

Uma nova abordagem baseada em Likelihood e Distância Euclidiana para o reconhecimento de padrões em gas metano

A new approach based on Likelihood and Euclidean Distance for the recognition of standards in methane gas

Un nuevo enfoque basado en la Probabilidad y la Distancia Euclidiana para el reconocimiento de estándares en gas metano

Recebido: 15/04/2022 | Revisado: 23/04/2022 | Aceito: 25/04/2022 | Publicado: 29/04/2022

Caroline Lyra Dias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-6603>
Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Brasil
E-mail: caroline.dias2@fatec.sp.gov.br

Roberto Outa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8649-1722>
Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Brazil
Faculdade de Tecnologia de Lins, Brazil
E-mail: roberto.outa@fatec.sp.gov.br

Fábio Roberto Chavarette

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1203-7586>
Universidade Estadual Paulista, Brazil
E-mail: fabio.chavarette@unesp.br

Aparecido Carlos Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-3392>
Universidade Estadual Paulista, Brazil
E-mail: cido@dem.feis.unesp.br

Adriana Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3054-1804>
Institute of Technological Research of the State of São Paulo S.A – IPT, Brazil
E-mail: adrianag@ipt.br

Sandro da Silva Pinto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1484-8534>
Faculdade de Tecnologia de Lins, Brazil
E-mail: sandro.pinto@fateclins.edu.br

Luiz Gustavo Pereira Roefero

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9194-8208>
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brazil
E-mail: roefero@ita.br

Resumo

Já a algum tempo, o gás natural que vem sendo utilizado como combustível alternativo em diferentes veículos de transporte, e assim, veículos pesados como ônibus e caminhões, tendem a reduzir os custos funcionais, diminuindo as taxas de poluição ao meio ambiente. O objetivo deste trabalho é identificar e classificar sinais do gás metano de duas biomassas, uma do lodo de esgoto de primeira fase e a outra do lodo de esgoto de primeira fase incrementando o inóculo de esterco bovino, utilizando métodos matemáticos aplicados na análise de clusters da área da ciência da computação. Os teoremas utilizados na aplicação deste conceito foram o da distância euclidiana e likelihood. Para isso, será necessário incrementar conceitos ligados a: inteligência artificial; sistemas embarcados; e projeto estrutural de um protótipo de biodigestor para a produção de biogás. O resultado encontrado, demonstra com sucesso que, através do desenvolvimento do modelo experimental científico do biodigestor, obteve-se metano, e foi introduzido técnicas de análise de clusters para a formação de padrão de sinais.

Palavras-chave: Biogás; Metano; Cybersystem; Likelihood; Distância Euclidiana.

Abstract

For some time now, natural gas that has been used as an alternative fuel in different transport vehicles, and thus, heavy vehicles such as buses and trucks, tend to reduce functional costs, reducing pollution rates to the environment. The objective of this work is to identify and classify signs of methane gas from two biomasses, one from the first phase sewage sludge and the other from the first phase sewage sludge by increasing the bovine manure inoculum,

using mathematical methods applied in the analysis of clusters in the area of computer science. The theorems used in the application of this concept were that of the Euclidean and likelihood distance. For this, it will be necessary to increase concepts related to: artificial intelligence; embedded systems; and structural design of a biodigester prototype for biogas production. The result found successfully demonstrates that, through the development of the experimental scientific model of the biodigester, methane was obtained, and cluster analysis techniques were introduced for the formation of signal pattern.

Keywords: Biogas; Methane; Cybersystem; Likelihood; Euclidean Distance.

Resumen

Desde hace algún tiempo, el gas natural que se ha utilizado como combustible alternativo en diferentes vehículos de transporte, y por lo tanto, los vehículos pesados como autobuses y camiones, tienden a reducir los costos funcionales, reduciendo las tasas de contaminación al medio ambiente. El objetivo de este trabajo es identificar y clasificar signos de gas metano a partir de dos biomásas, una de los lodos de depuradora de la primera fase y la otra de los lodos de depuradora de la primera fase mediante el aumento del inóculo de estiércol bovino, utilizando métodos matemáticos aplicados en el análisis de clusters en el área de la informática. Los teoremas utilizados en la aplicación de este concepto fueron el de la distancia euclidiana y de verosimilitud. Para ello, será necesario aumentar conceptos relacionados con: inteligencia artificial; sistemas integrados; y diseño estructural de un prototipo de biodigestor para la producción de biogás. El resultado encontrado con éxito demuestra que, a través del desarrollo del modelo científico experimental del biodigestor, se obtuvo metano y se introdujeron técnicas de análisis de conglomerados para la formación del patrón de señal.

Palabras clave: Biogás; Metano; Cipersistema; Probabilidad; Distancia Euclidiana.

