temperaturas distintas. Esse equipamento tem como principais características: baixo custo de instalação, desmontagem fácil para a manutenção e eficiência térmica elevada no processo de transferência de calor.

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com o fluxo dos fluidos que passam no interior dele. O trocador de calor paralelo, os fluidos entram pela mesma entrada e saem pela mesma saída, enquanto que no trocador de calor de fluxo contracorrente os fluidos se deslocam na mesma direção, porém em sentidos contrários.

Além disso, os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com a construção e características técnicas do modelo, conforme pode ser visto abaixo:

- Trocador de calor duplo tubo: possui dois tubos concêntricos em formato de U, onde um fluido escoar pelo tubo interno e o outro escoar pela espaço anular, o que acarreta na troca de calor na parede do tubo interno. As grandes vantagens desse equipamento são que ele apresenta construção, montagem e manutenção simples.
- Trocador de calor casco e tubo: é composto por um casco cilíndrico, uma junção de tubos paralelos e chicanas que servem de suporte para os fluidos e direcionam o seu fluxo, sendo que um fluido escoar pelo interior e outro por fora dos tubos. As vantagens desse tipo de trocador é que apresenta uma grande troca de calor ao lado do casco, flexibilização para alteração do diâmetro dos tubos e distribuição dos tubos padronizados.
- Trocador de calor de placas: suporte com placas de metal independentes sustentadas por barras, nas quais o fluxo do fluido é contracorrente e ocorre nos canais formados nas placas adjacentes. As vantagens desse equipamento são que ele ocupa pouco espaço, a desmontagem para a manutenção é fácil, possibilidade de operar com mais de dois fluidos e baixo custo operacional.

3.4.8- Refrigerador por absorção

Os componentes que integram o refrigerador por absorção são: condensador, evaporador, gerador e absorvedor, válvula redutora de pressão e bomba. Esse sistema tem o objetivo de produzir frio através de uma fonte de calor que é conectada ao sistema, que normalmente atua com o par água- brometo de lítio ou água-amônia.

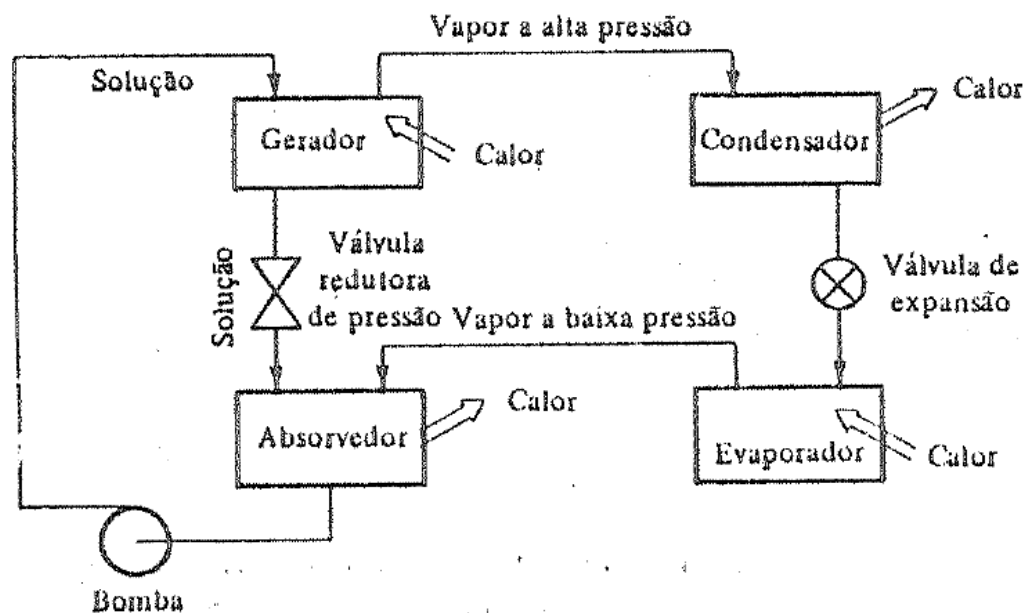
O refrigerador por absorção apresenta vantagens e desvantagens em relação ao refrigerador convencional. Segundo Noberto (2018), podemos elencar as seguintes vantagens: possui alta confiabilidade, baixo custo de manutenção, baixo consumo de eletricidade em comparação com um sistema de compressão com igual capacidade de refrigeração, menor impacto ambiental por não utilizar os refrigerantes HCFC's e CFC's e

possui flexibilidade energética, porque se adapta a diversas fontes de calor, como rejeitos térmicos, energia solar ou queima direta do gás.

Ainda segundo Noberto (2018), o refrigerador por absorção apresenta as seguintes desvantagens: apresenta necessidade de torres de resfriamento maiores, a utilização da água como fluido refrigerante impossibilita que a temperatura no evaporador seja menor que 5°C, os sistemas são maiores, mais complexos e mais pesados, precisando-se de maior espaço e coeficiente de desempenho (COP) baixo comparado com os ciclos de refrigeração por compressão de vapor, o que por vezes inviabiliza a sua utilização em casos de queima direta.

A imagem a seguir mostra de forma objetiva como ocorre o ciclo de absorção no refrigerador:

Figura 3.7: Unidade básica de refrigeração por absorção



Autor: Stoecker et al. (1985).

3.5- ANÁLISE TERMODINÂMICA

3.5.1- Definição de sistema e volume de controle

A maior parte das leis físicas são válidas para sistemas que não possuem fluxo de massa e onde é possível descobrir a posição das partículas no ambiente fechado. Logo,

quando é possível determinar a posição da partícula por todo um caminho, trata-se de uma abordagem Lagrangeana de sistemas fechados.

A partir do desenvolvimento dos estudos, foi notado, muitas vezes, que não era importante analisar a trajetória da partícula por todo o caminho, mas apenas focar em uma determinada região em que é possível ocorrer a troca de componentes que cruzam as fronteiras. Nessa situação, trata-se de uma abordagem Euleriana para sistemas abertos ou volumes de controle, em que ocorre fluxo.

Por convenção, quando se fala de sistema, está se referindo a um sistema fechado e quando se aborda o volume de controle, está se tratando de um sistema aberto. Para as duas diferentes abordagens, as leis termodinâmicas também irão se alterar, portanto, é essencial definir o objeto de estudo no qual está sendo analisado. Para o sistema de cogeração, em que há fluxos de massa e energia, se trabalha com volume de controle.

3.5.2- Primeira lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica pode ser definida de acordo com a conservação da energia. Com relação a massa, tem-se que:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (3.3)$$

onde dm/dt representa a variação da massa em relação ao tempo, $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ a vazão mássica que entra e que sai do volume de controle, respectivamente.

Com relação a energia, ela pode ser armazenada dentro de volumes de controle de diversas formas, como: energia potencial gravitacional, energia interna e energia cinética. Ela é transferida pelo trabalho, transferência de calor e fluxo de matéria, e transformada em diferentes formas de energia, sem que haja perda de energia (BEJAN e MAMUT, 1998). A equação que define o princípio de conservação de energia em sistemas abertos é:

$$\frac{d(U+KE+PE)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3.4)$$

onde U , KE e PE denotam, respectivamente, a energia interna, a energia cinética e a energia potencial gravitacional do volume de controle total. Além disso, $\dot{Q}$ e $\dot{W}$ representam a taxa de transferência de calor e a taxa de trabalho transferida para dentro ou para fora do sistema aberto.

A taxa na qual a energia entra com a matéria é $\dot{m}_e \left(h_e + v_e^2/2 + gz_e \right)$, em que os três termos entre parênteses tratam, respectivamente, da entalpia específica, da energia cinética específica e da energia potencial gravitacional específica da substância que flui através da região de entrada. A entalpia específica é dada pela soma da energia interna específica e do trabalho de fluxo específico em cada entrada e saída, como mostra a equação abaixo:

$$h = u + pv \quad (3.5)$$

3.5.3- Segunda lei da Termodinâmica

A segunda lei da termodinâmica é baseada em três enunciados, que são os de: Clausius, Kelvin-Planck e entropia. O enunciado de Clausius faz a seguinte afirmação:

“É impossível para qualquer sistema operar de tal maneira que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.”

Outro enunciado bastante importante é o de Kelvin-Planck, que afirma o seguinte:

“É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer uma quantidade líquida de trabalho para a sua vizinhança enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico.”

Isso implica dizer que nenhuma máquina térmica operando em um ciclo termodinâmico pode ter eficiência de 100%, ou seja, o calor recebido não pode ser completamente convertido em trabalho.

Por fim, o enunciado da entropia declara que:

“É impossível para qualquer sistema operar de uma maneira que a entropia seja destruída.”

Segundo Bejan e Mamut (1998), a entropia pode ser armazenada dentro de sistemas e transferida através das fronteiras deles, assim como a massa e a energia. Porém, ela não é conservada, e sim gerada por irreversibilidades dentro desses sistemas. Esse enunciado pode ser transcrito analiticamente da seguinte forma:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{gen} \quad (3.6)$$

onde dS / dt representa a taxa de variação de entropia em relação ao tempo dentro do volume de controle. Os termos $\dot{m}_e s_e$ e $\dot{m}_s s_s$ representam as taxas de transferência de entropia para dentro e para fora do volume de controle, respectivamente. Além disso, $\dot{Q}_j$

representa a taxa de transferência de calor no local onde a temperatura instantânea é T_j . A razão Q'_j/T_j é responsável pela taxa associada a transferência de entropia e S'_{gen} representa a taxa de geração de entropia em relação ao tempo, devido às irreversibilidades dentro do volume de controle.

3.5.4- Conceito de estado morto

O estado morto é um estado da matéria no qual o material está em um equilíbrio químico, mecânico e térmico. O material permanece na temperatura ambiente, a sua velocidade em relação ao ambiente é nula, assim como a pressão do material em relação a pressão atmosférica e a energia potencial do material também é nula (BEJAN, TSATSARONIS, MORAN, 1996).

Outra definição bastante importante é o conceito do estado morto limitado. Ele existe quando ocorre o equilíbrio térmico e mecânico no material, com uma velocidade potencial e energia potencial igual a zero. Porém, apesar dessas características, o equilíbrio químico entre o ambiente e a matéria pode não ocorrer.

3.5.5- Conceito de exergia

Segundo Kotas (1985), a exergia é o trabalho ou potência máxima produzida por um sistema ou fluxo, quando o mesmo realiza um processo inteiramente reversível, até atingir o estado de equilíbrio com as condições ambientais, o qual é chamado de estado morto. O processo reversível é aquele que o sistema e todas as partes da sua vizinhança podem retornar ao estado inicial.

Quando se analisa a exergia, o principal objetivo é quantificar a produção de irreversibilidades e localizá-las durante os muitos processos termodinâmicos que envolvem o sistema. Ainda mais, é preciso identificar os fatores causadores que provocam essas irreversibilidades e diminuem o rendimento do sistema, para serem tomadas as medidas corretivas necessárias para diminuir o desperdício de exergia evitável (LEITE, 2019).

