

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS -
CAMPUS ARCos
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Felipe Fernandes Lopes

**CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO INDIANO E
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE BAIXO CUSTO PARA
DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANO DO BIOGÁS**

Arcos
2021

FELIPE FERNANDES LOPES

**CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO INDIANO E
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE BAIXO CUSTO PARA
DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANO DO BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do *Campus Arcos* do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), como requisito parcial para aprovação na disciplina Trabalho Acadêmico Integrador X e obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Reginaldo Gonçalves Leão Junior

Arcos
2021

L864c Lopes, Felipe Fernandes.

Construção de biodigestor anaeróbico indiano e desenvolvimento de metodologia de baixo custo para determinação da concentração de metano do biogás / Felipe Fernandes Lopes. – 2021.

56f.: il.

Orientador: Reginaldo Gonçalves Leão Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus Avançado Arcos*, 2021.

1. Biogás.
 2. Biodigestor.
 3. Análise.
- I. Lopes, Felipe Fernandes.
II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus Avançado Arcos*.
III. Título.

CDD 621.3

Catalogação: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÉNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

Campus Avançado Arcos

Direção Geral

Diretoria de Ensino

Departamento de Engenharia

Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG
3733515173 - www.ifmg.edu.br

**Ata da 1ª Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de
Bacharelado em Engenharia Mecânica do IFMG - Arcos, realizada
em 24 de maio de 2021**

Aos **vinte e quatro de maio de dois mil e vinte e um**, às oito horas e trinta minutos, se reuniu virtualmente a banca composta por Prof. Dr. Reginaldo Gonçalves Leão Junior (orientador), Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Arcos; Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio, Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Arcos; Prof. Me. Rafael Vinícius Tayette da Nóbrega, Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Formiga e Prof. Me. Diego Luis Izidoro Silva, Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Formiga; para avaliar o trabalho intitulado **"CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO INDIANO E
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE BAIXO CUSTO PARA DETERMINAÇÃO
DA CONCENTRAÇÃO DE METANO DO BIOGÁS."**, apresentado pelo aluno Felipe Fernandes Lopes, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica. Após apresentação e arguição, emitiu-se o parecer **APROVADO**, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. Para fins de registro na disciplina Trabalho Acadêmico Integrador X, a banca avaliadora emite, em consenso, o conceito final **93,3**. Nada mais havendo a tratar a defesa foi encerrada às onze horas e eu, Reginaldo Gonçalves Leão Junior, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os avaliadores.

Arcos, 24 de maio de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo Goncalves Leao Junior, Professor**, em 24/05/2021, às 10:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Carrasco Carpio, Professor**, em 24/05/2021, às 11:05, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Diego Luis Izidoro Silva, Professor**, em 24/05/2021, às 11:13, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Vinicius Tayette da Nobrega, Professor**, em 24/05/2021, às 11:43, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **0837595** e o código CRC **386F4FC3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me possibilitar percorrer esta jornada com saúde.

Ao professor e orientador Reginaldo Gonçalves Leão, por sua disponibilidade e imensurável contribuição ao desenvolvimento do trabalho.

Ao meu irmão Willian pelo grande incentivo e ajuda, o qual foi extremamente importante.

A Igor Loschi e as empresas Asja Energy e Embaré, pelo apoio logístico.

A minha família, amigos e uma certa outra pessoa, que me apoiaram e não deixaram que eu desistisse.

Ao meu amigo Leonardo, pelo café.

MUITO OBRIGADO.

RESUMO

O presente trabalho descreve o processo de construção de um biodigestor anaeróbico do tipo indiano e o desenvolvimento de uma proposta de metodologia de baixo custo para análise da concentração de metano no biogás. A construção foi conduzida com baixo orçamento, com objetivo de acelerar o retorno do investimento. Foram inseridos elementos de filtragem para remoção de odor e resíduos sólidos, uma coluna de limalha de ferro oxidada para remoção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e um dreno para eliminação de condensado. A produção de biogás foi avaliada quantitativamente e qualitativamente, pela medição da capacidade de produção em volume e pela proposta de um sistema de medição da concentração de metano, baseado em um conjunto de câmaras de diluição e sensores resistivos de baixo custo. Foram realizadas análises de amostras do biogás produzido tanto pelo protótipo de sistema de diluição construído, quanto por dispositivos comerciais certificados, para a obtenção de dados. Diferentes metodologias para a interpretação dos dados foram avaliadas e desenvolvidas, a que demonstrou maior compatibilidade com os sensores utilizados foi uma metodologia inovadora, baseada na modelagem matemática do comportamento dos sensores. A validação desta abordagem requer a aquisição de dados experimentais adicionais, para a devida análise de incertezas. A construção do biodigestor resultou em benefícios econômicos, ao substituir o uso do gás derivado de petróleo, proporcionando o retorno do investimento em 19 meses. E benefícios ambientais, pela conversão dos dejetos da criação de gado na propriedade em biofertilizante, e a consequente redução da emissão de metano para a atmosfera.

Palavras-chave: Biogás. Biodigestor. Análise.

ABSTRACT

The present work describes the process of construction of a Indian biodigester with biogas production destined to domestic use and the development of a low-cost methodology for analyzing the methane concentration in biogas. The construction was carried out on a low budget, aiming to accelerate the payback. Filter elements were inserted to remove odor and solid residues, a column of oxidized iron filings to remove H_2S and a drain to eliminate condensate. The biogas production was assessed both quantitatively and qualitatively. By measuring volume production capacity and proposing a methane concentration measurement system, based on a set of low cost resistive sensors and dilution chambers. To obtain data analyzes of samples of the biogas produced were carried out by both the built dilution system prototype and by certified commercial devices . Different methodologies for data interpretation were evaluated and developed, the one that showed the greatest compatibility with the sensors used was an innovative methodology based on mathematical modeling of the sensors' behavior. The validation of this approach requires the acquisition of additional experimental data. The construction of the biodigester resulted in economic benefits, by replacing the use of gas derived from petroleum, providing a return on investment in 19 months. And environmental benefits, by converting the waste from cattle raising on the property into biofertilizer, and the consequent reduction of methane emissions into the atmosphere.

Keywords: Biogas. Biodigester. Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Certificado de apresentação	13
Figura 2 – Esquematização do modelo indiano.	15
Figura 3 – Esquematização do modelo chinês.	15
Figura 4 – Esquema MQ4	18
Figura 5 – Dimensões das placas	19
Figura 6 – Dimensões da caixa de descarga	20
Figura 7 – Esquematização	21
Figura 8 – Biodigestor construído	21
Figura 9 – Modelagem tridimensional da câmara de fermentação	22
Figura 10 – Filtro primário	22
Figura 11 – Filtro secundário	23
Figura 12 – Dreno	23
Figura 13 – Diagrama do processamento da biomassa	24
Figura 14 – Esquematização do sistema (cotas em centímetros)	25
Figura 15 – Dimensões da campânula (cotas em centímetros)	26
Figura 16 – Parametrização	26
Figura 17 – Diagrama de Nelson-Obert	28
Figura 18 – Câmara de expansão	30
Figura 19 – Câmara de amostragem	30
Figura 20 – Sistema de testes	31
Figura 21 – Primeira análise externa	32
Figura 22 – Segunda análise externa	33
Figura 23 – Terceira análise externa	33
Figura 24 – Tensão em função da concentração	35
Figura 25 – Características sensitivas do sensor MQ4	36
Figura 26 – Variação do volume armazenado de biogás	39
Figura 27 – Análise interna 1	40
Figura 28 – Análise interna 2	41
Figura 29 – Análise interna 3	42
Figura 30 – Análise interna 4	43
Figura 31 – Dados experimentais	43
Figura 32 – Características sensitivas do sensor MQ4	45
Figura 33 – Ajustes dos dados experimentais	46
Figura 34 – Normalização da leitura analógica	47
Figura 35 – Correlação por método	50
Figura 36 – Fluxograma para implementação de tecnologia embarcada	52
Figura 37 – Modelo e esquematização do dispositivo proposto	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações MQ4	18
Tabela 2 – Materiais	24
Tabela 3 – Dados por composição	28
Tabela 4 – Propriedades dos gases	29
Tabela 5 – Materiais	31
Tabela 6 – Etapas do algoritmo de SA	38
Tabela 7 – Dados de deslocamento da campânula	39
Tabela 8 – Resultados da primeira análise externa	40
Tabela 9 – Resultado análise externa 3	41
Tabela 10 – Resultados por tensão	44
Tabela 11 – Resultados por resistência	46
Tabela 12 – Parâmetros dos ajustes	47
Tabela 13 – Resultados normalizados	48
Tabela 14 – Concentrações de metano estimadas	48
Tabela 15 – Resultados obtidos pela metaheurística	49
Tabela 16 – Previsões por Regression Learner	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	12
1.3	Estrutura do trabalho	12
1.4	Apresentação em congresso	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Biogás	14
2.2	Biodigestores	14
2.2.1	Intermitentes	14
2.3	Métodos de purificação	16
2.3.1	<i>Coluna de limalha de ferro oxidada</i>	16
2.3.2	<i>Water Scrubbing</i>	16
2.3.3	<i>Pressure Swing Adsorption</i>	17
2.4	Técnicas de medição de concentração de CH_4	17
2.5	Sensores semicondutivos e potencialidades de utilização para a medição.	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Construção do biodigestor	19
3.2	Processamento do biogás	21
3.3	Custos de construção	24
3.4	Análise da capacidade de produção do biodigestor	24
3.5	Análise da concentração de metano no biogás	27
3.5.1	<i>Projeto das câmaras</i>	30
3.5.2	<i>Aquisição de dados</i>	32
3.5.2.1	Primeira análise externa - 21/02/2020	32
3.5.2.2	Segunda e terceira análises externas - 11/09/2020 ; 08/11/2020	33
3.5.2.3	Quarta análise externa - 09/11/2020	34
3.5.3	<i>Interpretação do sinal</i>	34
3.5.3.1	Método baseado na tensão	34
3.5.3.2	Método baseado na resistência	35
3.5.3.3	Método baseado na modelagem matemática do sinal analógico	36
3.5.3.4	Método baseado em metaheurística	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Capacidade de produção volumétrica	39

4.2	Dados experimentais	40
4.3	Retorno do investimento	44
4.4	Métodos de interpretação do sinal	44
4.4.1	<i>Método baseado na tensão</i>	44
4.4.2	<i>Método baseado na resistência</i>	45
4.4.3	<i>Método baseado na modelagem matemática do sinal analógico</i>	46
4.4.4	<i>Método baseado em metaheurística</i>	48
4.4.5	<i>Regression Learner</i>	49
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	51
	Referências	53

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial demanda um crescimento das matrizes energéticas, ao passo em que os efeitos ambientais negativos decorrentes da utilização de combustíveis fósseis se agravam. Estes dois fenômenos resultam no aumento da importância das chamadas fontes renováveis de energia, tais como a energia solar, eólica, biomassa dentre outras (MARIANI, 2018).

Os dejetos gerados em ambientes de criação de animais, sob algumas condições, liberam para a atmosfera gases como dióxido de carbono e metano que contribuem para o efeito estufa, mas que no caso do metano, também possui potencial energético para utilização como combustível (SANTOS, 2016). Para o aproveitamento da energia contida nos dejetos foram desenvolvidos reatores, que por meio da biodigestão anaeróbica, produzem biogás, utilizado tanto para geração de calor quanto de energia elétrica por meio de conjuntos motogeradores.

Os reatores nos quais ocorre a produção de biogás são chamados biodigestores, uma tecnologia bastante difundida nas áreas rurais de Índia e China, mas ainda pouco utilizada nas áreas rurais brasileiras (MARIANI, 2018). Diferentes tipos matérias orgânicas podem ser utilizadas para a produção de biogás, em pequenas propriedades rurais se destacam como mais utilizadas os dejetos animais (BARBOSA; LANGER, 2011).

A composição química do biogás pode variar significativamente conforme as condições de produção e processamento, com a finalidade de homogenizar sua qualidade, existem diversos métodos de purificação que são utilizados para eliminar os componentes inertes, aumentando a concentração de metano e por conseguinte o potencial energético do gás (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Para determinar o potencial energético do biogás gerado em determinadas condições, verificar suas possíveis aplicações, acompanhar as variações de sua qualidade ao longo do tempo e também para aferir a efetividade e a necessidade de métodos de purificação é necessário determinar a composição do biogás. Para isto existem equipamentos fixos e portáteis disponíveis no mercado, entretanto o custo elevado destes equipamentos tornam sua utilização inviável para pequenas propriedades rurais, nas quais os custos dos equipamentos superam consideravelmente o custo total da construção do biodigestor.

1.1 Justificativa

Tendo em vista os benefícios ambientais e econômicos obtidos pela utilização dos biodigestores no aproveitamento energético de dejetos orgânicos rurais, dentre eles a redução de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, com prevalência do metano (CH_4), a produção de biofertilizantes e principalmente a substituição de combustíveis derivados de fontes fósseis pelo biogás (MARIANI, 2018). Assim, o presente trabalho se justifica pois aplica a tecnologia de geração de biogás em um pequena propriedade rural, proporcionando a substituição do gás derivado de petróleo para o uso doméstico. Além disso propõe o desenvolvimento de uma

metodologia para a análise da concentração de metano no biogás com base em sensores de baixo custo, como uma alternativa aos dispositivos comerciais disponíveis no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a construção de um biodigestor anaeróbico indiano de médio porte para a obtenção de biogás com qualidade adequada para utilização doméstica, além do desenvolvimento de uma metodologia para análise da concentração de metano do biogás obtido através de um sistema de baixo custo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Revisar a literatura acerca da construção de biodigestores;
2. Construir um biodigestor indiano com capacidade para $3\ m^3$ de biogás;
3. Condicionar o biogás para utilização doméstica;
4. Desenvolver uma metodologia para a análise do biogás produzido, utilizando sensores semicondutivos;

1.3 Estrutura do trabalho

A introdução deste trabalho destaca os benefícios que podem ser obtidos pela conversão de dejetos orgânicos em biogás. Além de discutir as aplicações da análise da composição do biogás e a dificuldade de acesso a tecnologias relacionadas.

O Capítulo 2 introduz brevemente alguns dos conceitos básicos para o entendimento do trabalho, como o processo de produção do biogás, métodos de purificação e as metodologias de análise.

O Capítulo 3 descreve a metodologia implementada para a construção do biodigestor, conduzida com orçamento reduzido. Apresenta a análise da capacidade de produção em volume de biogás, desenvolvida a partir das características do biodigestor construído. Detalha o desenvolvimento de uma metodologia de análise da concentração de metano no biogás, baseada em um sistema de diluição e em sensores semicondutivos de baixo custo. Aborda os diferentes métodos para a interpretação do sinal externado pelos sensores, incluindo métodos inovadores propostos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das análises conduzidas, incluindo o cálculo do tempo de retorno do investimento. Discute e compara os resultados obtidos pelos diferentes métodos de interpretação de sinal, indicando uma abordagem para implementação.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões extraídas dos resultados obtidos, além de fornecer sugestões para trabalhos futuros.

1.4 Apresentação em congresso

Resultados parciais deste trabalho foram apresentado no congresso ENCIT de 2020, na modalidade de *poster*. O título do *paper* foi "*Proposal for a new methodological approach to measure the concentration of methane in biogas using a low-cost sensor*", o certificado de apresentação é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Certificado de apresentação



Fonte: ABCM

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Biogás

O biogás é o resultado da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos de origens diversas, sendo considerado uma fonte renovável de energia. É composto por uma mistura de gases, predominantemente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). De acordo com Souza (2006) os primeiros estudos científicos acerca da digestão anaeróbica de resíduos agrícolas datam de 1808. A primeira instalação destinada à produzir gás combustível foi construída na Índia em 1857, e após isto os biodigestores se disseminaram por aquele país. Enquanto na China o biogás se desenvolveu no meio rural como fonte de energia para cozimento de alimentos e iluminação doméstica (SOUZA, 2006) (SEIXAS; FOLLE; MARCHETTI, 1981).

