

TONY CORRÊA SILVA

**PROJETO DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS
PROVENIENTE DE BIODIGESTOR DE REJEITOS
BOVINOS E AGRÍCOLAS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

TONY CORRÊA SILVA

**PROJETO DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE
BIODIGESTOR DE REJEITOS BOVINOS E AGRÍCOLAS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho.

UBERLÂNDIA – MG

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2024	<p>Silva, Tony Corrêa, 1994- Projeto de aproveitamento do biogás proveniente de biodigestor de rejeitos bovinos e agrícolas para geração de energia [recurso eletrônico] / Tony Corrêa Silva. - 2024.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.156 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação Mestrado Acadêmico, nº 642, PPGEM				
Data:	26/01/2024	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:40
Matrícula do Discente:	12122EMC015				
Nome do Discente:	Tony Corrêa Silva				
Título do Trabalho:	Projeto de aproveitamento de biogás proveniente de biogestor de rejeitos bovinos e agrícolas para geração de energia.				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: João Marcelo Vedovotto - FEMEC/UFU; Elisan dos Santos Magalhães - ITA; e Solidônio Rodrigues de Carvalho, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/01/2024, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elisan dos Santos Magalhaes, Usuário Externo**, em 27/01/2024, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/01/2024, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5126766** e o código CRC **AC2487D5**.

SILVA, T. C. **Projeto de Aproveitamento de Biogás Proveniente de Biodigestor de Rejeitos Bovinos e Agrícolas para Geração de Energia**. 2024. 80 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

A intensificação da produção de leite na indústria agropecuária possui forte influência na economia brasileira. O que resulta em maiores quantidades de dejetos animais, que sem um tratamento prévio, escoam ou são jogados em lavouras, atingindo águas subterrâneas, causando problemas de contaminação. O sistema de biodigestores é uma solução viável para esta problemática. Neste cenário, o presente trabalho teve como objetivo conceber um método de aproveitamento do biogás proveniente de um biodigestor para geração de energia elétrica, e desenvolver uma modelagem termodinâmica do biogás. Os experimentos foram realizados na Fazenda Pirapitinga situada no município de Presidente Olegário - MG – Brasil, onde foi coletada uma amostra do biogás, que posteriormente foi analisada no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A partir da cromatografia química do biogás obteve-se a sua composição, a saber: 62,86% (v/v) de metano; 24,10% (v/v) de dióxido de carbono, 10,04% (v/v) de nitrogênio, 2,99%(v/v) de oxigênio. A vazão do biogás de 7,2 litros por segundo foi medida com um anemômetro digital. A partir desses dados foi desenvolvido uma modelagem termodinâmica, que consistiu em um algoritmo considerando o processo politrópico para a simulação de um motor Otto de 3 cilindros, com capacidade de produzir 35 kW de potência elétrica. A partir dos dados calculados, foi dimensionado um sistema motogerador para a fazenda, correspondente ao motor de fabricação nacional MWM modelo N229-3. O alto custo do motor (estimado em R\$100.000,00) e o tempo de *payback* (5 anos) foram alguns dos fatores que desmotivaram os produtores da Fazenda Pirapitinga a investir no aproveitamento energético do biogás.

Palavras chave: biogás, biodigestores rurais, geração de energia.

SILVA, T. C. **Project to use biogas from bovine and agricultural waste biodigester for energy generation.** 2024. 80 p. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Abstract

The intensification of milk production in the agricultural industry has a strong influence on the Brazilian economy, resulting in larger quantities of animal waste. Without prior treatment, these wastes runoff or are thrown onto crops, reaching groundwater, causing contamination problems. The biodigester system is a viable solution to this issue. In this scenario, the present study aimed to devise a method for harnessing biogas from a biodigester for the generation of electrical energy and to develop a thermodynamic modeling of biogas. The experiments were conducted at Pirapitinga Farm located in the municipality of Presidente Olegário - MG - Brazil, where a sample of biogas was collected and later analyzed at the Heat and Mass Transfer Laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering at the Federal University of Uberlândia. The chromatographic analysis of the biogas unveiled its chemical composition: 62.86% (v/v) methane; 24.10% (v/v) carbon dioxide, 10.04% (v/v) nitrogen, 2.99% (v/v) oxygen. The biogas flow rate of 7.2 liters per second was measured using a digital anemometer. From this data, a thermodynamic modeling was developed, which consisted of an algorithm considering the polytropic process to simulate a 3-cylinder Otto engine, capable of producing 35 kW of electrical power. Using the calculated data, a motor-generator system was sized for the farm, corresponding to the domestically manufactured MWM model N229-3 engine. The high cost of the engine (estimated at R\$100,000.00) and the payback period (5 years) were some of the factors that discouraged the producers at Pirapitinga Farm from investing in the energy utilization of biogas.

Keywords: biogas, agricultural biodigester, energy generation.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, amigos, familiares e todos que de alguma forma me ajudaram, aconselharam e incentivaram nas horas difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho pela oportunidade e apoio e paciência comigo durante a elaboração deste trabalho.

Ao pessoal da Fazenda Pirapitinga, por conceder espaço para desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelos conhecimentos compartilhados.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) pela oportunidade de realizar o Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica.

À FAPEMIG pelo suporte financeiro durante parte da realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0 – Localização da Fazenda Pirapitinga.....	12
Figura 2.0 – Composição do Biogás.....	19
Figura 2.1 – Biodigestor de produção contínua.....	26
Figura 2.2 – Biodigestor modelo Indiano.....	27
Figura 2.3 – Biodigestor modelo Chinês	27
Figura 2.4 – Biodigestor modelo Canadense.....	28
Figura 2.5 – Biodigestor modelo Alemão.....	30
Figura 2.6 – Geração de energia elétrica e calor através de biodigestor.....	31
Figura 2.7 – Diagrama Pressão x volume específico de um ciclo Otto ideal.....	32
Figura 2.8 - Ciclo Otto com ignição por centelha operando com misturar ar-combustível.....	32
Figura 2.9 – Eficiência térmica do ciclo Otto ideal em função da taxa de compressão e razão dos calores específicos ($k = 1,4$).....	33
Figura 2.10 – Motor ciclo Otto alimentado por biogás.....	34
Figura 2.11 – Esquema e diagrama P-V para um processo politrópico.....	36
Figura 2.12 – Motogeradores MWM.....	36
Figura 2.13 – Motogerador Jembacher Tipo 2.....	37
Figura 3.1 – Cromatógrafo a gás modelo Shimadzu CG-2014.....	39
Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um cromatógrafo a gás.....	40
Figura 3.3 – Microseringas utilizadas para coleta e injeção de amostras gasosas.....	41
Figura 3.4 – Bags de coleta modelo Tedlar de 1 L.....	42
Figura 3.5 – Esquema das colunas tubulares abertas utilizadas em cromatografia gasosa....	43
Figura 3.6 – Esquema de um TCD.....	44
Figura 3.7 – Circuito de Ponte de Wheatstone.....	44
Figura 3.8 – Esquema DIC.....	46
Figura 3.9 – Parâmetros de avaliação da resolução em cromatografia.....	50
Figura 3.10 – Representação da variação da temperatura do forno.....	51
Figura 3.11 – Representação da taxa de pressão.....	53
Figura 3.12 – Principais grupos motogeradores MWM.....	54
Figura 3.13 – Ficha técnica dos motores MWM modelo 229.....	54

Figura 3.14 – Medições e aparelhos utilizados para cálculo de vazão no queimador do biodigestor da Fazenda Pirapitinga.....	56
Figura 4.1 – Composição química do biogás da Fazenda Pirapitinga reconhecida.....	57
Figura 4.2 – Imagens das medições de velocidades e temperatura realizadas pelo anemômetro.....	58
Figura 4.3 – Fluxograma de funcionamento e tomadas de decisões de acordo com os resultados do software.....	60
Figura 4.4 – Gráfico P-v (Pressão – volume específico)	61
Figura 4.5 – Gráfico T-s (Temperatura – entropia)	61
Figura 4.6 – Gráfico com resultados obtidos pelo algoritmo através da variação da temperatura de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	61
Figura 4.7 – Gráfico com resultados de potência elétrica produzida obtido pelo algoritmo através da variação da temperatura de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	66
Figura 4.8 – Gráfico com resultados de vazão mínima exigida obtidos pelo algoritmo através da variação da temperatura de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	66
Figura 4.9 – Gráfico com resultados de vazão de combustível obtido pelo algoritmo através da variação da pressão de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	67
Figura 4.10 – Gráfico com resultados de potência elétrica obtidos pelo algoritmo através da variação da pressão de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	67
Figura 4.11 – Fogões adaptados para o uso do biogás da Fazenda Pirapitinga.....	68
Figura 4.12 – Chama dos fogões adaptados para o uso do biogás.....	68
Figura 4.13 – Torrador de soja adaptados para o uso do biogás.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo de 1 m ³ de biogás com outros combustíveis.....	22
Tabela 2.2 – Quantidade de material (massa) necessário para produção de 1 m ³ de biogás.....	22
Tabela 2.3 – Características dos principais combustíveis utilizados em motores de combustão interna.....	31
Tabela 3.1 – Valores de condutividade térmica e viscosidade de gases utilizados como fase móvel em cromatografia gasosa a 100 °C.....	45
Tabela 3.2 – Temperatura de ebulição das substâncias em análise.....	52
Tabela 4.1 – Resultados da análise cromatográfica do biogás da fazenda Pirapitinga.....	58
Tabela 4.2 – Tabela com valores de entrada do sistema motogerador e do biogás.....	59
Tabela 4.3 – Tabela com as principais propriedades termodinâmicas nos pontos de 1 ao 4.....	60
Tabela 4.4 – Resultados obtidos pelos cálculos do algoritmo com valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	64
Tabela 4.5 – Resultados obtidos pelos cálculos do algoritmo com todos os valores termodinâmicos associados do motor de 4 cilindros.....	65
Tabela 4.6 – Tabela paramétrica com resultados obtidos pelo algoritmo através da variação da constante politrópica considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.....	65

SUMÁRIO

PROJETO DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE BIODIGESTOR DE REJEITOS BOVINOS E AGRÍCOLAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	i
Resumo	3
Abstract	4
Agradecimentos	5
Lista de figuras	6
Lista de tabelas	8
CAPÍTULO I	10
INTRODUÇÃO	10
1.1. Contextualização	10
1.2. Objetivos	11
1.3. Justificativa	12
1.4. Estrutura da dissertação	13
CAPÍTULO II	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. O Biogás.....	16
2.2. Biodigestores.....	24
2.3. Motores de combustão e geração de energia aplicada a biodigestores.....	30
CAPÍTULO III	38
PROCEDIMENTOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS	38
3.1 Análise química do biogás.....	38
3.2 Desenvolvimento de modelagem e código computacional.....	53
3.3 Método para aferição de vazão	56
CAPÍTULO VI	57
RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 Resultados da análise química do biogás.....	57
4.2 Resultados de vazão volumétrica do biogás.....	58
4.3 Resultados do algoritmo desenvolvido.....	59
CAPÍTULO V	71
CONCLUSÕES	71
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
CAPÍTULO VI	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

No Brasil, a indústria agropecuária apresenta forte influência na economia, a produção de leite destaca-se como uma das principais atividades agropecuárias. A intensificação deste sistema de produção resulta em grandes concentrações de dejetos animais. Geralmente, esses dejetos escoam ocorrendo a salinização do solo e a eutrofização dos rios, ou então, são aplicados nas lavouras sem tratamento prévio. Quando isto acontece, alguns destes nutrientes podem atingir as águas subterrâneas ou superficiais, acarretando problemas de contaminação. A contaminação das águas com os efluentes de concentração de dejetos animais, resulta em aumento da população de bactérias, que reduzem a qualidade da água. A técnica da biodigestão anaeróbia promove o tratamento dos efluentes, resultando na produção do biogás e do biofertilizante. O biogás apresenta em maioria de sua composição o gás metano, que deve ser queimado e pode ser utilizado como fonte de energia. O uso do biodigestor rural é uma alternativa viável de utilização racional dos resíduos orgânicos. Além disso, esse mercado apresenta um grande potencial de aprimoramento. As pesquisas para utilização das fontes renováveis de energia estão crescendo muito, buscando soluções para os problemas gerados pelo “mundo moderno”. Entre estes problemas, a crise energética traz preocupações para muitas pessoas, principalmente nas áreas rurais, devido a demanda energética crescente. A biomassa teve grande destaque nos últimos anos, principalmente por reaproveitar matéria orgânica disponível na natureza ou produzida em locais específicos. Com intuito de desenvolver fontes renováveis de energia, o biogás vem sendo utilizado em diversas aplicações, por exemplo, como combustível para geração de energia.

Os biodigestores desempenham um papel significativo no contexto das energias renováveis por várias razões. Para a produção do biogás: os biodigestores convertem

resíduos orgânicos, como esterco animal, resíduos agrícolas, resíduos de alimentos e biomassa, em biogás por meio do processo de digestão anaeróbica. O biogás é uma fonte de energia renovável composta principalmente por gás metano, que pode ser usado para produção de eletricidade, aquecimento e até como combustível veicular. Também pode ser utilizado para redução de resíduos: Os biodigestores ajudam a lidar com o problema dos resíduos orgânicos, reduzindo a quantidade de resíduos que acabam em aterros sanitários ou são descartados de forma inadequada, o que pode resultar em emissões de gases de efeito estufa e poluição do solo e da água. Como uma fonte de energia descentralizada: Os biodigestores podem ser implementados em uma variedade de escalas, desde pequenas unidades em propriedades rurais até grandes instalações em áreas urbanas ou industriais. Isso permite que as comunidades gerem sua própria energia de forma descentralizada e reduzam a dependência de fontes de energia convencionais. Também pode ser utilizada para benefícios ambientais: Além de produzir energia renovável, os biodigestores também produzem biofertilizantes ricos em nutrientes que podem ser usados como adubo orgânico, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e contribuindo para a saúde do solo e a produtividade agrícola. Para redução de emissões de gases: A utilização de biogás produzido por biodigestores reduz a necessidade de combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, que são fontes significativas de emissões de gases de efeito estufa. Portanto, os biodigestores ajudam a mitigar as mudanças climáticas ao reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa.

Em resumo, os biodigestores desempenham um papel importante na transição para um sistema energético mais sustentável, fornecendo uma fonte de energia renovável, reduzindo resíduos orgânicos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver um projeto de aproveitamento do biogás proveniente de um biodigestor para geração de energia. A finalidade prática para esse estudo se dá pela necessidade de se compreender melhor a aplicação do biogás, proveniente de biodigestores rurais, como combustível nos possíveis ciclos de potência, analisando sua viabilidade técnica e econômica no âmbito da geração de energia. Ademais, objetivou-se também investigar aspectos químicos do gás, que definem as características principais do gás de síntese produzido, como a composição e a relevância de cada componente.

Para executar tal proposição, estabeleceu-se os seguintes **objetivos específicos**:

- Conceber um método de aproveitamento do biogás de biodigestores proveniente de bovinos para geração de energia;
- Avaliar a influência dos compostos químicos contidos no biogás;
- Descrever sobre a composição do biogás de estudo aspectos teóricos e bibliográficos em relação as suas aplicações;
- Propor aplicação do biogás nos possíveis ciclos de potência;
- Analisar a viabilidade econômica da aplicação do biogás em cenários de interesse ao projeto em que se insere o presente trabalho;

Todos os objetivos foram determinados considerando-se as limitações e propósitos de uma planta de biogás rural, localizada no município de Presidente Olegário-MG, na Fazenda Pirapitinga, a aproximadamente 3,0 km da cidade de Presidente Olegário-MG:



Figura 1.0 – Localização da Fazenda Pirapitinga (Google Maps).

1.3. Justificativa

Algumas propriedades rurais criadoras de aves, bovinos, suínos e outros, utilizam parte dos dejetos desses animais para a adubação de plantações, porém esta adubação é feita pela mera aspersão do material orgânico sobre as plantas, ou por sepultamento na área a ser semeada posteriormente. Esses procedimentos apresentam grande potencial poluidor, uma vez que a aspersão a céu aberto atrai insetos, além disso, os detritos colocados dentro da terra são mais facilmente transportados para os lençóis freáticos pela ação da infiltração das chuvas. Alguns critérios devem ser adotados para a sua utilização como fertilizante, evitando que sejam aplicados em excesso no solo e cause poluição, grande maioria das propriedades

deposita seus resíduos no meio-ambiente como em rios, ribeirões, açudes ou no meio de matas (MOURA, 2012).

A partir de uma consulta realizada junto aos produtores rurais, verificou-se que estes consideram a falta de informação a principal dificuldade encontrada para construir biodigestores em suas propriedades. E biodigestores são ferramentas adequadas para diminuir a poluição por dejetos e agregar valor às propriedades rurais. Ainda de acordo com essa consulta, os produtores alegam que não há e uma troca significativa de informações entre eles e as associações, órgãos oficiais de preservação do meio ambiente e as universidades sobre o assunto. A possibilidade de geração de energia elétrica por meio do reaproveitamento do biogás proveniente de dejetos animais através de biodigestores é de extrema relevância na busca por energias renováveis. Nesse sentido esse trabalho pode ser de valia para estes produtores no sentido de identificar e discutir as lacunas na literatura quanto a utilização de biodigestores de dejetos bovinos.

Além da geração de energia elétrica renovável através do biogás, o desenvolvimento da presente linha de pesquisa pode levar a vários outros impactos positivos ao meio ambiente, por exemplo:

- Redução de dejetos animais em lençóis freáticos;
- Redução da poluição do ar (A queima do biogás faz com que ele seja 21 vezes menos poluente);
- Fornecer uma energia de qualidade às propriedades rurais (se possível autossuficiente), pois ainda há muita queda de energia elétrica nestes locais;
- Produtores de leite no cenário atual, ainda precisam de um gerador de energia a base de combustíveis fósseis devido à má qualidade da entrega de energia elétrica pela concessionária nestes locais;
- Produzir energia renovável e “limpa”.

Resumindo, é uma forma de geração de energia elétrica, produção de um fertilizante orgânico de qualidade sem agressões ao meio ambiente.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta dissertação foi estruturada em seis capítulos.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, abordando inicialmente uma problematização do biogás relacionado a produtores de leite no Brasil. Uma descrição do biogás, contexto histórico, propriedades, formação e aplicação em biodigestores. Também são brevemente descritos os principais tipos de biodigestores. Em seguida foi

revisado tópicos sobre geração de energia aplicada a biodigestores, revisando tópicos que influenciam no dimensionamento de um motor de combustão interna movido a biogás, e também os principais tipos de motogeradores movidos a biogás nacionais e importados.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos teóricos e experimentais executados neste trabalho, e é apresentado o método de cromatografia gasosa, utilizado para análise química do biogás. Em seguida apresenta os cálculos termodinâmicos e simulação do gás de síntese em ciclos de potência a gás para geração de energia.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados dos procedimentos e uma discussão referente à metodologia. Este capítulo apresenta os resultados da análise química experimental sobre o biogás, os resultados de aferição de vazão do biogás da fazenda, os resultados dos cálculos termodinâmicos e simulações realizadas para aplicação do biogás para geração de energia elétrica.

No quinto capítulo, foi descrito as conclusões finais e considerações relevantes sobre a viabilidade econômica do projeto. Também foram listadas sugestões para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa.

Por fim, no capítulo seis, as referências bibliográficas utilizadas ao longo deste trabalho.

CAPÍTULO II

Diante do exposto, este trabalho apresenta no Capítulo II uma Revisão Bibliográfica envolvendo os principais problemas decorrentes da falta de um biodigestor em fazendas, um resumo do contexto histórico do biogás desde suas primeiras aplicações, a composição química do biogás, um comparativo energético entre o biogás de bovinos e de outros animais. Este capítulo também apresenta os principais sistemas motogeradores movidos a biogás.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A produção de leite no Brasil destaca-se como uma das principais atividades agropecuárias, em razão de sua capacidade de geração de emprego e renda, e conexão com outros setores agroindustriais (FERREIRA et al., 2008). Essa a intensificação dos sistemas de produção animal resulta em grandes concentrações de resíduos, e conseqüentemente a contaminação do ar, dos solos, das águas e também na proliferação de doenças (BIAGIOLI, 2013). Quando mal manejados, esses resíduos são fontes de contaminação ambiental e causam risco à saúde pública, através de seu descarte de forma inadequada, principalmente na criação animal em confinamentos (SILVA et al., 2012a).

Segundo o Ministério de Ciência e Tecnologia (2010), o setor de agropecuário é o maior responsável pelas emissões de CH₄ (gás metano), representando 71% das emissões desse gás. A utilização de biomassa como fonte renovável e sustentável de energia, seja com efluentes industriais ou resíduos rurais, permite diversificar a matriz energética do Brasil, além de reduzir a emissão de gases de efeito estufa (PECORA, 2006). Em 2012, o Governo Federal implementou o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Este Plano é importante no compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), assumido pelo Brasil na 15^a Conferência das Partes – COP15 ocorrida em Copenhague, em 2009. O Plano ABC é composto por sete programas, o sexto programa diz respeito ao “Incentivo do uso de Tratamento de Dejetos Animais para Geração de Biogás e de Composto Orgânico” (MATOS, 2016).