Porém, para que a otimização do sistema seja bem executada, é essencial descobrir qual o custo que o desperdício de exergia irá causar ao proprietário. Para isso, faz-se

necessário realizar a análise exergoeconômica, visando encontrar o melhor equilíbrio entre os custos de destruição de exergia e os custos de investimento no sistema.

3.5.6- Cálculo da exergia

De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a exergia de um sistema pode ser calculada, na ausência de efeitos de tensão superficial, elétricos, magnéticos e nucleares, através da soma das exergias física (E^{PH}), cinética (E^{KN}), potencial (E^{PT}) e química (E^{CH}), que podem ser calculadas da seguinte forma conforme as expressões abaixo:

$$Ex^{PH} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) + T_0 \cdot (S - S_0) \quad (3.7)$$

$$Ex^{KN} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (3.8)$$

$$Ex^{PT} = m \cdot g \cdot z \quad (3.9)$$

No qual temos:

- U_0, V_0, S_0, T_0, p_0 : Energia interna, volume, entropia, temperatura e pressão do ambiente, respectivamente;
- U, V, S : Energia interna, volume e entropia do sistema, respectivamente;
- m : Massa do sistema;
- g : Gravidade;
- V : Velocidade do sistema em relação ao ambiente;
- z : Altura do sistema em relação ao ambiente;

A exergia física para volume de controle pode ser calculada pela entalpia e entropia específica do sistema (h, s) e do ambiente (h_0, s_0) e pela temperatura do ambiente, conforme mostrado abaixo:

$$e^{PH} = (h - h_0) + T_0 \cdot (s - s_0) \quad (3.10)$$

A exergia química representa o trabalho máximo teórico para o volume de controle, em que uma substância é inserida em um certo estado padrão e reage de forma completa com o ambiente, produzindo outros componentes. Para uma mistura, ela pode ser calculada da seguinte forma:

$$\dot{Ex}^{CH} = \dot{n} \cdot [\sum_i y_i \cdot \overline{ex}_i^{CH,0} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_i y_i \cdot \ln(y_i)] \quad (3.11)$$

Sendo $\dot{E}^{CH}$ a taxa de exergia química, $\dot{n}$ a quantidade de mols por segundo, y_i a fração molar da substância, $\overline{ex}_i^{CH,0}$ a exergia padrão, $\overline{R}$ a constante universal dos gases e T_0 a temperatura padrão em Kelvin. Já para um combustível, a exergia química deve ser calculada através da fórmula abaixo.

$$\dot{E}^{CH} = \beta \cdot PCI \quad (3.12)$$

Em que:

$$\beta = 1,401 + 0,1728 \cdot \frac{y_H}{y_c} \quad (3.13)$$

Sendo PCI o poder calorífico inferior da substância, y_H a fração molar da substância quente e y_c a fração molar da substância fria.

3.6- EXERGEOCONOMIA

Segundo Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a exergoeconomia é um método que combina a análise exergética com a análise econômica dos componentes de um sistema, com a finalidade de obter informações importantes para as etapas de projeto e operação do sistema. Tais informações não podem ser fornecidas pelas análises energéticas ou econômicas usuais.

Essa metodologia fundamenta-se em realizar o balanço exergoeconômico, no qual se atribui custos às taxas de fluxo de cada componente e define-se, para cada um dos fluxos, seu valor monetário. Portanto, as taxas de custo associadas à entrada ($\dot{C}_e$), à saída ($\dot{C}_s$), à potência ($\dot{C}_w$) e à transferência de calor ($\dot{C}_q$) são:

$$\dot{C}_e = c_e \cdot Ex_e = c_e \cdot \dot{m}_e \cdot e_e \quad (3.14)$$

$$\dot{C}_s = c_s \cdot Ex_s = c_s \cdot \dot{m}_s \cdot e_s \quad (3.15)$$

$$\dot{C}_w = c_w \cdot \dot{W} \quad (3.16)$$

$$\dot{C}_q = c_q \cdot Ex_q = c_q \cdot \dot{q} \left[1 - \frac{T}{T_0} \right] \quad (3.17)$$

Em que os termos c_e , c_s , c_w e c_q representam os custos médios por unidade de exergia; Ex_e , Ex_s , $\dot{W}$ e Ex_q indicam as exergias totais que entram e que saem dos componentes; $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ referenciam-se às vazões mássicas de entrada e saída, respectivamente.

Segundo Cavalcanti (2016), determina-se o balanço exergoeconômico igualando-se a soma da taxa de custo para toda a transferência de exergia que sai, ou seja, a parcela da saída e do trabalho; com a soma da taxa de custo para toda a transferência de exergia que entra, o que consiste nas parcelas de entrada, transferência de calor e as taxas de despesas com capital de aquisição, operação e manutenção ($\dot{Z}_k$):

$$\sum_s (c_s \cdot Ex_s)_k + c_w \cdot \dot{W} = c_q \cdot Ex_q + \sum_i (c_e \cdot Ex_e)_k + \dot{Z}_k \quad (3.18)$$

Com isso, pode-se ainda expandir a fórmula e dividir as taxas de despesas com capital de aquisição ($\dot{Z}^{CI}$) das taxas de operação e manutenção ($\dot{Z}^{OM}$):

$$\sum_s (c_s \cdot Ex_s)_k + c_w \cdot \dot{W} = c_q \cdot Ex_q + \sum_i (c_e \cdot Ex_e)_k + (\dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM})_k \quad (3.19)$$

A equação acima pode ser reescrita, também, utilizando-se dos conceitos de produto e combustíveis, os quais serão abordados posteriormente no trabalho, quando for abordado a metodologia SPECO. Logo, tem-se que:

$$\dot{C}_p = \dot{C}_f + \dot{Z}_{tot} = c_p \cdot Ex_p = c_f \cdot Ex_f + \dot{Z} \quad (3.20)$$

Em que $\dot{C}_p$ e $\dot{C}_f$ são as taxas de custos associadas aos fluxos de exergia dos produtos e dos combustíveis, respectivamente; c_p e c_f indicam os custos médios por unidade de exergia e Ex_p e Ex_f representam as exergias totais. Além disso, a taxa de despesas em cada componente pode ser associada ao custo de aquisição (Z_i), fator de recuperação do capital (CRF) e fator de manutenção (φ), conforme mostra a fórmula abaixo:

$$\dot{Z}_i = Z_i \cdot CRF \cdot \varphi \quad (3.21)$$

De acordo com Neto (2018), o fator de recuperação do capital é usado quando é necessário verificar o retorno do investimento, assim como a amortização do capital, podendo ser expresso da seguinte forma:

$$CRF = i \cdot \left[\frac{(1+i)^{n_{ano}}}{(1+i)^{n_{ano}} - 1} \right] \quad (3.22)$$

Em que i é a taxa de juros, n_{ano} é a vida útil em anos. Outra variável bastante importante para realizar a análise exergoeconômica é a taxa de exergia destruída, a qual é diretamente proporcional ao custo médio por unidade de exergia do combustível (c_f) e a exergia destruída (E_D).

$$\dot{C}_D = c_f \cdot Ex_D = c_f \cdot (Ex_F - Ex_P) \quad (3.23)$$

De posse de todos as variáveis anteriormente citadas, pode-se analisar o desempenho de cada equipamento de acordo com três parâmetros. O primeiro é a eficiência exergética (ε), a qual informa que quanto menor for a diferença entre as exergias totais do combustível e do produto, maior será a eficiência do componente, conforme indica a fórmula abaixo:

$$\varepsilon = \frac{Ex_P}{Ex_F} \quad (3.24)$$

Outro fator importante é a diferença relativa do custo (r_k), a qual relaciona o custo do produto com o custo do combustível. Quanto maior for seu valor, maior o potencial de otimização de custo do componente com menor esforço, conforme é expressado a seguir:

$$r_k = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad (3.25)$$

Por fim, o fator exergoeconômico (f_k) compara a taxa do custo de investimento com a taxa de custo da exergia destruída. Quanto menor for seu valor, maior o potencial de melhoria através da redução da irreversibilidade, ou seja, o fator mostra qual componente precisa elevar seu investimento para aumentar a sua eficiência global.

$$f_k = \frac{\dot{Z}}{\dot{C}_D + \dot{Z}} \quad (3.26)$$

Diversos métodos de análise exergoeconômica e termoeconômica já foram criados com a finalidade de obter informações acerca de sistemas de cogeração e poligeração, para que eles possam ser otimizados. As principais metodologias são: Teoria do Custo Exergético, Método SPECO, Análise Funcional Termoeconômica, Análise Funcional de Engenharia, Modelo UFS, Modelo H&S e Teoria Estrutural.

3.6.1- Método SPECO

No presente trabalho será abordada a metodologia SPECO, a qual é bastante difundida no mundo. De acordo com Lazzareto e Tsatsaronis (2006), esse método consiste em definir custos exergéticos e calcular eficiências exergéticas de sistemas térmicos, por meio das seguintes tomadas de decisão:

1. Identificação dos fluxos exergéticos: inicialmente, é necessário definir se a exergia será analisada em seu valor total ou dividida em sua parcela química, mecânica e térmica. Também, é importante destacar que o fluxo de exergia só será analisado de forma separada caso se queira obter uma maior precisão nos resultados, pois essa forma de avaliação demanda maior esforço e tempo.

2. Definição de combustível e de produto: de acordo com Lazzareto e Tsatsaronis (2006), o produto é o resultado produzido pelo componente, ou seja, ele representa todos os valores de exergia na saída e todo aumento de exergia entre a entrada e a saída conforme a finalidade do componente. Em relação ao combustível, ele pode ser definido como a fonte utilizada na geração do produto, isto é, todos os valores de exergia na entrada, toda redução de exergia entre a entrada e saída e o aumento de exergia que não esteja consoante a finalidade do componente.

3. Equações de custo: essas equações foram definidas na seção anterior. De posse delas, pode-se determinar as taxas de custos associadas aos fluxos de exergia e, posteriormente, realizar o balanço exergoeconômico. Porém, geralmente, existe um número de fluxos exergéticos maior do que o número de componentes, o que significa ter mais incógnitas do que equações, acarretando na necessidade de se encontrar equações auxiliares para resolver o balanço exergoeconômico.

4. Princípios F e P: o princípio F estabelece que o custo específico associado à remoção de exergia deve ser igual ao custo médio específico do fluxo de saída, de forma a se obter o número de equações auxiliares igual ao número de fluxos de saída considerados como combustível. Já o princípio P afirma que cada unidade de exergia é distribuída para um fluxo associado ao produto no mesmo custo médio, para que se possa ter o número de equações igual ao número de fluxos de saída considerados como produto menos um ($N_{e,P} - 1$) (CAVALCANTI, 2016).

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

4.1- DESCRIÇÃO DO SISTEMA A SER ESTUDADO

O sistema de poligeração é composto pelo biodigestor, filtro purificador, grupo gerador, o qual possui motor e gerador elétrico e, por fim, o refrigerador por absorção de simples efeito, que é composto por um gerador de vapor, um condensador, duas válvulas de expansão, um evaporador, uma bomba de solução, um absorvedor e um trocador de calor intermediário.