A composição do biogás varia conforme a matéria orgânica utilizada e o processo de biodigestão, sendo que o metano corresponde a algo entre 20 a 80% e o dióxido de carbono 20 a 60% (em base volumétrica) (SANTOS, 2016). Além disso o biogás geralmente contém entre 0,3 a 2% de H_2S , traços de hidrogênio e também nitrogênio (COELHO; VELÁZQUEZ; SILVA et al., 2006).

A geração de biogás no interior do biodigestor se dá pela biodigestão, que ocorre em quatro etapas, a saber (CHERNICHARO et al., 1997):

- Hidrólise: Bactérias fermentativas reduzem os compostos orgânicos complexos a orgânicos simples.
- Acidogênese: Bactérias fermentativas reduzem os compostos orgânicos simples a ácidos.
- Acetogênese: Bactérias acetogênicas formam acetatos a partir dos ácidos.
- Metanogênese: Arqueas metanogênicas formam biogás a partir dos acetatos.

2.2 Biodigestores

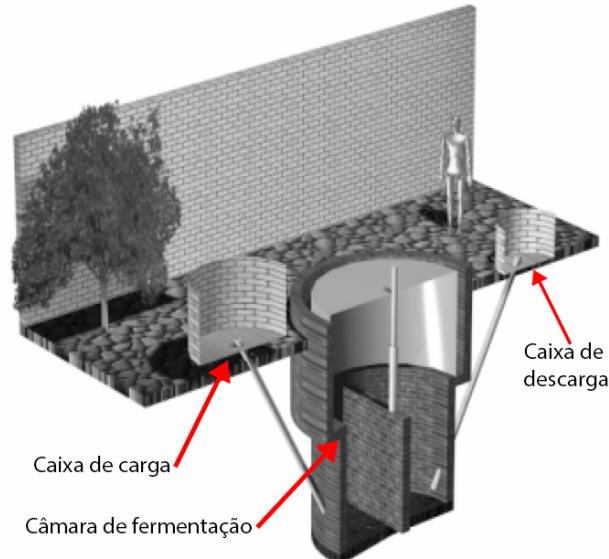
Os reatores desenvolvidos para geração de biogás pela digestão anaeróbica de matéria orgânica são denominados biodigestores, e podem ser caracterizados como intermitentes ou contínuos.

2.2.1 *Intermitentes*

Os biodigestores intermitentes retêm a matéria orgânica por um tempo determinado, de forma que toda a biomassa seja decomposta, sendo a alimentação periódica (FERNANDES et al., 2012). Dentre os modelos de biodigestores intermitentes se destacam o modelo indiano e o modelo chinês, por serem mais utilizados. O modelo indiano conta com uma caixa de carga, uma caixa de descarga e uma câmara de fermentação, sendo suas principais características a campânula que é responsável por manter a pressão do gás constante e a parede central responsável por

promover a movimentação da matéria orgânica no interior da câmara de fermentação, conforme ilustrado na Figura 2 (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI et al., 2002).

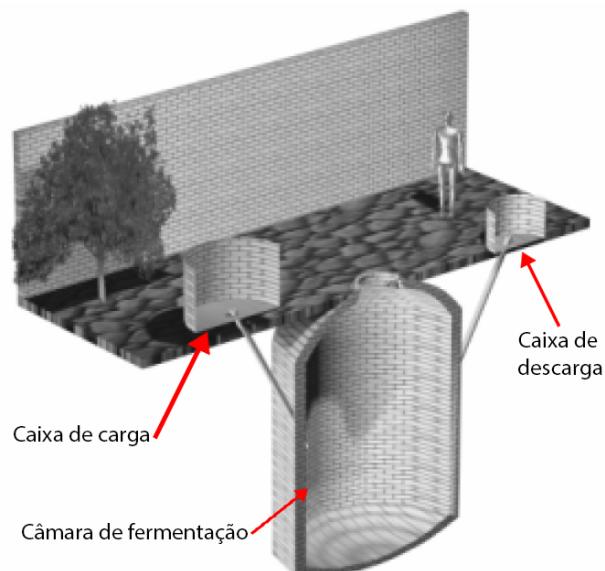
Figura 2 – Esquematização do modelo indiano.



Fonte: Adaptado (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI et al., 2002)

Na Figura 3 é apresentado o modelo chinês, que conta com uma caixa de carga, uma caixa de descarga e uma câmara de fermentação, seu princípio de funcionamento é a movimentação da matéria orgânica por gradientes de pressão na câmara de fermentação causados pelo acúmulo de biogás (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI et al., 2002).

Figura 3 – Esquematização do modelo chinês.



Fonte: Adaptado (DEGANUTTI; PALHACI; ROSSI et al., 2002)

Apesar de não serem incluídos no escopo deste trabalho, deve-se mencionar os biodigestores contínuos, que de acordo com Fernandes et al. (2012) apresentam um volume de matéria

orgânica constante durante todo o período de operação, sendo que todas as variações de volume na entrada implicam em variações de volume na saída.

2.3 Métodos de purificação

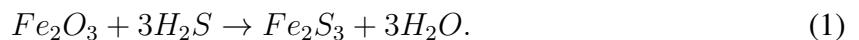
Diante da grande variedade de contaminantes presentes no biogás bruto, foram desenvolvidos métodos de limpeza e purificação, responsáveis por eliminar ou neutralizar os contaminantes, aumentando a concentração de metano e reduzindo efeitos indesejados como a corrosão de tubulações e componentes internos de conjuntos motogeradores pelo H_2S (SANTOS, 2016).

Conforme Souza e Schaeffer (2010) o biogás purificado com um percentual de 90% de metano adquire propriedades similares às do GNV (Gás Natural Veicular), com o diferencial de ser um combustível obtido de fonte renovável, sendo este gás denominado biometano. De acordo com Santos (2016) 1 m^3 de biometano equivale energeticamente à 0,6 dm^3 de gasolina.

Alguns dos principais métodos de purificação do biogás são descritos nas subseções a seguir.

2.3.1 Coluna de limalha de ferro oxidada

Uma das formas de purificação do biogás é a adsorção de H_2S por coluna de limalha de ferro, esta técnica é amplamente utilizada em instalações de pequeno porte devido a sua simplicidade e baixo custo (BUI; NHAN; TRUONG, 2008). Conforme Bui, Nhan e Truong (2008) este processo retém H_2S através de uma reação química com o Fe_2O_3 presente na limalha de ferro oxidada, conforme mostrado na reação a seguir:



A limalha irá adsorver H_2S até se saturar, neste ponto é necessário realizar o processo de regeneração, por meio da passagem de oxigênio de forma controlada pela coluna, conforme a reação 2.



Conforme Santos (2016) este processo de regeneração deve ser lento devido ao efeito exotérmico da reação, e recomenda-se ainda umidificar o filtro durante este processo para evitar a combustão espontânea da limalha saturada.

2.3.2 Water Scrubbing

Water scrubbing é um método de remoção de CO_2 por absorção, em que o biogás pressurizado é submetido à um fluxo em contra corrente de água também pressurizada, que irá absorver parte do CO_2 presente no biogás, por este ser mais solúvel que o CH_4 (SANTOS, 2016).

2.3.3 Pressure Swing Adsorption

É um método de purificação por adsorção, utilizando um filtro de carvão ativado, capaz de remover uma vasta gama de contaminantes e fornecer biometano ao final da purificação, com um teor de CH_4 de 98%. O sistema opera com quatro colunas de adsorção que atuam em ciclos. Este método apresenta dificuldade em sua operação devido à complexidade (SANTOS, 2016).

2.4 Técnicas de medição de concentração de CH_4

Para verificar a qualidade do biogás em diferentes etapas do seu processo de purificação e também ao longo do tempo, se torna necessário medir a concentração de metano em sua composição.

Dispositivos comerciais com esta finalidade podem ser adquiridos por valores entre R\$ 650,00 e R\$ 33.000,00¹ sendo considerados elevados diante do valor total de construção de biodigestores de pequeno ou médio porte.

A técnica de análise mais comumente usada atualmente é baseada em cromatografia gasosa (CG) instrumentalizada por um detector de ignição de chama (FID) (POOLE, 2003). Esta técnica tem inúmeras vantagens para uso industrial e de campo, tais como; alta resolução, alta taxa de leitura temporal e excelente sensibilidade para CH_4 . No entanto, é cara, com custos de acesso geralmente incompatíveis com os custos de construção de pequenas plantas (KOLB; ETTRE, 2006).

Embora não seja comumente usado como opção confiável para cromatografia gasosa, os sensores de metano, que são mais simples do que FID (flame ionization detector), principalmente semicondutores, são facilmente encontrados e vendidos como componentes eletrônicos para a detecção de vazamento de gases inflamáveis, dentre estes componentes o mais utilizado é o MQ4.

2.5 Sensores semicondutivos e potencialidades de utilização para a medição.

A utilização de materiais semicondutores para a detecção de gases foi originalmente proposta por Seiyama et al. (1962), que notaram a capacidade de filmes destes materiais terem sua condutividade alterada rapidamente na presença de determinados gases, desde que condicionados a uma determinada temperatura.

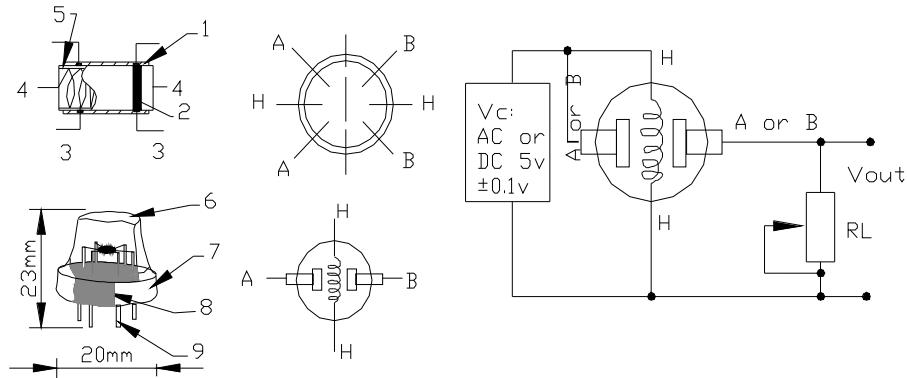
Conforme Yamazoe (1991) esta tecnologia foi objeto de diversos estudos e se desenvolveu principalmente para a detecção de vazamentos de gases inflamáveis e tóxicos, como o monóxido de carbono (CO).

O sensor MQ4 é um sensor semicondutivo baseado em dióxido de estanho (SnO_2), desenvolvido para detectar pequenos vazamentos de CH_4 . Na Figura 4 são apresentadas a

¹ Valores de 10/19, obtidos por cotação na internet

esquematização dos componentes do sensor, juntamente com o circuito elétrico do mesmo, as especificações dos componentes são detalhadas pela Tabela 1.

Figura 4 – Esquema MQ4



Fonte: (HANWEI, 2007)

Tabela 1 – Especificações MQ4

	Componente	Material
1	Camada de detecção de gás	SnO_2
2	Eletrodo	Au
3	Linha de eletrodo	Pt
4	Bobina de aquecimento	Liga Ni-Cr
5	Cerâmica tubular	AL_2O_3
6	Rede anti-explosão	Gaze de aço inoxidável (SUS316 100-malha)
7	Anel de pressão	Níquel - Cobre
8	Base de resina	Baquelite
9	Pino de tubo	Níquel - Cobre

Fonte: (HANWEI, 2007)

Este sensor é capaz de detectar a concentração de metano em seu ambiente pelo aumento da condutividade de seus componentes sensíveis, que é baixa em ar limpo, convertendo continuamente a variação da condutividade em um sinal de saída.

O sensor MQ4 apresenta alta sensibilidade para metano e gás natural, com faixa de leitura entre 200 ppm e 10000 ppm (1%) (MENON; MARIA; THIRUGNANAM, 2012).

Alguns trabalhos utilizaram o MQ4 para medir a concentração de metano em amostras de biogás, como Fakra et al. (2020) , Frattaroli (2017) e Yang et al. (2019). Em todos estes trabalhos foram utilizadas amostras padrão de gás para calibração.

3 METODOLOGIA

Para este projeto o modelo de biodigestor escolhido foi o modelo intermitente indiano, por seu baixo custo e facilidade de operação (OLIVEIRA JÚNIOR, 2014).

3.1 Construção do biodigestor

A construção do biodigestor se baseou no manual desenvolvido por Oliveira Júnior (2014), com adaptações pontuais.

Para a construção do biodigestor foram realizados os procedimentos de:

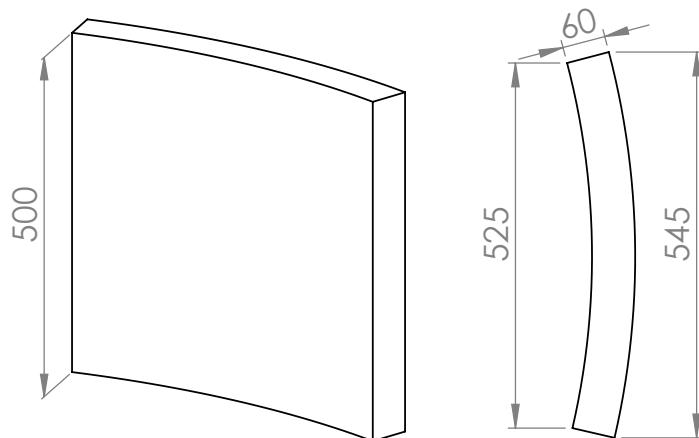
1. Escavação

O local responsável por alocar a câmara de fermentação foi escavado por uma retroescavadeira, com uma profundidade de 1,8 m.

2. Confecção das placas para a câmara de fermentação

A câmara principal foi construída com 52 placas pré moldadas de cimento, cujas dimensões são apresentadas pela Figura 5.

Figura 5 – Dimensões das placas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. (*Dimensões em milímetros)

3. Construção da câmara principal

Após a preparação do solo foi construída a base da câmara principal contendo uma armação de aço. Sobre a base foram distribuídas as 52 placas em 4 níveis de 13 placas, que são circundados por 3 fios de aço para fixação e revestidos interna e externamente para garantir a impermeabilidade. No interior da câmara são dispostos o pino guia fixado na base e uma parede de suporte que limita a movimentação vertical da campânula.

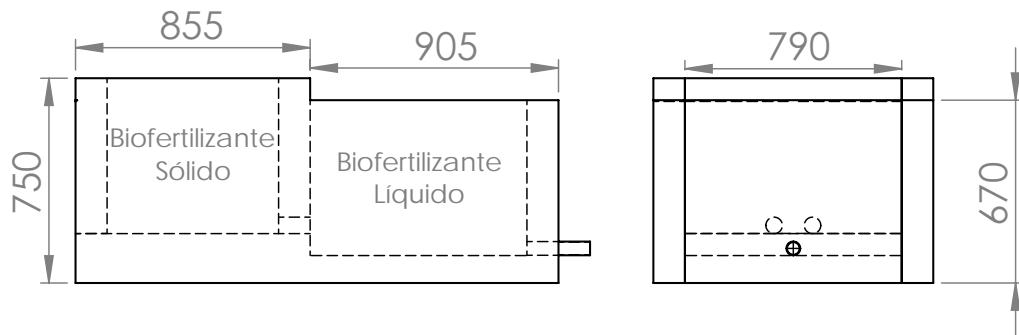
4. Aquisição da caixa de carga

Para o abastecimento de biomassa foi utilizada uma caixa pré-moldada com capacidade de 127 litros.

5. Construção da caixa de descarga

A caixa de descarga na qual são armazenados temporariamente o biofertilizante sólido e o líquido é construída em alvenaria e suas dimensões são apresentadas pela Figura 6.

Figura 6 – Dimensões da caixa de descarga



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021. (*Dimensões em milímetros)

6. Aquisição, preparação e posicionamento da campânula

Para este projeto a campânula utilizada consiste em uma caixa d’água de fibra de vidro, com capacidade de 3.000 litros cujas dimensões são apresentadas na Figura 15.