Dentre os resíduos originados da pecuária, destaca-se o esterco animal. Geralmente, esses resíduos são aplicados na lavoura sem o tratamento prévio, contaminando o lençol freático, causando a eutrofização de rios, dentre outros. Dentre as soluções, a FAO (Food and Agriculture Organization) recomenda o uso do biodigestor como uma alternativa viável, racional e prática de utilização desses resíduos orgânicos (RIBEIRO, 2011). Esses são

compostos por câmaras de fermentação anaeróbica, onde ocorre o processo de biodigestão anaeróbica. Esse processo apresenta-se como uma excelente alternativa para o tratamento e a reciclagem energética dos nutrientes presentes nos dejetos animais, reduzindo o potencial poluidor e os riscos sanitários, além de promover a geração do biogás e do biofertilizante (RODRIGUES et al., 2014).

A produção de biogás em propriedades rurais associa-se a fatores como preservação do meio ambiente, uso para calefação e iluminação da própria propriedade (DEGANUTTI et al., 2002), e ao uso de combustível em substituição ao gás natural e ao gás liquefeito de petróleo (ESPERANCINI et al., 2007). Assim, o uso dos biodigestores proporciona o retorno ao sistema produtivo de parte da energia que seria “perdida”, por meio do biogás (ORRICO et al., 2007, SANTOS et al., 2007). Simultaneamente à obtenção do biogás, os materiais orgânicos submetidos ao processo de digestão anaeróbia por meio de biodigestor produzem um adubo orgânico, o biofertilizante, que pode ser utilizado na agricultura como fonte de nutrientes para a diversas culturas (BOCOLI et al., 2016). A elevada eficiência do biofertilizante quando comparado aos fertilizantes minerais se dá pelo fato do material já se encontrar em avançado grau de “decomposição”, facilitando a solubilização de alguns nutrientes para as plantas (ARRUDA et al., 2002). Porém, o mais importante é a estabilização do material orgânico através do processo de biodigestão, proporcionando a adição de matéria orgânica no solo, na forma de húmus, importante para as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MATOS, 2016).

2.1. O Biogás

Biogás é o nome dado à mistura de gases produzidos pela biodigestão de materiais orgânicos. Trata-se de uma mistura gasosa resultante da fermentação da biomassa no processo do tratamento anaeróbio, ou seja, pela ação de bactérias na ausência de oxigênio. O biogás é formado naturalmente em pântanos, lagos e rios, como uma fase no ciclo do carbono em nosso planeta. Outra forma de obtê-lo é nos biodigestores, onde se opera a decomposição de resíduos orgânicos, restos de plantas, lixo urbano, dejetos de animais entre outros (WALKER, 2009).

Estudos indicam que, 90% do CH₄ emitido para a atmosfera deriva-se da decomposição de biomassa, sendo o restante de origem fóssil como, por exemplo, de processos petroquímicos (ALVES, 2000).

No meio rural, o aproveitamento de biomassa para fins energéticos pode ser um meio facilitador para a sustentabilidade de produção, em função de sua disponibilidade. Seu aproveitamento apresenta baixo custo de resíduos de produção, grande potencial de geração

de energia, diminuição do potencial poluidor dos resíduos e economia de recursos energéticos. Neste sentido, o Brasil apresenta grande potencial de aproveitamento do biogás, em função dos grandes criadouros de aves, suínos e bovinos (SANTOS, 2016).

2.1.1. A História do Biogás

A história dos biodigestores começou no século XVII, com o pesquisador pioneiro Jan Batista Helmont. Ele observou que à medida que a matéria orgânica diminuía, os gases inflamáveis eram produzidos. Essa correlação entre o decaimento da matéria orgânica e a produção de gases inflamáveis é exatamente o princípio de uma digestão anaeróbia (LIMA, 2021).

Em 1776, o físico italiano Alessandro Volta, inspirado nos estudos e trabalhos sobre gases inflamáveis do pesquisador americano Benjamin Franklin, descobriu o gás metano. A partir da decomposição de restos vegetais em ambientes confinados, essa descoberta foi no lago Maggiore localizado entre a Itália e a Suíça. Por volta de um ano depois, o próprio Alessandro Volta conseguiu isolar o gás metano. Volta também demonstrou que esse gás poderia entrar em combustão com uma faísca elétrica (GASPAR, 2003).

Em 1808 o Sr. Humphry Davy determinou a presença do metano nos gases produzidos a partir da digestão anaeróbia de resíduos das criações de gado. Aproximadamente 50 anos depois, por volta de 1860, a primeira planta de digestão anaeróbia foi construída em Bombay na Índia. No final do século XIX a digestão anaeróbia já era utilizada na Inglaterra para produção de energia em lâmpadas de rua a partir do tratamento de esgoto. Devidas às facilidades de operação das plantas de digestão anaeróbia, sua aplicação se tornou popular por toda Europa logo no início dos anos de 1915. Durante a segunda guerra mundial, a digestão anaeróbia foi ainda mais aplicada e útil. Durante as guerras, o fornecimento de energia era comprometido. Visando suprir esse abastecimento de energia elétrica de alguns pontos da Europa, a digestão anaeróbia, ou seja, os biodigestores foram mais uma vez utilizados e aplicados. Somente a partir de 1960, a digestão anaeróbia passou a ser pesquisada e avançar ainda mais rápida com caráter mais científico (LIMA, 2021).

O primeiro relato da coleta de biogás proveniente de um processo de biodigestão anaeróbia é de 1895, na Inglaterra, em uma estação de tratamento de efluentes municipais. Porém somente em 1941, na Índia, apareceu o primeiro estudo de aproveitamento de biogás gerado através de estrume e outros materiais em uma pequena planta. Esse foi o início do desenvolvimento do processo de biodigestão anaeróbia para tratamento de resíduos industriais, agrícolas e municipais (ROSS e DRAKE, 1996).

Houve grande progresso quanto à compreensão dos fundamentos do processo e do desenvolvimento de equipamentos auxiliares visando maximizar o processo. Por volta de 1970 com o avanço da tecnologia, as plantas de digestão anaeróbia estavam cada vez mais desenvolvidas na Europa. Na América Latina começavam as primeiras instalações. Ainda nessa década de 1970, foram instaladas as primeiras plantas de digestão anaeróbia no Brasil. Por volta de 1982, o governo federal começou com alguns incentivos, como a Criação do Programa Mobilização Energética (PME). Em suma, o PME possui incentivos para o desenvolvimento do biogás como alternativa para produção de energia (LIMA, 2021).

A utilização do biogás, como fonte de energia motivou a China a adotar a tecnologia a partir de 1958, onde, até 1972, já haviam sido instalados 7,2 milhões de biodigestores na região do Rio Amarelo. Tal localização não é acidental, pois as condições climáticas da região a tornam propícias para a produção de biogás. A partir da crise energética deflagrada em 1973, a utilização de biodigestores passou a ser uma opção adotada tanto por países ricos como países de Terceiro Mundo. Em nenhum deles, contudo, o uso dessa tecnologia alternativa foi ou é tão acentuado como na China e Índia. O interesse da China pelo uso de biodigestores deveu-se, originalmente, a questões militares. Preocupada com a Guerra Fria, a China temeu que um ataque nuclear impediria toda e qualquer atividade econômica (principalmente industrial). Entretanto, com a pulverização de pequenas unidades biodigestoras ao longo do país, algumas poderiam escapar ao ataque inimigo (GASPAR, 2003). Há pelo menos meio século, para os chineses, a implantação de biodigestores transformou-se em questão vital, incrustada em lógicas de política internacional. Um país continental, com excesso de população, a China buscou, durante os anos 50 e 60, no auge da Guerra Fria, por uma alternativa de descentralização energética. Baseavam-se em uma lógica simples. No caso de uma guerra que poderia significar a destruição quase total da civilização como a conhecemos, o ataque às centrais energéticas, como poderosas usinas hidroelétricas, representaria o fim de toda atividade econômica. Isso porque a energia deixaria de ser disponível nos grandes centros, mas naqueles pequenos centros, as pequenas unidades de biodigestão conseguiriam passar incólumes ao poder inimigo. A descentralização, portanto, implica em criar unidades suficientes nas pequenas vilas, vilarejos e regiões mais longínquas. Desnecessário dizer a razão pela qual os biodigestores fizeram parte da estratégia. (BARRERA, 1993). Hoje em dia, contudo, o motivo da manutenção e expansão do programa de biodigestores é bem mais simples e urgente. Como a China possui milhões de pessoas para alimentar, não é possível ou recomendável mecanizar a atividade agrícola em larga escala, pois o uso de tratores e demais implementos resultaria em um índice de desemprego rural alarmante, criando uma massa de trabalhadores ociosos. Assim, o governo chinês optou pelo aproveitamento e aperfeiçoamento de rudimentares técnicas de cultivo do

solo, com os biodigestores desempenhando papel de destaque (GASPAR, 2003). Já a Índia não pensava em guerras nucleares pois sempre fez parte do grupo dos países conhecidos como "não alinhados". A fome e a falta de combustíveis fósseis é que motivaram o desenvolvimento da tecnologia dos biodigestores (BARRERA, 1993). A Índia ao contrário da China, não é autossuficiente em petróleo, vendo-se obrigada a buscar soluções para alimentar as imensas populações marginalizadas pelo sistema de castas ainda não erradicado daquele país. Encontram-se aí dois extremos da utilização de biodigestores. Chineses buscam, nessa tecnologia, o biofertilizante necessário para produção dos alimentos necessários ao seu excedente de população. A energia do biogás não conta muito frente à autossuficiência em petróleo. Indianos, por seu turno, precisam dos biodigestores para cobrir o imenso déficit de energia. Com isso, foram desenvolvidos dois modelos diferentes de biodigestor: o modelo chinês, mais simples e econômico e o modelo indiano, mais sofisticado e técnico, para aproveitar melhor a produção de biogás (GASPAR, 2003).

Nos tópicos a seguir será descrito as principais propriedades e diferenças entre os tipos de biodigestores.

2.1.2. Propriedades do Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível gerada pela fermentação da matéria orgânica. A proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros, como o tipo de biodigestor e o substrato a digerir. No geral, o biogás é constituído principalmente por cerca de 60 a 70% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono e outros gases como nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e gás sulfídrico (SANTANA et al., 2012).

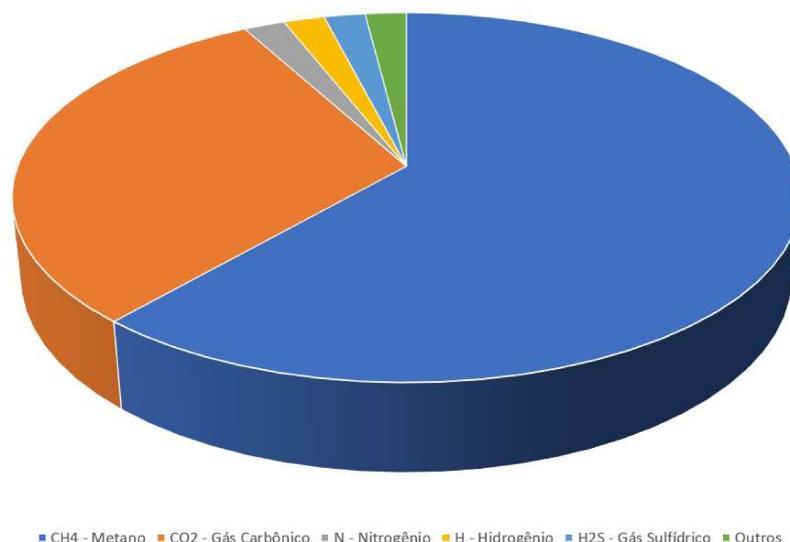


Figura 2.0 – Composição do Biogás (Adaptado de SGANZERLA, 1983)

O biogás é inflamável, resultante da fermentação anaeróbica de dejetos animais, de resíduos vegetais e de lixo industrial ou residencial em condições adequadas de umidade. O biogás é composto basicamente de dois gases: o metano que representa 60-80 % da mistura e o gás carbônico que representa os 40-20 % restantes. Outros gases participam da composição em proporções menores, destacando-se o gás sulfídrico que pode chegar a 1,5 %. A pureza do biogás é avaliada pela presença de metano. Quanto maior o percentual de metano mais puro será o gás. (MASSOTTI, 2009)

O biogás tem efeitos asfixiantes quando em concentrações elevadas. Quando a concentração do oxigênio estiver abaixo de 17 %, a respiração torna-se difícil, sendo que abaixo de 13 % atinge limites asfixiantes (WALKER, 2009). O Biogás é um gás inflamável produzido por microrganismos quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em um ambiente impermeável ao ar. O metano, principal componente do biogás, não tem cheiro, cor ou sabor, mas os outros gases presentes conferem-lhe um ligeiro odor de alho ou de ovo podre (BARRERA, 1993).

Sua formação ocorre de forma espontânea em alguns ambientes na natureza, onde as concentrações de oxigênio são baixas, como pântanos e lamas escuras, porém sua produção também é possível a partir da fermentação de diversos resíduos orgânicos como esterco animal, resíduos agrícolas, lixo urbano, efluentes industriais, entre outros. Podemos então aproveitar essa mistura gasosa como combustível realizando a digestão anaeróbia em biodigestores. Este processo é influenciado por alguns parâmetros, os mais importantes para a produção mais eficiente do biogás, estão descritos abaixo:

Composição da matéria: Quanto maior a porcentagem de material orgânico presente no resíduo, maior é o potencial de geração de metano. Para a formação de biogás é necessário que exista uma relação entre 20:1 e 30:1, de carbono para nitrogênio. O excesso de nitrogênio pode levar a má produção de biogás, com formação de compostos nitrogenados como a amônia (NH_3).

Teor de água: O teor de água deve estar em torno de 90% do conteúdo total de biomassa, de acordo com a origem da mesma. A diluição deve estar em torno de 1:1 e 1:2 de água para substrato. O excesso de água pode atrapalhar a hidrólise, exigindo uma elevada carga de biomassa, e a falta d'água pode causar o entupimento da tubulação de carga do biodigestor.

Potencial hidrogeniônico (pH): As bactérias envolvidas no processo são afetadas por alterações do pH no interior do biodigestor. A média de valores está entre 6,0 e 8,0, tendo o

pH 7,0 como ponto ótimo. Esses valores são respeitados quando o processo acontece em condições normais.

Temperatura: As atividades enzimáticas das bactérias dependem da temperatura, e alterações bruscas causam desequilíbrio nas culturas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10°C a atividade é muito reduzida e acima de 65°C as enzimas são destruídas. Deve-se procurar sempre manter a temperatura de 35 a 45 °C, sendo esta, a faixa ótima de temperatura para a biodigestão. Para conter a variação da temperatura no interior do biodigestor, a maior parte do sistema se encontra enterrado no solo, pois a variação de temperatura ali é muito menor do que na atmosfera. A temperatura ideal, no entanto, dependerá do tipo de bactéria a ser utilizada, ou seja, se forem termofílicas, mesofílicas ou psicrófilicas, além das condições locais.

Tempo de retenção: O tempo de retenção pode variar de reação para reação, porém normalmente leva de 30 a 45 dias para a formação do biogás. Entretanto, em algumas situações, na primeira semana de retenção hidráulica, já é possível verificar a existência de biogás em menores proporções. Essa variação é mais fácil de ser observada em biodigestores do tipo contínuo.

Concentração de sólidos voláteis: Quanto maior a concentração de sólidos voláteis da biomassa, maior será a produção de biogás, já que são os que serão fermentados para produzir o biogás (ARRUDA, et al. 2002).

A produção de biogás a partir de resíduos animais varia conforme cada espécie de animal e de acordo com o método de armazenamento do esterco, anterior à sua introdução no biodigestor. Isso porque a biodegradabilidade dos sólidos voláteis, varia com a espécie animal, o período e o tipo de armazenamento dos resíduos (pré-fermentação), que posteriormente são convertidos em biogás. Os diferentes rendimentos na produção de biogás são função da composição química do substrato e da eficiência do biodigestor principalmente. Para aumentar a produção de biogás no inverno, deve-se incorporar à carga diária: urina animal, palha, melão ou sulfato de amônia, para aumentar o nível de nitrogênio que estimula as bactérias (WALKER, 2009).

A alta percentagem de metano cede ao biogás um alto poder calorífico, o qual varia de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico, e que, submetido a um alto índice de purificação, pode gerar um índice de até 12.000 kcal/m³ (GASPAR, 2003). A Tabela 2.1 apresenta a capacidade calorífica do biogás com outras fontes energéticas encontradas na natureza.

Tabela 2.1 – Comparativo de 1 m³ de biogás com outros combustíveis (Adaptado de BARRERA, 1993 e FUNDAÇÃO, 1982).

Combustível	Comparativo a 1 m³ de biogás
Gasolina	0,321 Litros
Querosene	0,342 Litros
Óleo Diesel	0,358 Litros
Álcool hidratado	0,790 Litros
Gás de cozinha (GLP)	0,396 kg
Lenha	1,450 kg
Eletricidade	1,428 kW

Apesar da pequena divergência entre os autores, provavelmente causadas por diferenças na produção do biogás, devido à utilização de diferentes tipos de biodigestores e também diferentes regiões do Brasil, fica claro a capacidade do biogás (GASPAR, 2003).

Outro dado importante é a capacidade de produção de biogás por massa de proveniente de cada espécie:

Tabela 2.2 – Quantidade de material (massa) necessário para produção de 1 m³ de biogás (Adaptado de BARRERA, 1993).

Material	Quantidade
Esterco fresco de bovinos	25 kg
Resíduos vegetais	25 kg
Lixo orgânico	20 kg
Esterco suíno	12 kg
Esterco de aves	5 kg

2.1.3. Formação do Biogás

Produto da ação digestiva das bactérias metanogênicas, o biogás é formado através da decomposição de matéria orgânica (biomassa) em condições anaeróbicas (GASPAR, 2003).

A decomposição anaeróbica desenvolve-se ao longo de três fases distintas:

Período de hidrólise: ocorre a liberação, pelas bactérias, no meio anaeróbico, de enzimas extracelulares, que causam a hidrólise das partículas orgânicas, transformando as moléculas em moléculas menores e solúveis ao meio.

Período de acidulação: como o próprio nome indica, nesta fase as bactérias produtoras de ácidos degradam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos orgânicos (como

ácido láctico e butílico), álcool, como o etanol, e gases, como amônia, hidrogênio e dióxido de carbono, entre outros.

Período de metanogênese: As bactérias metanogênicas agem sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em álcool e metanol.

Para a produção de biogás ser satisfatória devem ser atendidos os critérios essenciais de sustentação de vida dos microorganismos anaeróbios (bactérias), como a impermeabilidade do meio metagênico ao contato com o ar atmosférico, temperatura adequada quantidade suficiente de nutrientes orgânicos, ausência de substâncias tóxicas aos organismos anaeróbicos e teor de água adequado (SEIXAS, 1980).

As atividades biológicas dos microorganismos anaeróbicos, seu desenvolvimento, reprodução e metabolismo, prescindem da presença de oxigênio, o qual, dependendo do tempo de exposição dos microorganismos lhes é fatal. Sabe-se que a decomposição de biomassa em contato com o oxigênio produz dióxido de carbono (CO_2), enquanto que, na ausência de ar (e, portanto, oxigênio) é produzido o gás metano. Qualquer falha na vedação do biodigestor inibe, quando não inviabiliza, a produção de biogás (REIS, 1991).

Os nutrientes mais importantes para a vida dos microorganismos são o carbono, o nitrogênio e alguns sais orgânicos. A proporção de carbono em relação ao nitrogênio na biomassa com que se carrega o biodigestor deve ser mantida entre 20:1 e 30:1.

O nitrogênio se encontra em grande quantidade nos dejetos animais, ao passo que os polímeros presentes nos restos de culturas (palha ou forragem) são os principais fornecedores de carbono. Isto explica por que a produção de biogás não pode ser bem sucedida se apenas uma fonte de material orgânico for utilizada.

O teor de água deve normalmente situar-se em torno de 90% do peso do conteúdo total. O excesso ou a falta de água é igualmente prejudicial à produção de biogás. As características específicas das matérias-primas a serem fermentadas devem ditar o teor de água presente na mistura.

É simplesmente impossível impedir que determinados elementos prejudiciais aos microorganismos adentrem o biodigestor, dissolvidos na mistura da biomassa. Entretanto, certos elementos, como NaCl, Cu, Cr, NH_3 , K, Ca, Mg e Ni, não representam uma grande ameaça se suas concentrações estiverem muito diluídas. A presença destas substâncias pode ser evitada ou minimizada se for feito um estudo criterioso da alimentação dos animais, que contribuem para a formação da biomassa. Alguns tipos de ração podem conter altos teores de alguns desses elementos, e uma simples mudança na dieta dos animais pode ser a solução do problema. O exame da água a ser misturada com a matéria orgânica também é

uma medida apreciada para evitar que substâncias nocivas à vida dos microrganismos sejam adicionadas à biomassa, que abastece a câmara de digestão (GASPAR, 2003).

2.1.4. Vantagens do Biogás

O metano, principal componente do biogás, é um gás incolor, inodoro, altamente combustível. Sua combustão apresenta uma chama azul-lilás e, às vezes, com pequenas manchas vermelhas. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha (GASPAR, 2003).

Ainda na linha das vantagens, o biogás, pode ser usado na substituição do gás de cozinha e também alimentar lampiões a gás. Um motor destinado a acionar uma bomba d'água, um pequeno moinho ou uma descaroçadora de algodão pode funcionar perfeitamente à base de biogás. O mesmo pode ser feito com uma geladeira a gás, uma chocadeira, secadores de grãos, geradores de energia elétrica ou ventiladores destinados a refrescar o ambiente interno de granjas (WALKER, 2009). Além disso, em regiões onde a temperatura média se encontra estável (geralmente acima de 20 °C), não há necessidade de aquecer a água a ser adicionada aos dejetos. Em locais onde a temperatura cai bruscamente durante certos meses, o aquecimento pode ser feito com a energia produzida pelo próprio biogás (GASPAR, 2003).