Primeiramente, é necessário avaliar o material a ser inserido nos biodigestores de acordo com a disponibilidade local da matéria prima de forma a caracterizá-la para que, posteriormente, ela possa ser introduzida no biodigestor através de diluição com água. Como resultado desse procedimento, será gerado biogás e biofertilizante.

O biogás produzido apresenta uma composição com baixo poder calorífico, visto que esse biocombustível é composto por gases que diminuem o poder calorífico geral da mistura, como o ácido sulfídrico, nitrogênio, oxigênio e dióxido de carbono. A tabela abaixo mostra a composição do biogás obtida no aterro sanitário de João Pessoa, bem como a densidade dessa mistura de gases.

Tabela 4.1: Composição do biogás obtido no aterro sanitário de João Pessoa

Componentes	Concentração	Densidade (kg/m3)
Metano	0,508	0,657
Dióxido de carbono	0,4068	1,977
Oxigênio	0,0158	1,309
Ácido sulfídrico	0,01	1,360
Nitrogênio	0,0594	1,146
	Média ponderada	1,240

Fonte: Autor e GasNet.

Para que esse gás possa ser utilizado em um motor de combustão interna, é necessário ele passar pelo processo de limpeza e purificação através de filtros que eliminam os contaminantes, a fim de que a concentração de metano na mistura de gases seja de, no mínimo, 90 % (GARCILASSO et al., 2018).

Após a realização desse processo, é obtido o biometano, o qual é o biogás com concentração alta de metano, que vai ser utilizado para alimentar o motor de combustão interna. Como produtos dessa combustão, são obtidos os gases de exaustão, os quais serão reaproveitados no refrigerador por absorção; e a energia mecânica, a qual ativa o gerador elétrico, que produz energia.

Em se tratando do refrigerador por absorção, ele funciona a partir de uma solução de água-amônia fraca em NH_3 , que é bombeada para um trocador de calor intermediário, na qual é aquecida e, posteriormente, passa para o gerador de vapor com uma temperatura mais elevada.

A partir disso, o gerador de vapor recebe os gases de exaustão produzidos no motor e parte da água da solução é vaporizada. Com isso, a solução de água-amônia passa a se tornar forte e volta para o trocador de calor intermediário, onde sua temperatura é reduzida e a solução é encaminhada para a válvula de expansão, na qual ocorre a diminuição da pressão.

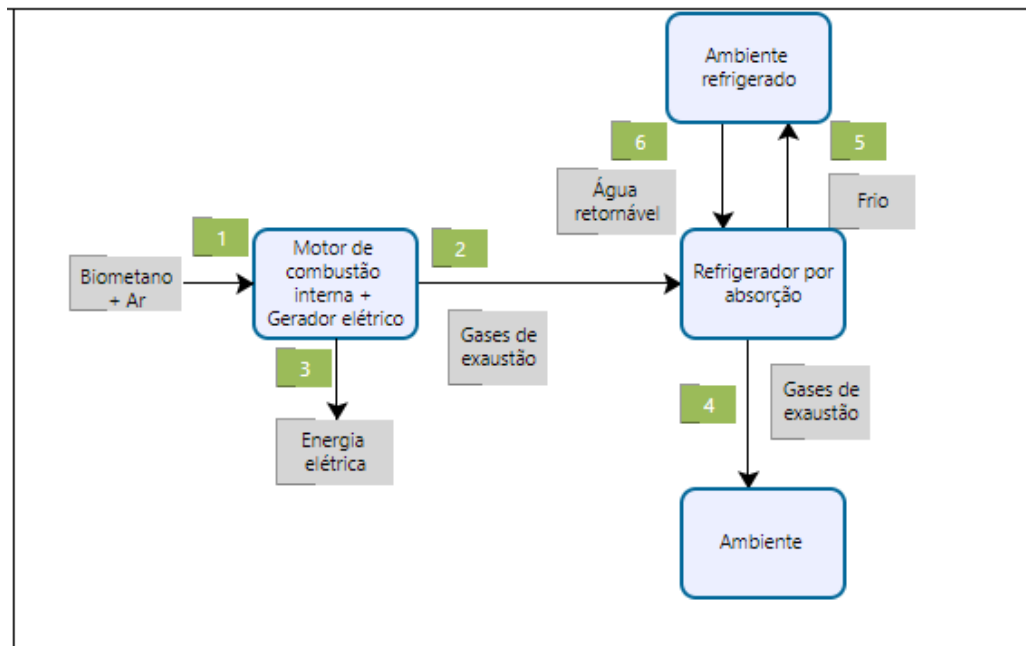
Quando a solução de $\text{H}_2\text{O} - \text{NH}_3$ chega no absorvedor, ocorre a liberação de calor e ela é diluída pela absorção do vapor de água, o que produz uma solução fraca de água e amônia. De forma concomitante, o vapor produzido no gerador é encaminhado para o condensador com elevada pressão e temperatura.

No condensador, ocorre a liberação de calor e a transformação de vapor em líquido, encaminhando a solução para a válvula de expansão, onde ocorre a redução da pressão. Por fim, a água recebe calor do ambiente e converte líquido em vapor, de forma a produzir frio para o ambiente em que está inserido e reiniciar novamente o processo de refrigeração.

O esquema realizado abaixo permite visualizar todas as etapas do processo e enumerá-las, a fim de servir como base para as análises energéticas, exergéticas e exergoeconômicas, as quais serão vistas posteriormente com mais detalhes, analisando cada componente em separado.

Pode-se observar que o sistema produziu quatro produtos, os quais são: biometano, biofertilizante, energia elétrica e frio. Logo, o sistema de poligeração abaixo apresenta uma alternativa sustentável para os dias atuais, de forma a atender as demandas urgentes do ambiente pela redução dos índices de aquecimento global e da sociedade por uma qualidade de vida melhor, através de um ar menos poluído e redução de doenças respiratórias.

Figura 4.1: Ciclo de cogeração em estudo



Fonte: Autor.

4.2- CONFEÇÃO DOS BIODIGESTORES E DOS FILTROS PURIFICADORES

A produção de biodigestores já é bastante difundida no mundo, como mostrado no referencial teórico. O modelo chinês, indiano e canadense já são muito utilizados e diversos trabalhos já foram produzidos acerca deles, de forma a mostrar todas as suas vantagens e desvantagens.

No presente trabalho, foi realizada a confecção dos biodigestores em série de pequena escala, do tipo semi contínuo, os quais são pouco difundidos na literatura. Esse tipo de sistema foi adotado a fim de evitar o acúmulo de ácidos voláteis nos biodigestores, o que ocasiona a redução de pH e impacta, negativamente, no desenvolvimento de microrganismos metanogênicos. Além disso, foram destinados dois biodigestores apenas para a limpeza do biogás e obtenção do biofertilizante em um recipiente próprio.

Para a realização do projeto, é necessário ser realizado o orçamento dos produtos que necessitam serem comprados de forma que seja obtido o resultado final. A lista de materiais que foram adquiridos e os seus respectivos preços podem ser observados conforme a tabela 4.2:

Tabela 4.2: Custo dos materiais utilizados na confecção dos biodigestores em série

Materiais	Unidades	Preço
Adaptador com flange soldável 40 x 32 mm	3	R\$ 63,27
Balde de 10 litros	5	R\$ 100,00
Bico de cobre 20 mm x 1/2"	1	R\$ 29,00
Câmara de ar de bicicleta aro 26	1	R\$ 18,50
Cola epóxi 100 gramas	5	R\$ 49,50
Curva soldável 32 mm	2	R\$ 13,80
Joelho Esgoto 50 mm	10	R\$ 43,33
Luva com rosca externa 32 mm	3	R\$ 30,00
Luva de redução soldável 25 x 20 mm	1	R\$ 1,10
Luva de redução soldável 32 x 25 mm	1	R\$ 3,33
Luva de união PVC 32 mm	2	R\$ 17,32
Luva de união PVC 50 mm	1	R\$ 34,90
Mangueira cristal transparente 1/2" x 3 m	1	R\$ 10,50
Manta asfáltica 5 cm x 5 m	1	R\$ 20,00
Prime para manta asfáltica 1 litro	1	R\$ 19,99
Registro de esfera latão 1/4"	2	R\$ 35,90
Registro esfera soldável 32 mm	2	R\$ 33,24
Tê soldável 32 mm	1	R\$ 2,40
Tubo PVC Esgoto 50 mm x 3m	1	R\$ 47,90
Tubo PVC soldável 32 mm x 3m	1	R\$ 34,90
Total	45	R\$ 608,88

Fonte: Autor

Através da compra desses materiais, foi possível confeccionar os biodigestores no Laboratório de Cogeração da UFPB, conforme mostra a figura 4.2:

Figura 4.2: Sistema de biodigestores em série confeccionados



Fonte: Autor

Antes da introdução da matéria orgânica diluída nos biodigestores, procedeu-se a um teste hidrostático com o intuito de verificar a ocorrência de possíveis vazamentos, os quais poderiam acarretar danos substanciais ao projeto. Este teste foi conduzido em condições de temperatura e pressão ambiente, mediante o preenchimento dos biodigestores com água por meio de uma mangueira.

Durante esse processo, foram identificados alguns vazamentos de água na região entre o joelho e o balde. Diante disso, a vedação foi aprimorada por meio da aplicação de prime e manta asfáltica e, como resultado dessas melhorias, no segundo teste subsequente, não foram registrados vazamentos.

Outro protótipo também foi confeccionado, porém ele não foi feito em série como o primeiro. Uma bombona de 200 litros foi adquirida com a finalidade de comparar a produção de biogás que cada um dos protótipos gerava. A tabela abaixo mostra todos os custos necessários para a elaboração desse biodigestor.