1. Introdução

Questões ambientais têm alavancado o interesse por fontes renováveis de energia e nesse contexto, os resíduos agroindustriais surgem como fonte importante para a produção de energia e de novos materiais. Entretanto, a conversão de biomassa em vários produtos com valor agregado para aproveitamento dos resíduos agroindustriais e geração de menor impacto ambiental ainda depende do desenvolvimento e da implementação de processos sustentáveis e viáveis economicamente (Moraes et al, 2017; de Santana et al., 2021).

Com um crescimento urbano caótico, surgiu no Brasil um problema relacionado a infra-estrutura de serviços relacionados ao saneamento básico, ocasionando problemas ambientais. Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA) são geradas 9,1 mil toneladas de esgoto por dia e somente 55% da população possui saneamento adequado, os outros 45% se dividem em 18% com esgoto coletado e não tratado e 27% que não possuem coleta nem tratamento.

Como uma solução paliativa foram criadas políticas de incentivo ao saneamento básico e a instalações de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Após o tratamento do esgoto é gerado o biossólido ou lodo de esgoto como é comumente chamado. Segundo a Sabesp, a produção desse resíduo nas ETEs operadas no município do estado de São Paulo chega a cerca de 90 toneladas por dia. Cerca de 90% do lodo gerado no mundo são destinados a processos de incineração, disposição em aterros e uso agrícola.

O uso agrícola requer atenção, pois é preciso fazer análises para verificar a presença de patógenos que podem apresentar riscos à saúde, se houver a presença dos mesmos, o biofertilizante não pode ser utilizado. Além das opções apresentadas, o lodo de esgoto apresenta potencial energético, podendo ser usados em biodigestores anaeróbios, objetivando promover o saneamento ambiental do resíduo e o aproveitamento energético do biogás, diminuindo o impacto ambiental do descarte incorreto nos rios, córregos e lagos e de emissão de biogás na atmosfera (Traballi & Makiya, 2009).

O biodigestor anaeróbio é um equipamento de fabricação simples com o objetivo de gerar biogás e biofertilizante a partir de resíduos orgânicos que geralmente são descartados na natureza causando desequilíbrio ambiental. Para a produção do biogás é necessário um ambiente propício para que as bactérias metanogênicas ajam sobre a matéria orgânica utilizada e produzam o biogás a partir de uma trajetória biológica definida. Esse ambiente refere-se a condições químicas e físicas necessárias para o crescimento das bactérias dentro do biodigestor, as quais são determinadas em certas faixas de temperatura,

pH e relação de carbono e nitrogênio contidos na biomassa. Existem dois modos de operação dos biodigestores, batelada e contínuo. No modo batelada o biodigestor é abastecido uma única vez com grande quantidade de resíduos orgânicos a determinado período e fica fechado entre 40 a 60 dias. No modo contínuo o biodigestor é abastecido constantemente pelo fluxo de entrada (Degannuti et al, 2002).

Diante deste contexto a utilização de biodigestores em áreas que não são atendidas pelo saneamento básico busca amenizar o impacto que este problema gera para os moradores destas regiões, oferecendo benefícios com a geração do biogás a partir do resíduo sólido gerado, podendo assim reduzir gastos com botijões de gás, fazendo adaptações dos fogões para o uso do biogás e também utiliza-lo como gerador de energia acoplado o sistema em motores adaptados. Uma maneira simples de solucionar um problema trazendo benefícios.

A biomassa é qualquer recurso renovável derivado de material orgânico de origem animal ou vegetal, existente na natureza ou gerada pelo homem e/ou animais, como, resíduos de atividades agrícolas, industriais e também resíduos urbanos que podem ser usados como alternativa de energia. A biomassa utilizada para produção de energia tem uma particularidade em comparação com outras fontes: o processo de conversão pode gerar combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, sendo considerada uma vantagem sobre outras fontes, pois, confere certa flexibilidade de adaptação tecnológica de acordo com a necessidade. O uso de biomassa para geração de energia é um assunto que tem muita importância, principalmente por ser um combustível renovável, devido às expectativas de esgotamento das reservas mundiais de combustíveis fósseis e pressões da sociedade por soluções ambientais para o problema das emissões de gases poluentes e das mudanças climáticas (Ferreira et al, 2018).