Para utilização no projeto foi necessário adicionar à caixa um cano de PVC, juntamente com barras de estabilização para garantir o correto posicionamento e a livre movimentação vertical ao longo do pino guia. Além disso foi inserida a conexão para saída do biogás.

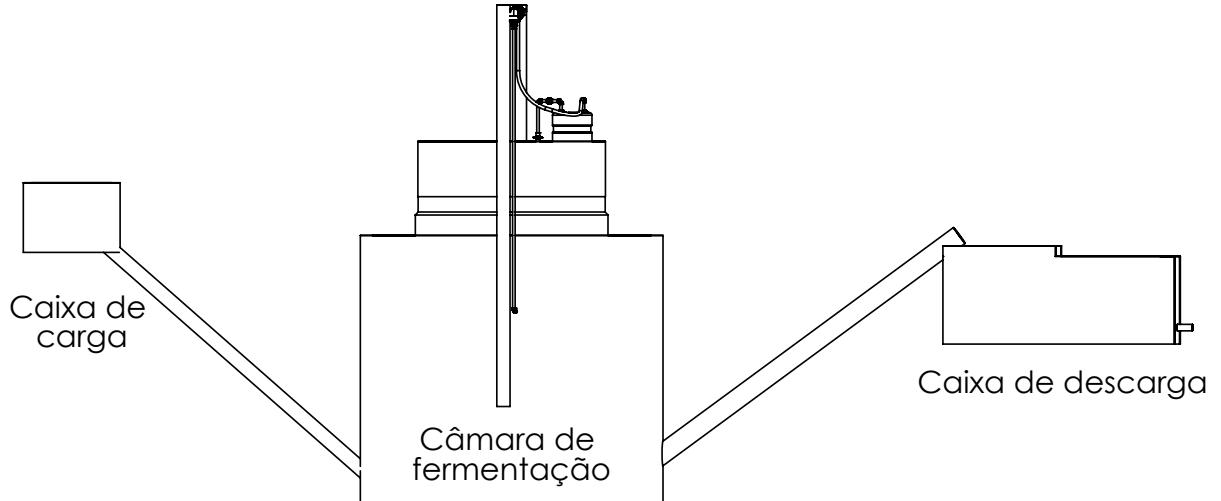
Devido à formação de uma trinca próxima à conexão de saída da campânula, um reparo e a colocação de um reforço de fibra no local foram necessários. Estes foram realizados por um terceiro.

7. Inserção dos filtros e tubulação

Com o devido posicionamento da campânula foram dispostos os elementos de filtragem do biogás e a tubulação para o uso doméstico, finalizando a construção do biodigestor.

A Figura 7 apresenta uma esquematização do modelo construído, enquanto a Figura 8 apresenta o biodigestor construído.

Figura 7 – Esquematização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 8 – Biodigestor construído

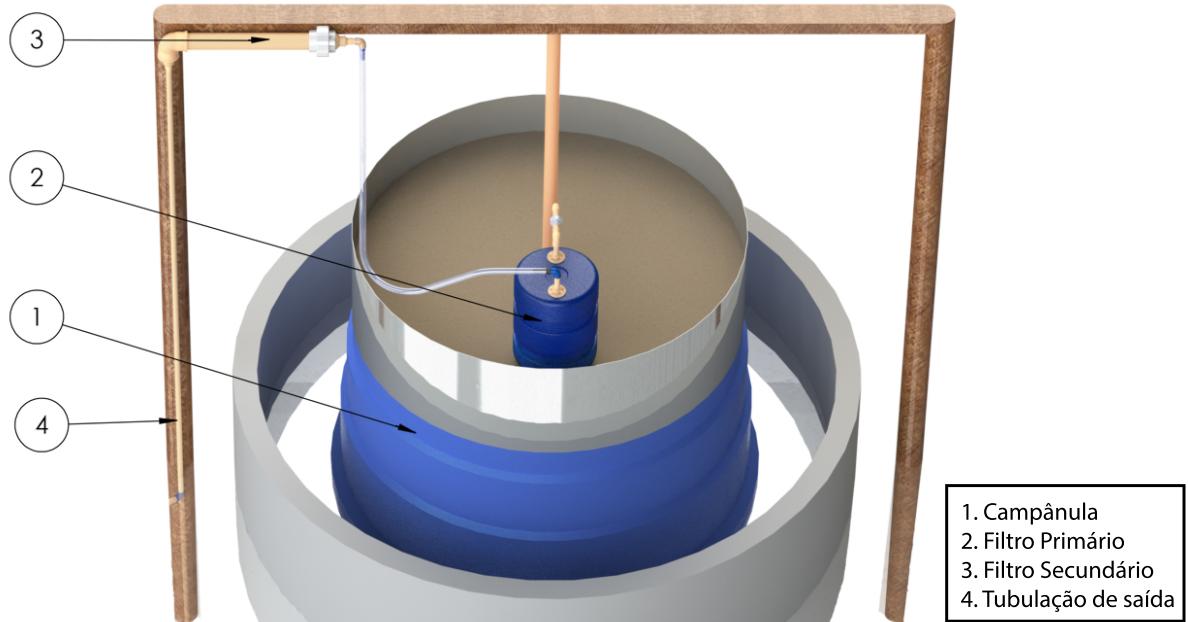


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.2 Processamento do biogás

Os dispositivos de armazenamento e purificação inseridos no projeto são apresentados no modelo tridimensional mostrado na Figura 9 (gerado no *software* Inventor). O biogás gerado na câmara de fermentação é armazenado temporariamente em uma campânula de fibra de vidro (Figura 9 - (1)) deste ponto o gás pressurizado é direcionado ao filtro primário, em que é forçado à passar por água (Figura 9 - (2)). Em seguida o gás passa pelo filtro secundário, para remoção de gás sulfídrico (Figura 9 - (3)). Por fim o biogás deixa o biodigestor pela tubulação de saída (Figura 9 - (4)).

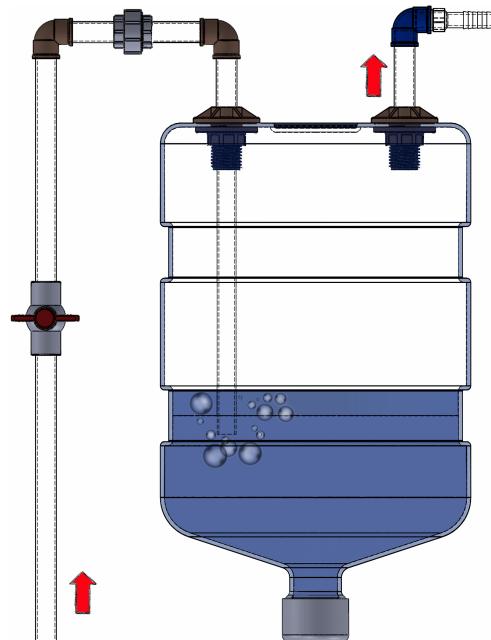
Figura 9 – Modelagem tridimensional da câmara de fermentação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O filtro primário é apresentado pela Figura 10, sendo responsável por absorver os contaminantes sólidos e alguns contaminantes gasosos pela solubilidade em água, que deve ser periodicamente substituída.

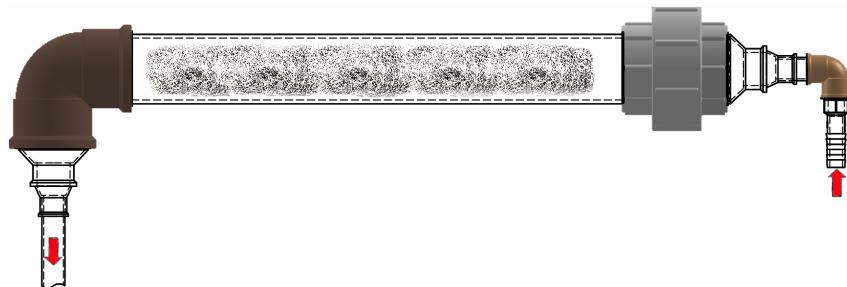
Figura 10 – Filtro primário



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O filtro secundário é apresentado pela Figura 11, sendo similar à uma coluna de limalha de ferro oxidada e tem por objetivo remover parte do gás sulfídrico (H_2S) presente no biogás, por meio de palha de aço (50g).

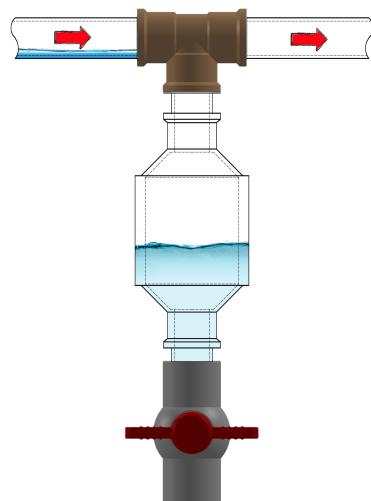
Figura 11 – Filtro secundário



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A tubulação de saída do biodigestor é direcionada à utilização doméstica, sendo enterrada em declive e contando com um sistema de drenagem em sua extremidade para eliminação do condensado, o sistema de drenagem conta com um reservatório temporário e uma válvula para purga, apresentada pela Figura 12.

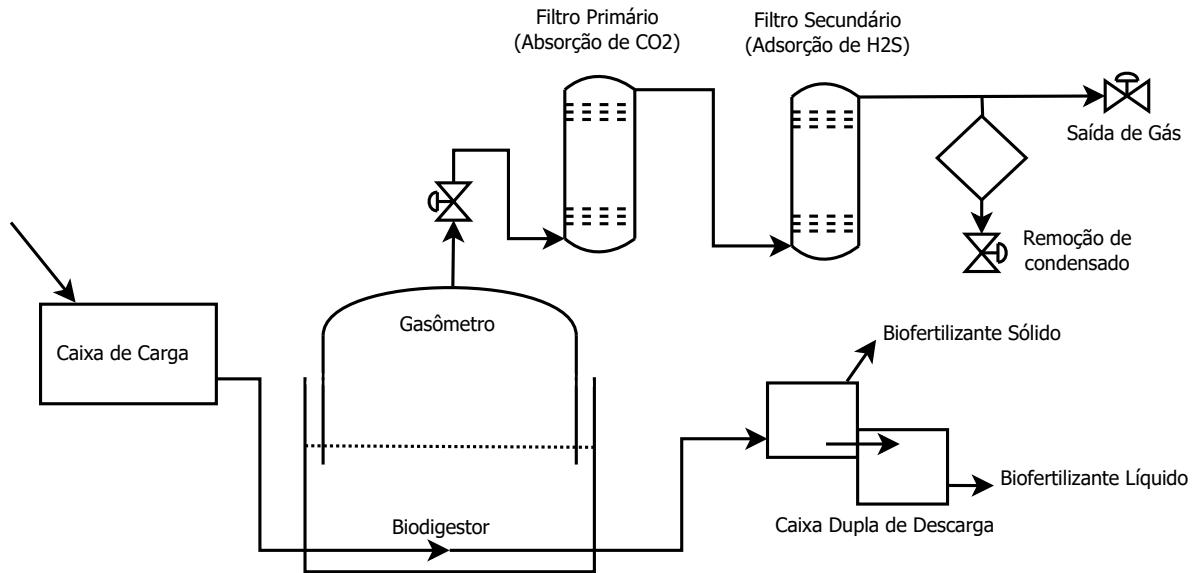
Figura 12 – Dreno



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O processamento da matéria orgânica e dos produtos gerados pelo processo de bio-digestão são compilados pelo diagrama apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama do processamento da biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3 Custos de construção

Para viabilizar a construção do biodigestor e para otimizar o tempo de retorno do investimento, os custos do projeto foram reduzidos pelo reaproveitamento de materiais de construção remanescentes de outros projetos e pela utilização de mão de obra própria. Os materiais utilizados e seus custos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Materiais

Descrição	Qtd	Valor (R\$)
Sacos de cimento	14 unds	210,00
Caixa d'água de 3000 litros	1 und	1080,00
Caixa de abastecimento	1 und	50,00
Tubos e conexões	1 und	200,00
Diversos	-	100,00
Total	-	1640,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

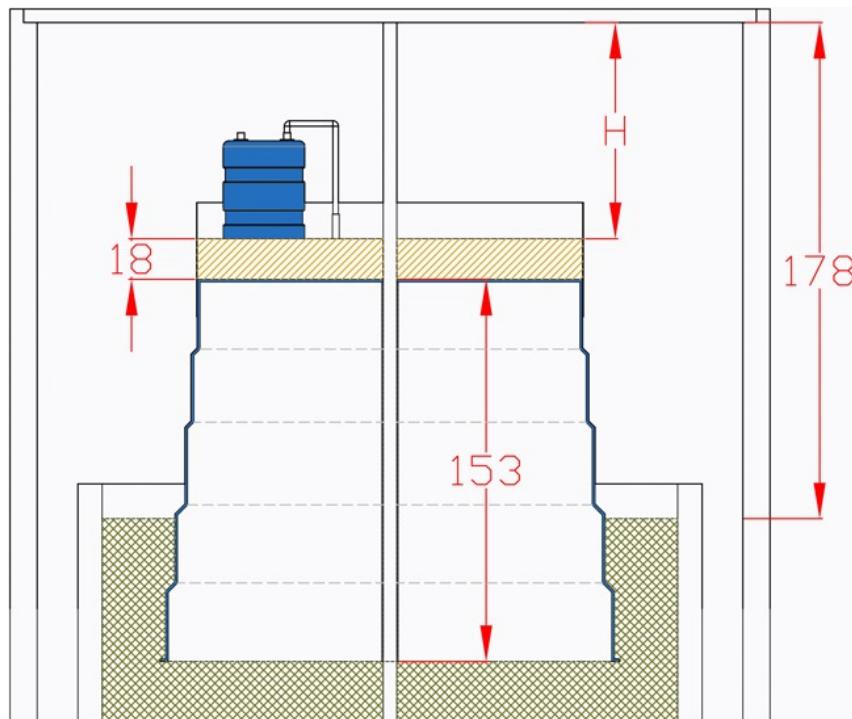
3.4 Análise da capacidade de produção do biodigestor

Para avaliar o retorno do investimento na construção do biodigestor optou-se por comparar sua produtividade e a qualidade do biogás produzido, com a capacidade calorífica equivalente de gás liquefeito de petróleo (GLP).

Como características do modelo indiano têm-se a pressão constante e o deslocamento da campânula para compensação das variações do volume de biogás armazenado, sendo assim, para quantificar a produção de biogás foi suficiente a medição da pressão na campânula e avaliação do volume armazenado pelo deslocamento da campânula.

Para avaliar a variação do volume armazenado ao longo do tempo foi desenvolvido um procedimento de cálculo baseado na distância entre a barra que suporta o pino guia e a superfície da carga de areia que promove a pressurização do biogás. Uma esquematização dos componentes e dimensões relevantes à medição do volume de biogás pode ser vista na Figura 14.

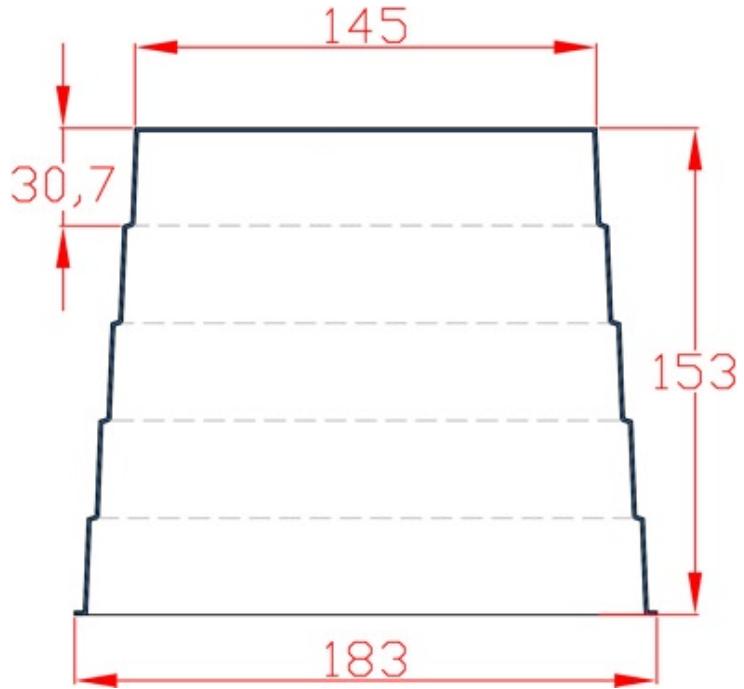
Figura 14 – Esquematização do sistema (cotas em centímetros)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As dimensões da campânula são medidas para que seja possível calcular o volume interno, conforme apresentado pela Figura 15.