Mais de cem milhões de chineses, com seus biodigestores "homemade", conseguem energia suficiente para suas necessidades domésticas e adubo para fertilizar suas plantações", além de manter o meio ambiente "livre de verminoses, esquistossomoses, hepatites e doenças entéricas" (GASPAR, 2003).

2.2. Biodigestores

Um biodigestor compõe-se, basicamente, de uma câmara fechada na qual uma biomassa é fermentada anaerobicamente, ou seja, sem a presença de ar. Como resultado desta fermentação ocorrem a liberação de biogás e a produção de biofertilizante. É possível, portanto, definir o biodigestor como um aparelho destinado a conter a biomassa e seu produto: o biogás. (GASPAR, 2003). O biodigestor, como toda grande ideia, é genial por sua simplicidade. Tal aparelho, contudo, não produz o biogás, sua função é fornecer as condições propícias para que um grupo especial de bactérias, as metanogênicas, degrade o material orgânico, com a conseqüente liberação do gás metano (BARRERA, 1993).

Define-se como biodigestor uma câmara hermeticamente fechada onde ocorre a biodigestão anaeróbica da matéria orgânica (NOGUEIRA, 1986). Este é um processo onde uma série de microrganismos, na ausência de oxigênio, atua na transformação da matéria orgânica, passando de moléculas mais complexas para aquelas com estruturas mais simples (CÔTE et al., 2006; SILVA et al., 2012b), que quando metabolizadas, resultam numa mistura de gases e numa série de compostos reduzidos (WALKER, 2009).

A partir da crise do petróleo da década de 70, a economia das nações dependentes dessa fonte energética vem sofrendo profundas modificações buscando sua substituição. No Brasil, estudos estão sendo realizados com o objetivo de adequar novas fontes substitutivas aos recursos não renováveis. Uma das opções estudadas para a produção de energia, a baixo custo, que vem apresentando resultados favoráveis é o biogás. Dessa forma, a partir do ano de 1976, os estudos relacionados ao seu aproveitamento foram intensificados (DEGANUTTI et al., 2002).

A utilização de biodigestores contribui para a integração das atividades agropecuárias, visto que o resíduo agrícola que com pouco ou nenhum valor comercial poderá ser reutilizado para outros fins. A partir daí, é proporcionado aumentos na produção agrícola e energética com a transformação dos produtos e agregação de valor (FERNANDES; TESTEZLAF, 2002). Além da produção de biogás, obtém-se como produto final do processo de biodigestão o biofertilizante, que pode ser utilizado como adubo orgânico na agricultura, além de reduzir também o gasto energético utilizado na produção de fertilizantes minerais. O Brasil destaca-se como o terceiro maior produtor de alimentos do mundo, e também é o quarto maior importador de fertilizantes. Os biofertilizantes podem ajudar sensivelmente a agricultura do país e representar uma importante fonte de renda para os empreendimentos de biodigestores (MATOS, 2016).

2.2.1. Tipos de Biodigestores

Existem centenas de projetos para construção de biodigestores. Todos, constituem, inevitavelmente, de duas partes: o tanque digestor (no qual se aloja a biomassa) e o gasômetro ou campânula (onde fica armazenado o biogás). Há dois tipos de sistema: o contínuo e o intermitente. O primeiro é o mais difundido e se adapta à maioria das biomassas, recebe cargas diárias ou periódicas e descarrega o biofertilizante automaticamente. O sistema intermitente, porém, é específico para biomassa de decomposição lenta e de longo período de produção. Recebe a carga total, retendo-a até terminar o processo de biodigestão quando então é esvaziado e recarregado novamente. O biodigestor é a estrutura física (câmara) onde se processa a degradação da matéria orgânica, acima do solo, em sua maioria acompanhada

de uma campânula acumuladora do gás desprendido da digestão da biomassa, o gasômetro. O biogás é basicamente o metano produzido no processo, e sua importância reside no fato de haver equivalência energética com outras fontes de energia. Cada biodigestor tem uma característica. Na produção intermitente, o biodigestor é totalmente fechado quando é inserida a biomassa, sendo reaberto somente após a produção de biogás. No modelo de produção contínua, não é necessária a abertura do biodigestor a cada ciclo. Na medida em que a biomassa é introduzida, o biofertilizante também é retirado (WALKER, 2009).

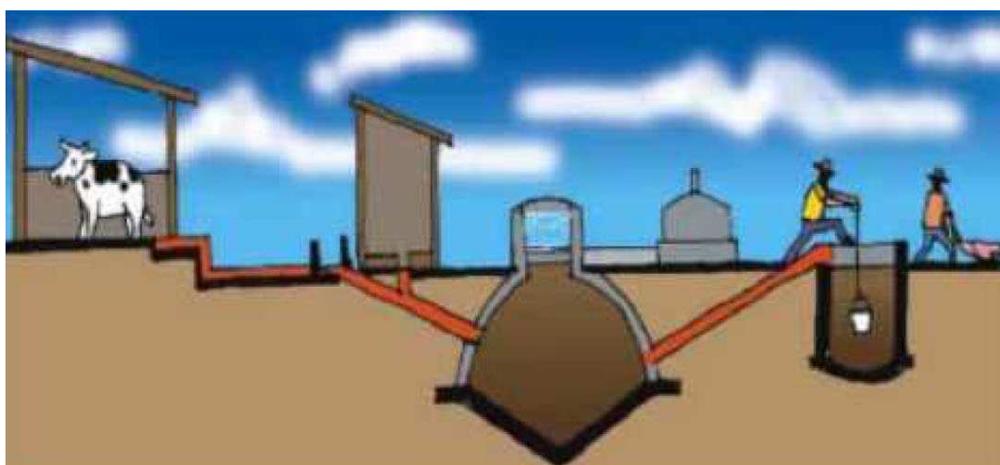


Figura 2.1 – Biodigestor de produção contínua (CASTANHO, 2008)

Os principais modelos de biodigestores utilizados no Brasil são os modelos contínuos, modelo Indiano, Chinês e Canadense, a saber:

Modelo Indiano: foi o primeiro utilizado em funcionamento regular, em Bombaim, na Índia, no início do século XIX (SGANZERLA, 1983). Este modelo possui uma campânula flutuante sobre o substrato em biodigestão ou em água. Este sistema faz com que a pressão seja mantida constante, já que o gasômetro se desloca à medida que o gás é produzido. Sua estrutura é composta de uma parede central que serve para dividir o tanque de fermentação em duas câmaras, para assim permitir que o material possa circular pelo interior da câmara de fermentação misturando o substrato e favorecendo o processo de biodigestão. O biodigestor Indiano tem a vantagem de ser de fácil construção, porém o gasômetro de metal pode encarecer o custo final e inviabilizar o projeto de instalação do mesmo (DEGANUTTI et al., 2002).

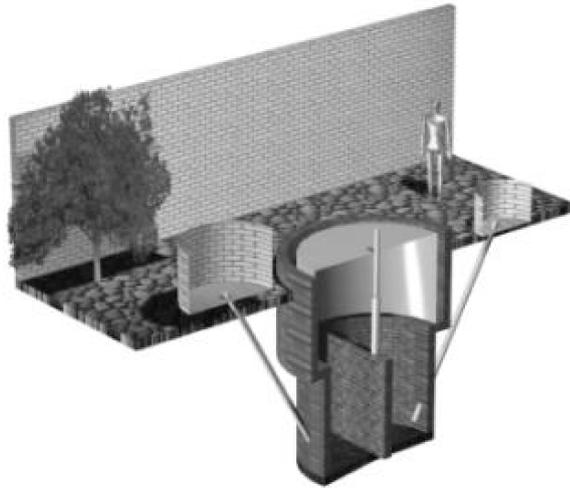


Figura 2.2 – Biodigestor modelo Indiano (DEGANUTTI et al., 2002).

Modelo Chinês: rústico e geralmente construído em alvenaria abaixo do nível do solo. Neste tipo de biodigestor uma parcela do gás formado na caixa de saída é liberada para a atmosfera, reduzindo parcialmente a pressão interna do gás. Por esse motivo, as construções de biodigestores do tipo chinês não são utilizadas e recomendadas para instalações de grande porte. O modelo Chinês é construído basicamente em alvenaria, não sendo necessário o uso de gasômetro em chapa de aço. Esse fato reduz os custos, contudo, pode haver problemas com vazamento do biogás caso a estrutura não seja bem vedada e impermeabilizada. Por serem construídos abaixo do solo, ficam mais protegidos das variações climáticas da superfície, principalmente em regiões que apresentam baixas temperaturas no inverno, fato este que influencia diretamente a produção de biogás (MATOS, 2016).

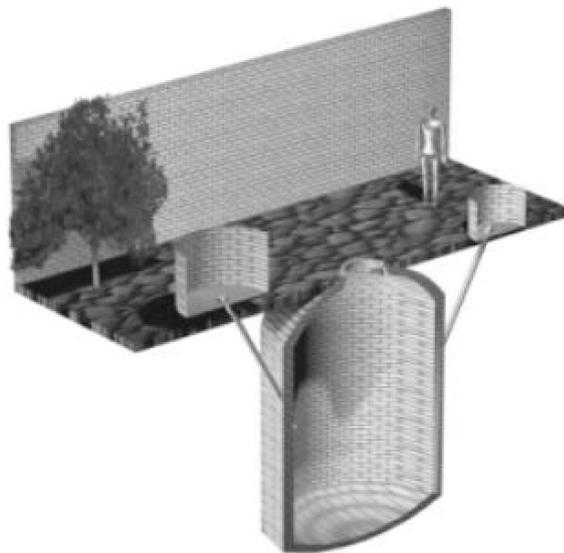


Figura 2.3 – Biodigestor modelo Chinês (DEGANUTTI et al., 2002).

Modelo Canadense: biodigestor horizontal, com caixa de carga feita em alvenaria e com o comprimento e largura maior que a profundidade, possuindo maior área de exposição ao sol, possibilitando uma grande produção de biogás e também evitando o entupimento (CASTANHO; ARRUDA, 2008). A câmara de fermentação é subterrânea e revestida com lona plástica e a manta superior tem objetivo de armazenar o biogás produzido de modo a formar uma campânula de armazenamento, como nos outros biodigestores. Há uma caixa de saída onde o efluente é liberado, um registro para saída do biogás e um queimador, que fica conectado a esse registro. Sua desvantagem é a maior sensibilidade às variações térmicas que os outros modelos. Sua utilização é recomendada para locais de clima tropical, onde predominam temperaturas altas e constantes (MATOS, 2016).



Figura 2.4 – Biodigestor modelo Canadense (AUTOR, 2022).

Além dos modelos descritos acima, existe o modelo alemão, que é um sistema mais eficiente e automatizado, porém o custo de instalação é muito maior comparado aos modelos anteriores. A Alemanha é um dos países líderes no desenvolvimento e na implementação de tecnologias relacionadas à energia renovável e à sustentabilidade ambiental, e os biodigestores fazem parte desse cenário. Os biodigestores alemães geralmente seguem os mesmos princípios básicos dos biodigestores, mas podem apresentar características específicas, isso inclui sistemas de alta eficiência para maximizar a produção de biogás a partir de uma variedade de substratos orgânicos, desde resíduos agrícolas até resíduos alimentares e subprodutos industriais. Os biodigestores alemães muitas vezes incorporam tecnologias avançadas de controle, monitoramento e tratamento de resíduos para garantir eficiência e conformidade com regulamentações ambientais rigorosas. Biodigestores alemães são parte integrante da estratégia de energia renovável e sustentabilidade da Alemanha, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição para uma economia mais verde e de baixo carbono (AZEVEDO, 2021; CARDOSO et. al, 2019).

Os biodigestores na Alemanha são caracterizados por uma abordagem avançada e altamente tecnológica, que refletem o compromisso do país com a energia renovável, a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética. Os principais aspectos do estado da arte dos biodigestores na Alemanha incluem: Tecnologia avançada: Os biodigestores alemães empregam tecnologias avançadas de digestão anaeróbica, incluindo sistemas de controle automatizado, monitoramento em tempo real e técnicas de otimização do processo. Diversidade de Substratos: Os biodigestores na Alemanha são projetados para lidar com uma ampla variedade de substratos orgânicos, incluindo resíduos agrícolas, resíduos de alimentos, esterco animal, resíduos industriais e biomassa cultivada especificamente para a produção de biogás. Eficiência na Produção de Biogás: Os biodigestores alemães são projetados para maximizar a produção de biogás a partir da matéria orgânica digerida, utilizando técnicas de controle de temperatura, pH e tempo de retenção hidráulica. Integração com a Rede Elétrica: Muitos biodigestores na Alemanha estão integrados à rede elétrica, permitindo a produção e a venda de eletricidade renovável gerada a partir do biogás produzido. Uso de Digestão em Fases: Alguns sistemas avançados de biodigestão na Alemanha empregam a digestão em fases, onde diferentes estágios de digestão são otimizados para maximizar a produção de biogás e a estabilidade do processo. Padrões Ambientais e Regulatórios Rigorosos: A Alemanha possui padrões ambientais e regulatórios rigorosos para o manejo de resíduos e a produção de energia a partir de biogás, o que incentiva a adoção de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis. Os biodigestores na Alemanha representam o estado da arte em termos de tecnologia, eficiência e sustentabilidade na produção de biogás a partir de resíduos orgânicos. Eles desempenham um papel fundamental na transição do país para uma economia de baixo carbono e na redução das emissões de gases de efeito estufa (AZEVEDO, 2021; CARDOSO et. al, 2019).

Modelo Alemão: Construído com paredes de concreto armado revestido com membrana de PEAD (Polietileno de alta densidade) e isopor para melhor isolamento térmico. A parte inferior deste tipo de biodigestor é construída com paredes em um ângulo com a superfície para evitar desmoronamentos e diminuir cantos vivos, aonde ocorre acúmulo de sólidos sedimentados. Além disso, o modelo possui bombeamento de substrato automático, sistema interno de aquecimento do substrato realizado através de trocadores de calor, dessulfurização biológica, sistema de agitação do substrato e sistema de controle remoto da usina. Com este tipo de sistema é possível aumentar a eficiência do processo de produção do biogás em no mínimo 20% comparado ao Canadense, mas o modelo torna-se viável somente em grande escala, é necessária uma produção mínima de dezenas toneladas de dejetos por dia e o investimento inicial de milhões de reais para instalação do mesmo (CARDOSO et. al, 2019).



Figura 2.5 – Biodigestor modelo Alemão (CARDOSO et. al, 2019).

2.3. Motores de combustão e geração de energia aplicada a biodigestores

A necessidade de substituição dos combustíveis derivados de petróleo é impulsionada pela busca de alternativas, preferencialmente renováveis, oriundas da biomassa, tanto para os óleos combustíveis como para a gasolina. A procura de alternativas apoia-se nas oscilações de preço e de oferta de petróleo, e também nas previsões de sua escassez, a maior parte da energia consumida no mundo é obtida a partir da queima de carvão, de gás natural e de derivados de petróleo, como a gasolina, o querosene e o óleo diesel, sendo este último um combustível amplamente utilizado para alimentar motores de combustão interna. Os motores a gás funcionam segundo os mesmos princípios dos motores ciclo Otto com apenas algumas modificações no sistema de alimentação, ignição e na taxa de compressão (MACHADO, 2010).

Uma alternativa utilizada em motores de combustão interna que operam com biogás é o sistema de geração. A geração é definida como processo de transformação da energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. A energia térmica não utilizada pelos motores de combustão interna, através dos sistemas de escapamento e arrefecimento, é de 60% a 70%. A Figura 2.6 apresenta a configuração típica de um sistema motogerador alimentado com biogás, oriundo do biodigestor, com um sistema gerador acoplado ao mesmo, para produção de energia elétrica e sistema de aproveitamento da energia térmica disponibilizada em forma de calor (SANTOS, 2016).

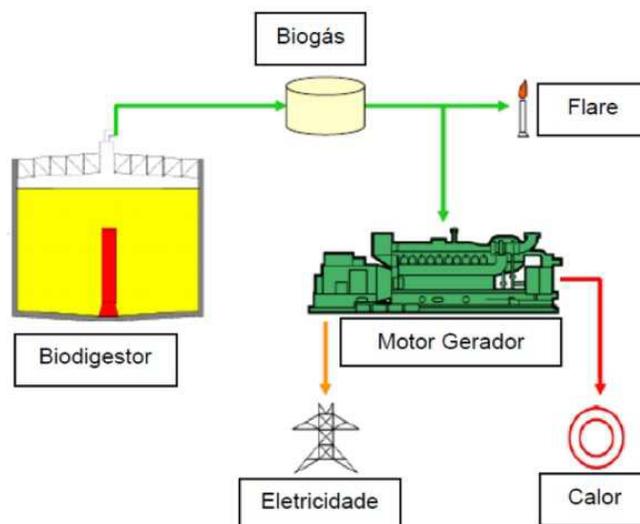


Figura 2.6 – Geração de energia elétrica e calor através de biodigestor (SANTOS, 2016).

Os motores de combustão interna são muito utilizados em grupos motogeradores, por operarem com diversos tipos de combustíveis, tanto líquidos quanto gasosos. São consideradas máquinas térmicas, cuja função é transformar energia química em trabalho mecânico, tendo como fluido de trabalho a mistura ar-combustível. Destacam-se entre as máquinas térmicas, por sua simplicidade, robustez e ótima relação peso/potência, colocando-as como uma opção vantajosa de acionadores, para geração de eletricidade contínua (SANTOS, 2016).

A utilização do biogás com elevado teor de metano é desejável, pela obtenção de biogás com elevado poder calorífico e alta octanagem. A obtenção de biogás com elevada octanagem adquire características de resistência à detonação, imprescindíveis para o bom funcionamento do motor (MITZLAFF, 1988).

Tabela 2.3 – Características dos principais combustíveis utilizados em motores de combustão interna (Adaptado de TAYLOR, 1971).

Combustível	Biogás	Metano	Álcool	Gasolina
Quantidade	1 m ³	1 m ³	1 L	1 L
Calor liberado [kJ]	23400	36000	19812	32486
Massa específica [kg/m ³]	1,2	0,72	809	739
PCI [kJ/kg]	19500	50000	24490	43960
Octanagem	130	100	99	85
Razão de compressão ideal	15-20	10-18	6-12	6-10
Temperatura de autoignição [°C]	650	650	-	220

2.3.1. Motores ciclo Otto 4 tempos com ignição por centelha

As figuras 2.7 e 2.8 representam um esquema de ciclo Otto 4 tempos, com ignição por centelha, operando com mistura ar-combustível, sendo um ciclo Otto ideal isentrópico com os principais pontos para avaliação termodinâmica. O ciclo Otto isentrópico foi inserido nesta parte do trabalho como revisão bibliográfica, este ciclo foi inicialmente modelado para critérios de comparação, e posteriormente simulado com o processo politrópico, resultando o algoritmo desenvolvido posteriormente, que utiliza o ciclo Otto politrópico.

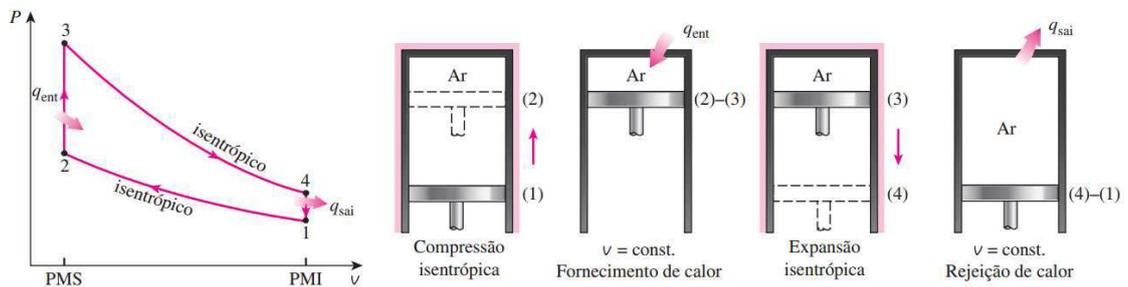


Figura 2.7 – Diagrama Pressão x volume específico de um ciclo Otto ideal (ÇENGEL, 2011)

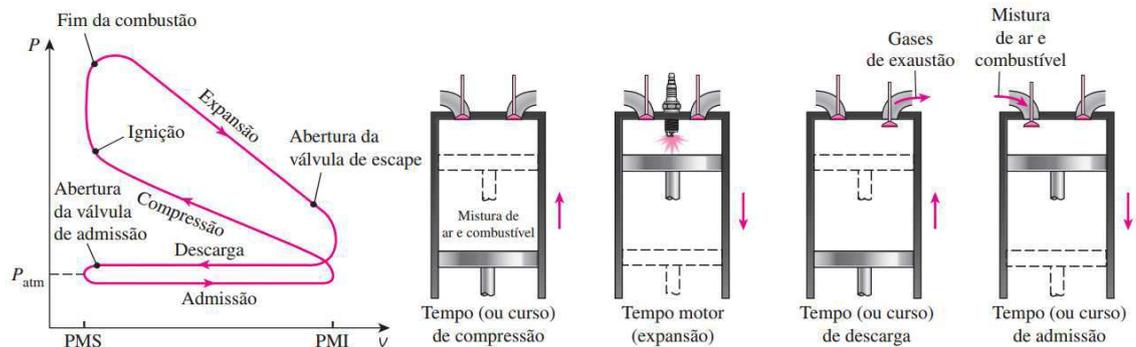


Figura 2.8 - Ciclo Otto com ignição por centelha operando com misturar ar-combustível (ÇENGEL, 2011)

2.3.2. Eficiência termodinâmica e taxa de compressão

A eficiência térmica de um ciclo Otto ideal depende da razão de compressão ou taxa de compressão do motor e da razão dos calores específicos (k) do fluido de trabalho. A eficiência térmica do ciclo Otto ideal aumenta com a razão de compressão e com a razão dos calores específicos.

$$k = c_p/c_v. \quad (\text{Eq. 2.01})$$

Onde: k : razão dos calores específicos; C_p : calor específico a pressão constante; C_v : calor específico a volume constante.