No Brasil, o sistema elétrico é predominantemente sustentado pela energia hidráulica, a qual dependente do regime fluvial. Para operar com maior eficiência, as usinas hidroelétricas necessitam da complementação de usinas termelétricas, que garantem segurança de entrada em operação a qualquer momento. Para ANEEL (2004), a médio e longo prazo, a exaustão de fontes não renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa como fonte alternativa. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica. Neste contexto, foi analisada a alternativa da produção de biogás como combustível a partir do uso de biodigestores, considerando a facilidade de obtenção de matéria prima (biomassa) para o processo e a flexibilidade de operar com geração constante ou variável, de forma complementar, no abastecimento de energia do país. Para Amaral et al. (2004), a fermentação da biomassa em bioreatores apresenta uma excelente alternativa, pois além de reduzir a taxa de poluição e contaminação do ciclo produtivo, promove a geração do biogás, utilizado como fonte de energia térmica, mecânica e elétrica, permitindo ainda a utilização do resíduo final como biofertilizante (Batista, 2017).

O objetivo deste trabalho é identificar e classificar sinais do gás metano de duas biomassas, uma do lodo de esgoto de primeira fase e a outra do lodo de esgoto de primeira fase incrementando o inóculo de esterco bovino, utilizando métodos matemáticos aplicados na análise de clusters da área da ciência da computação. Para isso acontecer é necessário desenvolver um experimento científico que possibilite a formação do gás, dada a biomassa, para que, conforme as condições de exposição, a produção do biogás possa ser medida utilizando sensores próprios.

2. Biodigestores

2.1 O Biodigestor

O metano, na fórmula molecular CH_4 , foi identificado pela primeira vez em torno do final do século XVIII por Alessandro Volta, cujos gás inflamável foi notado nas bolhas de um pântano alagado. Atualmente o metano é utilizado

mundialmente como fonte de combustível industrial e doméstico, e atende o protocolo de Kyoto na redução de emissão de gases de efeito estufa, substituindo a queima de carvão das centrais elétricas pela queima de gás. De uma certa forma, na época em que Alessandro Volta estudava as concentrações do metano na atmosfera, este era quantificado em 750 ppb, e atualmente o metano é considerado um dos principais gases do efeito estufa com valores acima de 1750 ppb (Reay et al., 2010).

As principais fontes naturais de metano são as áreas úmidas, cupins, estrumes e águas residuais, e fontes geológicas *onshore* e *offshore*, sendo que os termos das fontes geológicas *onshore* e *offshore* são métodos de produção de características distintas da extração de petróleo (Reay et al., 2010). O *offshore* é um termo utilizado para uma instalação estrutural localizada em alto mar para a extração de petróleo, e a *onshore* extrai o petróleo em terra firme.

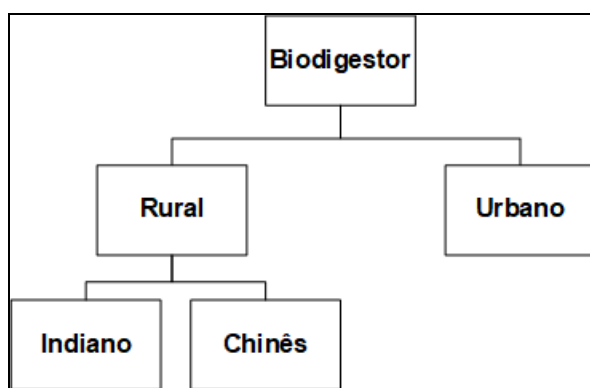
A produção de metano em estrumes e águas residuais são consideradas significativas devido à alta disponibilidade de substrato: acetato, dióxido de carbono (CO_2), gás hidrogênio (H_2), e às condições anóxicas. De um certo modo, o metano oriundo de estrumes, é crescente, considerando o fato da demanda de carne e laticínios animais (Reay et al., 2010).

2.2 Tipos de Biodigestores

Os biodigestores podem ser considerados compartimentos isolados, cuja função é a decomposição da matéria orgânica para a produção de metano. Os biodigestores são divididos em duas categorias, sendo: a primeira de fluxo contínuo, e a segunda de fluxo único ou descontínuo. No fluxo contínuo a alimentação dos dejetos ou estrumes são feitos em intervalos de tempo determinados, já nos de fluxo descontínuo a alimentação dos dejetos é feito em uma única vez (Tabatabaei & Ghanavati, 2018).

Os projetos estruturais dos biodigestores podem ser classificados em sistemas urbanos e rurais, sendo que os projetos rurais são subclassificados em biodigestores indianos e chinês (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). A Figura 1, mostra a divisão de classes em aplicações rurais e urbanas.