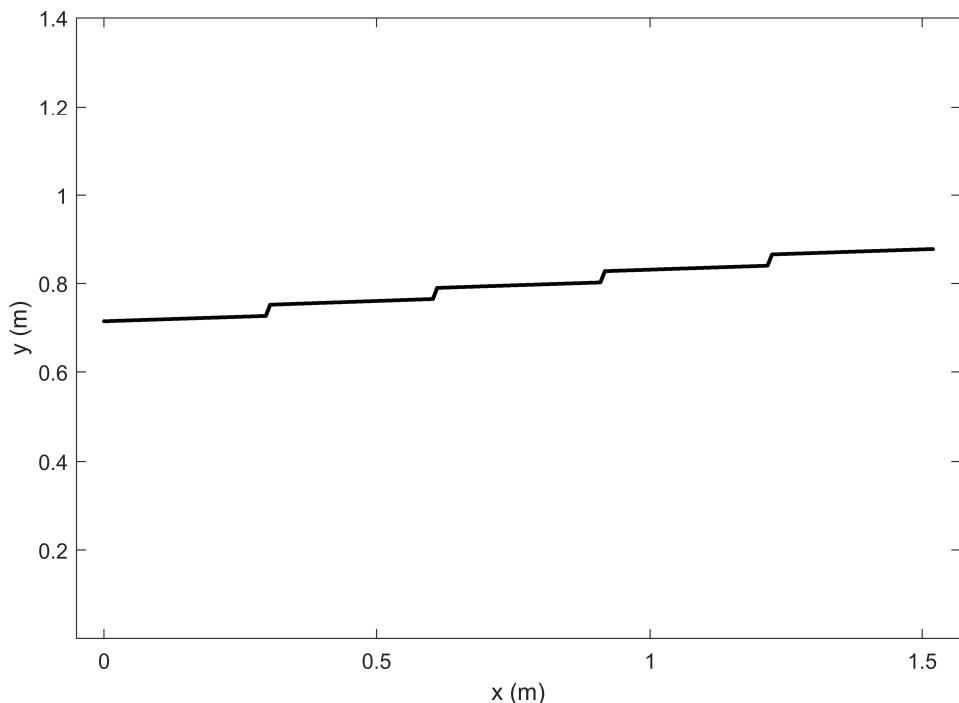
Figura 15 – Dimensões da campânula (cotas em centímetros)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As variações de diâmetro interno da campânula são parametrizadas por retas, conforme apresentado pela Figura 16.

Figura 16 – Parametrização



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O volume armazenado é o sólido de revolução gerado pelas retas, obtido por integração (STEWART, 2013). Foi desenvolvido um algoritmo para determinar o volume armazenado em

função da altura H medida. Os resultados do algoritmo foram verificados com as propriedades de massa resultantes da revolução do perfil base, através do *software* Inventor (licença estudantil).

Foram coletados dados de deslocamento da campânula ao longo de uma semana, em vários horários, porém a utilização de biogás não foi interrompida durante a aquisição de dados.

3.5 Análise da concentração de metano no biogás

Em alternativa ao custo elevado dos detectores de gás comerciais foi proposto o desenvolvimento de um sistema básico de medição de concentração de metano baseado em um sensor de gás metano MQ4 e uma placa controladora Arduino.

Como são esperadas concentrações entre 60 e 80% para o biogás se torna necessário desenvolver um método de medição que seja preciso apesar da limitação de sensibilidade do sensor (COLATTO; LANGER, 2011).

O sistema proposto é constituído de duas câmaras de armazenamento, uma preenchida com biogás e outra preenchida com ar ambiente, livre de metano. A medição precisa da concentração de metano na amostra de biogás é obtida pela diluição da amostra em ar, reduzindo a concentração aos níveis em que o sensor apresenta resultados confiáveis.

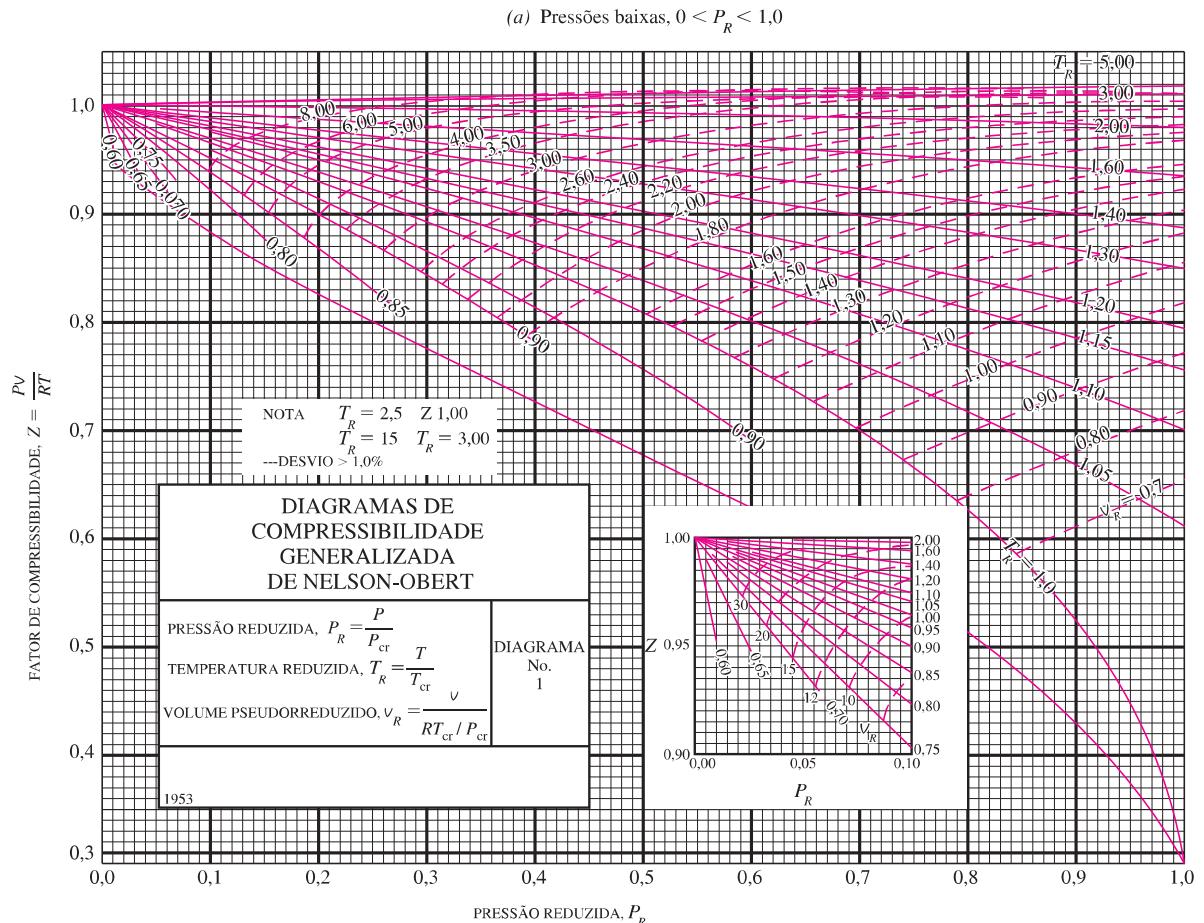
Para a análise de misturas de gases deve ser avaliado o fator de compressibilidade (Z) de cada componente presente no sistema, com base nas pressões e temperaturas reduzidas (CPOREL; BOLES, 2013):

$$P_{R,i} = \frac{P_m}{P_{cr,i}} ; T_{R,i} = \frac{T_m}{T_{cr,i}}, \quad (1)$$

Onde, $P_{R,i}$ é a pressão reduzida do componente, P_m é a pressão da mistura, $P_{cr,i}$ é a pressão crítica do componente, $T_{R,i}$ é a temperatura reduzida do componente, T_m é a temperatura da mistura e $T_{cr,i}$ é a temperatura crítica do componente.

Após calcular a pressão e a temperatura reduzida de cada componente, seu fator de compressibilidade deve ser avaliado por meio do diagrama de compressibilidade generalizada de Nelson-Obert. O diagrama para baixas pressões reduzidas é apresentado na Figura 17. Fatores de compressibilidade próximos de 1 indicam comportamento de gás ideal.

Figura 17 – Diagrama de Nelson-Obert



Fonte: (CPOREL; BOLES, 2013)

Considerando que a mistura mantenha uma temperatura de $25^\circ C$ e pressão atmosférica ($101,325 \text{ kPa}$), utilizando a biblioteca Coolprop (gratuita) para obter as pressões e temperaturas críticas e consultando a Figura 17 foram obtidos valores para os fatores de compressão dos componentes envolvidos no sistema:

Tabela 3 – Dados por composição

Componente	$T_{cr,i} (K)$	$P_{cr,i} (kPa)$	$T_{R,i}$	$P_{R,i}$	Z
CO_2	304,13	7377,3	0,9803	0,0137	0,995
CH_4	190,56	4599,2	1,5646	0,0220	0,998
Ar	132,53	3786	2,2497	0,0268	0,999

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Como o fator de compressão da mistura é uma combinação em proporção do fator de compressão de seus constituintes, para os dados da Tabela 3 é possível concluir que o biogás sob estas condições de temperatura e pressão pode ser tratado como um gás ideal independentemente de sua composição, também é possível concluir que o ar pode ser tratado como um gás ideal sob as mesmas condições.

A medição obtida pelo sensor corresponde ao número de mols de metano em relação ao número total de mols do sistema:

$$\varphi_3 = \frac{n_{CH4}}{n_3} \quad (2)$$

São definidos os identificadores 1 para a câmara de ar e 2 para a câmara de biogás e 3 para o sistema acoplado

Sendo que o objetivo do processo é a obtenção da concentração de metano na amostra, sendo definido pelo número de mols de metano no sistema pelo número de mols da amostra:

$$\varphi_2 = \frac{n_{CH4}}{n_2} \quad (3)$$

Para calcular o número de mols (n) em cada câmara, é necessário conhecer a massa do gás (m) e o peso molecular (PM) do gás (ÇPOREL; BOLES, 2013).

$$n = \frac{m}{PM} = \frac{v \cdot \rho}{PM}. \quad (4)$$

Na Tabela 4 é possível observar que a relação entre a densidade (ρ) e o peso molecular são aproximadamente constantes (0,3% de variação), de forma que o número de mols pode ser determinado com base apenas no volume (v), independentemente da composição da amostra (dados obtidos através da biblioteca Coolprop) (BELL et al., 2014).

Tabela 4 – Propriedades dos gases

Gás	Densidade (kg/m^3)	Peso molecular (kg/mol)	$\rho/PM(\text{mol}/\text{m}^3)$
CH_4	0,657	0,016	40,946
CO_2	1,808	0,044	41,081

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O dimensionamento das câmaras para as especificações dos sensores se baseia na Lei de Amagat, que dita que o volume da mistura é equivalente ao somatório dos volumes individuais sob mesma temperatura e pressão (ÇPOREL; BOLES, 2013):

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i (P_m, T_m) = \sum_{i=1}^k \frac{M_i}{\rho_i} (P_m, T_m) = \sum_{i=1}^k \frac{PM_i n_i}{\rho_i} (P_m, T_m). \quad (5)$$

Manipulando a Equação 3 para $n_2 = n_{CH4} + n_{CO2}$ obtém-se:

$$n_{CH4} = \frac{\varphi_2}{1 - \varphi_2} \cdot n_{CO2} \quad (6)$$

Substituindo 6 em 5 e desenvolvendo para o biogás obtém-se:

$$V_2 = \left(\frac{PM_{CH4}}{\rho_{CH4}} \cdot \frac{\varphi_2}{1 - \varphi_2} + \frac{PM_{CO2}}{\rho_{CO2}} \right) \cdot n_{CO2}. \quad (7)$$

A partir da Equação 7 é possível determinar o número de mols de dióxido de carbono no sistema para qualquer concentração de metano, fixado o volume da amostra (V_2). De posse

dessa informação podem ser calculados o número de mols de metano no sistema e a massa da amostra. Para o numero de mols e a massa de ar é necessário relacionar o volume da câmara de amostragem e o volume da câmara de expansão. Esta relação é definida para o caso de concentração 100% de metano na amostra e leitura de 10.000 *ppm* no sensor:

$$\varphi_3 = \frac{n_{CH4}}{n_{CH4} + n_{Ar}} = 0,01 \quad (8)$$

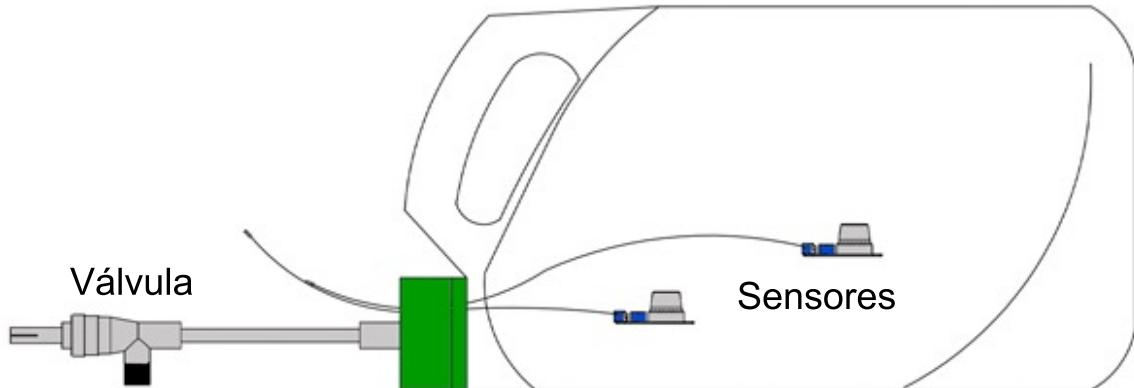
Desenvolvendo a Equação 8 obtém-se a relação entre o volume da câmara de expansão e o volume da câmara de amostragem:

$$\frac{V_1}{V_2} = 99 \cdot \frac{PM_{Ar}}{\rho_{Ar}} \cdot \frac{\rho_{CH4}}{PM_{CH4}} = 99,14 \quad (9)$$

3.5.1 Projeto das câmaras

As câmaras foram dimensionadas conforme a taxa de diluição calculada, visando uma fácil operação do sistema e baixo custo, uma representação da câmara de expansão é apresentada pela Figura 18.

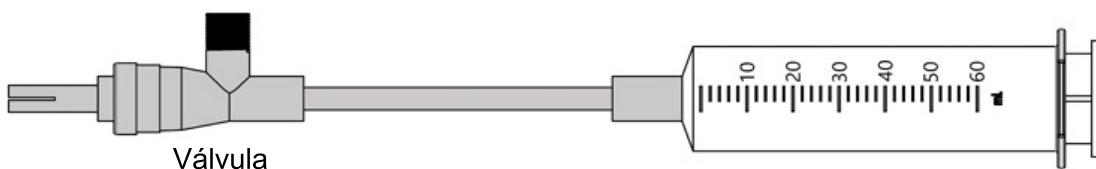
Figura 18 – Câmara de expansão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O volume medido da câmara de expansão foi de 3 litros e 160 mililitros, utilizando vidraria com incerteza de 2 mililitros, de forma que pela equação 9 o volume da câmara de amostragem deve ser de 31,9 mililitros. Para este volume e para evitar a presença de resíduos na análise, foi definida a utilização de uma seringa de 60 mililitros para a câmara de amostragem, apresentada pela Figura 19.