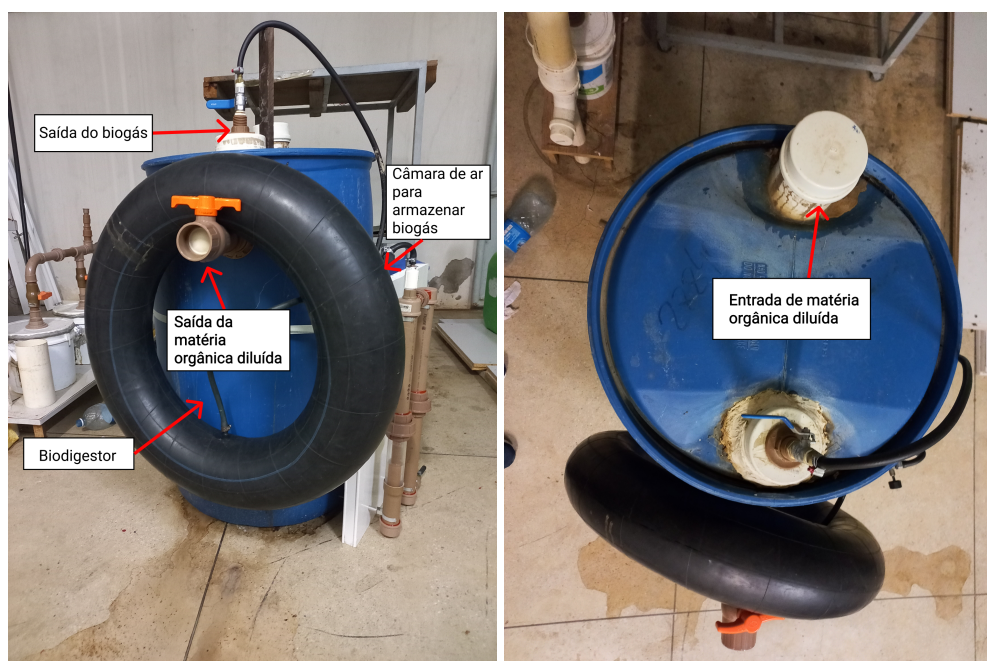
Tabela 4.3: Custo dos materiais utilizados na confecção do segundo biodigestor

Materiais	Unidades	Preço
Bombona plástica 200 litros	1	R\$ 268,46
Câmara de ar de trator	1	R\$ 81,19
Registro esfera soldável 50 mm	1	R\$ 26,80
Adaptador flange soldável 50 mm	1	R\$ 29,90
Curva soldável 90° 50 mm	1	R\$ 10,90
Tubo de esgoto 3 x 0,1 m	1	R\$ 49,99
Adaptador Flange soldável 20mm x 1/2"	1	R\$ 7,11
Conexão de latão bico mangueira 20mm x 1/2"	1	R\$ 19,90
Mangueira preta de borracha sintética 1/2" x 3m	1	R\$ 18,81
Total	9	R\$ 513,06

Fonte: Autor

O resultado do segundo biodigestor construído no Laboratório de Cogeração pode ser observado na sequência.

Figura 4.3: Biodigestor produzido no Laboratório de Cogeração



Fonte: Autor.

Finalmente, os filtros purificadores foram fabricados com o propósito de capturar os gases que reduzem o poder calorífico do biogás, resultando na conversão deste último em biometano. A tabela a seguir apresenta todos os componentes empregados neste projeto, juntamente com seus respectivos custos.

Tabela 4.4: Custo dos materiais utilizados na confecção dos filtros

Materiais	Unidades	Preço
Tubo PVC soldável 1500 x 40 mm	1	R\$ 20,50
Tubo PVC soldável 1000 x 20 mm	1	R\$ 4,00
Cap de tubo soldável 40 mm	4	R\$ 16,00
Luva de união soldável 40 mm	2	R\$ 56,00
Luva de união soldável 20 mm	1	R\$ 9,00
Adaptador soldável 20 mm	2	R\$ 1,40
Luva roscável 20 mm	2	R\$ 12,00
Espigões fixos de bronze 1/2"	2	R\$ 30,00
Pacotes de lã de aço	3	R\$ 7,50
Pacote de barrilha leve (carbonato de sódio)	1	R\$ 27,00
Pacote de carvão vegetal	1	R\$ 10,00
Total	20	R\$ 193,40

Fonte: Autor.

A figura apresentada abaixo ilustra o resultado da fabricação dos filtros purificadores e sua integração com o biodigestor.

Figura 4.4: Filtros purificadores e biodigestor



Fonte: Autor.

4.3- PARÂMETROS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

4.3.1- Concentração de sólido total e concentração dos sólidos voláteis antes do processo de biodigestão

Para maximizar a produção do biogás, é necessário ter conhecimento dos valores ideais para os parâmetros que envolvem o substrato. Um desses parâmetros é a concentração de sólido total antes do processo de biodigestão, o qual ocorre da seguinte forma, de acordo Tabatabaei e Ghanavati (2018): uma pequena amostra, de no máximo 2,5 gramas, deve ser colocada em um prato de alumínio seco e em uma estufa a 105°C por pelo menos 4 horas, para posteriormente ser resfriada por um dessecador e medida sua massa em uma balança. A equação abaixo expressa a concentração de sólido total antes da digestão (TS_i).

$$TS_i = \frac{m_{ss}}{m_{us}} \quad (4.1)$$

Em que:

- m_{ss} : Massa da amostra seca sem o prato (g);
- m_{us} : Massa da amostra inicial sem o prato (g).

Outra propriedade que pode ser obtida através de método experimental é a concentração de sólidos voláteis. O experimento funciona da seguinte forma, segundo Tabatabaei e Ghanavati (2018): um prato de alumínio seco com uma pequena amostra de biomassa é aquecido em um forno a 105°C por 4 horas, depois é aquecido em um forno a 550°C por 30 minutos, para posteriormente ocorrer o resfriamento e a amostra ser pesada. A concentração de sólidos voláteis (VS_i) é expressa na forma da porcentagem da concentração de sólido total antes da digestão pela equação a seguir:

$$VS_i = \frac{m_{ss} - m_{cs}}{m_{ss}} \quad (4.2)$$

No qual tem-se:

- m_{cs} : Massa da cinza sem o prato.

A concentração total de sólido de um substrato diminui ao longo do tempo que esse material fica no biodigestor. Esse parâmetro deve ser analisado, pois através dele pode-se mensurar a quantidade de matéria prima necessária para alimentação de um biodigestor em um certo período de tempo.

Por meio da tabela 4.5, pode-se consultar os valores teóricos da concentração de sólido total depois da digestão (TS) e da concentração de sólidos voláteis (VS), além do rendimento potencial do biogás, que será utilizado em outras abordagens posteriores.

Tabela 4.5: Parâmetros para diferentes tipos de substrato

Substrato	TS (%)	VS (%TS)	Rendimento potencial do gás (L/kgVS)
Resíduos de vegetais	20	90	420
Resíduos de mercado	8 - 20	75	-
Resíduos de cantina	9 - 37	75	-
Resíduos de frutas	25 - 45	90	420
Esterco de gado	30	80	600 - 800
Resíduos sólidos municipais	-	-	360 - 530

Fonte: Adaptado de FNR (2010) e Deublein e Steinhauser (2010).

4.3.2- Tempo de retenção hidráulica

Outro parâmetro que é fundamental para o processo de biodigestão é o tempo de retenção hidráulica. Ele mede o tempo médio que o substrato fica no interior de um

biodigestor e é dado através da seguinte expressão abaixo, sendo medido em dias no qual o substrato permanece no biodigestor.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (4.3)$$

No qual tem-se que:

- TRH: Tempo de retenção hidráulica (d);
- V: Volume da mistura no biodigestor (m³);
- Q: Vazão de alimentação (m³/d).

Nos biodigestores que são do tipo batelada, o tempo de retenção hidráulica será igual a duração em que o substrato ficar no biodigestor, ou seja, se a cada 30 dias o material dentro do recipiente for descartado e inserido um novo material, o seu TRH será de 30 dias. Já para biodigestores do tipo semi contínuo ou contínuo, o TRH é calculado de acordo com o início da alimentação nos biodigestores até o momento em que começa a sair a mistura diluída no recipiente final.

4.3.3- Carga orgânica volumétrica

O tempo de retenção hidráulica tem uma relação inversamente proporcional à carga orgânica volumétrica (COV). Este parâmetro mede a quantidade de substrato que deve ser inserido no biodigestor em uma certa quantidade de tempo, a fim de que se obtenha a melhor eficiência na conversão do material orgânico em biogás.

De acordo com Kunz, Steinmetz, Amaral (2022), as altas cargas orgânicas volumétricas apresentam uma elevada relação entre alimento/microrganismo, o que pode acarretar no aumento da concentração de ácidos orgânicos voláteis e, consequentemente, prejudicar a biodigestão. Já para baixas cargas orgânicas volumétricas, a relação entre alimento/microrganismo é baixa, o que diminui a atividade biológica.

Logo, é essencial se obter o valor desse parâmetro de forma que ele possa atender as exigências descritas acima, pois irá proporcionar as condições ideais para o crescimento dos microrganismos e melhorar a produção de biogás do processo. A melhor COV depende do tipo de substrato, da tecnologia aplicada e do modelo de biodigestor e pode ser expressa de acordo com a fórmula abaixo.

$$COV = \frac{Q \cdot VS}{V} = \frac{VS}{TRH} \quad (4.4)$$

Em que:

- COV: Carga orgânica volumétrica [$\text{kg}_{\text{SV}}/(\text{m}^3 \times \text{d})$];
- VS: Concentração de sólidos voláteis presentes no substrato (kg/m^3);

4.3.4- Temperatura da digestão anaeróbia

A temperatura de digestão anaeróbia é uma variável importante no processo de biodigestão, pois irá influenciar nos procedimentos a serem realizados e no custo da planta. Ela pode ser dividida de acordo com a intensidade da temperatura em: psicrófila, mesófila e termófila.

A temperatura psicrófila está abaixo de 25°C e é caracterizado por não maximizar o rendimento e produção do biogás. Logo, nessa temperatura não há a necessidade de se realizar alguma etapa de aquecimento, porém a conversão da matéria orgânica em biogás é inferior às demais faixas de temperatura (TABATABAEI e GHANAVATI, 2018)

Já no processo mesófilico, a faixa de temperatura é de 25°C a 42°C e, comparado ao processo termófilico, ele exige pouca energia térmica para manter a temperatura da biodigestão estável. Além disso, não requer que sejam utilizados materiais especiais no procedimento.

Conforme mencionado por Wellinger, Murphy e Baxter (2013), a hidrólise dos microrganismos anaeróbios mesófilicos demonstra um pH ótimo situado na faixa de 5,2 a 6,3, e a temperatura ideal para essa atividade está compreendida entre 25°C e 35°C . Por outro lado, no processo de metanogênese, observa-se uma variação de pH entre 6,7 e 7,5, sendo que a temperatura propícia para a atuação desses microrganismos deve ser superior a 32°C e inferior a 42°C .

Segundo Tabatabaei e Ghanavati (2018), o processo termófilico opera em uma faixa de temperatura de 43°C a 55°C e possui como grandes vantagens o tempo de retenção hidráulica curto e velocidade de reação mais rápida, o que acarreta em maior produção do biogás. Porém, requer muita energia térmica para manter estável a temperatura do processo e pode diminuir a vida útil de equipamentos, como bombas, gasômetros e misturadores.

De posse dessas informações, pode-se observar que ocorre um aumento de produção de biogás com a elevação da temperatura do processo. Para reforçar essa informação, a equação abaixo relaciona a carga volumétrica e a temperatura e, percebe-se que quanto maior for a temperatura, maior será a carga volumétrica.

$$\frac{COV_2}{COV_1} = e^{p \cdot (T_2 - T_1)} \quad (4.5)$$

Em que:

- COV_1 e COV_2 : Carga orgânica volumétrica [$kg_{SV}/(m^3 \cdot d)$];
- p : Constante igual a $0,1^\circ C^{-1}$;
- T_1 e T_2 : Temperatura ($^\circ C$).