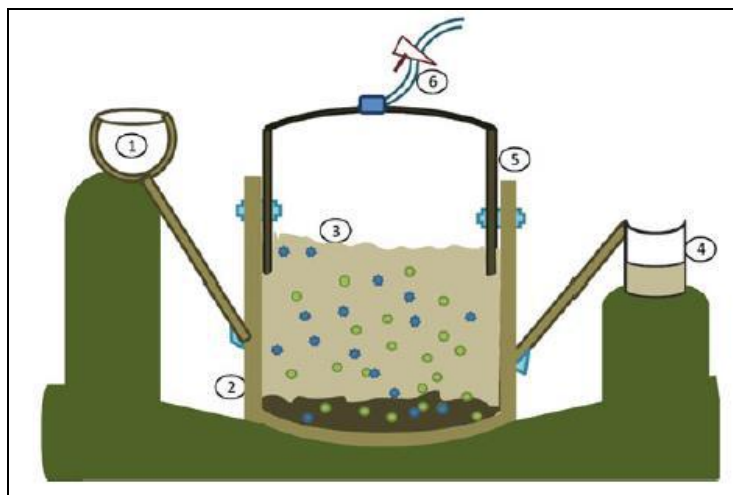
Figura 1 – Distribuição de Classes de Projetos de Biodigestores.



Fonte: Adaptado Tabatabaei e Ghanavati (2018).

O biodigestor indiano foi desenvolvido em 1950 e o tanque em torno de 1000 L e é feito de tijolo e concreto alocado acima ou abaixo do solo. O processo da produção de metano é feito quando ocorre a decomposição da matéria orgânica, e o tanque interno e sobreposto e de forma invertida ao tanque principal, flutua com o aumento da produção de metano (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). A Figura 2 mostra o desenho esquemático do biodigestor indiano e seus respectivos acessórios.

Figura 2 – Biodigestor Indiano.

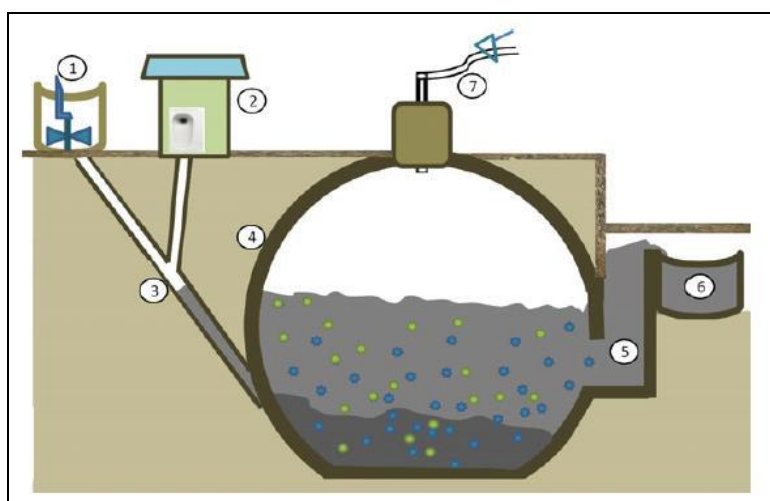


Fonte: Tabatabaei & Ghanavati (2018), p.441.

Na figura, o item (1) corresponde a entrada da matéria orgânica; o item (2) é o tanque maior chamado de reator acoplado com um tanque interno (5) sobreposto invertido (linha marrom escuro); o item (3) é a matéria orgânica; o item (4) é a saída do tanque digestor; o item (6) é o tubo de gás.

O biodigestor chinês foi desenvolvido em 1936 e tem um tamanho variando entre 6, 8 e 10 m^3 , e é projetado em um poço subterrâneo, cuja parte superior tem forma de cúpula feita de tijolo, pedra ou concreto. O metano é produzido considerando que os dejetos são alocados em um reservatório através de tubos de escoamento (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). A Figura 3 mostra o biodigestor chinês e seus respectivos componentes.

Figura 3 – Biodigestor Chinês.



Fonte: Tabatabaei & Ghanavati (2018), p.442.