Um gráfico da eficiência térmica em função da razão de compressão é mostrado na Figura 2.9, que é o valor da razão dos calores específicos do ar a temperatura ambiente. Para determinada razão de compressão, a eficiência térmica de um motor com ignição por centelha real é menor do que a de um ciclo Otto ideal, devido a irreversibilidades como atrito e outros fatores, como a combustão incompleta. Pela figura é possível observar que a curva da eficiência térmica é bastante inclinada a razões baixas de compressão, porém, se achata a partir de valores próximos de 8. O aumento da eficiência térmica não é tão pronunciado a razões de compressão muito altas. Da mesma forma quando se utiliza taxas de compressão muito altas, a temperatura da mistura pode ficar acima da temperatura de autoignição do combustível, ou seja, o combustível entra em ignição sem o auxílio de uma centelha, causando uma queima precoce. Essa ignição prematura produz um ruído audível chamado de batida do motor, prejudica o desempenho e pode causar danos sérios ao motor. A determinação da temperatura de auto ignição cria um limite superior para taxas de compressão a serem utilizadas no motor.

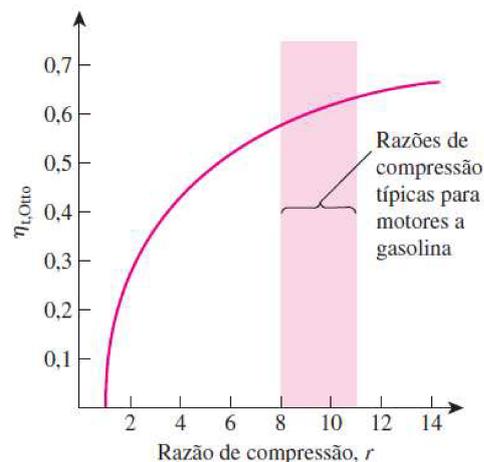


Figura 2.9 – Eficiência térmica do ciclo Otto ideal em função da taxa de compressão e razão dos calores específicos ($k = 1,4$) (ÇENGEL, 2011).

2.3.3. Motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás

As modificações realizadas em um motor ciclo Otto alimentado por combustível líquido para conversão em alimentação a biogás é a adaptação de um dispositivo ar-biogás, em substituição ao carburador ou sistema de injeção eletrônica, que tem como finalidade abastecer o motor com biogás no volume e pressão apropriados. Um motor ciclo Otto movido a biogás requer um biogás com, no mínimo, 45% de metano. A Figura 2.09 apresenta a composição típica de um motor movido a biogás. A potência e velocidade destes motores são controladas pelo fluxo da mistura ar-biogás ofertadas ao motor, obtido pela variação da posição de uma válvula borboleta, posicionada entre o dispositivo de mistura ar-biogás e a

entrada do motor. Qualquer mudança de posição desta válvula, no sentido de estrangular a entrada de ar-biogás para o motor, reduzirá a oferta de combustível, com conseqüente redução de rendimento. Caso o motor em questão seja permanentemente convertido para operação com biogás, uma adequação na taxa de compressão pode ser providenciada. Um aumento do valor da taxa de compressão promoverá melhor aproveitamento térmico, com redução do consumo específico e aumento do valor da pressão média efetiva (PME). Isto ocorre pelo biogás apresentar altas temperaturas de autoignição, aumentando seu poder antidetonante, permitindo o aumento da taxa de compressão. A desvantagem desta ação é a impossibilidade de operação com o combustível original (SANTOS, 2016).

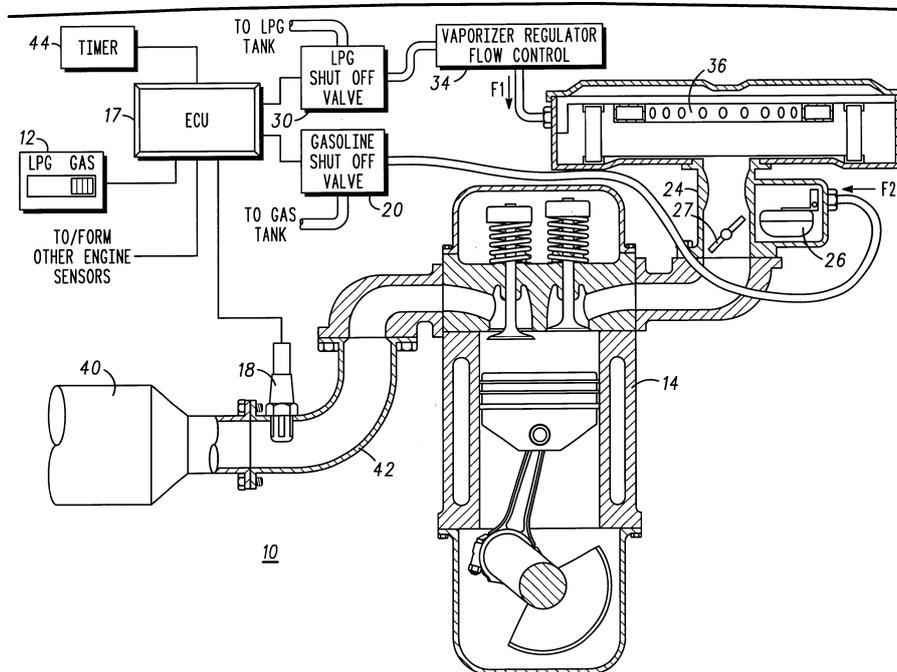


Figura 2.10 – Motor ciclo Otto alimentado por biogás (adaptado de GOOGLE PATENTS, 2003).

Motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás apresentam menor rendimento do que aqueles obtidos com o combustível de origem. O fato ocorre pela diminuição da eficiência volumétrica obtida e observada, principalmente, em motores aspirados. O biogás, por estar em estado gasoso, tem como vantagem não precisar do processo de vaporização, necessário para combustíveis líquidos. No entanto, ocupa uma maior porção em volume de mistura admitida do que ocuparia um combustível líquido, provocando uma limitação em volume na quantidade de ar admitido durante o processo. Neste sentido, torna-se necessária a utilização de biogás com elevado grau de pureza, pois grandes porções de dióxido de carbono, contidos em uma porção de biogás não purificado, também reduzirão o rendimento volumétrico. Outro fato adicional que confirma rendimentos maiores

com combustíveis líquidos associa-se ao calor específico destes combustíveis. Esta característica provoca uma redução de temperatura no coletor de admissão, aumentando a densidade do ar e, conseqüentemente, o rendimento volumétrico (SANTOS, 2016).

2.3.4. Processo politrópico

Além dos exemplos e comparativos acima, o processo politrópico é de grande valia para o desenvolvimento da metodologia e aplicação de simulações referentes ao biogás em motores de combustão interna descritos neste trabalho.

O processo politrópico descreve o comportamento de um sistema submetido à alguma transformação. É utilizado para analisar o comportamento de gases, durante sua compressão ou expansão. Durante os processos reais de expansão e compressão de gases, a pressão e o volume são relacionados pela Equação 2.02, onde n e C são constantes, o valor normalmente utilizado para a constante politrópica é 1,3.

$$C = P \cdot V^n \quad (\text{Eq. 2.02})$$

Onde: P : Pressão; V : Volume; n : índice politrópico; C : Constante.

De acordo com Çengel, uma expressão geral (Equação 2.03) foi desenvolvida para o trabalho realizado durante o processo (processo politrópico).

$$W_f = \frac{m \cdot R(T_2 - T_1)}{1 - n}; \quad n \neq 1 \quad (\text{Eq. 2.03})$$

Durante um processo politrópico, o sistema passa por uma série de mudanças, em que cada um dos passos pode ser considerado como um passo infinitesimal. Essas etapas são caracterizadas por uma mudança em pressão e volume, e o processo pode ser representado por uma curva contínua em um diagrama pressão-volume conforme a Figura 2.11 (ÇENGEL, 2011).

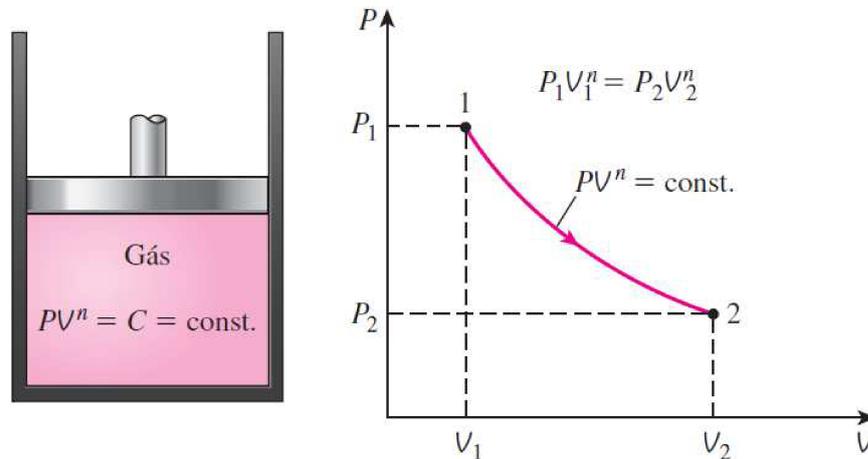


Figura 2.11 – Esquema e diagrama P-V para um processo politrópico (ÇENGEL, 2011).

2.3.5. Motoregeradores aplicados na geração de energia em biodigestores.

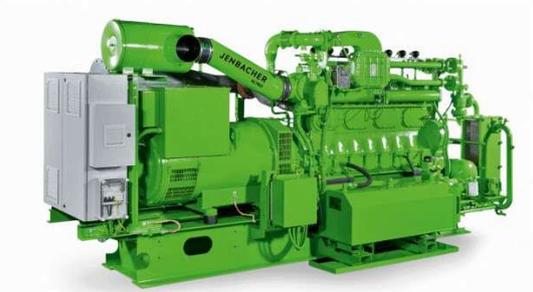
Conforme descrito anteriormente, depois de produzido, tratado e armazenado, o biogás é injetado no interior de um motor de combustão interna e é realizada a combustão, o motor fornece potência mecânica de eixo a um alternador, que é o equipamento utilizado para a produção da energia elétrica. Esses sistemas são chamados de conjuntos motogeradores, abaixo será descrito alguns motogeradores comerciais nacionais e importados, sendo apontado suas principais características.

A MWM Geradores possui um grupo gerador a gás, equipados com motores próprios e também motores de grande escala da Scania, com alternadores produzidos pela WEG, esses motogeradores são projetados e desenvolvidos com tecnologia 100% nacional, produzidos no centro tecnológico da MWM. Este grupo possui motogeradores de 64 a 620 kW @ 60 Hz, de acordo com a demanda exigida. Esses motores foram projetados exclusivamente para trabalho com gás e, segundo a MWM, possuem maior densidade de potência por cilindro do mercado, utilizando tanto o biogás, quanto o gás natural como combustível.



Figura 2.12 – Motogeradores MWM (MWM, 2022).

A Jenbacher é uma empresa Austríaca, oferece um faixa de potência maior comparado aos sistemas da MWM, o que conseqüentemente exige uma maior demanda de biogás, tornado os sistemas inviáveis para pequenas plantas rurais. Este grupo possui motogeradores de 200 kW a 10 MW que também podem funcionar com biogás e gás natural. Outro ponto negativo desses grupos geradores para pequenos produtores é em relação a tensão elétrica, que começa a partir de 480 Volts, em fazendas as tensões elétricas (voltagem) no Brasil são de 110 e 220 Volts e em alguns casos (trifásicos) com 360 Volts. A Figura 2.12 é o menor modelo apresentado pelo fabricante que opera na frequência de 60 Hertz.



Jenbacher Tipo 2

O conceito de motor estacionário oferece excelente durabilidade, enquanto componentes aprimorados e um modelo comprovado de controle e monitoramento fornecem confiabilidade excepcional ao motor Tipo 2.

Technical specifications:

<p>Produção elétrica > 335kW</p> <p>Eficiência elétrica > up to 37.2%</p> <p>Tensão > 480V – 600V</p>	<p>50 Hz <input type="radio"/> 60 Hz <input checked="" type="radio"/></p> <p>Produção térmica > 423kW – 424kW</p> <p>Eficiência térmica > up to 47.1%</p> <p>Tipo de combustível > Flexível</p>
---	--

Figura 2.13 – Motogerador Jenbacher Tipo 2 (JENBACHER, 2023).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Nessa seção, será apresentado o método cromatográfico utilizado para as análises químicas experimentais o biogás do biodigestor da fazenda Pirapitinga. Em seguida, serão apresentados os cálculos termodinâmicos e simulações realizadas para aplicação do gás de síntese em ciclos de potência a gás para a geração de energia.

3.1 Análise química do biogás

O biogás foi coletado em temperatura ambiente na fazenda Pirapitinga, em Tedlarbags recipiente específico para coleta, que será descrito posteriormente, e levado para análise no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica) da Universidade Federal de Uberlândia. O método utilizado para análise química do gás foi baseado no método de cromatografia gasosa da tese: Desenvolvimento e validação de método cromatográfico para determinação de gases sintetizados a partir de combustível derivado de resíduo sólido urbano gerados durante o processo de pirólise.

As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás modelo Shimadzu CG-2014 (Figura 3.1) utilizando uma coluna Carboxen 1010 PLOT. Os compostos foram detectados através de detectores TCD (Thermal Conductivity Detector) e FID (Flame Ionization Detector) e, o software CG-Solution foi utilizado para a análise dos dados. Este equipamento está disponível no Laboratório de Transfência de Calor e Massa (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia UFU.

Para análise química do biogás foi utilizado o método cromatográfico desenvolvido por SILVA (2021), no LCTM-UFU para determinação de gases sintetizados durante o processo de pirólise e gaseificação de biomassa. A autora relata um método para determinação simultânea de H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_4 (propadieno e propino), C_3H_6 , C_3H_8 e C_4H_{10} (*n*-butano e *iso*-butano) por cromatografia gasosa (CG) usando detectores de condutividade térmica (TCD) e ionização de chama (FID). As separações foram obtidas em uma coluna capilar de 0,32 mm de diâmetro interno, 30 m de comprimento e 15 μ m de espessura de camada porosa do filme. O método foi otimizado e validado de acordo com os

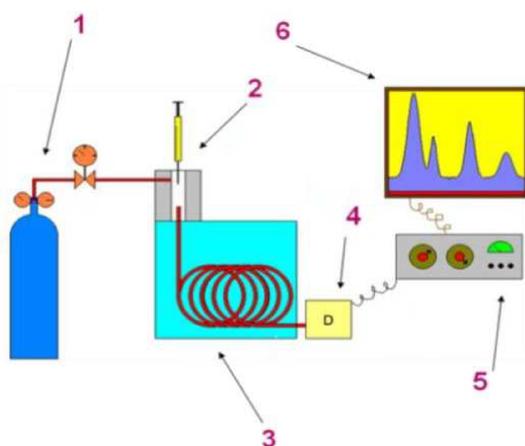
protocolos recomendados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) do Brasil. Sob as condições cromatográficas otimizadas, a determinação do número de mols dos analitos variaram de $1,4 \times 10^{-5}$ a $4,1 \times 10^{-4}$ mols com um valor de $r > 0,99$ em sua faixa linear, os limites de quantificação variaram (dependendo do analito) de $1,4 \times 10^{-5}$ a $2,7 \times 10^{-4}$ mols (SILVA, 2021).



Figura 3.1 – Cromatógrafo a gás modelo Shimadzu CG-2014 (AUTOR, 2023).

3.1.1 Cromatografia gasosa

De acordo com Silva, 2021, a cromatografia gasosa (CG) do inglês *Gas Chromatography*, é em método no qual os componentes de uma amostra vaporizada são divididos à medida de sua partição entre o gás de arraste, e uma fase estacionária líquida ou sólida contida dentro da coluna. A separação é baseada na diferente distribuição das substâncias da amostra entre a fase móvel e a fase estacionária. As substâncias passam por um detector; dispositivo que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de material eluido. Este sinal é registrado em função do tempo definindo o cromatograma. A área do pico do cromatograma, representado na figura abaixo, pode ser relacionada com a concentração do analito (substância) por meio de uma constante de proporcionalidade dada pela curva analítica, o que possibilita a análise quantitativa (SKOOG, 2002; COLLINS et al., 2007; SILVA, 2021).



- 1-Reservatório de gás de arraste e controles de vazão e pressão.
- 2-Injetor da amostra (Microseringa).
- 3-Coluna cromatográfica e forno da coluna.
- 4-Detectores TCD e FID.
- 5-Tratamento eletrônico (amplificação de sinal)
- 6-Registro de sinal (registrador ou computador)

Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um cromatógrafo a gás (MEDEIROS, 2018).

A cromatografia gasosa pode ser aplicada em compostos voláteis e termicamente estáveis, e volatilizáveis até 350 °C ou que possam ser derivados de forma conhecida, completa e estequiométrica (SILVA, 2021).

3.1.2 Principais constituintes de um sistema cromatográfico

Os principais gases empregados são H_2 , He e N_2 , a vazão destes gases deve ser controlada e constante durante a análise. O gás de arraste também conhecido como fase móvel deve ser compatível com o detector. A introdução da amostra é feita através de um injetor, a Microseringa apresentada na Figura 3.3, que consiste em um bloco metálico conectado a uma coluna cromatográfica, e a uma alimentação do gás de arraste. Este bloco contém um orifício com uma membrana, geralmente de borracha de silicone, na qual as amostras líquidas ou gasosas podem ser injetadas no cromatógrafo (SILVA, 2021).

Existem duas classes de injetores, os de vaporização e os de injeção direta na coluna, também conhecidos como *on-column*. Os injetores utilizados na vaporização podem ser do tipo *split* e *splitless*. A temperatura dos injetores *split* e *splitless* deve ser suficientemente alta para garantir a vaporização da amostra, sem ocasionar a decomposição da mesma. Geralmente, a temperatura no injetor é aproximadamente 50 °C acima da temperatura de ebulição do composto menos volátil. O tipo de injeção *split* e *splitless* determinam a quantidade de amostra que entra na coluna. No modo *split* com divisão da amostra, uma parte da amostra é injetada e outra parte é descartada como pré-determinado através do *split-vent*; este tipo de injeção é ideal para amostras concentradas; modo “*splitless*” sem divisão da amostra, toda a amostra injetada é direcionada para a coluna; este modo é ideal para análise de traços. A injeção em cromatografia gasosa no interior da coluna capilar a frio (*on-column*)

é ideal para a introdução de amostras que possui analitos termicamente instáveis ou misturas com componentes que apresentam propriedades de volatilização muito diferentes, dando origem a separação na evaporação para substâncias com elevado ponto de ebulição (SILVA, 2021).

As microseringas são seringas de vidro e a agulha podem ser fixas ou removíveis, como na Figura 3.3. Elas são muito empregadas nos processos cromatográficos. Podem ser utilizadas para a coleta de amostras quando estas se encontram próximas ao local de análise, todavia, não devem ser utilizadas para coletar e armazenar amostras por longos períodos de tempo, pois, não possuem um sistema de vedação. As coletas feitas nos bags e as injeções das amostras no CG são feitas utilizando duas microseringas apropriadas para a coleta de amostras gasosas: Hamilton Gastight 1001 com agulha fixa com ponta de Teflon de capacidade de 1000 μL e Hamilton Gastight 1701 com agulha fixa de capacidade de 10 μL (Figura 3.3).

Neste trabalho foi utilizado o método *on-column* e utilizou microseringas conforme as da figura 3.3.



Figura 3.3 – Microseringas utilizadas para coleta e injeção de amostras gasosas (a) Hamilton Gastight 1001, (b) Hamilton Gastight 1701 (SILVA, 2021).

Os Tedlars são sacos para coleta de gases, eles são resistentes à permeação de gás para dentro ou fora garantindo a integridade da amostra. Além disso, é considerado flexível numa vasta faixa de temperatura, quimicamente inerte, não altera a composição de sua amostra e apresenta baixa permeabilidade (DIAS, 2023; SILVA, 2021).

Neste trabalho foram utilizados *Tedlarbags* de polipropileno de 1,0 L, por se tratar de bags quimicamente inertes e por apresentarem o melhor custo benefício dentre os apresentados no mercado para este trabalho (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Bags de coleta modelo *Tedlar* de 1 L (DIAS, 2023).