Outro fato importante de se destacar é que as populações microbianas dentro do biodigestor são bastante afetadas quando ocorre uma alteração brusca de temperatura. Logo, é essencial que o biodigestor seja projetado em um local em que não haja mudança rápida de temperatura, para que a produção do biogás não seja diminuída.

4.3.5- Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH determina o grau de acidez de uma substância, classificando-a como ácida, neutra ou básica. Em relação à biodigestão, esse parâmetro pode determinar se a produção de biogás será maximizada ou minimizada, devido ao seguinte fato: os microrganismos fermentativos conseguem se adaptar às variações de pH entre 4 e 8,5; porém as arqueas metanogênicas são sensíveis a variação do pH, com valor ideal entre 6,7 a 7,5 (KUNZ, STEINMETZ, DO AMARAL, 2022).

Isso significa dizer que para se produzir o biogás com um alto poder calorífico, ou seja, com uma elevada concentração de metano, é necessário que o pH esteja dentro desse limite. Porém, é importante destacar que no processo de digestão anaeróbica ocorre, muitas vezes, o acúmulo de ácidos voláteis, os quais acarretam a diminuição do pH.

Segundo Kunz, Steinmetz e Amaral (2022), a correção para diminuição da acidificação do biodigestor pode ser realizada pela adição de hidróxido de sódio (NaOH), bicarbonato de potássio ($KHCO_3$), bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) e carbonato de sódio (Na_2CO_3).

4.3.6- Inoculação e fase de arranque

Para uma melhor produção de biogás, o sistema de biodigestores necessita ser inoculado com bactérias essenciais para o processo de digestão anaeróbia. Dentre os principais inoculados, o esterco de gado diluído na proporção de 1:1 com água é o ideal, pois aumenta a capacidade de tamponamento da mistura e reduz o risco de acidificação (DA SILVA, 2021).

Em geral, o mínimo de esterco necessário que deve ser inoculado no biodigestor corresponde a 10% do seu volume, porém, quanto mais esterco utilizado, melhor será a

inoculação. Após isso, é esperado entre duas a 4 semanas para que o biodigestor comece a produzir biogás (VOGELI et al.; 2014)

Essa fase é denominada fase de arranque, na qual o gás produzido é principalmente o gás carbônico. Após alguns dias dessa fase, o teor do gás metano vai aumentando consideravelmente até que ele chegue a um nível de 55 a 70% do biogás total, podendo ser usado, por exemplo, para a cocção de alimentos.

4.3.7- Quantidade de biogás produzida

A quantidade de biogás a ser produzida pode ser estimada a partir de algumas variáveis do processo de biodigestão. Essa produção pode ser limitada pelos seguintes fatores: potência do motor, disponibilidade do substrato e possíveis tarifas impostas por autoridades políticas. A equação abaixo estima a produção do biogás a partir de parâmetros que podem variar durante o ano, portanto, o engenheiro responsável pelo projeto da planta deve se atentar a isso.

$$Q_{biogás} = \sum_{i=1}^n Q_{sub_i} \cdot TS_i \cdot VS_i \cdot PGY_i \quad (4.6)$$

Em que:

- $Q_{biogás}$: Quantidade de biogás produzido em um ano (m^3 /ano);
- Q_{sub} : Quantidade de substrato disponível em um ano (ton/ano);
- TS_i : Concentração total de sólido antes do processo de biodigestão (%);
- VS_i : Concentração de sólidos voláteis referentes a TS_i (%);
- PGY : Rendimento potencial do gás ($m^3_{biogás}/ton_{VS}$).

Caso se queira converter esse biogás em biometano, a fim de se utilizar essa energia renovável para uso veicular ou colocá-la em uma rede de distribuição de gás natural, é possível calcular a quantidade de metano produzida da seguinte forma:

$$Q_{CH_4} = Q_{biogás} \cdot C_{CH_4} \quad (4.7)$$

Em que:

- Q_{CH_4} : Quantidade de metano produzida por ano (m^3 /ano);
- C_{CH_4} : Concentração de metano esperada no biogás produzido (%);

4.4- GRUPO GERADOR A GÁS

O grupo gerador Leon Heimer do Laboratório de Cogeração da UFPB possui motor de 4 tempos aspirado, com 8 cilindros, cilindrada total de 8,1 litros, potência de 100 kW e taxa de compressão de 9,1:1. Além, disso, conta com o sistema de refrigeração que utiliza água, tensão de saída do gerador elétrico de 380 V a 1800 rpm e fator de potência de 0,8.

A figura abaixo ilustra o grupo gerador a gás que possui, além motor de combustão interna e do gerador elétrico, um painel onde se pode visualizar a temperatura do fluido de arrefecimento, a temperatura e pressão do óleo e indicadores de alerta da pressão do óleo e da temperatura do fluido de arrefecimento.

Figura 4.5: Grupo gerador Leon Heimer



Fonte: Autor

4.5- REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO

O refrigerador por absorção do Laboratório de Cogeração da UFPB é do modelo ACF60-00 da marca ROBUR, com as seguintes especificações:

- Temperatura da água de entrada: 45°C;
- Temperatura da água de saída: 3°C;
- Consumo de energia elétrica: 0,75 kW
- Quantidade de calor necessária: 27,81 kW

- Capacidade de produção de frio: 17,73 kW

A figura 4.6 mostra o refrigerador por absorção que, como explicado anteriormente na descrição do sistema, recebe os gases proveniente do escape do motor e produz frio a partir a partir desses gases de exaustão.

Figura 4.6: Refrigerador por absorção ROBUR



Fonte: Autor

4.6- ANÁLISE ENERGÉTICA

A primeira lei da Termodinâmica foi aplicada através de equações de conservação de energia e de massa para a determinação das propriedades termodinâmicas e dos fluxos de calor de todo o sistema analisado.

Além disso, foram feitas algumas considerações para a realização da análise, como: regime permanente de todos os equipamentos, energias potencial e cinética desprezíveis, a amônia está em condição de equilíbrio nas saídas dos geradores de vapor e absorvedores, o refrigerante está saturado nas saídas do evaporador e do condensador e as perdas de carga por atrito nas tubulações e nos trocadores de calor não são consideradas.

Dessa forma, a quantidade de energia elétrica gerada (E) e a quantidade de frio produzido (F) podem ser determinados através das seguintes equações:

$$E = Q_{CH_4} * PCI_{CH_4} * \eta_{GG} \quad (4.8)$$

$$F = Q_{CH_4} * PCI_{CH_4} * \eta_{RA} * \beta_{RA} \quad (4.9)$$

Em que η_{GG} é o rendimento térmico do grupo gerador, η_{RA} é a eficiência de recuperação de calor do refrigerador por absorção e β_{RA} representa o coeficiente de desempenho. Essa última variável pode ser aferida pela equação abaixo:

$$\beta_{RA} = \frac{Q_{Frio}}{Q_{RA} - Q_{Frio}} \quad (4.10)$$

O calor recuperado pelo refrigerador por absorção (Q_{RA}) é calculado conforme a fórmula a seguir.

$$Q_{RA} = \dot{m}_{GE} * \int c(T) dT \quad (4.11)$$

Onde $\dot{m}_{GE}$ é a vazão mássica dos gases de escape e $c(T)$ é o calor específico em função da temperatura de entrada e saída dos gases de escape.

4.7- ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA

Na análise exergoeconômica, os custos monetários são associados aos fluxos exergéticos. De acordo com a tabela abaixo, pode-se afirmar que o custo de aquisição dos resíduos hortifruti e do esterco de gado foram nulos, pois os vegetais foram obtidos gratuitamente com o restaurante universitário da UFPB e o esterco de gado foi obtido por uma contribuição. Apenas foi contabilizado o transporte do esterco de gado de Guarabira até a universidade, o que totalizou em 40 reais.

Além disso, destaca-se o baixo custo para a confecção dos biodigestores, filtros e aquisição da câmara de ar. Isso demonstra que, apesar de se tratar de uma fonte de energia sustentável, o biogás pode ser obtido de forma acessível ao cidadão, sendo uma ótima alternativa para pessoas que moram em locais distantes, com difícil acesso à energia.

Tabela 4.6: Custos monetários do sistema

Componentes	Valor
Custo dos biodigestores em série	R\$ 608,88
Custo do biodigestor de bombona	R\$ 513,06
Custo dos filtros	R\$ 193,40
Custo do grupo gerador	R\$ 100.000,00
Custo do refrigerador por absorção	R\$ 30.000,00

Componentes	Valor
Custo dos resíduos hortifruti	R\$ 0,00
Custo do esterco de gado	R\$ 0,00
Custo do transporte do esterco de gado	R\$ 80,00
Taxa de juros	6%
Fator de manutenção dos equipamentos	6%
Quantidade de operador do sistema	1
Horas em operação do sistema por dia (h/dia)	8
Salário bruto do operador por ano	R\$ 37.500,00
Vida útil dos equipamentos	20 anos

Fonte: adaptado de Alves (2020) e Marques (2018)

De posse dessas informações, foram definidas as equações de combustível, produto e auxiliar, além do balanço exergoeconômico, para os 2 volumes controle analisados nesse trabalho, conforme o que se pode visualizar a seguir:

4.7.1- Grupo gerador

- Balanço exergoeconômico:

$$c_3 * Ex_3 + c_2 * Ex_2 = c_1 * Ex_1 + \dot{Z}_{GG} \quad (4.12)$$

- Equações auxiliares - Princípio F:

$$c_1 = c_2 \quad (4.13)$$

$$c_3 = \frac{c_1 * Ex_1 + \dot{Z}_{GG} - c_2 * Ex_2}{Ex_3} \quad (4.14)$$

- Exergia do produto e do insumo:

$$Ex_{PGG} = Ex_3 \quad (4.15)$$

$$Ex_{FGG} = Ex_1 - Ex_2 \quad (4.16)$$

- Taxa de custo do produto e do insumo:

$$\dot{C}_{PGG} = \dot{C}_3 \quad (4.17)$$

$$C_{FGG} = \dot{C}_1 - \dot{C}_2 \quad (4.18)$$

4.7.2- Refrigerador por absorção

- Balanço exergoeconômico

$$c_4 * Ex_4 + c_5 * Ex_5 = c_2 * Ex_2 + c_6 * Ex_6 + \dot{Z}_{RA} \quad (4.19)$$

- Equações auxiliares- Princípio F:

$$c_2 = c_4 \quad (4.20)$$

$$c_5 = c_6 \quad (4.21)$$

$$c_5 = \frac{c_2 * Ex_2 + \dot{Z}_{RA} - c_4 * Ex_4}{Ex_5 - Ex_6} \quad (4.22)$$

- Exergia do produto e do insumo:

$$Ex_{PRA} = Ex_5 - Ex_6 \quad (4.23)$$

$$Ex_{FRA} = Ex_2 - Ex_4 \quad (4.24)$$

- Taxa de custo do produto e do insumo:

$$\dot{C}_{PRA} = \dot{C}_5 - \dot{C}_6 \quad (4.25)$$

$$\dot{C}_{FRA} = \dot{C}_2 - \dot{C}_4 \quad (4.26)$$

4.7.3- Análise de custos

Com base nos custos de exergia e na análise exergoeconômica, realizou-se uma avaliação dos custos associados à produção de frio (C_F) e energia elétrica (C_E) do sistema de cogeração, como pode ser visto através das equações abaixo:

$$C_F = \frac{Z_{RA}}{F} + \frac{(\frac{Ex_2 - Ex_4}{Ex_1} + \frac{Ex_4}{2 * Ex_4}) * G_T}{F} \quad (4.27)$$

$$C_E = \frac{Z_{GG}}{E} + \frac{G_{BG}}{E} + \frac{(\frac{Ex_1 - Ex_2}{Ex_1} + \frac{Ex_4}{2*Ex_4}) * G_T}{E} \quad (4.28)$$

Em que G_{BG} é o custo associado a produção do biogás, levando em consideração a confecção dos biodigestores, do purificador e a obtenção da matéria prima; e G_T é o custo associado ao transporte da matéria prima.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- PRODUÇÃO REAL DOS BIODIGESTORES DESENVOLVIDOS

Ao longo do processo de fabricação dos biodigestores em série, foi constatada a presença de vazamentos por meio de testes hidrostáticos, os quais foram realizados à temperatura e pressão ambiente, enchendo todos o recipientes de água. Sempre que um vazamento era identificado, procedia-se à aplicação adicional de manta asfáltica no local afetado, visando assegurar a completa vedação dos biodigestores.