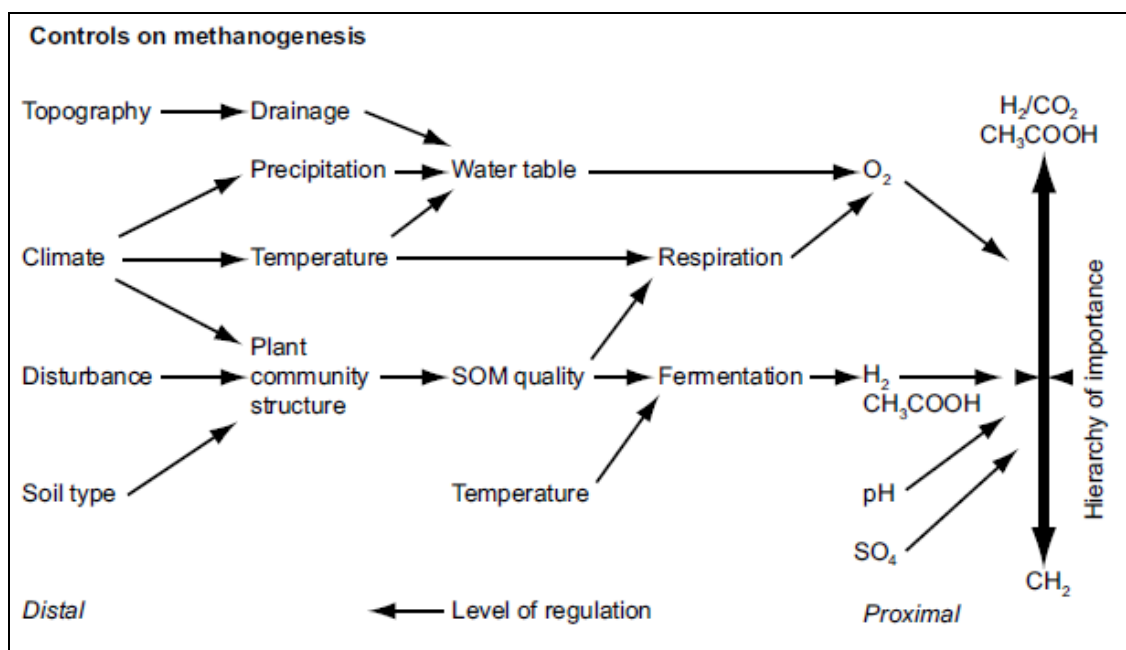
Na figura o item (1) corresponde a entrada; o item (2) a latrina; o item (3) aos dutos de entrada do dejetos na câmara; o item (4) corresponde ao biorreator; o item (5) corresponde a câmara de expansão (reservatório); o item (6) a saída do tanque de retenção do chorume; o item (7) corresponde ao tubo de gás.

O processo de produção do gás metano ocorre na decomposição da matéria orgânica, considerada a digestão anaeróbica, feita pelas bactérias anaeróbicas, este processo é comumente chamado de processo de fermentação (Van Basshuysen, 2016).

A princípio a formação do metano se inicia da fermentação primária de macromoléculas orgânicas em ácido acético, diferentes ácidos carboxílicos, álcoois, CO_2 e hidrogênio. A partir deste, se inicia a fermentação secundária dos álcoois e ácidos carboxílicos em acetato, H_2 , CO_2 , sendo todos convertidos em CH_4 por bactérias metanogênicas, cujos controles de temperatura, persistências de condições anaeróbicas, transporte de gases, e fornecimento de substratos orgânicos são essenciais para a formação do metano (Reay et al., 2010).

Durante a produção do metano ocorre um processo chamado processo microbiano de metanotrofia, que é o consumo do metano em partes aeróbicas do solo, ocorrendo também em solos secos com as bactérias na concentração atmosférica do metano. Este processo é responsável pela oxidação de aproximadamente 50% do metano produzido no solo (Reay et al., 2010). A Figura 4 mostra a variação de controles na taxa de formação do metano em diferentes escalas espaciais e temporais.

Figura 4 – Variação do Controle no Metano.



Fonte: Reay et al. (2010), p.29.

2.3 Produção de Biogás

A fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais, vegetais, lixos, efluentes industriais, lodo de esgoto dão origem ao biogás. O biogás é composto por metano, dióxido de carbono e misturas de gases de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio (Wellinger et al., 2013; Demirbas, 2010).

Para que ocorra a formação do biogás é indispensável que a biomassa ou a matéria orgânica seja composta por carboidratos, proteínas, lipídios entre outros nutrientes, sendo armazenadas em ambientes isentos de ar ela se decompõe formando gás e impurezas. O processo anaeróbio produz dióxido de carbono que faz ligação com a amônia e o enxofre produzido fica como resíduo, resultando no biogás de composição CH_4CO_2 (Wellinger et al., 2013; Demirbas, 2010).

O processo anaeróbico tem a atuação direta de diversas bactérias e é separado em quatro etapas, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Guebitz et al., 2015; Epstein, 2003; Wellinger et al., 2013; dos Santos et al., 2020).

A hidrólise é o processo de quebra das ligações moleculares complexas realizado por enzimas no processo bioquímico, dando origem aos monômeros considerados um composto orgânico simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares. O processo da biodigestão ocorre da quebra dos polímeros, formando o biogás. A acidogênese é um processo, cujas bactérias transformam as substâncias resultantes da hidrólise em ácidos, hidrogênio e gás. A quantidade de hidrogênio dissolvido pode afetar negativamente o processo causando o acúmulo de ácidos orgânicos, resultando na queda do PH e ineficiência do processo. A metanogênese, última fase da biodigestão, ocorre quando os microrganismos metanogênicos, classificados no domínio das Archeas, convertem o ácido acético, o hidrogênio, e o dióxido de carbono em metano. (Guebitz et al., 2015; Epstein, 2003; Wellinger et al., 2013). No processo de metanogênese os microrganismos metanogênicos acetoclásticos, transformam o grupo metil do ácido acético em gás metano predominantes em biodigestores de baixa carga volumétrica. Os microrganismos hidrogênotróficos, geram metano através do hidrogênio e do gás carbônico, predominantes em biodigestores de alta carga volumétrica (Guebitz et al., 2015; Epstein, 2003; Wellinger et al., 2013).