Figura 19 – Câmara de amostragem



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As válvulas e as conexões utilizadas foram reaproveitadas de fogões domésticos, o protótipo utilizado nos testes é apresentado pela Figura 20.

Figura 20 – Sistema de testes



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para otimizar a coleta de dados experimentais na fase de projeto, foi definida a utilização de dois sensores no interior da câmara de expansão, e a inserção da amostra em volumes variando entre 0 e 60 mililitros em incrementos de 5 mililitros. De forma que em cada experimento fossem coletadas 13 leituras por cada sensor, totalizando 26 leituras por experimento.

Os experimentos realizados com o protótipo (Figura 20) seguiram os seguintes passos:

1. Coleta de 60 mililitros de biogás pela câmara de amostragem.
2. Eliminação de resíduos na câmara de expansão através de um fluxo de ar.
3. Acoplamento das câmaras.
4. Leitura inicial com ar limpo.
5. Manuseio das válvulas e inserção da amostra na câmara de expansão em volumes discretos de 5 mililitros.
6. Leituras para volumes de 5 a 60 mililitros.
7. Registro e análise dos dados coletados.

Os custos de construção do protótipo são detalhados pela Tabela 5.

Tabela 5 – Materiais

Descrição	Qtd	Valor (R\$)
Sensores MQ4	2 unds	7,25
Placa Arduino Uno R3	1 und	42,50
Câmara de expansão	1 und	-
Seringa	1 und	-
Diversos	-	-
Total	-	49,75

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

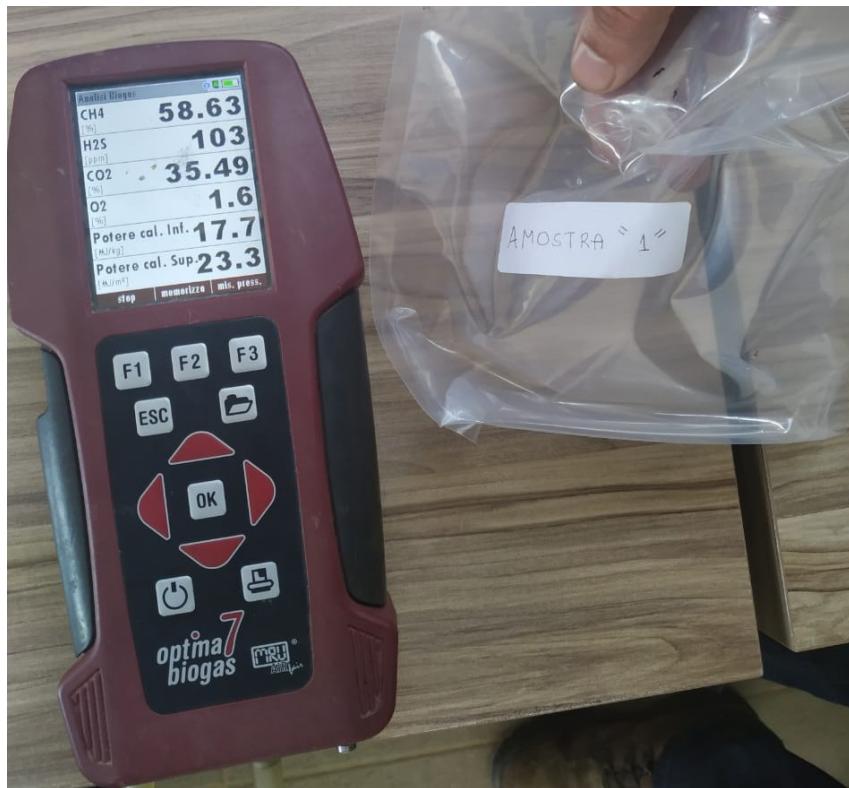
3.5.2 Aquisição de dados

Para calibração e validação dos resultados obtidos pelo sistema proposto, foram realizadas análises externas com a ajuda de empresas parceiras. Estas análises e os experimentos realizados com o protótipo, em amostras correspondentes, constituem a base de dados para o desenvolvimento de uma metodologia de análise de biogás utilizando o MQ4.

3.5.2.1 Primeira análise externa - 21/02/2020

A primeira análise foi realizada em três amostras do biogás produzido pelo biodigestor construído, utilizando o aparelho OPTIMA 7 Biogas Analyzer, conforme apresentado pela Figura 21.

Figura 21 – Primeira análise externa



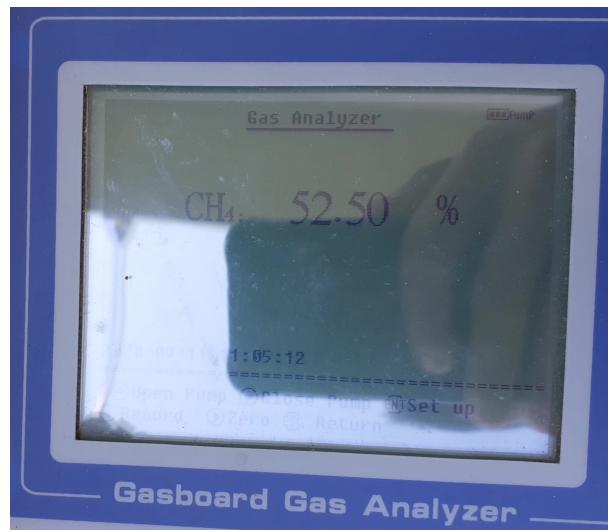
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Entre as amostras 1 e 2 enviadas para análise, foi coletada uma amostra de 60 mililitros para análise própria utilizando o protótipo desenvolvido. Para esboçar uma curva de calibração para o sensor, foram avaliadas as respostas dos sensores para diferentes concentrações de metano, obtidas pela injeção de volumes discretos de gás com concentração conhecida de forma controlada.

3.5.2.2 Segunda e terceira análises externas - 11/09/2020 ; 08/11/2020

A segunda análise externa, foi realizada com o aparelho GAS3200L Analisador portátil de Biogás. Seguindo os mesmos procedimentos utilizados na primeira análise externa, foram realizadas análises de três amostras de biogás, conforme apresentado pela Figura 22.

Figura 22 – Segunda análise externa

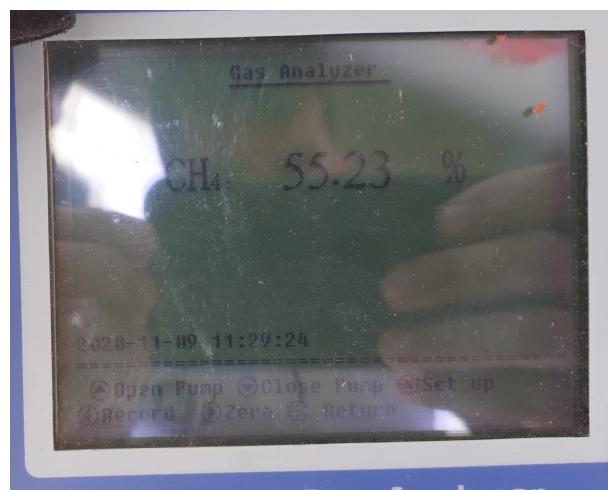


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Foram coletadas três amostras de 60 mililitros antes e durante a coleta das amostras destinadas à análise externa, para análise pelo sistema baseado no sensor MQ4.

A terceira análise externa seguiu os mesmos procedimentos e foi realizada com o mesmo equipamento que a segunda análise, conforme apresentado pela Figura 23.

Figura 23 – Terceira análise externa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.5.2.3 Quarta análise externa - 09/11/2020

Foram coletadas amostras do biogás produzido na planta de tratamento de resíduos da empresa Embaré, onde foram realizadas as análises externas 2 e 3. O biogás coletado foi proveniente de dois biodigestores diferentes, e a concentração de metano em cada um foi medida antes da coleta, para que as amostras pudessem ser tomadas como amostras padrão de biogás. Estas amostras foram então analisadas por meio do protótipo desenvolvido.

Os resultados das análises tanto externas quanto internas são apresentados na seção 4.2.

3.5.3 *Interpretação do sinal*

Cada sensor MQ-4 retorna uma leitura analógica que pode variar entre 0 e 1023, e que corresponde à uma variação entre 0 e 5 volts na tensão de saída do circuito do sensor.

O fabricante dos sensores utilizados não fornece uma metodologia para a conversão do sinal analógico em concentração de metano ambiente. Sendo necessário para tanto avaliar os métodos sugeridos por outros fabricantes ou o desenvolvimento de um método próprio para este projeto.

3.5.3.1 Método baseado na tensão

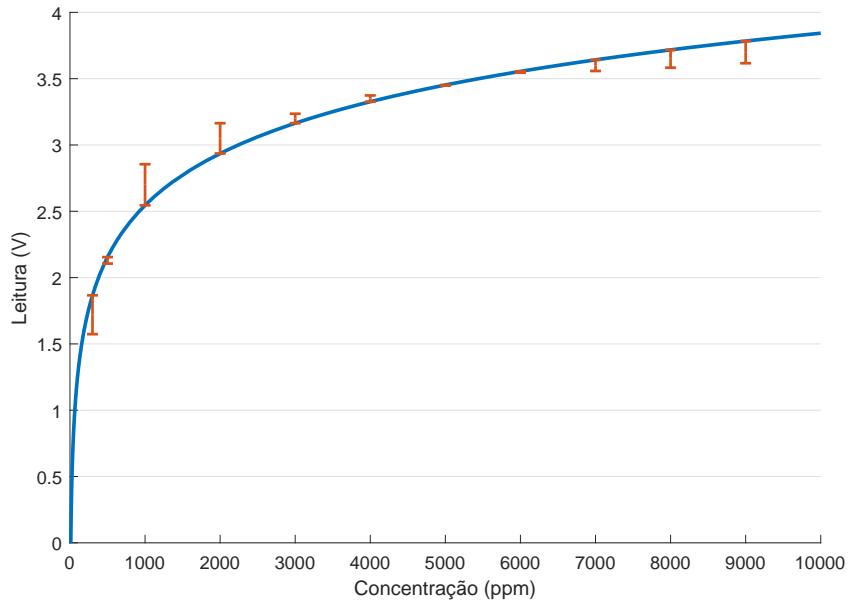
De acordo com Sparkfun (2016) e Winsen (2015) a concentração em partículas por milhão pode ser determinada com base na tensão correspondente à leitura analógica obtida, pela Equação 10.

$$\varphi_3 = 10,938 \cdot e^{1,7742 \cdot V} \quad (10)$$

Onde V é a tensão em volts.

A Equação 10 é representada pela Figura 24, onde as barras de erro representam a diferença entre os modelos propostos pelas duas referências.

Figura 24 – Tensão em função da concentração



Adaptado de:(SPARKFUN, 2016) e (WINSEN, 2015)

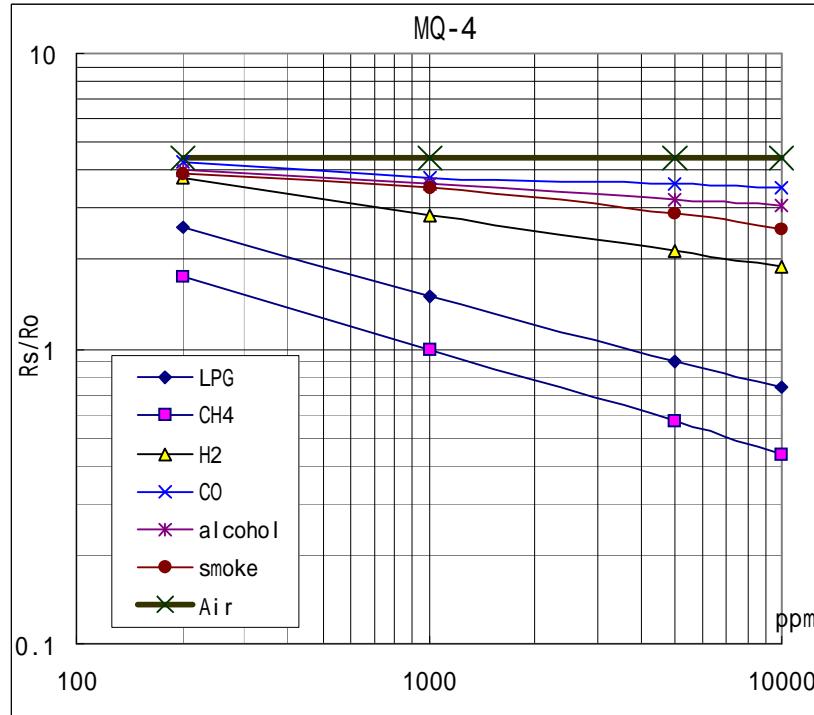
3.5.3.2 Método baseado na resistência

De acordo com Hanwei (2007), a concentração de metano pode ser determinada com base na relação entre a resistência atual e a resistência base. A resistência atual é dada pela Equação 11. Onde V_e é tensão de entrada do circuito, V_s é a tensão correspondente à leitura obtida pelo sensor e R_l é a resistência presente no circuito interno do sensor.

$$R_s = \left(\frac{V_e}{V_s} - 1 \right) \cdot R_l \quad (11)$$

A função sugerida por Hanwei (2007) para determinar a concentração de metano correspondente é apresentada pela Figura 25.

Figura 25 – Características sensitivas do sensor MQ4



Fonte: (HANWEI, 2007)

A equação correspondente é:

$$\ln\left(\frac{R_s}{R_o}\right) = 2,4606 - 0,3562 \cdot \ln\varphi \quad (12)$$

Também é possível desenvolver uma função baseada nos dados experimentais coletados, conforme apresentado na seção 4.4.2.

3.5.3.3 Método baseado na modelagem matemática do sinal analógico

As curvas formadas pelos dados experimentais apresentam comportamento assintótico, de forma que incrementos de volume produzem incrementos de leitura menores quando a leitura se aproxima da saturação. Este comportamento pode ser modelado por meio de uma equação diferencial de primeira ordem, a hipótese adotada para a variação da leitura analógica em relação ao volume de biogás no sistema é apresentada pela equação 13.

$$\frac{dL}{dv} = \lambda(L_{sat} - L) \quad (13)$$

Onde λ é uma constante relacionada à concentração de metano na amostra e também as características do sensor, L_{sat} é máxima leitura do sensor para uma condição específica (indica a saturação do sensor) e L é a leitura atual do sensor. Desenvolvendo a equação:

$$L' + \lambda L = \lambda L_{sat}.$$

Utilizando o método do fator integrante para a resolução da equação diferencial:

$$\begin{aligned}\mu(v) &= e^{\int \lambda dv} = e^{\lambda v} \\ L &= \frac{1}{e^{\lambda v}} \cdot \int e^{\lambda v} \cdot (\lambda L_{sat}) dv = \frac{1}{e^{\lambda v}} \cdot \left(\frac{\lambda L_{sat}}{\lambda} e^{\lambda v} + K \right) \\ L &= L_{sat} + K e^{-\lambda v}\end{aligned}$$

Para $v = 0$:

$$K = L_0 - L_{sat}$$

Assim:

$$L(v) = L_{sat} - (L_{sat} - L_0)e^{-\lambda v} \quad (14)$$

A concentração de metano na amostra deve ser extraída do valor de λ obtido pelo ajuste dos dados experimentais conforme o modelo matemático.

3.5.3.4 Método baseado em metaheurística

Outra opção para determinar a concentração de metano na amostra é baseada na equação:

$$\varphi_a \cdot \frac{n_a}{n_a + n_{ar}} - \varphi_e = 0 \quad (15)$$

Onde φ_a é a concentração de metano na amostra em ppm, n_a é o número de mols na amostra, n_{ar} é o número de mols de ar na câmara de expansão e φ_e é a concentração de metano na câmara de expansão em ppm.

Um algoritmo foi desenvolvido para minimizar o valor absoluto da equação, usando a metaheurística *Simulated Annealing* (SA), implementada em Python. São usadas a leitura analógica coletada para 30 mililitros de biogás diluído e o perfil de calibração obtido pelo experimento com a amostra de composição conhecida.