A separação dos componentes na CG é baseado nas diferentes distribuições dos componentes da amostra entre a fase móvel (gasosa) e a fase estacionária (líquida ou sólida). E é fortemente influenciada pela volatilidade do soluto, sua pressão de vapor e temperatura. A alteração da temperatura altera a pressão de vapor, consequentemente, influencia na separação de uma determinada substância. A coluna cromatográfica é um tubo longo, contendo a fase estacionária. Essas colunas estão disponíveis em diversos materiais sendo eles: sílica fundida, aço inoxidável, alumínio, vidro, etc. Durante a seleção de uma coluna deve ser levado em consideração a seletividade e a capacidade da coluna em separar os componentes da amostra em aplicações específicas. Essa escolha deve ser baseada em cinco fatores: tipo de coluna, fase estacionária, diâmetro interno, espessura do filme e comprimento da coluna (SILVA, 2021).

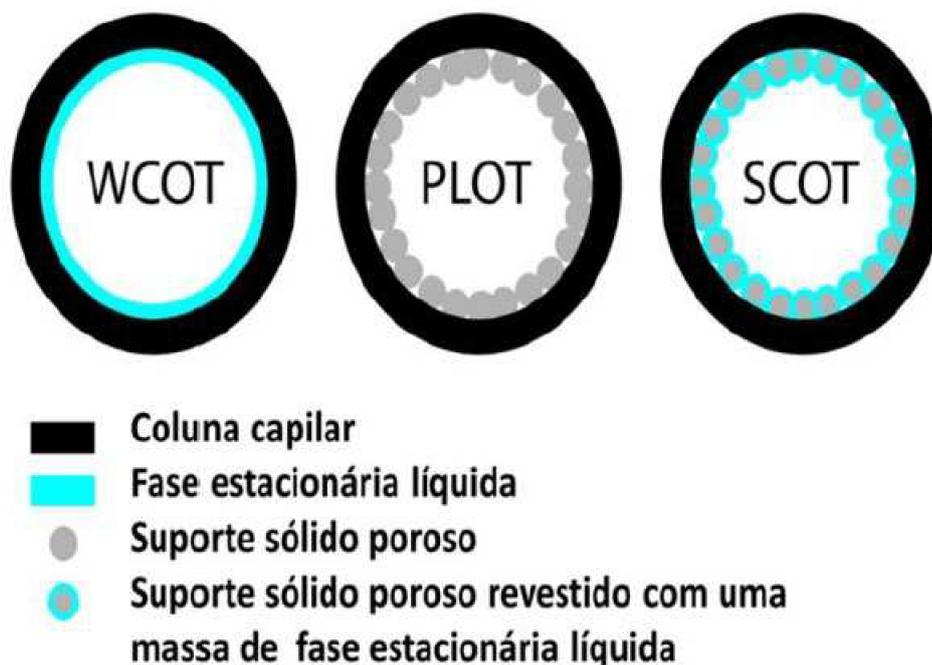


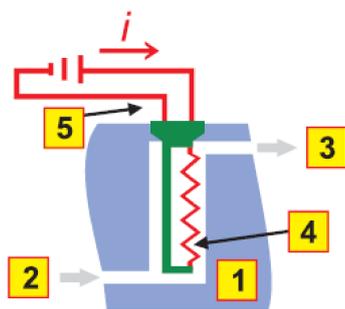
Figura 3.5 – Esquema das colunas tubulares abertas utilizadas em cromatografia gasosa (SILVA, 2021).

Durante a seleção de uma coluna devem ser levadas em consideração a seletividade e a capacidade da coluna em separar os componentes da amostra em aplicações específicas. Essa escolha deve ser baseada em cinco fatores: tipo de coluna, fase estacionária, diâmetro interno, espessura do filme e comprimento da coluna (SILVA, 2021).

As colunas do tipo PLOT (*Porous Layer Open tubular column*), possuem uma camada porosa de fase estacionária, formada por vários tipos de materiais que promovem adesão da substância na superfície; esse revestimento é imobilizado na parede do tubo capilar através de ligações químicas. A coluna Carboxen 1010 PLOT (coluna capilar) possui dimensões reduzidas, com um comprimento de 30 m, diâmetro interno de 0,32 mm e espessura de 15 μm do filme. Esta coluna é ideal para a separação simultânea de todos os principais analitos presentes em um gás (He , H_2 , O_2 , N_2 , CO , CH_4 e CO_2) e também para hidrocarbonetos leves. Além disso, as colunas do tipo PLOT são ideais para separação de compostos que são gases em temperatura ambiente (SUPELCO, 2019; SILVA, 2021).

O TCD (Detector de Condutividade Térmica) funciona com base na diferença de condutividade térmica do gás de arraste, onde os filamentos perdem calor de maneira constante. Quando moléculas diferentes do gás de arraste estão presentes, a condutividade térmica do meio é alterada e a temperatura do filamento se altera, causando uma diferença na condutividade térmica. O filamento metálico (geralmente fabricado em W, Au ou liga W-Re) é aquecido pela passagem de uma corrente elétrica constante. Este filamento é acoplado

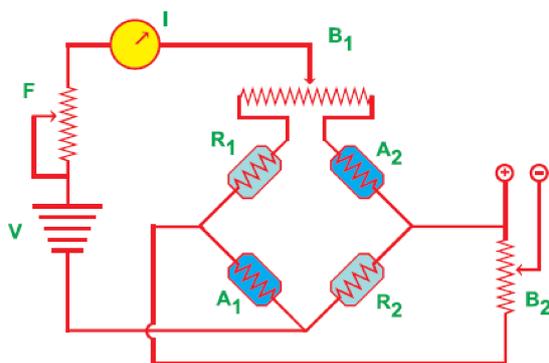
dentro de um orifício de um bloco metálico, e é aquecido a uma temperatura mais baixa que a do filamento, por onde passa continuamente o gás de arraste proveniente da coluna (Figura 3.6). A passagem constante do gás de arraste puro pela cela não ocasiona variação da taxa de perda de calor do filamento. Contudo, quando um componente é diluído na coluna, ele sai misturado com o gás de arraste e passa pelo detector. Caso a concentração desta mistura seja diferente daquela do gás de arraste puro, o filamento passa a perder calor para o bloco numa taxa diferente daquela do equilíbrio (COLLINS et al, 2007; HAGE; CARR, 2012; SILVA, 2021).



- 1-Bloco metálico
- 2-Entrada de gás de arraste
- 3-Saída de gás de arraste
- 4-Filamento metálico
- 5-Alimentação de corrente elétrica para aquecimento do filamento

Figura 3.6 – Esquema de um TCD (MEDEIROS, 2018).

O aquecimento do filamento provoca variação na sua resistência elétrica e a reatividade de um metal aumenta com a temperatura. O filamento é montado em circuito de Ponte de Wheatstone como apresentado na Figura 3.7, que converte a variação na resistência elétrica do filamento em uma variação de tensão elétrica, coletada em um registro, gerando o cromatograma (COLLINS et al, 2007; HARRIS, 2008; HAGE; CARR, 2012; SILVA 2021).



- V – Fonte de CC/Bateria (18 V a 36 V)
- F – Ajuste da corrente nos filamentos
- I – Medida da corrente nos filamentos (100 mA – 200 mA)
- B₁ B₂ – Balanceamento/ajuste de zero
- R₁ R₂ – Filamentos das celas de referência
- A₁ A₂ – Filamentos das celas de amostra

Figura 3.7 – Circuito de Ponte de Wheatstone (MEDEIROS, 2018).

O TCD é um detector universal, sensível à concentração do soluto no gás de arraste. É comum para o TCD utilizar como gás de arraste He ou H₂. Isso é justificado por possuírem maiores valores de condutividades térmicas (valores entre 162 e 205 MJ.s⁻¹.K⁻¹) quando comparados ao Ar, N₂ e CO₂ (20,5 e 30,5 M.J.s⁻¹.K⁻¹) (Figura 3.7). Como consequência, há grande variação na condutividade térmica ocorre na presença de soluto, e gerando melhores respostas. A sensibilidade de um detector de condutividade térmica é inversamente

proporcional à vazão, sendo mais sensível em uma vazão menor. Ela também aumenta com o aumento das diferenças de temperatura entre o filamento e o bloco vizinho (HARRIS, 2008; COLLINS et al, 2007; HAGE; CARR, 2012; SILVA 2021).

Tabela 3.1 – Valores de condutividade térmica e viscosidade de gases utilizados como fase móvel em cromatografia gasosa a 100 °C (Adaptado de COLLINS et al., 2007)

Gás	Condutividade térmica (MJ^s⁻¹K⁻¹)	Viscosidade (μPa.s)
Argônio (Ar)	20,9	27,0
Dióxido de carbono (CO ₂)	20,5	18,9
Hélio (He)	162,0	22,8
Hidrogênio (H ₂)	205,0	10,3
Nitrogênio (N ₂)	30,5	20,8

Esse tipo de detector é universal e as principais vantagens dele são o fato de ser barato e de operação simples, responde a espécies orgânicas e inorgânicas, e não é destrutivo. Além disso, o TCD é muito utilizado em amostras de concentração relativamente elevada e para substâncias que não produzem uma boa resposta com outros detectores, como H₂, N₂, CO, H₂O, SO₂, NO₂ e CO₂. Contudo, é necessário um gás de arraste com baixo nível de impurezas de água e oxigênio, pois a água e o oxigênio podem interagir com a fase estacionária e causar problemas significativos, como elevado ruído de base e sangramento da coluna, reduzindo tanto a sensibilidade do analisador, quanto a vida útil da coluna. Além disso, a presença de oxigênio e água no gás de arraste afeta o detector DCT, devido a oxidação dos seus fios (COLLINS et al, 2007; HAGE; CARR, 2012; SILVA, 2021).

O FID (Detector de Ionização de Chama) funciona com base na condução de eletricidade resultante da formação de íons durante a queima de compostos orgânicos por uma chama. Essa chama é formada por H₂ e ar sintético (aproximadamente, 20% de O₂ e 80% de N₂), e o gás de arraste (pode ser, N₂ ou He) que sai da coluna, contém substâncias que são queimadas como é representado na Figura 3.8. A chama resultante fica contida entre dois eletrodos, polarizados por uma voltagem constante. Como a chama de H₂ forma poucos íons, ela é considerada como um mal condutor elétrico e quase nenhuma corrente passa entre os eletrodos. Ao diluir um composto orgânico, ele é queimado e são formados íons na chama que conduzem corrente elétrica da ordem de pico, a qual é amplificada e constitui o sinal cromatográfico (COLLINS et al, 2007; HAGE; CARR, 2012; AUGUSTO, 2020; SILVA, 2021).

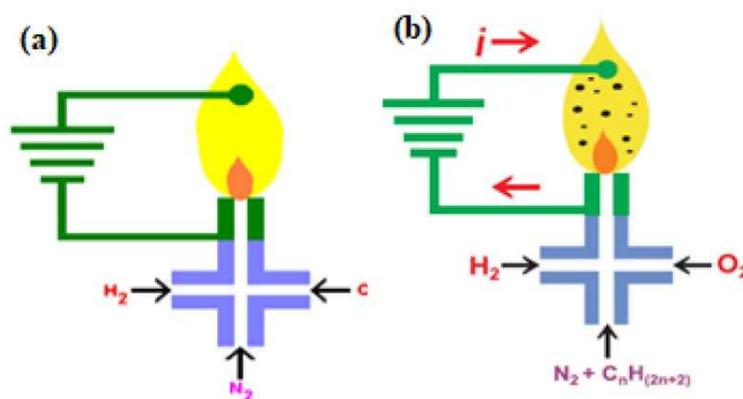


Figura 3.8 – Esquema DIC (a) sem analito, (b) com analito (MEDEIROS, 2018).

O detector de ionização de chama possui elevada detectabilidade, porém sua principal desvantagem é a destruição da amostra. Os detectores por ionização de chama são usados para detectar hidrocarbonetos (HC_n) como o metano (CH_4), etano (C_2H_6), entre outros. Esse tipo de detector é aplicável para a maioria dos hidrocarbonetos e não apresenta detectabilidade a substâncias que não sejam hidrocarbonetos, por exemplo, H_2 , N_2 , He , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , NH_3 , NO , H_2S e SiF_4 . A eficiência do detector depende das vazões dos gases que alimentam a chama. Geralmente, uma boa detecção e estabilidade são obtidas usando a proporção de 1:1:10 para o gás de arraste, hidrogênio e ar sintético (COLLINS et al, 2007; HARRIS, 2008; HAGE; CARR, 2012; SILVA, 2021).

3.1.3 Parâmetros para validação de cromatografia gasosa

Para a validação de métodos analíticos em laboratório é fundamental, garantir a obtenção de resultados confiáveis e adequados à qualidade pretendida. Os parâmetros de validação devem ser bem definidos de acordo com a legislação vigente para as amostras em estudo. O INMETRO ao se referir aos requisitos de Química Analítica, recomenda que seja feita a validação dos métodos e, enumera as características essenciais, sendo elas:

- Sensibilidade;
- Limite de detecção (LD);
- Limite de quantificação (LQ);
- Linearidade;
- Seletividade;
- Precisão e exatidão.

(HARRIS, 2008; ANVISA, 2017; INMETRO, 2020; SILVA 2021).

As definições de sensibilidade que geralmente são utilizadas são: a sensibilidade de calibração ou alteração do sinal de resposta devido à alteração no sinal de resposta devido à

alteração na concentração unitária da amostra. Portanto, a sensibilidade é a inclinação da curva de calibração. O limite de detecção (LD) é a quantidade mínima de uma substância presente em uma amostra que pode ser detectada, mas não necessariamente quantificada considerando as condições experimentais estabelecidas (SKOOG, 2008; SILVA 2021).

A determinação do limite de detecção pode ser realizada pelos dois parâmetros da curva de calibração descritos abaixo:

- (i) Método visual – O limite de detecção é a concentração mais baixa na qual o analito pode ser detectado de forma confiável analisando a amostra em uma concentração conhecida, portanto, o valor da relação sinal-ruído fundamental, é igual a 3 vezes (3:1) a concentração do elemento que dá sinal-ruído da linha base (RIBANI, 2004; INMETRO, 2020; SILVA 2021).
- (ii) Parâmetros da curva de calibração – podem ser expressos pelo desvio padrão do branco, e sensibilidade obtida pela curva de calibração na Equação 3.01 (RIBANI, 2004; INMETRO, 2020).

$$LD = \frac{3.s}{S} \quad (\text{Eq. 3.01})$$

Onde: s é o desvio padrão do branco e S a sensibilidade (inclinação, coeficiente angular) da curva de calibração.

Limite de quantificação (LQ) é a quantidade mínima de um analito em uma amostra que pode ser medida com precisão e exatidão aceitáveis, nas condições experimentais estabelecidas (ANVISA, 2016; 2017; SILVA 2021).

O limite de quantificação pode ser determinado pelos dois métodos, baseado nos parâmetros da curva de calibração, descritos abaixo:

- (i) Método visual – o limite de quantificação é determinado analisando amostras de concentrações conhecidas, estabelecendo a menor concentração que o analito pode ser quantificado com confiabilidade entre o sinal do analito e o ruído. A relação sinal-ruído pode ser adotada utilizando a estimativa de quantificação de 10:1 (BOTTOLI, 2003; INMETRO, 2020; SILVA 2021).
- (ii) Parâmetros de curva de calibração – (LQ) são calculados através da Equação 3.02, utilizando os parâmetros da curva analítica (BOTTOLI, 2003; INMETRO, 2020; SILVA 2021).

$$LQ = 3,3 \cdot LD \quad (\text{Eq. 3.02})$$

A linearidade de um método corresponde à capacidade do método em obter uma resposta analítica diretamente proporcional à concentração do analito, dentro de uma determinada faixa específica. Pelo menos cinco concentrações diferentes devem ser utilizadas para alcançar a linearidade. Todos os cálculos para avaliar a linearidade devem ser realizados com base nos dados reais de concentração e nas respostas analíticas individuais. A linearidade é alcançada através da padronização interna e externa (SKOOG, 2008; BRITO, 2003; ANVISA, 2017; SILVA, 2021).

A quantificação requer que se conheça a dependência entre o sinal do equipamento e a concentração do analito. A relação matemática entre o sinal e a concentração deve ser determinada empiricamente através de sinais medidos para concentrações conhecidas dessa espécie. Essa relação é expressa através de uma curva analítica acompanhada de sua avaliação estatística, onde essa equação é expressa por: $Y = aX + b$, onde Y = resposta (área do pico); X = concentração; a = inclinação da curva de calibração que representa a sensibilidade (coeficiente angular); b = intersecção com eixo y , quando $X = 0$ (ANVISA, 2017, BRITO 2003; SILVA 2021).

A linearidade pode ser avaliada utilizando os cálculos estatísticos de regressão linear, teste t-Student, análise de variância entre outros. Nesses testes estatísticos deve ser utilizado um nível de significância de 5%, sendo que o coeficiente de correlação deve estar superior 0,990 (SKOOG, 2002; ANALÍTICOS, 2016; ANVISA, 2016; SILVA, 2021).

A precisão é uma avaliação da proximidade dos resultados obtidos em comparação com os demais resultados obtidos pelo mesmo método, e pode ser expressa como: desvio-padrão, variância e o desvio padrão relativo. Esses dados mostram até que ponto os resultados individuais se desviam da média. As amostras para avaliação da precisão devem ser preparadas de forma independente desde o início das etapas descritas no método. A determinação da repetitividade deve obedecer aos critérios descritos abaixo:

- (i) As amostras devem ser avaliadas nas mesmas condições de operação, mesmo analista e mesma instrumentação dentro de um curto intervalo de tempo, em uma única corrida analítica;

- (ii) Utilizar, pelo menos, nove determinações, com um intervalo linear, recomenda-se a avaliação de três concentrações (baixa, média e alta), com três réplicas preparadas individualmente (SILVA, 2021; SKOOG, 2002; ANVISA, 2016).

A exatidão é a concordância entre o valor verdadeiro da substância química na amostra e o valor estimado pelo procedimento analítico. As três principais formas para a determinação da exatidão, estão descritas abaixo:

- (i) Material de Referência Certificado (MRC): compara os resultados obtidos com o valor certificado de padrões internacionais;
- (ii) comparação com método de referência, ou método validado: determinado através da comparação dos valores obtidos pelo método proposto com os valores de algum outro método validado que possui precisão e exatidão avaliados, para o mesmo tipo de amostras;
- (iii) ensaios de recuperação: o processo consiste na recuperação de um analito específico no processo em relação a quantidade adicionada inicialmente a amostra em branco ou já contendo o analito.

A recuperação consiste na quantidade de analito pode de ser quantificada. O método de recuperação consiste em concentrar o analito de interesse da amostra, através de soluções com níveis diferentes de concentrações (alto, médio e baixo), com três repetições em cada nível, e devem contemplar todo o intervalo linear. A quantidade percentual do analito recuperado é calculado através da Equação 3.03, (BRITO et al., 2003; INMETRO, 2020; SILVA 2021).

$$R(\%) = \frac{C1-C2}{C3} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3.03})$$

Onde:

R: Recuperação em porcentagem

C1: Concentração do analito na amostra fortificada;

C2: Concentração do analito na amostra não fortificada;

C3: Concentração do analito adicionado a amostra fortificada.

A seletividade mede a capacidade do método em quantificar uma substância na presença de outras ou de outros materiais potencialmente interferentes. Além disso, o grau de resolução pode ser utilizado para avaliar a seletividade, mas ela é estritamente limitado às

técnicas de separação. A separação completa de forma eficaz de dois picos cromatográficos simultaneamente depende dos tempos de retenção e suas larguras. A resolução expressa a separação efetiva entre dois picos adjacentes conforme a Equação 3.04. Se os dois picos das larguras dos picos estiverem muito próximas (Figura 3.9), a resolução deve ser calculada pela Equação 3.05 (INMETRO 2020; SILVA, 2021; SKOOG, 2008).

$$R_s = \frac{2.(trB-trA)}{W_A+WB} \quad (\text{Eq. 3.04})$$

$$R_s = \frac{trB-trA}{W_B} \quad (\text{Eq. 3.05})$$

Onde:

R_s : separação real dos picos;

trA : tempo de retenção do composto A;

trB : tempo de retenção do composto B;

W_A : largura da base do composto A;

W_B : largura da base do composto B.

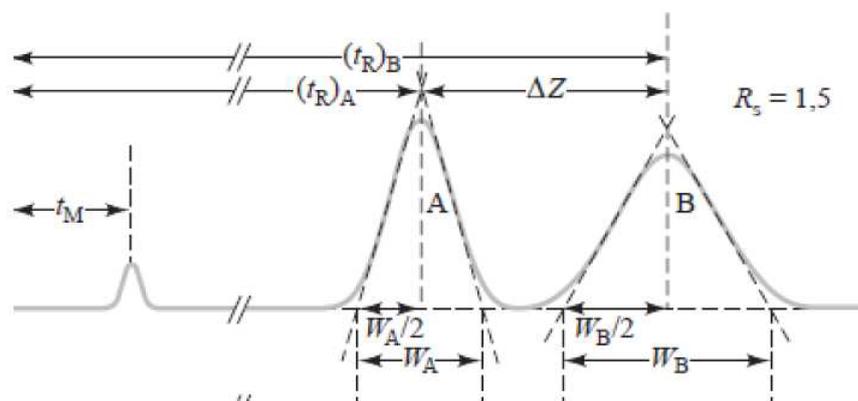


Figura 3.9 – Parâmetros de avaliação da resolução em cromatografia (SKOOG, 2008).