Depois dos procedimentos realizados, foram inseridas as matérias orgânicas diluídas, porém verificou-se que a câmara de ar conectada na saída dos biodigestores estava seca, constatando dessa forma um vazamento na estrutura. Com isso, não pode-se observar a produção de biogás durante os 2 meses.

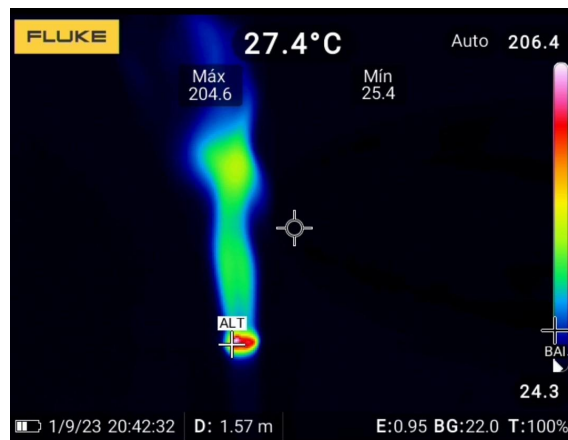
No entanto, no segundo protótipo, constituído por um recipiente de 200 litros, não foi observado a ocorrência de vazamentos nos testes hidrostáticos que foram realizados. Houve geração de biogás tanto no primeiro como no segundo mês analisado.

Para verificar a pureza do biogás, empregou-se a câmara térmica 20A800G Cativ 12V 640X480 FLKTI480PRO9HZBR Fluke, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA), e realizou-se as medições nas regiões sólidas identificadas.

O teste transcorreu ao longo de um período de 1 minuto, revelando que a temperatura mínima atingiu 25,4°C, enquanto a temperatura máxima alcançou 204,6 °C. O valor da temperatura máxima foi obtido na superfície da mangueira em que sai o biogás, por isso o valor foi elevado.

A temperatura média resultante das medições, excluindo a superfície da mangueira, situou-se em torno de 33°C. Esta condição térmica propicia a atividade dos microrganismos anaeróbios mesofílicos no processo de metanogênese, contribuindo para o aumento da concentração de metano no biogás. Isso evidencia a pureza do biogás obtido.

Figura 5.1: Medição das imediações sólidas na saída do biogás



Fonte: Autor

Adicionalmente, foi realizado um teste de chama com a finalidade de corroborar com o resultado obtido nas medições de temperatura. A chama resultante exibiu uma coloração intensamente azulada, o que confirmou que o gás apresenta alta concentração de metano.

Figura 5.2: Chama produzida pela queima do biogás

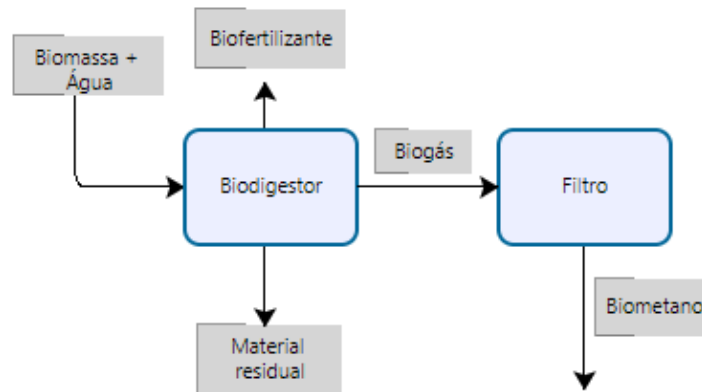


Fonte: Autor

5.2- ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE BIODIGESTÃO

O sistema que envolve os biodigestores e os filtros pode ser esquematizado da seguinte forma:

Figura 5.3: Sistema envolvendo biodigestores e filtros



Fonte: Autor

De acordo com Deublein e Steinhauser (2010), conforme mostra a tabela 4.5, os valores médios estimados de concentração de sólidos totais antes da biodigestão, concentração de sólidos voláteis antes da digestão e o rendimento potencial do biogás para resíduos hortifruti são, respectivamente: 20%, 90% de TS, e 420 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{VS}}$. Já para o esterco de gado, esses valores são, respectivamente: 30%, 80% de TS e 700 $L_{\text{biogás}}/\text{kg}_{\text{VS}}$.

De acordo Vogeli et al. (2014), o tempo de retenção hidráulica ideal para um clima tropical, com temperatura entre 25 a 30°C, é de 10 a 40 dias. Isso significa dizer que, para um TRH de 30 dias, o tempo para encher um recipiente que comporta 30 litros deve ser de 1 mês.

É importante destacar que o protótipo que gerou resultado tem 200 litros no total, porém não foi completamente preenchido, pois o projeto leva em consideração que é necessário haver espaço para armazenamento do biogás nos biodigestores. Por isso, foram inseridos 160 litros da mistura de água, esterco de gado e resíduos hortifruti na bombona.

Considerando o tempo de retenção hidráulica de 30 dias e utilizando a equação 4.3, obtém-se a seguinte vazão de alimentação:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$
$$30 \text{ d} = \frac{160 \text{ l}}{Q}$$
$$Q = 5,33 \text{ l}$$

Segundo Vogeli et al. (2014), a carga orgânica volumétrica deve ser menor ou igual que 2 $\text{kg}_{\text{VS}}/\text{m}^3$ por dia para sistemas de digestão anaeróbia que não possuem agitador, como é o caso dos biodigestores confeccionados neste trabalho; e para biodigestores com

agitador o valor ideal para a carga orgânica volumétrica está entre 4 a 8 kg_{VS}/m³. Então, pode-se calcular a concentração de sólidos voláteis segundo a equação 4.4:

$$COV = \frac{VS}{TRH}$$

$$2 \text{ kg}_{VS}/(m^3 * d) \leq \frac{VS}{30 d}$$

$$VS \leq 60 \text{ kg}/m^3$$

Convertendo-se as unidades, percebe-se que a concentração de sólidos voláteis deve ser menor que 60 g/L. Para verificar a quantidade máxima de substrato que deve ser colocada nos 5,33 litros de mistura, deve-se tomar como base os dados de TS e VS fornecidos para esterco de gado e resíduos de frutas, verduras e legumes. Analisando-se primeiramente os resíduos hortifruti, tem-se que:

$$0,20 * 0,90 * m_{HF} = 60 \text{ g} * \frac{5,33 \text{ l}}{1 \text{ l}}$$

$$m_{HF} = 1776,67 \text{ g}$$

Isso representa que, para se maximizar a produção do biogás, devem ser inseridos 1776,67 gramas de resíduos hortifruti da mistura de 5,33 litros, e o restante ser diluído em água, o que significa uma proporção substrato e água de 1:2. Também pode-se realizar o mesmo procedimento para o esterco de gado, da seguinte forma:

$$0,30 * 0,80 * m_{EG} = 60 \text{ g} * \frac{5,33 \text{ l}}{1 \text{ l}}$$

$$m_{EG} = 1332,5 \text{ g}$$

Isso indica que devem ser inseridos 1332,5 gramas de esterco de gado na mistura, representando uma proporção de substrato e água de 1:3 para se produzir mais biogás e a produção não ser afetada pelo acúmulo de ácidos voláteis.

Para calcular a quantidade de biogás produzida, é necessário saber quanto matéria orgânica será inserida no biodigestor. Primeiramente, o sistema será inoculado com uma mistura de esterco de gado e água na proporção de 1:1 e será esperado 30 dias para que o processo seja realizado da forma correta. Com isso, a quantidade de esterco de gado a ser inserida no primeiro mês será de:

$$Q_{EG} = \frac{160}{2} = 80 \text{ kg}$$

Já no segundo mês, será introduzida a mistura de resíduos hortifruti com água na proporção de 1:2. Isso significa dizer que a quantidade de resíduos hortifruti que serão colocados no biodigestor no segundo mês será de:

$$Q_{HF} = \frac{160}{3} = 53,33 \text{ kg}$$

Com isso, pode-se encontrar a quantidade de biogás produzida a partir da equação 4.6 e das informações da tabela 4.5:

$$Q_{biogás} = \sum_{i=1}^n Q_{sub_i} \cdot TS_i \cdot VS_i \cdot PGY_i$$

$$Q_{biogás} = 80 \text{ kg} * 0,3 * 0,8 * 700 \text{ L /kg}_{VS} + 53,33 \text{ kg} * 0,2 * 0,9 * 420 \text{ L /kg}_{VS}$$

$$Q_{biogás} = 13440 + 4031,748 = 17471,748 \text{ L}_{biogás}$$

A partir disso, pode-se calcular a quantidade de cada componente do biogás através da tabela 4.1, que mostra a composição do biogás do aterro sanitário de João Pessoa.

$$Q_{CH_4} = 0,508 * 17471,748 = 8875,648 \text{ L}$$

$$Q_{CO_2} = 0,4068 * 17471,748 = 7107,507 \text{ L}$$

$$Q_{H_2S} = 0,01 * 17471,748 = 171,717 \text{ L}$$

$$Q_{O_2} = 0,0158 * 17471,748 = 276,054 \text{ L}$$

$$Q_{N_2} = 0,0594 * 17471,748 = 1037,822 \text{ L}$$

Para quantificar a matéria residual (Q_{MR}) que ficou nos biodigestores, tem-se que levar em consideração parcela que faz parte dos sólidos totais da substância, mas que não é volátil. Dessa forma, tem-se que:

$$Q_{MR} = Q_{EG} * (1 - VS_{EG}) * TS_{EG} + Q_{HF} * (1 - VS_{HF}) * TS_{HF}$$

$$Q_{MR} = 80 * (1 - 0,8) * 0,3 + 53,33 * (1 - 0,9) * 0,2$$

$$Q_{MR} = 4,8 + 1,066 = 5,866 \text{ kg}$$

Além disso, pode-se estimar a quantidade de biofertilizante que será produzido nesses dois meses. Como a quantidade total de mistura de matéria orgânica e água será de 320 kg, sendo 160 kg inseridos no primeiro mês e 160 kg no segundo mês, tem-se que:

$$Q_{biofertilizante} = 320 - Q_{MR} - Q_{biogás} = 320 - 5,866 - (17471,748 * d_{biogás})$$