Dois fatores alteram o comportamento do gás metano, sendo a temperatura e o pH. A temperatura oscila entre 0°C a 97°C, cujo aumento do gás metano ocorre na faixa entre 35°C e 37°C. O pH determina a etapa da biodigestão e pode ser dividido da seguinte forma: fase de hidrólise e acidogênese, pH em torno de 5,2 a 6,3; fase da acetogênese e metanogênese, pH em torno de 6,5 a 8 (Guebitz et al., 2015; Wellinger et al., 2013).

A pressão no interior dos biodigestores varia de acordo com o modelo indiano ou chinês, cujas câmaras se movimentam de acordo com o processo fermentativo, a relação pode ser escrita como: 1Nm³ de biogás, ocupa 0,95m³ de volume, e contém aproximadamente 6kWh (Wellinger et al., 2013).

2.4 Métricas de Controle de Produção de Biogás

Os itens de controles têm como objetivo definir uma metodologia numérica para a produção estimada do biogás a partir de biodigestores. A equação 1 demonstra o fator de emissão do metano baseado em uma população de animais (Mito et al., 2018):

$$F_{em} = SV \cdot 365 \cdot \beta_0 \cdot 0,67 \cdot \frac{F_{cm}}{100} \cdot S_m \quad (1)$$

onde, F_{em} é o fator de emissão de metano por população/categoria ($kg_{CH_4}cab^{-1}ano^{-1}$); β_0 ; SV são os sólidos voláteis ($kg_{SV}cab^{-1}dia^{-1}$); β_0 é a capacidade de produção de metano pelo dejetos ($m^3_{CH_4} \cdot kg_{sv}^{-1}$); F_{cm} é o fator de conversão de acordo com o manejo (%); S_m é o fator do sistema de gerenciamento de resíduos (adimensional). A equação 2 demonstra a emissão de metano baseado em uma população de animais,

$$CH_4_{dejetos} = \sum \frac{F_{em} \cdot N}{10^6} \quad (2)$$

onde, $CH_4_{dejetos}$ é a emissão de metano durante o manejo de dejetos; N é o número de animais de categorias em questão (Mito et al., 2018). A Tabela 1 mostra os valores tabelados da metodologia IPCC para parâmetros qualitativos.

Tabela 1 – Parâmetros Qualitativos Metodologia IPCC (tabela de valores).

Categoria	SV (kg cab ⁻¹ dia ⁻¹)	B ₀ (m ³ CH ₄ kg _{SV} ⁻¹)	FCM (%)	SM
Suínos	0,3	0,29	0,79	1
Vacas de leite	2,9	0,13	0,79	1
Outros bovinos	2,5	0,1	0,79	1

Fonte: Mito et al. (2018), p.20.

O cálculo para a produção de dejetos de suínos e bovinos pode ser mostrada nas equações 3 e 4 respectivamente, assim:

$$P_{ds} = \sum N \cdot P_{e_{ds}} \quad (3)$$

$$P_{db} = \sum N \cdot P_{e_{db}} \cdot t_c \quad (4)$$

onde, P_{ds} é a produção diária de dejetos suínos de categoria animal; $P_{e_{ds}}$ é a produção específica de dejetos suínos da categoria animal; P_{db} é a produção diária de dejetos bovinos de categoria animal; $P_{e_{db}}$ é a produção específica de dejetos bovinos da categoria animal; e t_c é o tempo de confinamento por dia do animal (Mito et al., 2018). A Tabela 2 mostra os parâmetros tabelados qualitativos do CIBiogás-ER.

Tabela 2 – Parâmetros Qualitativos Metodologia CIBiogás-ER (tabela de valores).

Tipo de rebanho	SV (kg SVcab. ano ⁻¹)	FCM (%)	B ₀ (m ³ CH ₄ kgSV ⁻¹)	f _b	% CH ₄
Suínos	0,3	0,78	0,29	0,94	60
Bovino de leite	4	0,78	0,18	0,94	60
Outros bovinos	2,5	0,78	0,1	0,94	60

Fonte: Mito et al. (2018), p.22.