Para alcançar uma melhor separação, é interessante reduzir o tempo de análise e conseguir maior simetria nos picos. A temperatura do forno iniciou-se em uma isoterma de 35°C durante 10 minutos, seguida da variação da taxa de aquecimento de 12, 24, 48 e 60°C

min⁻¹ até 240 °C conforme a Figura 3.10, esta temperatura foi mantida 120 minutos. Para escolher a melhor programação foi avaliada a resposta para o CO₂ e CH₄. De acordo com as bibliografias citadas anteriormente, os gases CO₂ e CH₄ somados representam aproximadamente 90% do biogás proveniente de biodigestores rurais (SILVA, 2021).

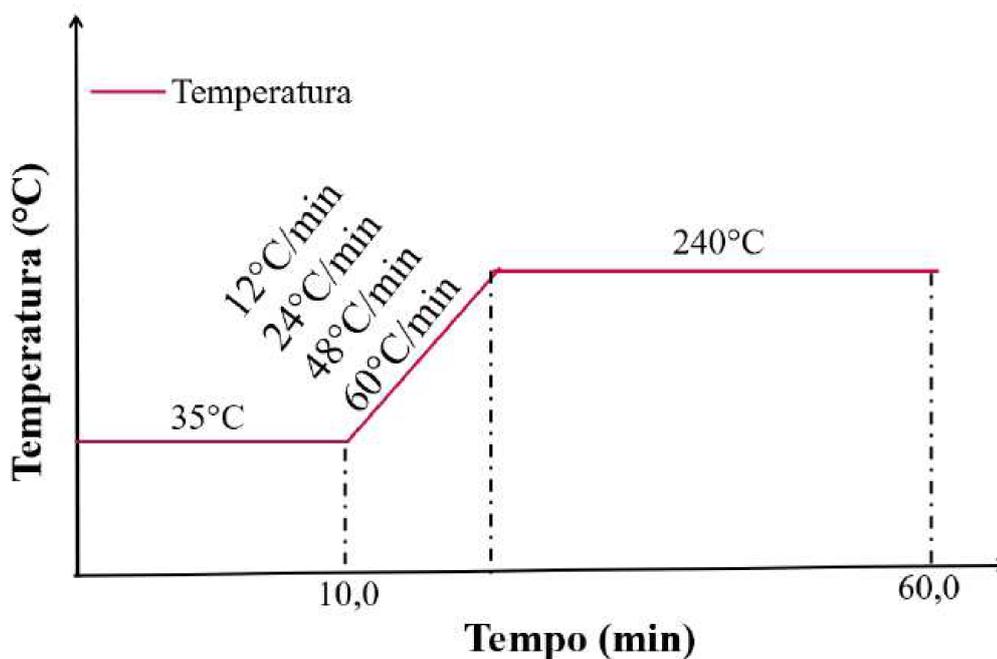


Figura 3.10 – Representação da variação da temperatura do forno (SILVA, 2021).

A temperatura do injetor deve ser suficientemente elevada para permitir rápida vaporização da amostra, porém é necessário cuidado para evitar a decomposição dos analitos. Geralmente, é utilizado uma temperatura no injetor de 50°C acima da temperatura de ebulição do composto menos volátil. A Tabela a seguir (Tabela 3.2) apresenta principais as temperaturas de ebulição de cada substância em análise por este método. Diante disto, foi utilizado uma temperatura constante de 200°C durante toda a análise, esta temperatura é capaz de vaporizar as substâncias em estudo (SILVA, 2021).

Tabela 3.2 – Temperatura de ebulição das substâncias em análise (adaptado de SILVA, 2021).

Analito	Temperatura de ebulição (°C)
H ₂	-153
N ₂	-196
CO	-192
O ₂	-183
CO ₂	-78,5
CH ₄	-162
C ₂ H ₂	-84
C ₂ H ₄	-104
C ₂ H ₆	-89
C ₃ H ₄ (propino)	-23,2
C ₃ H ₄ (propadieno)	-34,4
C ₃ H ₆	-47,6
C ₃ H ₈	-42,0
<i>iso</i> -C ₄ H ₁₀	-11,7
<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	-1,00

A programação de pressão foi avaliada primeiramente para os gases oxigênio e nitrogênio, pelo fato de terem tempos de retenção muito próximos, a separação deles é mais crítica. Inicialmente, foram avaliadas as pressões de 12, 14, 16, 18, 20, 25, 32 e 50 kPa para os compostos gases citados. Posteriormente, foi avaliado a separação dos hidrocarbonetos C₃H₆ e C₃H₈, na melhor pressão estimada para os gases oxigênio e nitrogênio. Consequentemente, para obter melhor separação e diminuir o tempo de análise para os hidrocarbonetos C₃H₆ e C₃H₈, foram testadas diferentes programações de pressão (16-50, 16-60, 16-70, 16-80, 16-90, 16-100, 16-125, 16-150 e 16-175 kPa) a uma taxa de 12 kPa por minuto, permanecendo 120 minutos na pressão final. Para escolher a melhor programação foi avaliada a separação cromatográfica dos hidrocarbonetos, assim como o tempo de retenção de cada composto. Em seguida, foi feita uma mistura dos demais hidrocarbonetos (C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₄ (propino), C₃H₄ (propadieno), C₃H₆, C₃H₈, *n*-C₄H₁₀ e *iso*-C₄H₁₀), e também avaliada a influência de diferentes inclinações de pressão (16-90, 16-100, 16-125, 16-150, 16-175 kPa), a uma taxa de 12 kPa min⁻¹. Sucessivamente, foi estabelecida a melhor pressão para a separação dos compostos (O₂, N₂, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₄ (propino), C₃H₄ (propadieno), C₃H₆, C₃H₈, *n*-C₄H₁₀ e *iso*-C₄H₁₀). Na sequência, foram testadas diferentes taxas de pressão 12, 24, 48 e 60 kPa por minuto, o gráfico da Figura 3.10 representa a variação da pressão em função do tempo, posteriormente ao representado, a pressão permaneceu durante 120 minutos nesta pressão final (SILVA, 2021).

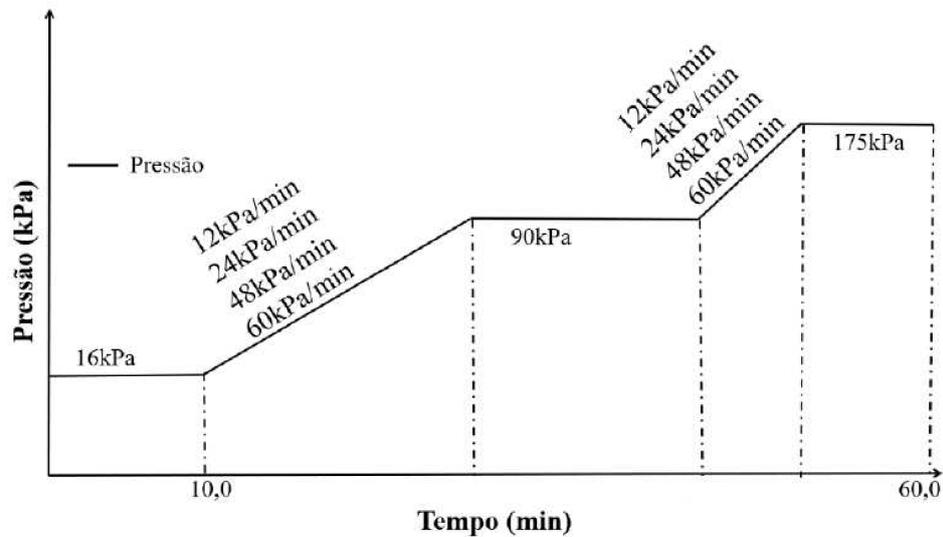


Figura 3.11 – Representação da taxa de pressão (SILVA, 2021).

3.2 Desenvolvimento de modelagem e código computacional

Para desenvolvimento de algoritmo foi utilizado um software, para facilitar cálculos termodinâmicos e simulações da aplicação do gás de síntese no Ciclo Otto para a geração de energia, considerando um processo politrópico.

3.2.1 Escolha de motogeradores para simulação

A Fig. 3.12 apresenta os principais grupos motogeradores da MWM, e alguns os dados técnicos. Conforme descrito na revisão bibliográfica, os motores MWM foram escolhidos pela escala, pois são motores relativamente menores, devido à baixa vazão da planta da Fazenda Pirapitinga, não foi possível simular motores de maior escala. Dos motores descritos, foram utilizados para simulação os modelos 229-3 N e o 229-4 N, descritos na Figura 3.12.

Linha: 60 Hz / Regiões Não Emissionadas					Potência Mecânica Bruta		Potência Elétrica*	
Família	Modelo	Configuração	Aspiração	Sistema de Injeção	Prime	Standby	Prime	Standby
Série 229	229-3 N	3 Cilindros	Natural	Mecânico	45cv (33kW) @1800rpm	50cv (37kW) @1780rpm	35kVA	39kVA
Série 229	229-4 N	4 Cilindros	Natural	Mecânico	60cv (44kW) @1800rpm	66cv (49kW) @1780rpm	47kVA	51kVA
Série MS	MS 3.9 N	4 Cilindros	Natural	Mecânico	61cv (45kW) @1800rpm	67cv (49kW) @1780rpm	51kVA	53kVA
Série 10	4.10 N	4 Cilindros	Natural	Mecânico	73cv (54kW) @1800rpm	80cv (59kW) @1780rpm	57kVA	62kVA
Série MS	MS 3.9 T	4 Cilindros	Turbo	Mecânico	82cv (60kW) @1800rpm	90cv (66kW) @1780rpm	68kVA	72kVA
Série 229	229-6 N	6 Cilindros	Natural	Mecânico	90cv (66kW) @1800rpm	99cv (73kW) @1780rpm	71kVA	78kVA
Série 229	229-6 N	6 Cilindros	Natural	Mecânico	95cv (70kW) @1800rpm	104cv (77kW) @1780rpm	74kVA	82kVA
Série 229	229-4 T	4 Cilindros	Turbo	Mecânico	96cv (71kW) @1820rpm	106cv (78kW) @1800rpm	75kVA	83kVA
Série MS	MS 4.1 TCA	4 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	121cv (89kW) @1800rpm	133cv (98kW) @1780rpm	100kVA	108kVA
Série 10	4.10 T	4 Cilindros	Turbo	Mecânico	125cv (92kW) @1800rpm	137cv (101kW) @1780rpm	98kVA	108kVA
Série 229	229-6 T	6 Cilindros	Turbo	Mecânico	125cv (92kW) @1800rpm	137cv (101kW) @1780rpm	98kVA	108kVA
Série 10	4.10 TCA	4 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	134cv (98kW) @1800rpm	147cv (108kW) @1780rpm	105kVA	116kVA
Série 12	4.12 T	4 Cilindros	Turbo	Mecânico	146cv (107kW) @1820rpm	160cv (118kW) @1800rpm	114kVA	125kVA
Série 10	6.10 T	6 Cilindros	Turbo	Mecânico	164cv (120kW) @1800rpm	180cv (132kW) @1780rpm	129kVA	142kVA
Série 12	4.12 TCA	4 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	177cv (130kW) @1820rpm	194cv (143kW) @1800rpm	136kVA	150kVA
Série 10	6.10 TCA	6 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	195cv (143kW) @1800rpm	215cv (158kW) @1780rpm	154kVA	170kVA
Série 12	6.12 TCA	6 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	267cv (196,5kW) @1820rpm	294cv (216,2kW) @1800rpm	220kVA	245kVA
Série 12	6.12 TCA	6 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	289cv (212kW) @1820rpm	318cv (233kW) @1800rpm	228kVA	250kVA
Série 12	6.12 TCA	6 Cilindros	Aftercooler	Mecânico	300cv (220,5kW) @1820rpm	330cv (242,6kW) @1800rpm	234kVA	260kVA
Série 12	6.12 TCE	6 Cilindros	Aftercooler	Common Rail	374cv (275kW) @1800rpm	415cv (305kW) @1800rpm	283kVA	315kVA

* Potência elétrica (kVA) orientativa, pois depende da eficiência do alternador e grupo gerador e da instalação/montagem realizada pelo cliente.

Figura 3.12 – Principais grupos motogeradores MWM (MWM, 2022).

Especificações do Gerador		Unidade	Descrições		
Classe de Regulação			ISO8528		
Frequência		Hz	60		
Fator de Potência			0,8		
Tensão Trifásica		Vca	220 / 127 - 380 / 220 - 440 / 254		
Regime de Operação			Stand-By	Prime	COP
Potência no Regime de Operação		kVA / kW	80 / 64	72 / 58	64 / 51
Consumo ± 5%		Nm³/h	24	22,2	20,3
Bateria			12V - 95Ah - 750CCA		
Especificações do Motor		Unidade	Descrições		
Modelo			4.12TCEG-G		
Fabricante			MWM		
Aplicação			Estacionário		
Rotação		rpm	1800		
Configuração			04 Tempos / 04 Cilindros em linha		
Diâmetro x Curso		mm	105 x 137		
Tipo de Aspiração / Sistema de Injeção			Turbo Aftercooler / Eletrônico		
Taxa de Compressão			12:01		
Alternador do Carregamento de Bateria		A	90		
Especificação de Motor de Partida		Vcc - kW	12 - 3,3		
Sistema de Refrigeração			Água + Ar + Sistema de Ventilação Soprante		
Cap. Total do Líquido Refrigerante		l	18		
Especificação do Líquido Refrigerante			Havoline Xtended Life Premix 50/50		
Especificação de óleo Lubrificante			SAE 15W40 / API CI-4 / ACEA E7-08		
Cap.de lts de óleo Lubrificante com filtro		l	10		
Interv. para Subst. do filtro de óleo lub.		h	250		
Resistência de Pré Aquecimento			1000W - Aplicável apenas para geradores automáticos		

Figura 3.13 – Ficha técnica dos motores MWM modelo 229 (MWM, 2022).

3.2.2 Modelagem do código computacional

Para a modelagem do código, o primeiro passo foi coletar as informações técnicas dos possíveis motores e inserir no software. A segunda parte foi definir o estado termodinâmico nos quatro pontos de um motor ciclo Otto de acordo com Çengel, comentados na Figura 2.06 e 2.07 do referencial bibliográfico. No ponto 1, primeiramente foi inserido uma pressão de 0,9 bar, valor levemente inferior a pressão atmosférica, pois os modelos simulados trabalham com aspiração natural, também foi considerado uma temperatura média de entrada da mistura ar combustível no motor de 60°C, com esses dados foi calculado pelo software os dados do estado termodinâmico no ponto 1 relevantes para a simulação, esses dados foram: energia interna, entropia e volume específico.

No ponto 2 foi utilizado a taxa de compressão do motor para cálculo do volume específico e, ainda de acordo com Çengel, foram utilizadas as equações do processo politrópico, descritos no tópico 2.3.4 do referencial para calcular a pressão e a temperatura. Da mesma forma do ponto 1, foram calculados energia interna e entropia pelo software.

No ponto 3, o volume específico é igual ao volume específico do ponto 2, pois o pistão ainda está no PMS, e a temperatura neste ponto é a temperatura adiabática de chama do gás, pois a mistura ar/combustível entra em combustão. Com estes valores é calculado o calor produzido durante a combustão com as diferenças de energia interna entre os pontos 2 e 3, e são calculados os valores de energia interna, pressão e entropia.

No ponto 4 o volume específico é igual ao do ponto 1, o pistão está no PMI, a pressão e a temperatura são calculadas utilizando a equação do processo politrópico e a equação geral dos gases com constante politrópica ($k=1,3$). Através destes valores energia interna e entropia são calculadas pelo software.

A terceira parte foi aplicar a primeira lei da termodinâmica para calcular o calor na fase de exaustão, entre os pontos 4 e 1, feito isso, aplicar a primeira lei da termodinâmica e as equações do processo politrópico, para calcular os trabalhos de expansão e compressão e o calor na compressão. Com esses cálculos é possível calcular o calor e trabalhos de entrada e saída no ciclo. Com os valores acima é possível aplicar a equação do trabalho líquido, calcular a PME (Pressão Média Efetiva) do motor e a potência mecânica. Com esses valores e os dados de análise química do biogás (poder calorífico inferior e relação ar/ combustível e o fator de potência do motor), foi possível calcular a eficiência da combustão, a eficiência

termodinâmica (comentada no tópico 2.3.2 do referencial bibliográfico), e a vazão volumétrica exigida para execução do processo, e a potência elétrica produzida pelo motogerador.

3.3 Método para aferição de vazão

Para simulação de utilização do biogás nos ciclos de potência, foi necessário aferir a capacidade de vazão da planta. A medição foi feita na Fazenda Pirapitinga no dia 19 de agosto de 2023. Foi medido o diâmetro do duto utilizando um paquímetro, a velocidade de vazão do biogás com um anemômetro digital HM-312, que também mede temperatura e o comprimento de trecho retilíneo do duto com uma trena, conforme a Figura 3.14.



Figura 3.14 – Medições e aparelhos utilizados para cálculo de vazão no queimador do biodigestor da Fazenda Pirapitinga.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos conforme os procedimentos apresentados no Capítulo III: Nessa seção, será apresentado os resultados das análises químicas experimentais sobre o biogás do biodigestor da fazenda Pirapitinga. Os resultados de medição de vazão, os resultados dos cálculos termodinâmicos, e simulações realizadas para aplicação do gás de síntese em ciclos de potência a gás para a geração de energia com o algoritmo desenvolvido.

4.1 Resultados da análise química do biogás

Da análise química do biogás, utilizando o método de cromatografia gasosa descrito na metodologia, com novas curvas de calibração desenvolvidas no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia UFU. Os resultados estão resumidos na Tabela 4.1. Nesta análise foi utilizado 1 mL (1000 μ L) do biogás coletado na Fazenda Pirapitinga, dos resultados desta amostra, representados em forma de gráfico na Figura 4.1, estes valores estão de acordo com o que foi descrito na revisão bibliográfica. A massa específica ou densidade do biogás foi de 1,0 kg/m³, o poder calorífico inferior de 20620 kJ/kg, relação mássica de mistura ar combustível de 7,578, e temperatura adiabática de chama de 2018°C.

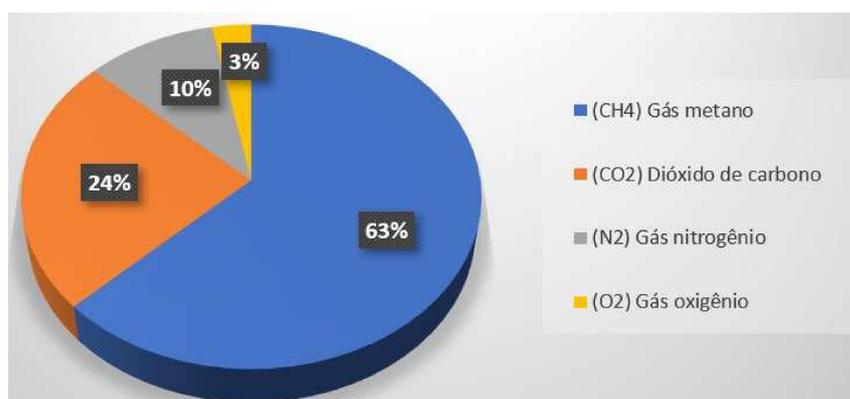


Figura 4.1 – Composição química do biogás da Fazenda Pirapitinga reconhecida.

Tabela 4.1 – Resultados da análise cromatográfica do biogás da fazenda Pirapitinga.

Análito	Abrev.	Vol. [μ L]	n [mol]	[%]	PCI	20620	kJ/kg
Metano	CH4	568,70	1,552E-06	62,9%	Densidade	1,00	kg/m ³
Oxigênio	O2	27,13	7,403E-08	3,0%	Temp. de chama	2018	°C
Nitrogênio	N2	90,84	2,478E-07	10,0%	Rel. Ar/Syngas	7,578	kg/kg
Monóxido de carb.	CO	0,00	0,000E+00	0,0%	Temp. Syngas	25	°C
Dióxido de carb.	CO2	218,10	5,949E-07	24,1%	Temp. Fumos	300	°C
TOTAL		904,77	2,469E-06	100,0%	Energia	20,22	MJ
					Wobbe	24,9	MJ/Nm ³

4.2 Resultados de vazão volumétrica do biogás

A vazão volumétrica aferida no queimador da Fazenda Pirapitinga foi de 7,229 L/s ou 26,02 m³/h. Para o cálculo de vazão foi considerado o diâmetro interno do duto 58 mm, e a velocidade média entre os valores medidos anemômetro, que foram 9,7 e 10,0 km/h durante o processo a temperatura do biogás era 24,0 °C.



Figura 4.2 – Imagens das medições de velocidades e temperatura realizadas pelo anemômetro.

4.3 Resultados do algoritmo desenvolvido

Para a modelagem do primeiro código foi utilizado os dois menores motores fornecidos pela MWM modelo N229, de aspiração natural conforme as Figuras 3.12 e 3.13, com 3 e 4 cilindros, com fator de potência de 0,8 e que quando utilizados com uma frequência de 1800 rpm fornece potências elétricas de 35 e 47 kW. Foram selecionados estes motores devido a vazão volumétrica do biogás da Fazenda Pirapitinga ser pequena, os valores de entrada de dados estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tabela com valores de entrada do sistema motogerador e do biogás.