Como a densidade do biogás ($d_{biogás}$) é 1,24 kg/m³ ou 1,24*10⁻³ kg/L, de acordo com a tabela 4.1, tem-se que:

$$Q_{biofertilizante} = 314,134 - (17471,748 * 0,00124) = 292,47 \text{ kg}$$

Sabe-se que, idealmente, após a limpeza e a purificação do gás, os componentes restantes da mistura são apenas o metano, o qual não sofre alteração no seu volume, e o gás carbônico, que tem seu volume reduzido devido ao processo de purificação. Como visto anteriormente, a concentração mínima do metano na mistura deve ser de no mínimo 90%, para que o biometano possa ser utilizado no motor de combustão interna. Logo, pode-se calcular a quantidade de biometano ($Q_{biometano}$) e de gás carbônico (Q_{CO_2}) produzidos, considerando a concentração da mistura de 90%_{CH₄} e 10%_{CO₂} a partir das equações abaixo:

$$Q_{biometano} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} = \frac{8875,648}{0,9} = 9861,831 \text{ L}$$

$$Q_{CO_2} = C_{CO_2} * Q_{biometano} = 0,1 * 9861,831 = 986,183 \text{ L}$$

Por meio da tabela abaixo, pode-se resumir os valores obtidos através dos cálculos realizados. Analisando-se os resultados obtidos da estimativa, percebe-se que grande parte da matéria orgânica é reutilizada, visto que foi obtido apenas 5,866 kg de matéria residual a partir de 133,33 kg de matéria orgânica produzida. Isso significa dizer que 95,6% dos resíduos inseridos nos biodigestores foram reaproveitados.

Tabela 5.1: Estimativa dos parâmetros de digestão nos biodigestores desenvolvidos

Componentes	Quantidade inserida/ produzida
Resíduos Hortifruti	53,33 kg
Esterco de gado	80 kg
Matéria orgânica	133,33 kg
Água	186,67 L
Biogás	17471,748 L
Matéria residual	5,866 kg
Biofertilizante	292,47 kg
Biometano	9861,831 L

Fonte: Autor.

Outro ponto de relevância a ser ressaltado é a geração de biometano, que culminou na produção de aproximadamente 10 metros cúbicos de biometano, representando, portanto, uma considerável produção de energia.

5.3- ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGEOCONÔMICA

O sistema de cogeração em questão já foi objeto de investigação por parte de Alves (2020), e nessa pesquisa, o combustível empregado foi o gás natural, cuja composição incluía uma concentração de 90% de metano. No âmbito deste estudo em particular, cujo propósito reside na produção de biometano, isto é, no processo de purificação do biogás para conferir-lhe um elevado poder calorífico, a meta é alcançar uma composição do gás com igualmente 90% de metano.

Desse modo, os parâmetros obtidos nos testes experimentais realizados podem ser visualizados a seguir.

Tabela 5.2: Parâmetros obtidos nos testes experimentais

Parâmetros obtidos	Valores
Rendimento térmico do grupo gerador	36,30%
Potência elétrica líquida	53,7 kW
Relação ar combustível	24,1
Vazão de ar	0,077 kg/s
Rendimento térmico do sistema de cogeração	51,70%
Quantidade de energia fornecida pela combustão do gás natural	147,9 kW
Calor fornecido ao refrigerador pelos gases de escape	24,58 kW
Frio produzido pelo refrigerador por absorção	15,67 kW

Fonte: Alves (2020).

Foram, adicionalmente, examinados os diversos pontos do sistema de cogeração, e com base em parâmetros como temperatura, vazão mássica e entropia, foram realizados os cálculos necessários para determinar a exergia e a taxa de custos correlatos.

Tabela 5.3: Análise das propriedades no sistema de cogeração

Pontos	T (°C)	Vazão mássica (kg/s)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)	Ex (kW)	c (R\$/GJ)	C' (R\$/h)
1	25	0,0076	-	19417,5	147,573	60,65	32,22
2	592	0,0076	9,056	3943,2	29,968	60,65	6,54
3					53,70	206,58	39,94
4	384	0,0076	8,668	1865,3	14,176	60,65	3,10
5	10	0,75	0,076	20,98	1,393	769,70	3,10

Pontos	T (°C)	Vazão mássica (kg/s)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)	Ex (kW)	c (R\$/GJ)	C' (R\$/h)
6	5	0,75	0,151	42	0,409	769,70	1,14

Fonte: Alves (2020).

Portanto, a partir do que foi obtido, pode-se calcular a quantidade de energia elétrica (E) e de frio (F) produzido a partir do sistema de cogeração.

$$E = Q_{CH_4} * PCI_{CH_4} * \eta_{GG} = 8875,648 * 35,800 \text{ kJ/L} * 0,363 = 115342,596 \text{ kJ}$$

$$E = 32,0396 \text{ kWh}$$

$$F = Q_{CH_4} * PCI_{CH_4} * \eta_{RA} * \beta_{RA}$$

$$\beta_{RA} = \frac{Q_{Frio}}{Q_{refrig} - Q_{Frio}} = \frac{15,67}{24,58 - 15,67} = 1,759$$

$$\eta_{RA} = 0,517 - 0,363 = 0,154$$

$$F = 8875,648 * 35,800 \text{ kJ/L} * 0,154 * 1,759 = 86073,538 \text{ kJ}$$

$$F = 23,9093 \text{ kWh}$$

De posse dessas informações, pode-se calcular os custos associados a produção de energia elétrica e frio. O investimento para a produção do biogás engloba o custo com a confecção do biodigestor de bombona e dos filtros purificadores.

$$C_E = \frac{Z_{GG}}{E} + \frac{G_{BG}}{E} + \frac{(\frac{Ex_1 - Ex_2}{Ex_1} + \frac{Ex_4}{2 * Ex_4}) * G_T}{E}$$

$$C_E = \frac{R\$100000}{32,0396 \text{ kWh}} + \frac{R\$706,46}{32,0396 \text{ kWh}} + \frac{(\frac{147,573 - 29,968}{147,573} + 0,5) * 80}{32,0396 \text{ kWh}} = 3121,14 + 22,05 + 3,2$$

$$C_E = R\$3165,43/\text{kWh}$$

$$C_F = \frac{Z_{RA}}{F} + \frac{(\frac{Ex_2 - Ex_4}{Ex_1} + \frac{Ex_4}{2 * Ex_4}) * G_T}{F}$$

$$C_F = \frac{R\$30000}{23,9093 \text{ kWh}} + \frac{(\frac{29,968 - 14,176}{147,573} + 0,5) * 80}{23,9093 \text{ kWh}} = 1254,74 + 2,031$$

$$C_F = R\$1256,77/\text{kWh}$$

Ao analisar a fatura da Energisa, é evidente que o custo da energia elétrica e do frio por quilowatt-hora (kWh) equivale a R\$0,77/kWh. Portanto, a quantidade de energia

elétrica gerada (E_{F1}) e a quantidade de frio produzido (F_{F1}) para que o investimento demonstre viabilidade econômica é calculado da seguinte forma:

$$\frac{R\$100000}{E_F} + \frac{R\$706,46}{E_F} + \frac{103,754}{E_F} = 0,77$$

$$0,77E_F = 100000 + 706,46 + 103,754$$

$$E_{F1} = 130922,356 \text{ kWh}$$

$$\frac{R\$30000}{F_F} + \frac{48,561}{F_F} = 0,77$$

$$0,77F_F = 30000 + 48,561$$

$$F_{F1} = 39024,105 \text{ kWh}$$

A produção de biogás foi analisada em dois meses, portanto, pode-se estimar o retorno do investimento:

$$ROI_{EF1} = \frac{E_{F1}}{E} = \frac{130922,356}{32,0396} = 4086 \text{ meses} \simeq 341 \text{ anos}$$

$$ROI_{FF1} = \frac{F_{F1}}{F} = \frac{39024,105}{23,9093} = 1632 \text{ meses} \simeq 136 \text{ anos}$$

Com a finalidade de reduzir o retorno do investimento do sistema de cogeração que compreende o grupo gerador e o refrigerador por absorção, é necessário aumentar o número de biodigestores ou substituir por um biodigestor de volume maior e, consequentemente, aumentar a produção de biogás. Considerando que um tanque de polietileno de 10000 litros que custa R\$3000,00 é 50 vezes maior que a bombona de 200 litros em que foi feito o experimento e que os filtros purificadores custaram R\$193,40, tem-se que:

$$E_{F2} = \frac{R\$100000 + R\$3193,4 + 103,754}{0,77} = 134152,148 \text{ kWh}$$

$$F_{F2} = F_{F1} = 39024,105 \text{ kWh}$$

$$ROI_{EF2} = \frac{134152,148}{50 \cdot 32,0396} \simeq 84 \text{ meses} = 7 \text{ anos}$$

$$ROI_{FF2} = \frac{39024,105}{50 \cdot 23,9093} \simeq 33 \text{ meses} \simeq 3 \text{ anos}$$

Dessa forma, mediante a implementação do reservatório de 10.000 litros, o período de recuperação do investimento está estimado em sete anos. Tal circunstância confere viabilidade econômica à execução do projeto, destacando-se como uma alternativa sustentável que contribui para a preservação do meio ambiente.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Com base na totalidade dos experimentos conduzidos e na análise rigorosa dos resultados teóricos e experimentais, é possível inferir que a tecnologia de produção de biometano exibe um potencial notável para desenvolvimento. Este potencial se estende tanto ao seu conteúdo energético quanto ao seu impacto ambiental favorável.

Foram fabricados dois dispositivos de biodigestão: um consistindo em cinco recipientes de 10 litros conectados em série, e outro composto por uma única bombona de 200 litros. Durante um intervalo de dois meses, foi observado que o biodigestor constituído por uma única bombona demonstrou produção de biogás, enquanto os biodigestores em série não registraram qualquer produção.

Além disso, foi realizada a avaliação da quantidade de biogás produzida de forma teórica, com base nas características da matéria orgânica inserida nos recipientes. É importante ressaltar que, no primeiro mês, utilizou-se esterco de gado como inóculo, enquanto no segundo mês foram empregados resíduos hortifruti provenientes do restaurante universitário da UFPB.