A metodologia numérica de produção de metano por reatores anaeróbicos, demonstrada por Chen (1983), determina que o metano produzido do reator representa 60% do total de biogás produzido em um determinado período (Mito et al., 2018). A equação 5 demonstra a produtividade em m³ de metano de um biodigestor por dia, assim:

$$Pb_{chen} = \frac{\beta_0 \cdot SV}{t_{rh}} \left(1 - \frac{k}{(t_{rh} \cdot v_{ce}) - 1 + k} \right) \quad (5)$$

onde, Pb_{chen} é a produtividade em m³ de metano por m³ do biodigestor ao dia; t_{rh} é o tempo de retenção hidráulica; k coeficiente cinético ($k = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,051 \cdot SV}$) (adimensional); v_{ce} é a velocidade máxima de crescimento específico ($v_{ce} = 0,013 \cdot T - 0,0129$)(dia⁻¹); T é a temperatura (°C) (Mito et al., 2018). A equação 6 determina a estimativa da produção diária de metano, assim:

$$Pbd_{chen} = Pb_{chen} \cdot V_{bio} \quad (6)$$

onde, V_{bio} é o volume do biodigestor. A Tabela 3 mostra os parâmetros qualitativos de Chen (1983) para suínos, bovinos de leite, bovinos confinados e outros bovinos (Mito et al., 2018).

Tabela 3 – Parâmetros Qualitativos para a Produção de Metano de Chen (1983).

Tipo de rebanho	SV ($g_{sv} L^{-1}$)	B0 ($m^3_{CH_4} kg_{sv}^{-1}$)
Suínos	31,50	0,50
Bovino de leite	64,70	0,20
Bovinos confinados		0,35
Outros bovinos		0,25

Fonte: Mito et al., (2018), p.24.

3. Análise de Sinais e Métodos Matemáticos

3.1 Métodos Matemáticos Aplicado a Análise de Sinais

Um sinal pode ser considerado uma representação digital de uma determinada quantidade de informações, como uma tensão analógica, corrente, resistência, entre outros, e são utilizados, geralmente para identificar um determinado comportamento físico de um determinado sistema dinâmico (Holman, 2012). O objetivo de qualquer captação de dados e processamento de sinais é coletar informações do experimento, cujo processamento é determinado por um método analítico, resultando em variáveis expressivas no projeto.

Diferentes métodos analíticos ligados ao processamento de sinais podem ser aplicados para se adquirir os resultados, podemos citar o agrupamento de dados que é uma técnica aplicada para análise estatística de dados, e a análise de clusters que é muito utilizado por cientistas, de uma forma geral, para achar grupos em banco de dados, e aplicados principalmente na inteligência artificial e reconhecimento de padrões (Kaufman & Rousseeuw, 1990; Abonyi & Feil, 2007).

Os sinais processados, chamados de amostras, quando considerados representativos, podem gerar estimativas de afirmação de parâmetros, induzindo conclusões sobre um determinado universo, e esta condição é chamada de inferência estatística (Prado, 2014).

A estimação de parâmetros de uma população (*maximum likelihood estimation* - MLE) “determina as estimativas dos parâmetros de uma determinada população que maximizam a função de verossimilhança, ou seja, a estimativa determina as mais semelhantes à verdade” (Prado, 2014). Este teorema estatístico permite que, dado uma determinada distribuição, é possível se determinar a sua distribuição mesmo desconhecendo a média e variância. Supondo que a função densidade seja $f(\vec{x}|\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, onde \vec{x} é o vetor das variáveis medidas e $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ são os parâmetros (Roe, 2001; Montgomery & Runger, 2003). Considerando que diversas experimentações foram feitas, obtém-se $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \dots, \vec{x}_n$, teremos,

$$L_{kh} = f(\vec{x}_1) f(\vec{x}_2) f(\vec{x}_3) \dots f(\vec{x}_n) \quad (7)$$

onde L_{kh} é a função *likelihood* dos resultados experimentais, sendo que a função densidade é obtida dos valores fixos de $\vec{\alpha}$ (v). Com isso, matematicamente, o método de máxima verossimilhança ou *maximum likelihood*, consiste em encontrar uma estimativa dos parâmetros $\vec{\alpha}$ que maximize L_{kh} , e a equação que a representa pode ser escrita como (Roe, 2001; Montgomery & Runger, 2003),

$$w = \log L_{kh} = \sum_{i=1}^n \log f(\vec{x}_i|\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \alpha_j} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f(\vec{x}_i)} \frac{\partial f(\vec{x}_i)}{\partial \alpha_j} = 0 \quad (9)$$

Considerando que é necessário estimar a menor variação, teremos, $f(x_1|\alpha) f(x_2|\alpha) \dots f(x_n|\alpha) dx_1 \dots dx_n$, escrito como, $g(\alpha^*|\alpha) h(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}, \alpha^*|\alpha) d\alpha^* d\xi_1 \dots d\xi_{n-1}$. Supondo que quase todos os valores são derivadas, $\frac{\partial f}{\partial \alpha}, \frac{\partial g}{\partial \alpha}$, e $\frac{\partial h}{\partial \alpha}$ existe para todo α em A , e que