O código implementado inicia pela Equação 15 considerando que podem ser determinados com precisão o número de mols de ar na câmara de expansão (n_a) e a concentração de metano na câmara de expansão (φ_e) após a injeção da amostra, o primeiro valor por métodos termodinâmicos e o segundo pela leitura do sensor corrigida pela curva de calibração. Essas premissas reduzem o número de variáveis na função objetivo para apenas duas, o número de mols na amostra (n_a) e a concentração de metano na amostra (φ_a), onde a última é o objetivo desejado.

A implementação da SA utilizada é resumidamente descrita pela Tabela 6.

Tabela 6 – Etapas do algoritmo de SA

Etapa 1.	Inicializa o código carregando a função objetivo, as restrições (limites superior e inferior para pesquisar cada variável) <code>conj_sol</code> , a taxa de resfriamento do método heurístico <code>raz_resf</code> , o número de iterações de temperatura <code>n_inter_temp</code> , a temperatura inicial <code>t_0</code> e as sugestões fictícias de n_a e ϕ_a , ϕ e n respectivamente;
Etapa 2.	Repete as temperaturas até que a temperatura mínima (critério de parada) seja alcançada.
Etapa 3.	Para cada iteração na temperatura, executa uma sequência aninhada de iterações determinada por <code>n_inter_temp</code> .
Etapa 4.	Em cada iteração, valores aleatórios pertencentes a <code>conj_sol</code> são gerados pelo código e a adequação desses novos valores é comparada à adequação dos valores atuais de ϕ e n . As verificações de adaptação ocorrem através da solução da função objetivo e da avaliação da proximidade entre (δ_{sol}) e zero. É mantido o par de soluções (seja a antiga ou a gerada na iteração atual) com melhor proximidade do valor objetivo da função.
Etapa 5.	Se um novo par de soluções resultante da geração aleatória passou pela verificação na etapa 4, então uma variável de controle da população aceita por temperatura <code>neighbors</code> é incrementada unitariamente, caso contrário, o critério de Boltzmann é acessado, e o δ_{sol} avaliado por $x < \exp(-\delta_{sol}/t_0)$, onde x é gerado aleatoriamente cada vez que o critério de Boltzmann é acessado, encerrando a iteração atual para a temperatura real.
Etapa 6.	Se <code>neighbors</code> é menor do que 60% de <code>n_inter_temp</code> , então a temperatura é incrementada pelo fator $1 + \gamma * \sqrt{t}$, caso contrário é decrementada pelo fator $t/(1 + \gamma * \sqrt{t})$, onde (γ) é uma constante interna para controlar as taxas de aquecimento e resfriamento.
Etapa 7.	Uma vez que a nova temperatura é determinada, são repetidas as etapas 3 a 6 até que as iterações na temperatura tenham atingido o critério de parada $t = 1 \cdot 10^{-6}$.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Capacidade de produção volumétrica

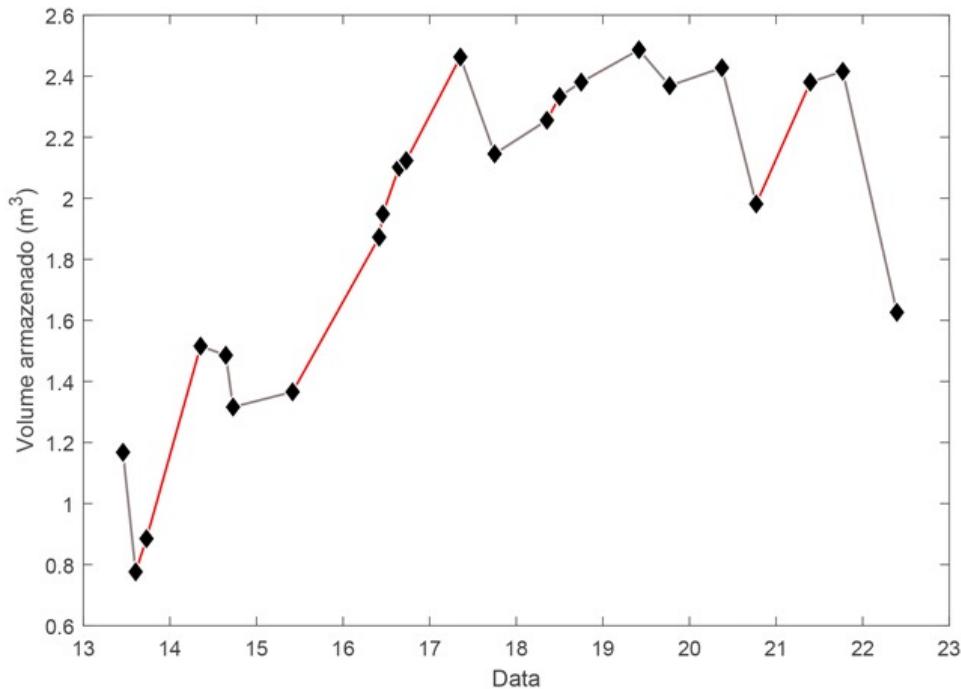
Os dados de deslocamento da campânula coletados são apresentados pela Tabela 7 e a variação de volume calculada é apresentada pela Figura 26.

Tabela 7 – Dados de deslocamento da campânula

Data	Horário	Medição (cm)	Data	Horário	Medição (cm)
13/12/19	11:00	92	17/12/19	8:30	31
	14:30	113		18:00	45
	17:30	107		8:30	40
14/12/19	8:30	74,5	18/12/19	18:00	34,5
	15:30	86		10:00	30
	17:30	84,5		18:30	35
15/12/19	10:00	82	19/12/19	9:00	32,5
16/12/19	10:00	57,5		18:30	52,5
	17:30	46	20/12/19	9:30	34,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 26 – Variação do volume armazenado de biogás



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A análise das variações de volume considera períodos de consumo predominante, de produção predominante e condições intermediárias. Para estimar a capacidade de produção do biodigestor são avaliados os períodos de provável produção predominante, destacados pelas linhas em vermelho na Figura 26. Pela média dos coeficientes de inclinação das retas é estimada

uma capacidade de produção de $1,18\ m^3$ por dia ou $35,60\ m^3$ por mês. Para este cálculo foi considerada a pressão atmosférica, pois não foi obtida leitura por manômetro na conexão de saída da campâula.

4.2 Dados experimentais

Os resultados obtidos pela primeira análise externa são apresentados na Tabela 8.

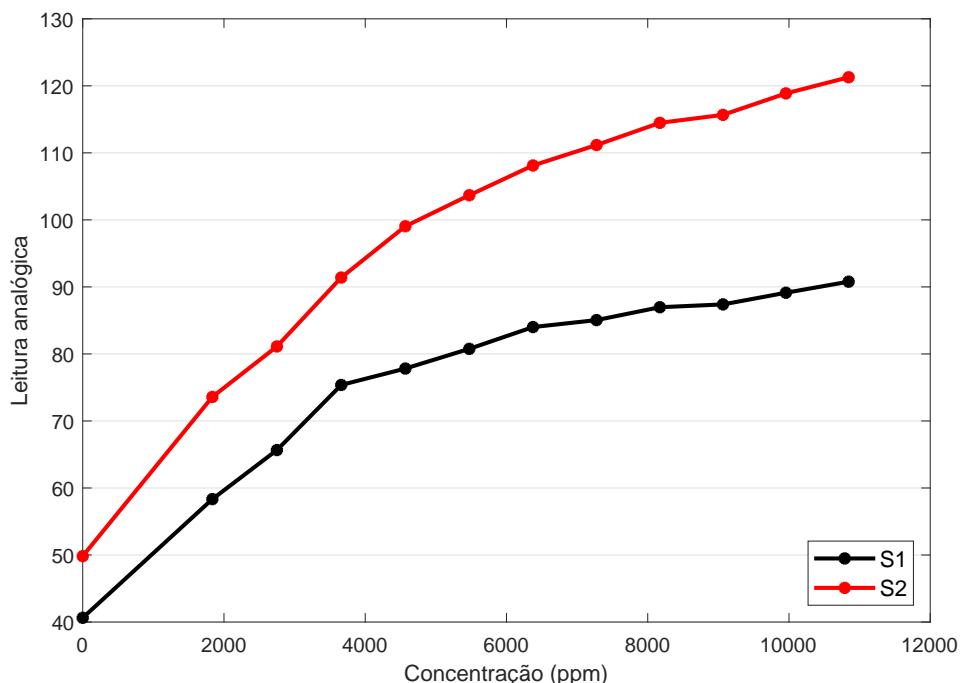
Tabela 8 – Resultados da primeira análise externa

Propriedades	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Concentração de CH_4 (%)	58,63	57,79	57,94	58,12
Concentração de H_2S (ppm)	103	98	102	101
Concentração de CO_2 (%)	35,49	34,78	35,18	35,15
Concentração de O_2 (%)	1,6	1,9	1,7	1,7
Poder Calorífico inferior (MJ/kg)	17,7	17,4	17,4	17,5
Poder Calorífico superior (MJ/m ³)	23,3	23,0	23,1	23,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os dados experimentais referentes às amostras de biogás enviadas para a primeira análise externa são apresentados na Figura 27, onde S1 designa o sensor 1 e S2 designa o sensor 2. As concentrações de metano designadas no gráfico foram calculadas a partir do volume de biogás injetado e da concentração de metano obtida pela análise externa correspondente.

Figura 27 – Análise interna 1

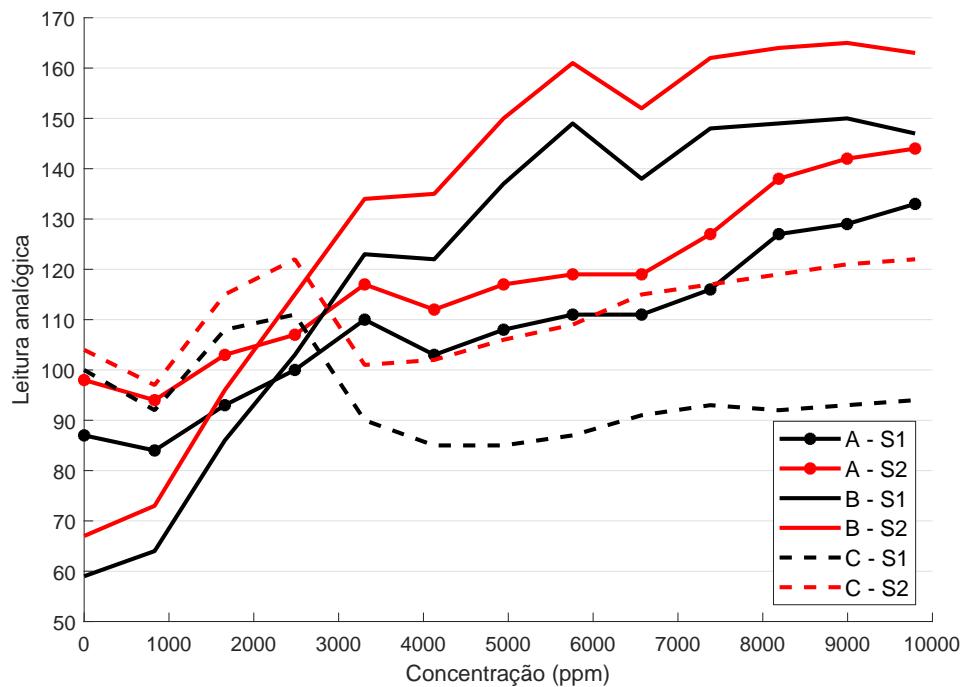


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na segunda análise externa, ocorreram problemas na análise das amostras 1 e 2, sendo obtidos resultados coerentes com o biogás apenas para a amostra 3, para qual o resultado da análise foi de 52,50% de CH_4 .

Os dados coletados na respectiva análise interna são apresentados pela Figura 28, onde A, B e C designam os três experimentos realizados para as três amostras coletadas.

Figura 28 – Análise interna 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados incoerentes obtidos nas análises das amostras 1 e 2 e a grande variação no comportamento das leituras obtidas fazem com que os dados desta análise sejam considerados não confiáveis.

Na terceira análise externa foram obtidos resultados coerentes para as três amostras, conforme apresentado pela Tabela 9.

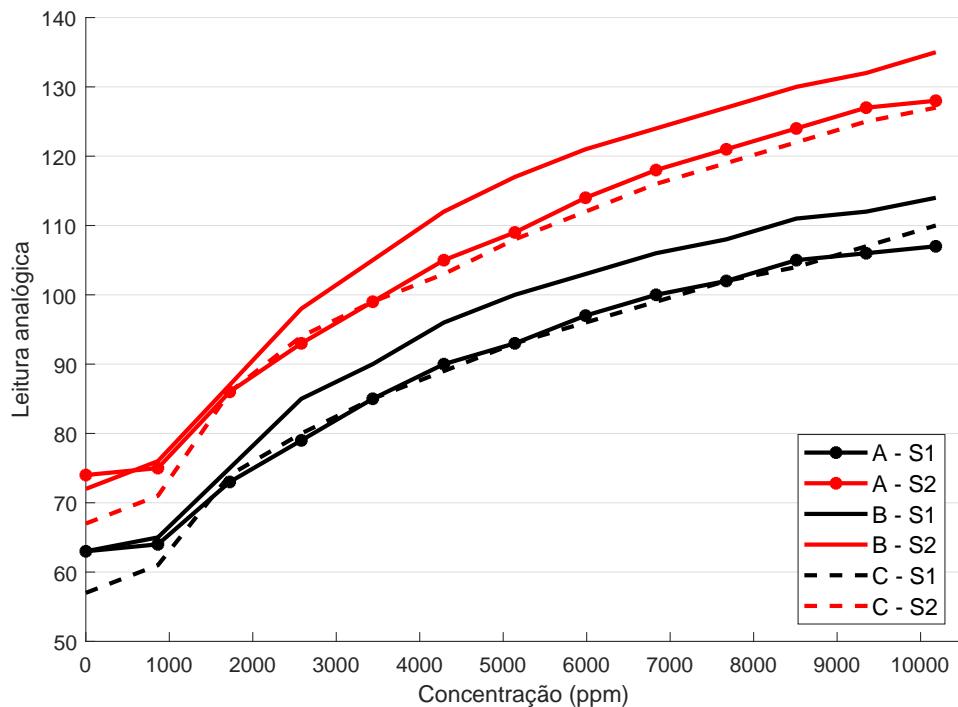
Tabela 9 – Resultado análise externa 3

Amostra	1	2	3	Média
Resultado (% de CH_4)	55,23	55,09	53,78	54,70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O resultado da respectiva análise interna é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Análise interna 3

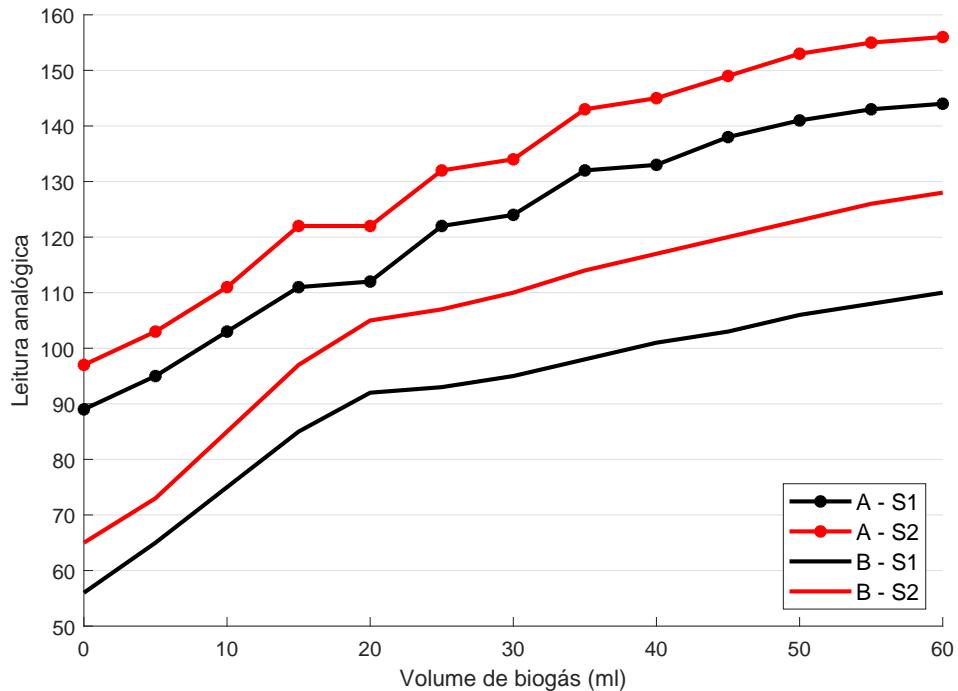


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nas análises das diferentes fontes do biogás coletado na empresa Embaré foram constatadas concentrações de metano de 71,80% e 64,43%, de forma que as amostras coletadas possuem uma concentração de metano intermediária a esses valores.