Dados de entrada	Valores
Taxa de compressão do motor	12
Número de cilindros	3
Diâmetro dos pistões	105 mm
Curso dos pistões	137 mm
Potência de referência	35 kW
Frequência (rotação do motor)	1800 rpm
Fator de potência	0,8
Constante politrópica	1,3
Relação ar/combustível	7,578
Poder calorífico	20620 kJ/kg
Massa específica	1,0 kg/m ³

4.3.1 Algoritmo desenvolvido

Foi desenvolvido um algoritmo conforme descrito no tópico 3.2.3, da metodologia, utilizando os dados do motor N229 com 3 cilindros, e posteriormente para o motor N229 com 4 cilindros. O Algoritmo foi desenvolvido, primeiramente utilizando o motor com 3 cilindros, e desenvolvido para funcionar conforme o fluxograma da figura abaixo (Figura 4.3), o fluxograma representa um escopo do modelo simplificado:

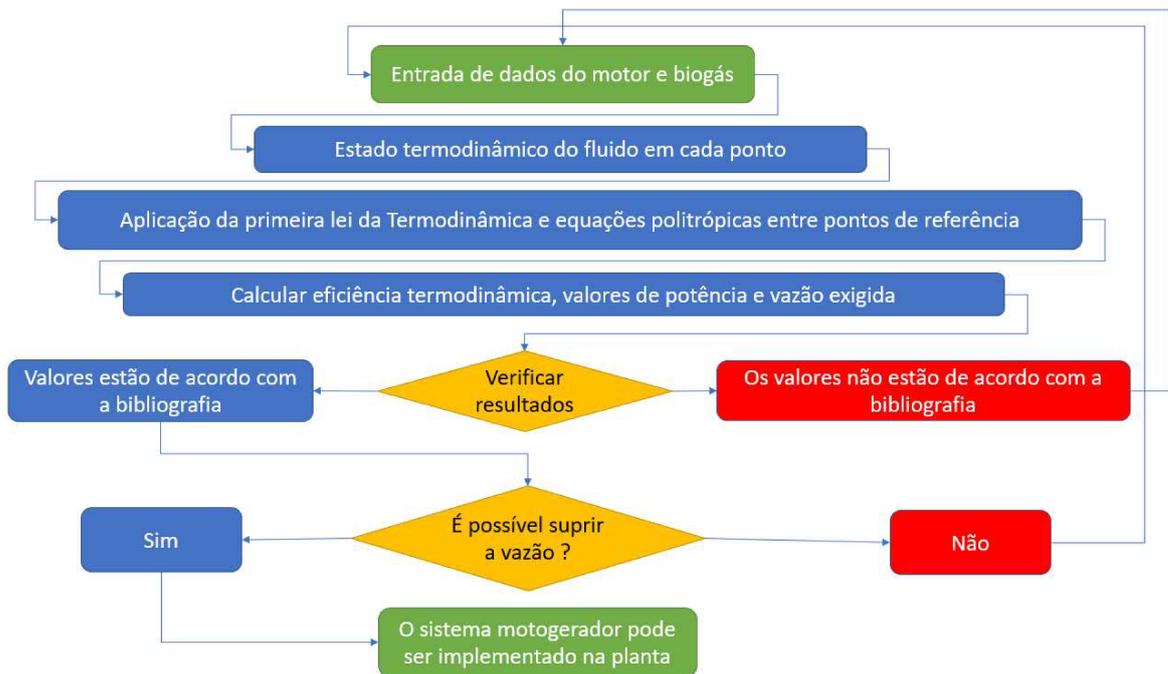


Figura 4.3 – Fluxograma de funcionamento e tomadas de decisões de acordo com os resultados do software.

4.3.2 Definição de pontos do ciclo de potência de acordo com as propriedades termodinâmicas.

Com os pontos 1 a 4 definidos foi gerado uma tabela com as principais propriedades termodinâmicas em cada ponto Tabela 4.3, e os gráficos P-v (Pressão volume-específico) e T-s (Temperatura-entropia) nas Figuras 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3 – Tabela com as principais propriedades termodinâmicas nos pontos de 1 ao 4.

	Pressão [kPa]	Temp. [K]	vol. esp. [m ³ /kg]	energ. int. [kJ/kg]	entropia [kJ/kg.K]
[1]	90,0	333,2	1,06200	238,1	5,841
[2]	2276,0	702,1	0,08854	514,3	5,682
[3]	7427,0	2291,0	0,08854	1961,0	6,736
[4]	293,7	1087,0	1,06200	834,4	6,757

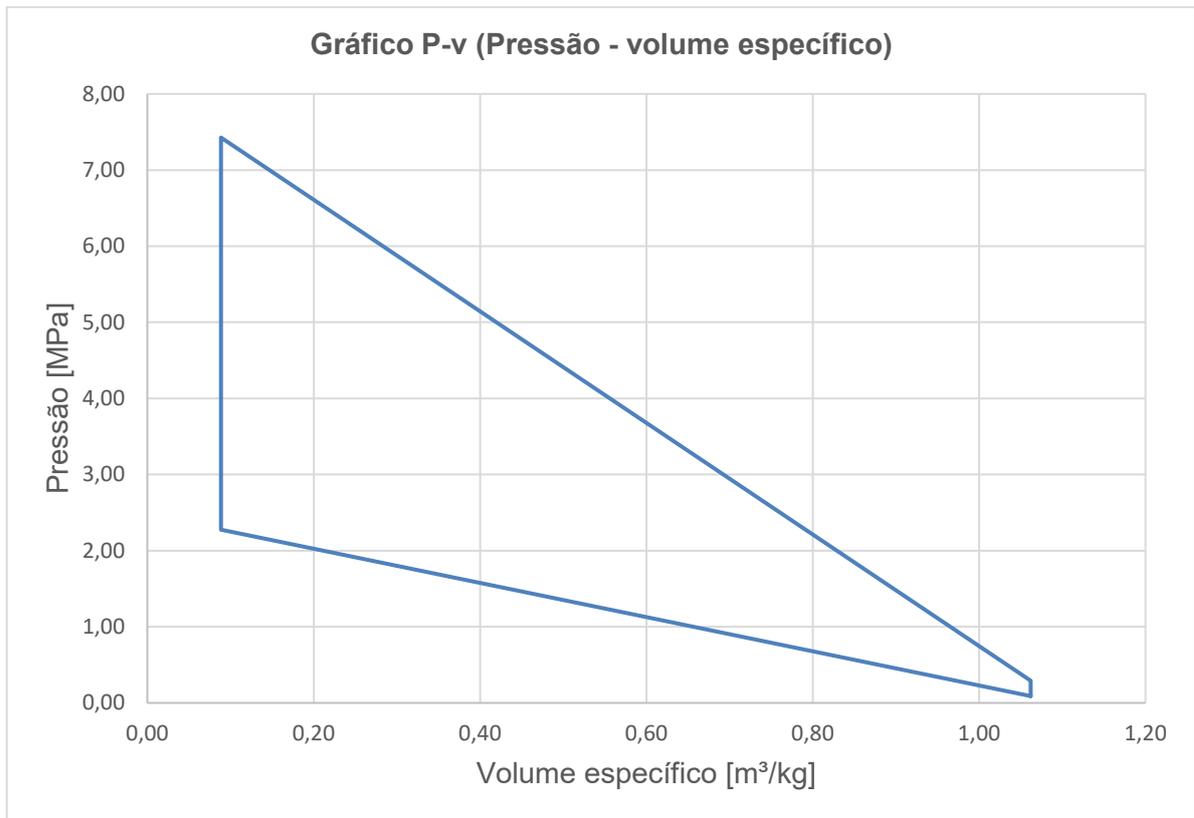


Figura 4.4 – Gráfico P-v (Pressão – volume específico).

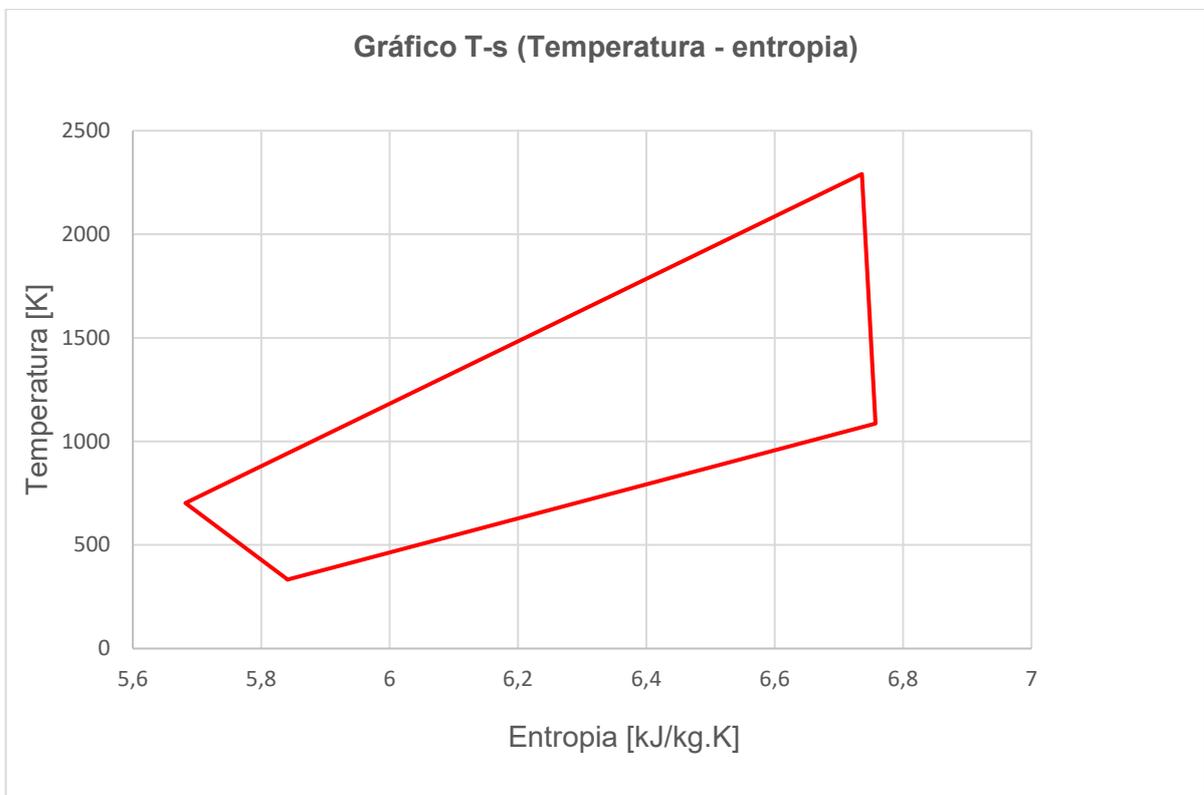


Figura 4.5 – Gráfico T-s (Temperatura – entropia).

O algoritmo foi desenvolvido no software: *Engineerig Equation Solver* na versão *Limited Academic Version*, conforme descrito no t3pico 3.2.2 da metodologia, da seguinte forma:

{Dados de entrada do motor e biog3s, conforme Fig. 2.7 e Tab. 4.2}

$$TC=12$$

$$N=3$$

$$d=0,105$$

$$S=0,137$$

$$Vc=S*\pi*d^2/4$$

$$Rot=1800/60$$

$$Fp=0,8$$

$$k=1,3$$

$$R=7,578$$

$$PCI=20620$$

$$\rho=1,0$$

{Ponto 1}

$$P[1]=90$$

$$T[1]=60+273,15$$

$$u[1]=\text{IntEnergy}(\text{Air}; T=T[1])$$

$$v[1]=\text{Volume}(\text{Air}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$s[1]=\text{Entropy}(\text{Air}; T=T[1]; P=P[1])$$

{Ponto 2}

$$TC=v[1]/v[2]$$

$$P[1]*v[1]^k=P[2]*v[2]^k$$

$$P[1]*v[1]/T[1]=P[2]*v[2]/T[2]$$

$$u[2]=\text{IntEnergy}(\text{Air}; T=T[2])$$

$$s[2]=\text{Entropy}(\text{Air}; v=v[2]; u=u[2])$$

{Ponto 3}

$$v[3]=v[2]$$

$$T[3]=2018+273,15 \text{ \{Temperatura de chama\}}$$

$$u[3]=\text{IntEnergy}(\text{Air}; T=T[3])$$

$$P[3]=\text{Pressure}(\text{Air}; v=v[3]; u=u[3])$$

$$s[3]=\text{Entropy}(\text{Air}; v=v[3]; u=u[3])$$

{Ponto 4}

$$v[4]=v[1]$$

$$P[3]*v[3]^k=P[4]*v[4]^k$$

$$P[3]*v[3]/T[3]=P[4]*v[4]/T[4]$$

$$u[4]=\text{IntEnergy}(\text{Air}; T=T[4])$$

$$s[4]=\text{Entropy}(\text{Air}; v=v[4]; u=u[4])$$

{Primeira lei da Termodinâmica entre os pontos 4 e 1}

$$Q_{41}+u[4]=u[1]$$

{Primeira lei da Termodinâmica e equação politrópica entre os pontos 1 e 2}

$$W_c=(P[2]*v[2]-P[1]*v[1])/(1-k)$$

$$Q_c+u[1]=u[2]+W_c$$

{Primeira lei da Termodinâmica entre os pontos 2 e 3}

$$Q_{23}+u[2]=u[3]$$

{Primeira lei da Termodinâmica e equação politrópica entre os pontos 3 e 4}

$$W_e=(P[4]*v[4]-P[3]*v[3])/(1-k)$$

$$Q_e+u[3]=u[4]+W_e$$

{Cálculo de trabalho líquido e PME}

$$Q_H=Q_e+Q_{23}$$

$$Q_L=Q_c+Q_{41}$$

$$W_{\text{liq}}=Q_H+Q_L$$

$$PME=W_{\text{liq}}/(v[4]-v[3])$$

{Cálculo da potência no motor}

$$W_{\text{dot}}=0,5*PME*V_c*N*Rot$$

{Cálculo de eficiências, vazão mínima exigida e potência elétrica produzida}

$$R=m_{\text{ar}}/m_{\text{comb}}$$

$$m_t=m_{\text{ar}}+m_{\text{comb}}$$

$$W_{\text{dot}}=m_t*W_{\text{liq}}$$

$$\text{Eff}_{\text{Termo}}=100*(W_{\text{liq}}/Q_H)$$

$$\text{Eff}_{\text{comb}}=100*(Q_H*m_t)/(m_{\text{comb}}*PCI)$$

$$V_{\text{comb}}=(m_{\text{comb}}/\rho)*1000$$

$$WGE=W_{\text{dot}}*F_p$$

Tabela 4.4 – Resultados obtidos pelos cálculos do algoritmo com valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.

Dados de saída	Valores
Volume unitário dos cilindros	1186 cm ³
Trabalho líquido	798,9 kJ/kg
Pressão média efetiva	820,3 kPa
Potência mecânica	43,79 kW
Eficiência termodinâmica	54,27 %
Vazão de combustível	6,39 L/s
Potência elétrica produzida	35,03 kW

4.3.3 Discussão dos resultados do algoritmo

Conforme os valores obtidos pelo algoritmo (Tabela 4.4), a potência elétrica produzida pelo motogerador foi de 35,03 kW, e está de acordo com a potência elétrica indicada pelo fabricante, que para o motor de 3 cilindros operando a 1800 rpm é de 35 kW, e a vazão volumétrica de biogás exigida pelo motor nessas condições é de 6,39 L/s, o que é possível nas limitações da Fazenda Pirapitinga, como descrito no tópico 4.2 dos resultados, a vazão volumétrica máxima do biogás no queimador é de 7,229 L/s.

Feito isso, o algoritmo foi reajustado para um motor com 4 cilindros, como o modelo dos dois motores são o mesmo, e a única característica construtiva que irá influenciar no cálculo é o acréscimo de um cilindro, as únicas variações no algoritmo foram: o número de cilindros e a potência elétrica indicada pelo fabricante. A potência elétrica produzida por este motogerador operando nas mesmas condições da primeira simulação, de acordo com o fabricante é de 47 kW. De acordo com os resultados do algoritmo, a potência elétrica produzida pelo motogerador foi de 46,71 kW, resultado que novamente está de acordo com a potência elétrica fornecida pelo fabricante. Porém, a vazão mínima exigida pelo biogás neste caso foi de 8,52 L/s, esta vazão está acima das limitações do biodigestor da Fazenda Pirapitinga, portanto, não é possível utilizar o motor de 4 cilindros na planta da fazenda.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos pelos cálculos do algoritmo com todos os valores termodinâmicos associados do motor de 4 cilindros.

Dados de saída	Valores
Volume unitário dos cilindros	1186 cm ³
Trabalho líquido	798,9 kJ/kg
Pressão média efetiva	820,3 kPa
Potência mecânica	58,39 kW
Eficiência termodinâmica	54,27 %
Vazão de combustível	8,52 L/s
Potência elétrica produzida	46,71 kW

4.3.4 Análise de incertezas na simulação do processo politrópico

Finalizando o capítulo de resultados, foi feita uma análise de incertezas na simulação do processo politrópico. Os valores da constante politrópica, temperatura e pressão de admissão foram adicionadas ao algoritmo sem uma base experimental, pois o trabalho feito até aqui foi uma simulação, portanto, esses valores carregam uma incerteza. Neste tópico serão analisados e discutidos a variação destes parâmetros de incerteza (constante politrópica, temperatura e pressão de admissão) e os resultados de vazão volumétrica e potência elétrica do motogerador do motor de 3 cilindros, de acordo com a variação dos parâmetros descritos.

O primeiro parâmetro alterado foi a constante politrópica, descrito no tópico 2.3.4 do referencial bibliográfico. E de acordo com o algoritmo, a potência elétrica produzida alterou significativamente, foi notável que quanto menor o valor de k , entre os valores de 1,1 até 1,4, maior foi a potência produzida pelo motogerador, já vazão volumétrica exigida não sofreu alteração com a variação da constante. A justificativa para estes resultados vem da Equação 2.02, pois valor de k depende das propriedades termodinâmicas do fluido, onde o valor desta constante, depende da pressão, volume específico e do índice politrópico, os resultados estão detalhados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Tabela paramétrica com resultados obtidos pelo algoritmo através da variação da constante politrópica considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.

	k	Vol. Comb [L/s]	WGE [kW]
[1]	1,1	6,39	51,62
[2]	1,2	6,39	42,97
[3]	1,3	6,39	35,03
[4]	1,4	6,39	24,57

O segundo parâmetro alterado foi a temperatura de admissão, que de acordo com o algoritmo, a variação da temperatura afetou levemente a vazão a potência produzida, com o aumento da temperatura de 40 até 60°C, o sistema perdeu aproximadamente 9% de potência produzida, e a vazão mínima exigida diminuiu levemente, aproximadamente 6% com o aumento da temperatura. Quanto menor a temperatura de admissão, maior será a massa de ar/combustível na câmara de combustão, e conseqüentemente mais energia durante a combustão. Os gráficos dos resultados estão detalhados nas Figuras 4.7 e 4.8.

Figura 4.7 – Gráfico com resultados de potência elétrica produzida obtido pelo algoritmo através da variação da temperatura de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.

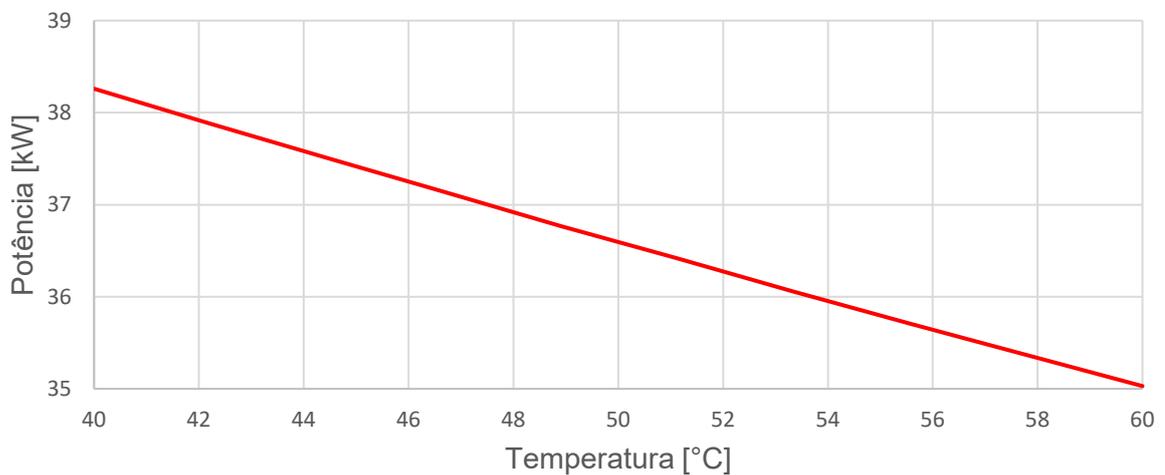
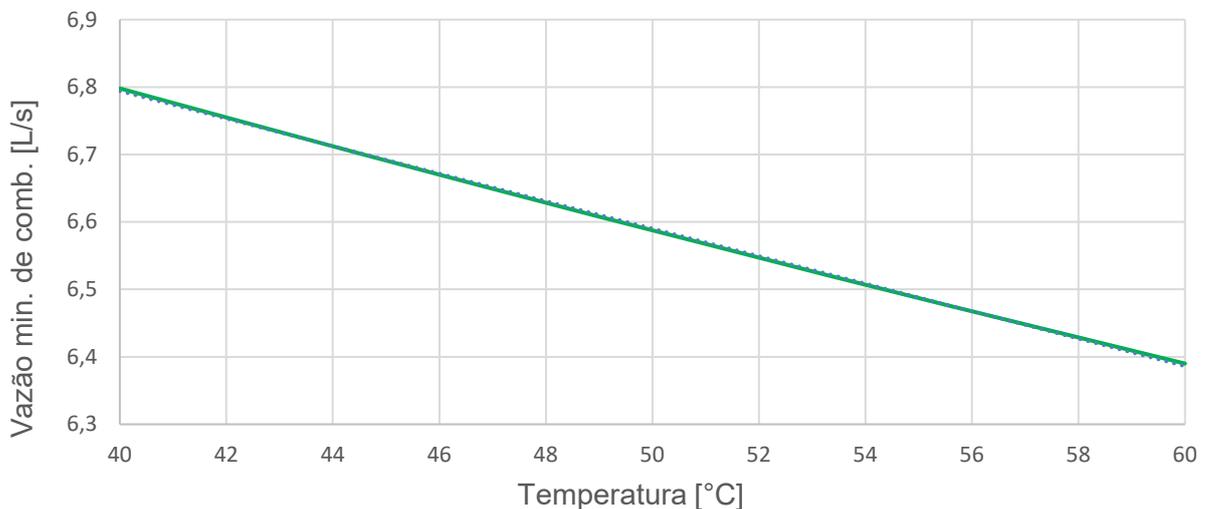


Figura 4.8 – Gráfico com resultados de vazão mínima exigida obtidos pelo algoritmo através da variação da temperatura de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.