No que se refere ao processo de purificação, embora não tenha sido conduzida uma análise cromatográfica do biogás produzido, empregou-se a câmara térmica 20A800G Cativ 12V 640X480 FLKTI480PRO9HZBR Fluke, pertencente ao GPICEEMA da UFPB, e foram efetuadas as medições nas regiões sólidas identificadas, constatando-se uma temperatura média de 33°C. Essa temperatura é considerada propícia para a atividade dos microrganismos anaeróbios mesofílicos no processo de metanogênese, o que contribui para o aumento da concentração de metano no biogás.

Além disso, foi conduzido um teste de chama, revelando que a chama produzida pelo biometano apresentava uma coloração azulada, em contraste com o tom alaranjado. Tal observação corroborou com o resultado encontrado nas medições de temperatura.

Verificou-se que, no protótipo de 200 litros, foi possível produzir aproximadamente 10 metros cúbicos de biometano a partir de 133,33 kg de matéria orgânica, dos quais 80 kg consistiam de esterco de gado e 53,33 kg eram resíduos hortifruti, misturados com água para evitar obstruções nos canos.

Além disso, constatou-se que 95,6% dos resíduos inseridos no biodigestor foram aproveitados, seja na forma de biogás, estimando-se a produção de 17.471,748 litros com base em cálculos teóricos, dos quais ocorreu a purificação, resultando em 9.861,831 litros de biometano. Adicionalmente, foram produzidos 292,47 kg de biofertilizante.

No que diz respeito à análise energética e exergoeconômica do sistema de cogeração, todas as etapas do sistema foram submetidas a avaliações, levando em consideração suas propriedades e os custos associados à produção de energia elétrica e resfriamento. Tornou-se evidente que os custos eram substancialmente superiores em comparação com as tarifas praticadas pela Energisa.

Diante dessa conjuntura e com o objetivo de otimizar o retorno do investimento do sistema de cogeração, composto pelo biodigestor, grupo gerador Leon Heimer e refrigerador por absorção ACF60-00 da marca ROBUR, foi efetuada a análise da implementação de um reservatório de 10.000 litros. Constatou-se que o período estimado para a recuperação do investimento é de sete anos caso esse biodigestor fosse utilizado, sendo assim uma alternativa sustentável e viável economicamente.

Sugestões para trabalhos futuros

Para que todo o trabalho produzido possa ter continuidade, é ideal que sejam desenvolvidos os seguintes estudos e experimentos:

- Análise metrológica de todo o gás produzido nos biodigestores;
- Análise cromatográfica do biogás e biometano, com a finalidade de comparar a elevação de poder calorífico com a purificação;
- Proposição de um sistema de biodigestores mais robustos a fim de analisar o retorno de investimento;
- Análise exergoambiental com a finalidade de avaliar o impacto ambiental que a utilização de biometano como fonte de energia resultaria;
- Proposição de análise exergoeconômica de um novo sistema de cogeração.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Classificação de Resíduos Sólidos. ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **Sem Desperdício**. 2019. Disponível em<<https://www.semdesperdicio.org/>>. Acesso: 13/02/2019.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Classificação de Resíduos Sólidos. Norma ABNT NBR 10.004:2004. Rio de Janeiro, maio de 2004.
- ALMEIDA, Bruno S. G. **Análise exergoeconômica avançada de um sistema de cogeração otimizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.
- ALVES, André F. M. **Análise exergoeconômica e exergoambiental de um sistema de trigerção usando gás natural e extensão para o uso do biogás de aterro sanitário**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2020.
- AMIDPOUR, M.; MANESH, M. H. K. **Cogeneration and polygeneration systems**. Academic Press. Londres. 2021.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. Editora Wiley. Nova York. 1996.
- BEJAN, A.; MAMUT, E. **Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems**. Springer. Neptun. 1998.
- CALISE, F.; D'ACCADIA, M. D.; VANOLI, L.; VICIDOMINI, M. **Polygeneration systems: design, processes and technologies**. Academic Press. Londres. 2022.
- CAVALCANTI, E. J. C. **Análise exergoeconômica e exergoambiental**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

Como funciona um motor 4 tempos. Educação Automotiva. Disponível em: <https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/>. Acesso em: 07/02/2023.

DA SILVA, Carlos Emílio Vieira. **Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala.** Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento). Universidade do Vale do Taquari. Lajeado. 2021.

DA SILVA, Daniel R. S. **Ciclo de cogeração com bagaço de cana - Análise exergoeconômica e exergoambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2021.

DE ALMEIDA, Bruno S. G. **Análise exergoeconômica avançada de um sistema de cogeração avançado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2018.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources – An Introduction.** Mörlenbach: Wiley, 2010.

DIAS, L. M. M. **Produção de zeólita a partir de cinza volante de carvão mineral para adsorção de metais em chorume gerado no lixão/aterro controlado na região amazônica.** Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade Federal do Pará. 2022

EBA – European Biogas Association. **Annual Report 2015.** Bruxelas, 2015. Disponível em: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2016/02/EBA-Annual-Report-2015-Web.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2022.

EPE. **Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano.** Rio de Janeiro, 2018.

EULER, A. M. C. **O acordo de Paris e o futuro do REDD+ no Brasil**. Embrapa Amapá-Capítulo em livro científico (ALICE), 2016.

FIGUEREDO, Thiago de Souza. **Análise exergoeconômica de um sistema de trigeriação de energia operando sob um ciclo de Rankine orgânico, acoplado a um chiller de absorção de simples efeito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2019

FNR (2010). **Leitfaden Biogas**. Gülzow, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Von der Gewinnung zur Nutzung, p. 272.

FONSECA, F. S. T, et al. **Análise de Viabilidade Econômica de Biodigestores na Atividade de Suinocultura na Cidade de Balsas - MA: um Estudo de Caso**. Congresso da sociedade brasileira de economia, administração e sociologia rural. Universidade Estadual do Maranhão. Maranhão, 2009.

FRANQUETO, R.; DA SILVA, J. D. Desenvolvimento histórico da valorização de biomassa do agronegócio para produção de biogás no âmbito rural. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp , p. 451-477, fev. 2020.

GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. Nunes; SANTOS, M. M. dos; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo. 2018.

Gás natural. GasNet. Disponível em: <https://www.gasnet.com.br/GasNatural/OGasCompleto>. Acesso em: 22/07/2023.

GBA – German Biogas Association. Biogas to biomethane. Disponível em <biogas-to-biomethane.com>. Acesso em: 28/09/2021.

KARLSSON, Tommy; KONRAD, Odorico; LUMI, Marluce; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Editora UNIVATES. Lajeado. 2014.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Essex: Butterworths, 1985.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Sbera e Embrapa. Concórdia. 2022.

LAZZARETO, A. **Fuel and product definitions in cost accounting evaluations: is it a solved problem?** 12th Joint European Thermodynamics Conference Brescia. 2013.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. **SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems**. Energy, vol. 31, p. 1257–1289, 2006.

LEITE, Ana L. F. **Análise exergoeconômica de um sistema de trigeriação no setor terciário: um estudo de caso em resort**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2019.

LEITE, N. D.; PAIVA, B. K. V.; OLIVEIRA, M. Z. F. da Silva; SANTOS, G. O. **Lixões, aterros controlados e aterros sanitários: o que mudou no Brasil após a publicação da lei federal 12.305/2010?** 30º Congresso ABES. 2019.

LEME, R. M.; SEABRA, J. E. A. Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. **Energy**, v. 119, p. 754-766, 2017.

MARI, A. G. et al. Performance of up-flow anaerobic digester in solids removal and biogas production. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 12, p. 1135-1139, 2014.

MARQUES; A. S. **Análise termoeconômica de um sistema de refrigeração automotivo por absorção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2005

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. Publindústria. Guimarães. 2006.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; DE SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **PROGRAMA NACIONAL METANO ZERO**. Disponível em:
[https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/ProgramaMetanoZero.p](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/ProgramaMetanoZero.pdf)
df. Acesso em: 27/04/2022.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MULU, E.; M'ARIMI, M. M.; RAMKAT, R. C. A review of recent developments in application of low cost natural materials in purification and upgrade of biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, 2021.

NETO, João Luiz de Medeiros. **Análise comparativa das metodologias de estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2018.

NOBERTO, Luis G. de M. **Análise de um sistema de refrigeração por absorção com mistura água-brometo de lítio**. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2018.

Observatório do Clima. **Na contramão do mundo, Brasil aumentou emissões em plena pandemia**. 2021. Disponível em:
<<https://www.oc.eco.br/na-contramao-do-mundo-brasil-aumentou-emissoes-em-plena-pandemia/>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

OLIVEIRA, J. da S.; GATTAMORTA, M. A. Avaliação de resíduos sólidos orgânicos em feiras livres na região metropolitana de São Paulo e potencialidade de geração de metano e energia elétrica- um estudo de caso. **INOVAE**, v. 9, p. 468-489, 2021.

PETERSSON, A., WELLINGER, A. **Biogas upgrading technologies - developments and innovations**. IEA Bioenergy, 2009.

PICCIAFUOCO, B. D. F. **Avaliação dos resíduos sólidos gerados no restaurante universitário da UNESP de Rio Claro: uma análise do potencial de compostagem**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental). UNESP. Rio Claro, 2013.

Produzione di biogas, rallenta la crescita in Europa. Truenumbers, 2018. Disponível em: <https://www.truenumbers.it/biogas-in-europa/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ROSA, A. P. et al. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. **Renewable Energy**, v. 124, p. 21-26, 2018.

RYCKEBOSCH, E., DROUILLON, M., VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, n. 35, p. 1633-1645, 2011.

SILVA, A. C. Guedes; TREVISAN, G. de Meneses. Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, nº 2, 2019.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. Editora Mc Graw Hill. São Paulo. 1985.

TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. **Biogas: fundamentals, process and operation**. Springer. Gewerbestrasse. 2018.

Tipos de biodigestor: entenda o funcionamento e qual o melhor para você. EMAS Jr. Consultoria, 2021. Disponível em:

<https://emasjr.com.br/blog/entenda-os-tipos-de-biodigestor-e-qual-e-o-mais-adequado-para-voce/>. Acesso em: 13/01/2023.

UFPB reabrirá restaurantes universitários de João Pessoa e Areia, e reitor anuncia subsídio de 50% para estudantes. UFPB, 2023. Disponível em: <https://www.ufpb.br/ufpb/contents/noticias/ufpb-reabrira-restaurantes-universitarios-de-joao-pessoa-e-areia-e-reitor-anuncia-subsidio-de-50-para-estudantes>. Acesso em: 15/08/2023.

VOGELI, Y.; LOHRI, C. R.; GALLARDO, A.; DIENER, S.; ZURBRUGG, C. **Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Informations and Case Studies.** Dubendorf: Eawag, 2014.

WELLINGER, A.; MURPHY, J., BAXTER, D. **The biogas handbook: Science, production and applications.** Woodhead Publishing, 2013.

YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 40, p. 1133-1152, 2014.

O que é cogeração. Energês. Disponível em: <https://energes.com.br/o-que-e-cogeracao/>. Acesso em: 12/02/2023.