Os dados coletados nas análises internas destas amostras coletadas são apresentados pela Figura 30.

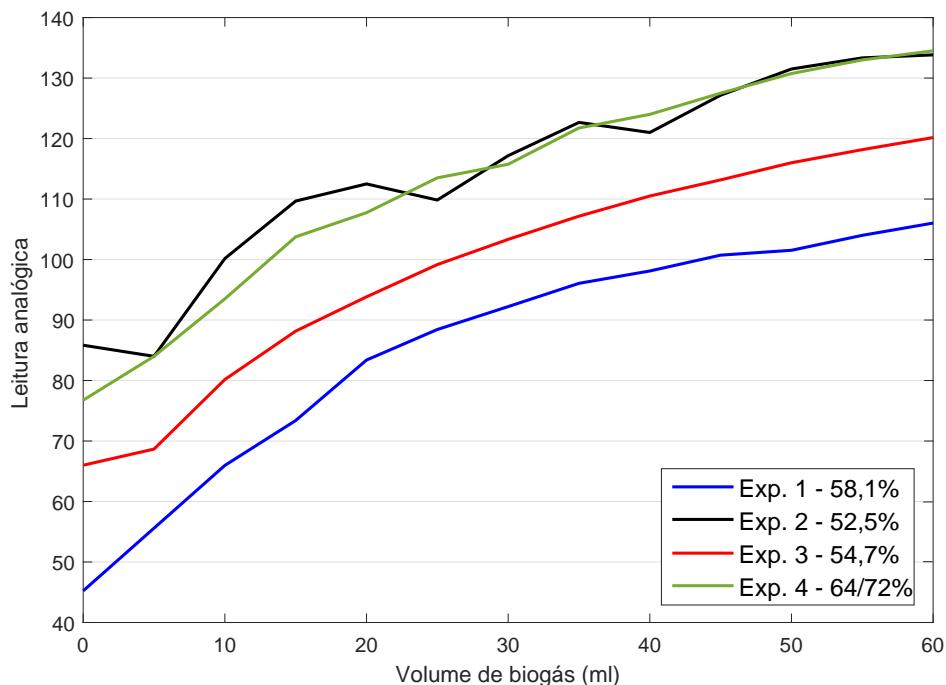
Figura 30 – Análise interna 4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O conjunto de dados experimentais coletados é resumidamente apresentado pela Figura 31, onde são expostos a média dos dados de cada análise interna e a respectiva concentração de metano inferida pela análise externa.

Figura 31 – Dados experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A base de dados é constituída por um total de 232 leituras e as respectivas concentrações as quais os sensores foram expostos, sendo considerada quantitativamente adequada para as análises subsequentes.

4.3 Retorno do investimento

De acordo com Jenkin (1962) e Morais (2005) o poder calorífico do GLP é de aproximadamente 11.300 kcal/kg o que corresponde a 47.310,84 kJ/kg. Considerando o resultado da primeira análise externa e a capacidade de produção calculada é possível concluir que a produção mensal de biogás corresponde a aproximadamente 15 kg de GLP, o que em valores de 2020 corresponde a R\$86,45 por mês. Sendo portanto necessários 19 meses para retorno do investimento total, como a primeira utilização doméstica do biogás é datada de 25/08/2019 a previsão de retorno do investimento é 25/02/2021.

4.4 Métodos de interpretação do sinal

Para avaliar a aplicabilidade de cada método de interpretação de sinal previamente selecionado foram utilizados os conjuntos de dados experimentais, delimitando para a calibração os dados da primeira e da terceira análise externa, e o principal critério de validação sendo a quarta análise externa.

Apesar das equações serem definidas para a concentração em partes por milhão, os resultados são apresentados em concentração volumétrica de metano na amostra, obtida por um fator de conversão definido para a taxa de diluição em 30 mililitros de amostra inseridos no sistema.

O parâmetro de avaliação dos resultados de cada método é a correlação entre a concentração de metano estimada e a concentração medida por análise externa.

4.4.1 Método baseado na tensão

A verificação da metodologia proposta por Sparkfun (2016) e Winsen (2015) é apresentada pela Tabela 4.4.

Tabela 10 – Resultados por tensão

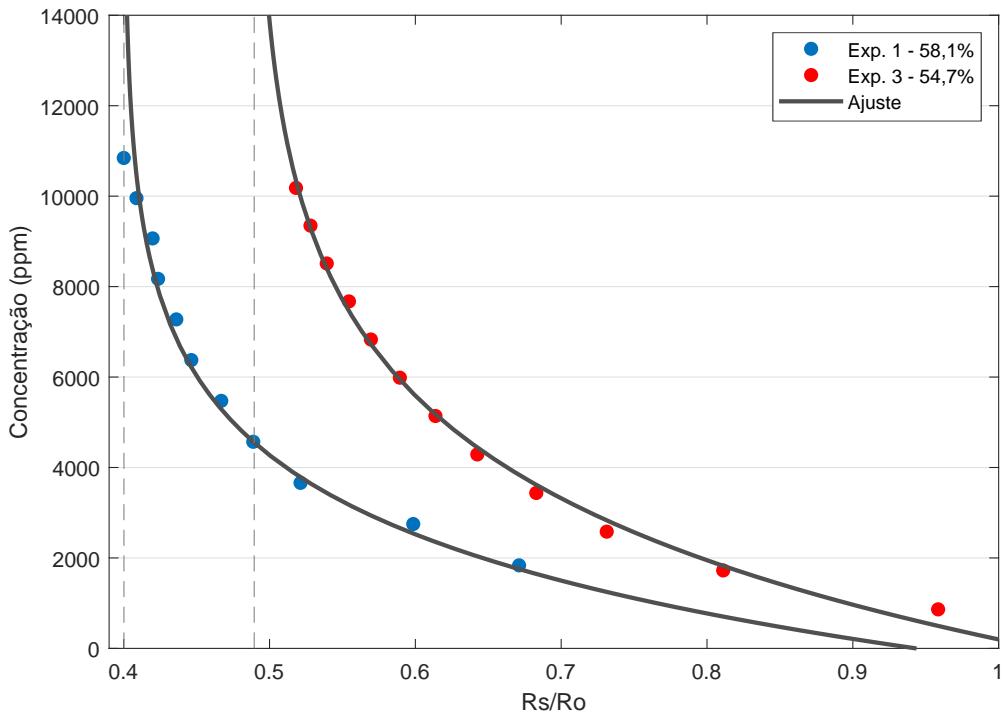
Teste	φ_{medido}	$\varphi_{Eq.10}$
08/11 - A	0,547	2,78849
08/11 - B	0,547	2,975872
08/11 - C	0,547	2,776426
21/02	0,581	2,584066
11/09	0,525	3,208137
09/11 - A	0,64-0,72	3,554818
09/11 - B	0,64-0,72	2,824998
Correlação		0,34

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4.2 Método baseado na resistência

A partir dos dados experimentais de referência foram definidas duas curvas de calibração e suas equações correspondentes, conforme apresentado pela Figura 32.

Figura 32 – Características sensitivas do sensor MQ4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para o primeiro experimento o comportamento dos dados podem ser aproximados da Equação 1.

$$\varphi_e = -2522.07 \cdot \ln \left(\frac{R_s}{R_o} - 0.4002 \right) - 1539.63 \quad (1)$$

Para o terceiro experimento o comportamento dos dados podem ser aproximados da Equação 2.

$$\varphi_e = -3522 \cdot \ln \left(\frac{R_s}{R_o} - 0.4895 \right) - 2170 \quad (2)$$

Os resultados obtidos para a equação proposta por Hanwei (2007) e para as equações geradas pelas curvas de calibração são apresentadas pela Tabela 4.5.

Tabela 11 – Resultados por resistência

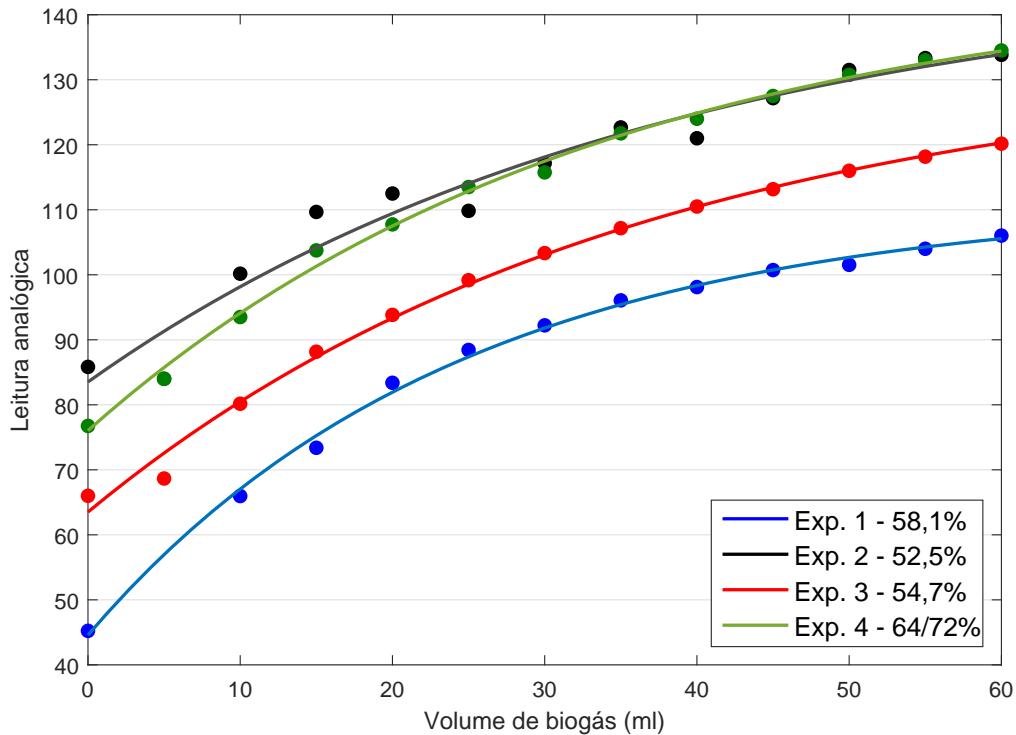
Teste	φ_{medido}	$\varphi_{Eq.12}$	$\varphi_{Eq.1}$	$\varphi_{Eq.2}$
08/11 - A	0,547	0,348167	0,202548	0,442013
08/11 - B	0,547	0,45529	0,274004	0,609182
08/11 - C	0,547	0,462284	0,278464	0,620745
21/02	0,581	0,901142	0,561666	
11/09	0,525	0,279909	0,152004	0,338262
09/11 - A	0,64-0,72	0,297318	0,16543	0,364952
09/11 - B	0,64-0,72	0,528862	0,320209	0,738359
Correlação	0,06	0,05	0,22	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4.3 Método baseado na modelagem matemática do sinal analógico

O modelo desenvolvido foi aplicado aos dados experimentais, os resultados dos ajustes para cada experimento são apresentados pela Figura 33 e pela Tabela 12.

Figura 33 – Ajustes dos dados experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Tabela 12 – Parâmetros dos ajustes

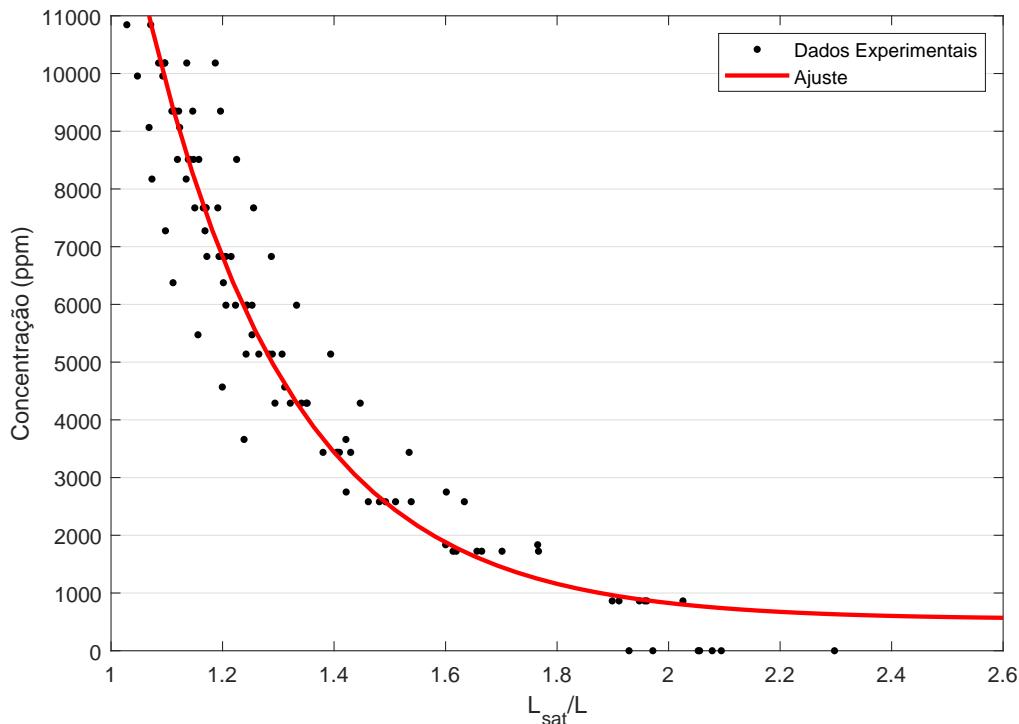
Teste	φ_{medido}	L_{sat}	L_0	λ	<i>R-square</i>
21/02/20	0,581	111,2	44,58	0,04114	0,9971
11/09/20	0,525	147,1	83,48	0,02616	0,9573
08/11/20	0,547	133,5	63,47	0,02776	0,9943
09/11/20	0,64-0,72	146,2	76,07	0,02978	0,9966
Correlação	0,32	0,36	0,12		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os valores de *R-square* próximos de 1 indicam que o modelo proposto é adequado. Para enriquecer a abordagem pelo modelo matemático foram realizadas tentativas de normalizar o comportamento do sensor em relação a concentração a qual é exposto.

Uma destas tentativas consistiu em analisar o quociente entre a leitura referente a saturação (L_{sat}) e a leitura analógica obtida experimentalmente. Os dados normalizados e o ajuste exponencial dos mesmos são apresentados pela Figura 34.

Figura 34 – Normalização da leitura analógica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A equação obtida é:

$$\varphi_e = 6,526 \times 10^5 \cdot e^{-3,87 \cdot L_{sat}/L} + 542,7 \quad (3)$$

Aplicando a equação ao conjunto de dados experimentais de referência são verificadas as correlações entre os resultados para cada volume de biogás inserido no sistema e a respectiva composição do biogás. Sendo observada uma maior correlação para a leitura inicial (L_{sat}/L_0).

Com base nos parâmetros de ajustes obtidos pelo modelo matemático e na normalização a partir da leitura de saturação foram verificadas as correlações para L_{sat}/L_0 e e^{-L_{sat}/L_0} conforme a Tabela 13, sendo utilizadas as leituras iniciais geradas pelo ajuste dos dados.