E por último foi analisado a pressão de admissão, a pressão foi variada de 0,9 até 1,0 bar, pois a pressão de admissão de um motor aspirado deve ser menor do que a pressão atmosférica. De acordo com o algoritmo, quanto maior a pressão de admissão, maior a potência produzida pelo motogerador, e maior a vazão volumétrica exigida. A potência produzida aumentou e conseqüentemente a vazão de combustível exigida aumentaram em aproximadamente 11% com a variação da pressão de admissão. A justificativa para estes resultados é que quanto menor a pressão menor é a densidade do ar atmosférico, menor é a quantidade de oxigênio aspirada pelo motor, a consequência disso é uma variação de energia menor durante a combustão. Os gráficos dos resultados estão detalhados na Figura 4.7.

Figura 4.9 – Gráfico com resultados de vazão de combustível obtido pelo algoritmo através da variação da pressão de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.

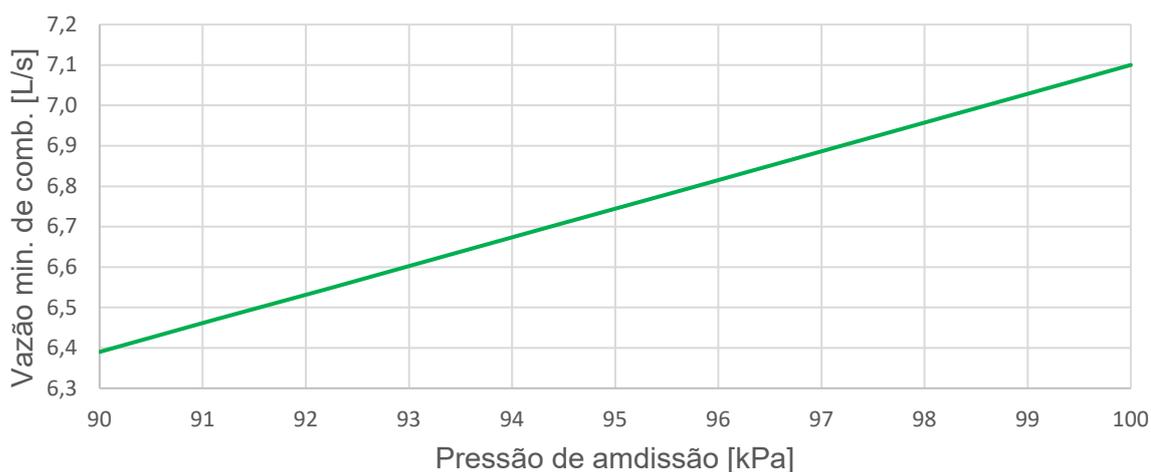
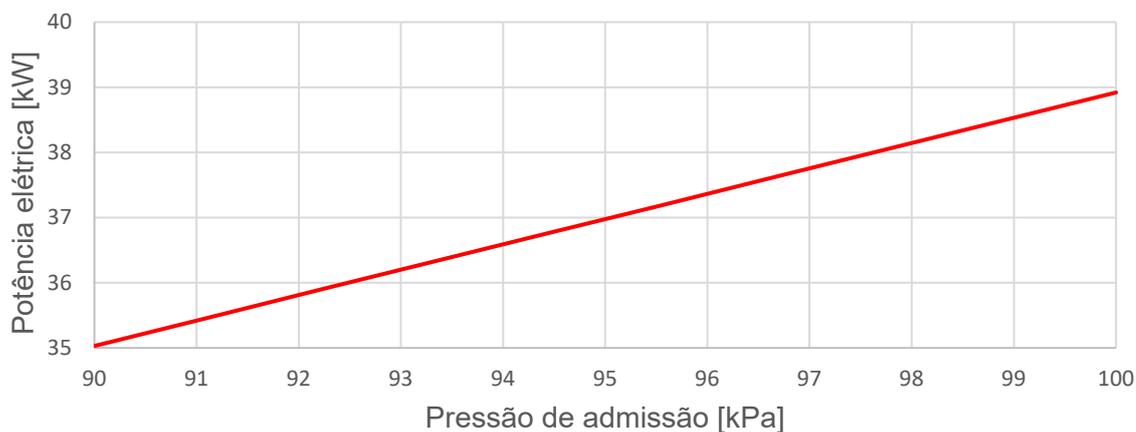


Figura 4.10 – Gráfico com resultados de potência elétrica obtidos pelo algoritmo através da variação da pressão de admissão considerando os valores termodinâmicos associados do motor de 3 cilindros.



4.3.5 Aplicação do biogás como fonte de calor, no método *flare*.

Além do projeto de para geração de energia, o biogás também foi utilizado para como fonte de calor no método *flare*, conforme apresentado na Figura 2.5. Os fogões e um torrador movido a gás butano foram adaptados para utilizar o biogás.



Figura 4.11 – Fogões adaptados para o uso do biogás da Fazenda Pirapitinga.



Figura 4.12 – Chama dos fogões adaptados para o uso do biogás.



Figura 4.13 – Torrador de soja adaptados para o uso do biogás.

Os fogões adaptados, apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9, são utilizados para cozinhar alimentos da fazenda sem a necessidade de usar o gás de cozinha, sendo movidos somente pelo biogás. O torrador era originalmente um torrador de café, movido a gás de cozinha (butano) e foi adaptado para utilizar somente o biogás da fazenda e para torrar soja, pois, a soja torrada aumenta a produção de leite das vacas leiteiras, Figura 4.10.

4.3.6 Discussão dos resultados obtidos em relação aos objetivos do trabalho

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um projeto de aproveitamento do biogás proveniente do biodigestor da Fazenda Pirapitinga. Considerando as limitações da fazenda, para geração de energia, analisando a melhor aplicação do biogás nos ciclos de potência e sua viabilidade técnica e econômica. Para execução deste trabalho e conceber um método de aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica. Foi necessário um estudo sobre o tema, o melhor ciclo de potência a gás para aplicação do biogás para geração de energia foi o ciclo Otto. Devido as suas dimensões, baixo custo em relação à aplicação dos outros ciclos e eficiência térmica. A primeiro plano foi considerado a aplicação de um ciclo Rankine, porém devido à baixa eficiência térmica, altos custos de implementação o sistema foi considerado inviável para a aplicação.

Foi coletado uma amostra do biogás da fazenda e levado para o Laboratório de Transferência de Calor e Massa da FEMEC (Faculdade de Engenharia Mecânica) da Universidade Federal de Uberlândia, e realizado uma análise química, através do método de cromatografia gasosa, dos compostos contidos no biogás, sendo possível compreender 90,48% da composição do biogás. Feito isso, foi feito um estudo de mercado sobre sistemas de motores e geradores movidos a biogás. E por fim, desenvolvimento de algoritmo para aferir

a capacidade de produção de energia elétrica de acordo com a vazão do biogás da fazenda, e uma discussão sobre a viabilidade econômica da aplicação do biogás em cenários de interesse ao projeto em que insere o trabalho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi buscado o entendimento do biogás produzido na Fazenda Pirapitinga para aplicação de processos de melhoria, a maior parte deste gás é proveniente de dejetos de vacas leiteiras. Após um estudo geral sobre biodigestores, foi feita uma análise química do biogás para compreender sua composição desenvolver cálculos estequiométricos, cálculo de poder calorífico inferior, densidade e temperatura adiabática de chama deste gás, e posteriormente o desenvolvimento de uma modelagem termodinâmica, para dimensionamento e aplicação do biogás no processo de combustão em motores ciclo Otto, com o intuito de conceber um método para geração de energia elétrica considerando as limitações da fazenda. Os principais resultados da modelagem para contribuição deste trabalho, foi o dimensionamento de um sistema motogerador para a planta, determinando vazão volumétrica mínima de biogás exigida e a potência elétrica possível de ser produzida por este sistema.

5.1.1 Viabilidade econômica de aplicação do biogás para geração de energia.

No final deste trabalho é esperado uma resposta quanto análise da viabilidade econômica da aplicação do biogás para geração de energia. O consumo energético da Fazenda Pirapitinga durante o desenvolvimento deste trabalho foi de aproximadamente 2000 kWh por mês. A concessionária que fornece eletricidade para a fazenda não faz pagamentos diretos pela energia produzida na fazenda, então o que pode ser feito é enviar a energia produzida para a rede e receber créditos (descontos) sobre a energia enviada. Por exemplo, se a fazenda produzir 2500 kWh por mês e gastar 2000 kWh, os 2000 kWh serão descontados e a fazenda terá um crédito de 500 kWh com a concessionária que pode ser utilizado em outro local ou no próximo mês, porém a concessionária não paga diretamente a fazenda nenhum valor.

Levando em consideração as regras da concessionária e o motor possível de ser utilizado nas condições da planta (motor MWM de 3 cilindros) modelado no algoritmo, este motor poderia suprir a demanda mensal da fazenda operando 20 dias por mês, durante 3 horas por dia. Nestas condições descritas, a aplicação do motor é extremamente viável, porém o sistema motogerador ainda não foi instalado na fazenda devido ao seu alto custo inicial, e a falta de dados sobre a vida útil do motor e a dificuldade de manutenção.

O custo inicial deste motor é de aproximadamente 100 mil reais, e o fabricante dos motores fornece garantia do motor somente durante 1 ano e não fornece dados sobre a vida útil do motor, por exemplo, a quantidade média de horas em que este motor pode rodar até precisar de uma retífica ou algo do tipo. De acordo com as considerações descritas neste tópico e considerando o valor do kWh de 0,87 reais, seria necessário aproximadamente 5 anos para o retorno do valor (*payback*) de compra do sistema motogerador. Esses foram os principais motivos que desmotivaram os produtores da Fazenda Pirapitinga a comprar o motogerador MWM.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A contribuição científica deste trabalho consiste no melhor entendimento do biogás e biodigestores aplicados derivados de bovinos, pois a maioria dos trabalhos nessa área são referentes a suínos. Suas particularidades, propriedades termodinâmicas, e sua aplicação em ciclos de potência a gás com a finalidade de geração de energia elétrica. Este estudo tem sua importância justificada no Capítulo I sob a perspectiva de cooperar com pesquisas relacionadas, desenvolver uma ponte entre a universidade, indústria de motogeradores e o produtor rural.

Dessa forma, para continuação e desenvolvimento de linhas de pesquisas ligadas a esta área, sugere-se as seguintes alternativas:

- Realização de parcerias com fabricantes e/ou desenvolvedores de equipamentos de geração de energia elétrica, possibilitando possíveis estudos sobre desgastes de materiais, corrosão e vida útil destes motores.
- Um estudo aprofundado sobre as substâncias desconhecidas nos sistemas de biogás bovinos, de acordo com as bibliografias este gás possui quantidade significativa de

ácido sulfídrico, ácido com alto índice de corrosão de metais, e que influencia diretamente na vida útil destes motores.

- Pesquisa e desenvolvimento de uma planta padrão para construção de biodigestores com motogeradores dimensionados para pequenos produtores rurais, beneficiando o produtor rural das diversas formas justificadas no Capítulo I.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 166, de 24 Julho de 2017. Disponível em: <http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/2721567/RDC_166_2017_COMP.pdf/d5fb92b3-6c6b-4130-8670-4e3263763401>. Acessado em: 17 julho, 2023.

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

ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. De L.; PIRES, O. P. J.; BARUFI, C. R. V. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. Revista Científica Eletrônica De Agronomia, Garças, ano 1, n. 2, 2002.

AZEVEDO, H. L. de S.; Biodigestores anaeróbios como alternativa tecnológica para produtores e cooperativas rurais. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis – Instituto Federal de Educação e Ciências e Tecnologias de Goiás, Goiânia, 2021.

BARRERA, Paulo. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993.

BIAGIOLI, B. Características fermentativas e econômicas da produção de biogás utilizando dejetos de cabras leiteiras. 2013. 54 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal. 2013.

BÓCOLI, M. E.; MANTOVANI, J. R.; MIRANDA, J. M.; MARQUES, D. J.; SILVA, A. B. Soil chemical properties and maize yield under application of pig slurry biofertilizer. Revista

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 42-48, Jan. 2016.

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p42-48>

BRITO, N. M.; JUNIOR, O. P. A.; POLESE, L.; RIBEIRO, M. L. Validação de métodos analíticos: estratégia e discussão. Pesticidas: R.Ecotoxicol. e Meio Ambiente, Curitiba, v. 13, p. 129-146, 2003. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/pesticidas/article/viewFile/3173/2546>>. Acessado em: 17 Julho, 2023.

<https://doi.org/10.5380/pes.v13i0.3173>

CARDOSO, A de L.; DALPAZ, R; FOCKING, A. M.; NASCIMENTO, F. M do; PASSAGIA, R. C.; ROTH, J. C. C; Proposta de otimização para um sistema de geração de biogás de uma propriedade rural do município de Espumoso-RS. Revista Brasileira de Energias Renováveis. UERS, Rio Grande do Sul-RS, 2019.

CASTANHO, Diego Solak, et. al. Biodigestores. In: VI semana de tecnologia em alimentos. UTFPR. Ponta Grossa. Paraná, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.: Thermodynamics: An Engineering Approach. Ed. McGraw-Hill: Boston, 7ª ed. 2011.

COLLINS, C. H., BRAGA, G. L., BONATO, P. S. Fundamentos de Cromatografia. Ed. Unicamp. p. 17-18; 204-105. Campinas, 2007.

COMASTRI FILHO, J. A. BIOGÁS: Independência Energética do Pantanal Mato-grossense, EMBRAPA. UEPAE, Corumbá-MS, nº 9, out. 1981.

DEGANUTTI, R., PALHACI, M. C. J. P., ROSSI, M., TAVARES, R., SANTOS, C. Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. FEAGRI. Faculdade de Engenharia Agrícola de São Paulo, São Paulo, 2002.

DIAS, J. W. C. Bolsas de amostragem de tedlar com válvula de polipropileno. Manual de operação. Energética Qualidade do Ar. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://www.energetica.ind.br/wp-content/uploads/2016/01/env1_manual-bolsas-tedlar_rev-00.pdf />. Acessado em: 11 Julho, 2023.

ESPERANCINI, M. S. T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A.E.B.; SIMONE, J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do estado de São Paulo. *Revista de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 110-118, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100004>

FERREIRA, M. A. M.; ABRANTES, L. A.; PEREZ, R. Investigação de grupos estratégicos na indústria de laticínios por meio da abordagem multivariada. *Revista de Administração Mackenzi*, São Paulo, v. 9, n. 2, 2008.

<https://doi.org/10.1590/S1678-69712008000200008>

GASPAR, R. M. A. B. L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR. 2003. 119 f. Dissertação (Engenharia de Produção) – UFSC, Santa Catarina. 2003.

GOOGLE PATENTS. Dual fuel method and system. 2003. Disponível em: < <http://www.google.com/patents/US6591817>>. Acesso em 10 nov. 2023.

[https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(03\)00634-5](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(03)00634-5)

GUANDALIM, A.; CHAVES, C. B. M. Parâmetros de qualidade do leite cru resfriado comercializado no Sudoeste do Paraná. 51 f. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Paraná, 2014.

HAGE, D. S., CARR, J.D. *Química Analítica e Análise Quantitativa*. Tradução: Midori Yamamoto; revisão técnica: Edilson Wendler. 1ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

HARRIS, D. C. *Análise Química Quantitativa*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro. DOQ-CGCRE-008: Orientação sobre validação de métodos analíticos: Documento de caráter Orientativo. Disponível em: < <http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/>>. Acessado em: 17 julho, 2023.

JENBACHER. Motores alternativos movidos à gás Jenbacher. Disponível em <<https://oakenergia.com.br/blog/author/drdiego/>>. Acesso em: 22 abril. 2023.

LIMA, D. R. S. Biodigestores, como funcionam, suas aplicações e benefícios. Artigo Oak Energia, Disponível em <<https://oakenergia.com.br/blog/author/drdiego/>>. Acesso em: 24 Nov. 2021.

MACHADO, N. S. Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás produzido na fermentação de dejetos suínos para utilização em motores de combustão interna para geração de energia elétrica. Tese de doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, MG, 2010.

MASSOTI, Zemiro. Viabilidade técnica e econômica do biogás a nível de propriedade. Epagri. Concórdia-SC, 2009

MATOS, C. F. Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MEDEIROS, P. T. Cromatografia Gasosa. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1782138/>>. Acessado em: 14 Julho, 2023.

MITZLAFF, K. V. Engines for biogas: theory, modification, economic operation. Braunschweig: Vieweg, 1988.

MOURA, J. P. Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor. 2012. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

MWM. Catálogo de grupos geradores a gás MWM. Disponível em: <<https://www.geradoresmwm.com.br/gerador-gas/#>>. Acesso em 26 Outubro, 2022.

ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J.; ORRICO JÚNIOR, M. A. P. Caracterização e biodigestão anaeróbia dos dejetos de caprinos. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 639-647, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400006>

PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de Energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto Residencial da USP – estudo de caso. 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

POINT, G. D. Um breve histórico e descrição do uso da cromatografia gasosa como ferramenta analítica para a determinação de hidrocarbonetos de petróleo. Disponível em: <<https://gia.org.br/portal/um-breve-historico-e-descricao-do-uso-da-cromatografia-gasosa-como-ferramenta-analitica-para-a-determinacao-de-hidrocarbonetos-de-petroleo/>>. Acessado em: 12 Julho, 2023.

REIS, Antônio Junqueira. Potencial energético e fertilizante do lixo. Folha de São Paulo, 12 nov. 1991. Caderno Regional – Nordeste.

RIBANI, M.; BOTTOLI, C. B. G.; COLLINS, C. H.; JARDIM, I. C. S. S. Validação em métodos cromatográficos e eletroforeticos. Química Nova. v. 5, p. 771-780, 2004.

<https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500017>

RIBEIRO, D. S. Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida. Holos, [S.l.], v. 1, p. 49-56, mar. 2011. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<http://www.etfrn.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/269>>. Acesso em: 28 Agosto, 2021.

<https://doi.org/10.15628/holos.2011.269>

RODRIGUES, J. P.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JUNIOR, M. A. P.; SENO, L. O.; ARAÚJO, L. C.; SUNADA, N. S. Adição de óleo e lipase sobre a biodigestão anaeróbia de dejetos suínos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 544-547, Mar. 2014.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300025>

SANTANA, L. E.; CINTRA, L. M. L.; A biodigestão como solução para a destinação dos resíduos do setor pecuarista. *Revista da Ciência da Administração*, v.6, 2012.

SANTOS, M. V. dos, Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização: estudo de caso. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté-SP – 2016.

SEIXAS, Jorge, et al. Construção e funcionamento de biodigestores. Brasília: EMBRAPA - DID, 1980. EMBRAPA-CPAC. Circular técnica.

SILVA, V. M. da; Desenvolvimento e validação de método cromatográfico para determinação de gases sintetizados a partir de combustível urbano gerado durante o processo de pirólise. Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia – MG. 2021.

SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P.; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. A.; MAGNONI JÚNIOR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. Química Nova, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012a.

<https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000100007>

SGANZERLA, Edílio. Biodigestores: uma solução. Porto Alegre. Agropecuária, 1983.

SKOOG, D. A.; HOLLER, J; NIEMAN, T. Princípios de Análise Instrumental. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

SKOOG, WEST, HOLLER, CROUCH. Fundamentos de Química Analítica. 8ª ed. norte-americana, Editora Thomson, São Paulo - SP, 2008.

SOUZA, J. Desempenho de um motor de combustão interna ciclo Otto operando com gás natural e Biogás. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola. UNIOESTE, Cascavel - PR. 2004

SUPELCO. GC Column Selection Guide. Achieve optimal Method Performance. Disponível em: <<https://market.mikro-polo.si/files/mikropolo/dodatno/brosure/SU-24079.pdf>>. Acessado em: 15 Julho, 2023.

TAYLOR, C. F. Análise dos motores de combustão interna. Edgard Blucher: São Paulo, 1971.

WALKER, E. Estudo da viabilidade econômica na utilização de biomassa como fonte de energia renovável na produção de biogás em propriedades rurais, Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, 2009.