Tabela 13 – Resultados normalizados

Teste	L_{sat}/L_0	e^{-L_{sat}/L_0}
21/02 - S1	2,367	0,094
21/02 - S2	2,652	0,071
08/11 - A	2,083	0,125
08/11 - B	2,119	0,12
08/11 - C	2,13	0,119
21/02	2,44	0,087
08/11	2,103	0,122
Correlação	0,923	-0,932

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir destas correlações foi desenvolvida uma proposta de abordagem para estimativa de concentração de metano na amostra, a partir da equação:

$$\varphi = 57,143 \cdot (\lambda \cdot e^{-\frac{L_{sat}}{L_0}}) + 0,3543 \quad (4)$$

O resultado da aplicação da equação sobre os dados experimentais é apresentado pela Tabela 14.

Tabela 14 – Concentrações de metano estimadas

Teste	φ_{medido}	$\lambda \cdot e^{-\frac{L_{sat}}{L_0}}$	$\varphi_{estimado}$	Erro
21/02	0,5812	0,0040	0,5824	0,2%
08/09	0,547	0,0034	0,5483	0,2%
09/09	0,64-0,72	0,0044	0,6032	5,75%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4.4 Método baseado em metaheurística

O algoritmo de metaheurística *Simulated Annealing* (SA) foi aplicado aos dados experimentais, utilizando para calibração os resultados do primeiro e da terceiro experimentos. Os resultados gerados pelo algoritmo para cada calibração são apresentados pela Tabela 15

Tabela 15 – Resultados obtidos pela metaheurística

Teste	φ_{medido}	Exp. 1	Exp. 3
08/11 - A	0,547	0,605	0,603
08/11 - B	0,547	0,637	0,659
08/11 - C	0,547	0,656	0,630
21/02	0,581	0,660	0,623
11/09	0,525	0,614	0,644
09/11 - A	0,64-0,72	0,657	0,669
09/11 - B	0,64-0,73	0,611	0,639
Correlação	0,659	0,208	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4.5 Regression Learner

Outro método avaliado foi a utilização da ferramenta *Regression Learner* do software Matlab (Disponibilizado pelo IFMG), que treina modelos de regressão para prever dados usando aprendizado de máquina supervisionado. Foram testados modelos baseados nas leituras analógicas experimentais, nas relações entre resistências (R_s/R_o), e também nos ajustes oriundos da modelagem matemática das leituras analógicas.

As previsões retornadas pelos modelos ótimos indicados pela ferramenta são apresentadas pela Tabela 4.10.

Tabela 16 – Previsões por Regression Learner

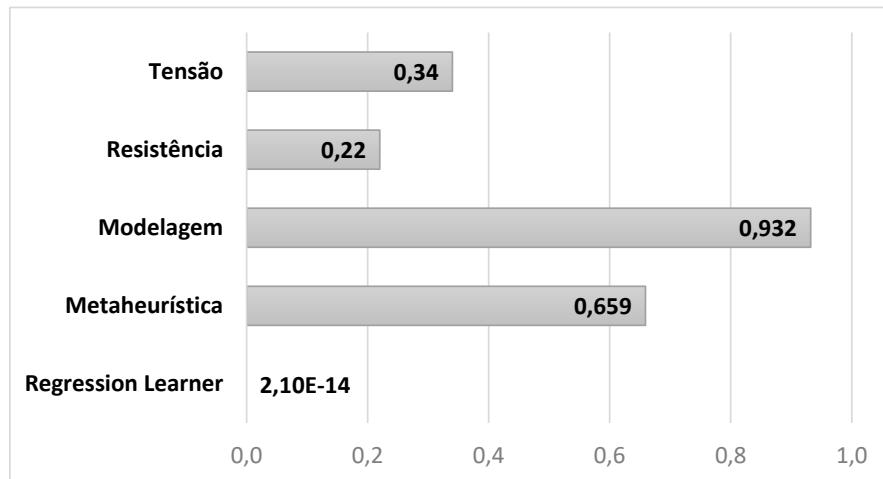
Teste	Leituras	Rs/Ro	Ajuste
09/11 A S1	0,5283	0,5832	0,5502
09/11 A S2	0,5253	0,5864	0,5537
09/11 B S1	0,5392	0,5734	0,5594
09/11 B S2	0,541	0,5708	0,5521
09/11 A	0,5265	0,5848	0,5521
09/11 B	0,5404	0,5719	0,555
09/11	0,5322	0,5767	0,5456
Correlação	1×10^{-14}	$2,1 \times 10^{-14}$	$-1,2 \times 10^{-14}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As correlações obtidas demonstram que o método não é compatível com o comportamento dos sensores utilizados no projeto, além de oferecer limitações para implementação embarcada devido à linguagem proprietária da MathWorks e ao custo computacional elevado.

As correlações obtidas para cada método são apresentadas pela Figura 35.

Figura 35 – Correlação por método



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Por apresentar a melhor correlação é definido o método baseado na modelagem matemática para implementação no sistema, cujas estimativas são consideradas adequadas ao escopo deste projeto.

Os trabalhos desenvolvidos por Fakra et al. (2020) , Frattaroli (2017) e Yang et al. (2019) obtiveram resultados promissores ao utilizar o método baseado na resistência. A baixa correlação obtida por este método para os dados experimentais deste projeto pode ser atribuída a não linearidade na fabricação dos sensores utilizados.

O método proposto baseado na modelagem matemática da leitura obtida pelo sensor é uma abordagem inovadora, ao parametrizar o comportamento do sensor nos termos de L_{sat} , L_0 e λ este método pode em teoria se adaptar a diferentes condições operacionais e a sensores oriundos de diferentes fabricantes.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta a construção de um biodigestor de modelo indiano e a análise quantitativa e qualitativa da produção de biogás.

Dante do exposto, constata-se que os objetivos foram alcançados, sendo obtido biogás com qualidade adequada para a utilização doméstica. A construção por mão de obra própria reduziu os custos totais e permitiu o retorno do investimento em apenas 19 meses.

Dentre os diversos benefícios obtidos pela construção do biodigestor nesta propriedade, constam a remoção dos dejetos do ambiente de manejo dos animais, a não liberação de metano diretamente a atmosfera e a obtenção de biofertilizante sólido e líquido para utilização no cultivo de hortaliças.

Foram desenvolvidas propostas de metodologias tanto para a medição do volume de biogás produzido quanto para a medição da concentração de metano no biogás.

Como alternativa aos dispositivos comerciais de análise de gás, foi proposto e desenvolvido um protótipo baseado em sensores semicondutivos de baixo custo. Devido as limitações destes sensores foi desenvolvido um conjunto de câmaras de diluição.

Diversos métodos foram avaliados para a interpretação do sinal analógico obtido pelos sensores, incluindo os métodos sugeridos pelos manuais de fabricantes e pela bibliografia, e também métodos elaborados especificamente para este projeto.

A adequação de cada método foi avaliada com base em dados experimentais obtidos pelo protótipo desenvolvido e em dados obtidos por análises externas realizadas com equipamentos homologados.

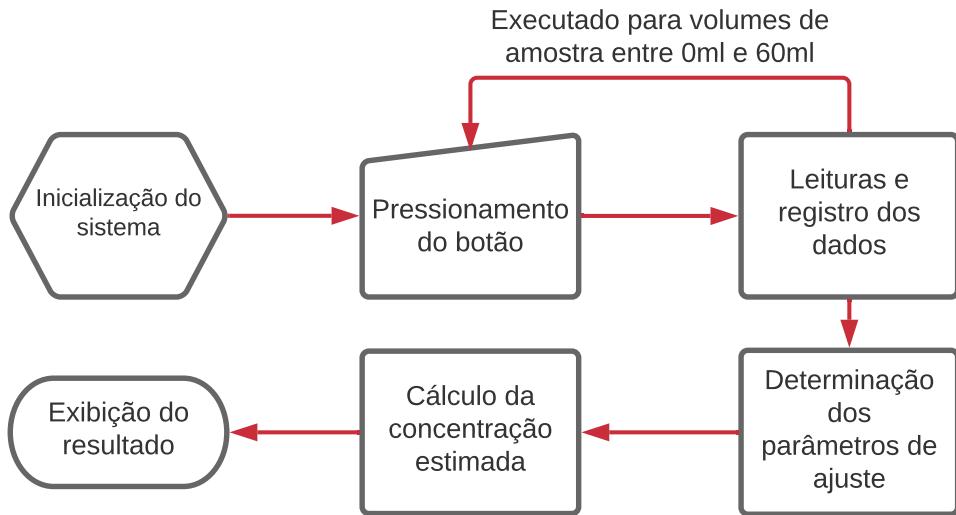
Um método de autoria própria demonstrou maior adequação aos dados experimentais de referência, sendo indicado para implementação.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para possíveis continuações deste trabalho, é sugerida a análise aprofundada acerca do método de interpretação de sinal analógico baseado na modelagem matemática do comportamento do sinal, para verificar sua aplicabilidade e sua confiabilidade.

É também sugerida a remodelagem do protótipo desenvolvido como tecnologia embarcada, e também a utilização de outros sensores de mesmo valor comercial para medida da concentração de outros gases de interesse. Um fluxograma para um possível algoritmo é apresentado pela Figura 36.

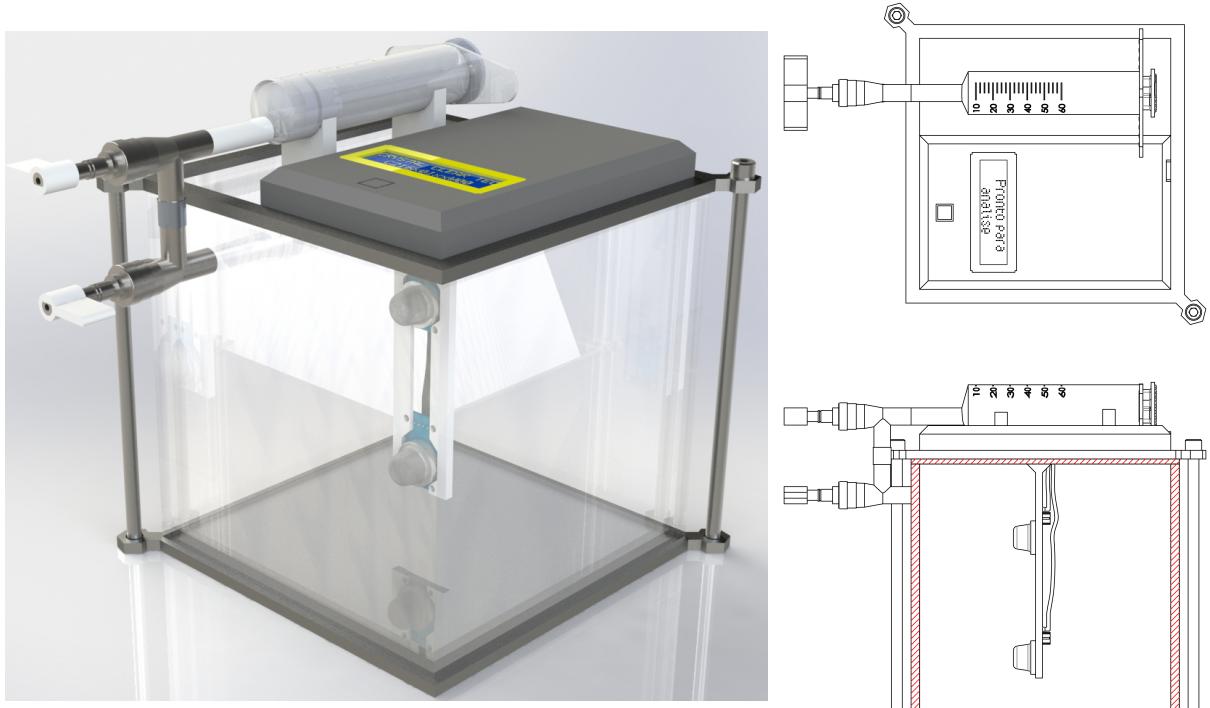
Figura 36 – Fluxograma para implementação de tecnologia embarcada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para a construção é sugerida a manutenção do volume das câmaras de expansão e amostra, sendo a câmara de expansão construída em acrílico, também é sugerida a utilização de um sistema eletrônico composto por um controlador lógico, dois sensores MQ4, um display LCD, um botão e um atuador automático na seringa, para a injeção controlada do volume da amostra. Um modelo base sugerido é apresentado pela Figura 37.

Figura 37 – Modelo e esquematização do dispositivo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, George; LANGER, Marcelo. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc & Ciência–ACSA, Joaçaba**, v. 2, n. 1, 2011.
- BELL, Ian H. et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 6, p. 2498–2508, 2014. DOI: [10.1021/ie4033999](https://doi.org/10.1021/ie4033999) Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie4033999>>.
- BUI, V. G.; NHAN, H. Q.; TRUONG, L. B. T. Small power engine fueled with biogas. **The University of Danang**, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11094/12943>>.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos et al. **Reactores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. v. 5.
- COELHO, Suan Teixeira; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González; SILVA, Orlando Cristiano da et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. 6º **Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2006.
- COLATTO, Luciulla; LANGER, Marcelo. Biodigestor–resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência–ACET, Joaçaba**, v. 2, n. 2, p. 119–128, 2011.
- CPOREL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica - 7ed.** Bookman Editora, 2013.
- DEGANUTTI, Roberto; PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido; ROSSI, Marco et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. 4º **Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002.
- DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. John Wiley & Sons, 2011.
- FAKRA, Damien Ali Hamada et al. A simple and low-cost integrative sensor system for methane and hydrogen measurement. **Sensors International**, Elsevier, 2020.
- FERNANDES, Dangela Maria et al. **Biomassa e biogás da suinocultura**. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br:8080/tede/handle/tede/821>>.

FRATTAROLI, Francesca. Design and Assessment of a Low-Cost, Autonomous, Methane-Ebullition Measurement Apparatus (MEMA), 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.15760/honors.418>>.

HANWEI, Henan. **MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas**. 2007. Disponível em: <<https://www.pololu.com/file/0J311/MQ4.pdf>>.

JENKIN, DB. **The properties of liquefied petroleum gases**. OPD Report, 1962.

KOLB, Bruno; ETTRE, Leslie S. **Static headspace-gas chromatography: theory and practice**. John Wiley & Sons, 2006.

MARIANI, Leidiane. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. 2018. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

MORAIS, Alexandre Barreira de. **Perspectivas de inserção do GLP na matriz energética brasileira**. 2005. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA JÚNIOR, Frederico Alvarenga. **Manual de construção do biodigestor rural**. 2014. Disponível em: <http://www1.pucminas.br/imagedb/documento/DOC_DSC_NOME_ARQUI20140917140023.pdf>.

POOLE, Colin F. **The essence of chromatography**. Elsevier, 2003.

SANTOS, Marcelo Valério dos. **Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização: estudo de caso**. 2016. Diss. (Mestrado) Universidade de Taubaté.

SEIXAS, Jorge; FOLLE, Sergio; MARCHETTI, Delmar. Construção e funcionamento de biodigestores. In: EMBRAPA circular técnica. Embrapa, 1981. v. 4.

SEIYAMA, Tetsuro et al. A new detector for gaseous components using semiconductive thin films. **Analytical Chemistry**, ACS Publications, v. 34, n. 11, 1962.

SOUZA, José de; SCHAEFFER, Lirio. Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano. **REVISTA LIBERATO, Educação, Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 15, p. 33-38, 2010.

SOUZA, RG de. **Desempenho do Conjunto Motogerador adaptado a Biogás**. 2006. Diss. (Mestrado) Universidade Federal de Lavras.

SPARKFUN. **Hazardous Gas Monitor**. 2016. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/hazardous-gas-monitor/all>>.

STEWART, James. **Cálculo, Volume 1, 7a edição**. Editora Cengage Learning, 2013.

WINSEN. **Combustible Gas Sensor Manual**. 2015. Disponível em: <<https://www.compel.ru/item-pdf/1198d1e9d31118870ba0dbbc167b8b98/pn/winsen~mq-4-methane-gas-sensor--lng-detection-gas-sensor.pdf>>.

YAMAZOE, Noboru. New approaches for improving semiconductor gas sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, Elsevier, v. 5, n. 1-4, p. 7–19, 1991.

YANG, Shunchang et al. Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 138, p. 224–229, 2019.