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} < F_0(x), \frac{\partial g}{\partial \alpha} < G_0(x^*), \left| \frac{\partial h}{\partial \alpha} \right| < H_0(\xi_1, \dots, \xi_{n-1}, \alpha^*), \quad (10)$$

onde, $F_0, G_0, \alpha^* G_0, H_0$ são integráveis em todo o espaço de variáveis \vec{x} e $\alpha^*, \xi_1, \dots, \xi_{n-1}$, respectivamente (Roe, 2001; Montgomery & Runger, 2003). Portanto, a estimativa regular contínuo de α^* é uma estimativa regular de α e, para o caso de uma medição única de variável x (\vec{x} é *unidimensional*), e um único parâmetro α ($\vec{\alpha}$ é *unidimensional*), a integral que representa o intervalo de $-\infty, +\infty$, pode ser escrita como,

$$\int_{-\infty}^{\infty} H(x) f(x) dx < M \quad (11)$$

onde, M depende de α (Roe, 2001; Montgomery & Runger, 2003). Assim, a equação *likelihood* tem uma solução α^* que converge na probabilidade de valores reais, α_0 , quando $n \rightarrow \infty$, portanto,

$$k^2 = E \left\{ \left(\frac{\partial \log f}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=\alpha_0}^2 \right\} \quad (12)$$

$$y = k\sqrt{n}(\alpha^* - \alpha_0) \quad (13)$$

onde, E é a estimativa, k é a distribuição normal, y é o resultado assintótico normal $(0,1)$. A variância de α^* é assintótico quando $\left(n E \left\{ \left(\frac{\partial \log f}{\partial \alpha} \right)^2 \right\} \right)^{-1}$ (Roe, 2001; Montgomery & Runger, 2003).

Considerando o fato de que os métodos estatísticos são utilizados para auxiliar a descrição do entendimento de uma variabilidade, é importante entender as medidas de dispersões das amostras em relação a sua média aritmética, e assim são considerados o: desvio padrão, a variância e desvio médio absoluto. Portanto, o desvio padrão pode ser escrito como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (14)$$

A variância pode ser escrita como,

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (15)$$

O desvio médio absoluto pode ser escrito como,

$$Da_m = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n-1} \quad (16)$$

onde, $|X_i - \bar{X}|$ representa o valor absoluto dos resíduos R_i ; $X_i - \bar{X}$ são os resíduos de R_i , $n - 1$ representam os graus de liberdade, sendo $n > 1$; \bar{X} é a média aritmética amostral; X_i é a amostra; $\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|$ é a mediana do desvio absoluto (de Prado, 2014).

A largura da faixa de uma amostra X , pode ser definida como,

$$\Delta f = X_{i(\max)} - X_{i(\min)} \quad (17)$$

onde, $X_{i(\min)}$ é o elemento da amostra de menor valor, e $X_{i(\max)}$ é o elemento da amostra de maior valor (de Prado, 2014).

3.2 Prototipagem Experimental

Considerando o fato de que os seres humanos estão cada vez mais exigentes com os produtos e condições humanas, muitos produtos estão sofrendo modificações e até mesmo sendo adaptados para o cotidiano, satisfazendo as condições de custos, qualidade e aplicações.

Um dos fatores de exigência pode ser considerado as fontes de energias renováveis, que surgiu na década de 1970, quando o preço do petróleo teve um aumento, e foi necessário a busca de energia importada, resultando no crescente interesse de recursos renováveis disponíveis e situados em locais próximos, por diferentes ramos industriais. Atualmente o comitê de energia Watt atua diretamente na conscientização de programas ligados a fontes alternativas de energias renováveis. A digestão anaeróbica para a produção de metano, considerada uma fonte de energia renovável, é comumente utilizada em diversos países, dado a condição de que melhorias no processo estão sendo desenvolvidas (Laughton, 1990).

A indústria atual reconhece o incremento de novas tecnologias, sendo elas os elementos de base ou fundamentais, os elementos estruturantes e os elementos complementares. Os elementos de base são os sistemas ciber físicos, internet das coisas (IoT) e internet de serviços (IoS). Os sistemas ciber-físicos, considerado a junção de informação e automação, atua na troca de informações, execução de comandos e acompanhamento de processos produtivos a distância e em tempo real (Sacomano et al., 2018).

Os sensores podem ser considerados dispositivos que respondem a estímulos de condições físico-químicas, transformando essas condições em sinais elétricos, cuja leitura pode ser feita através de sistemas eletrônicos. Pode-se exemplificar os sensores como os de temperatura, pressão, deslocamento, tipo de gás, posição, entre outros (Sacomano et al., 2018).

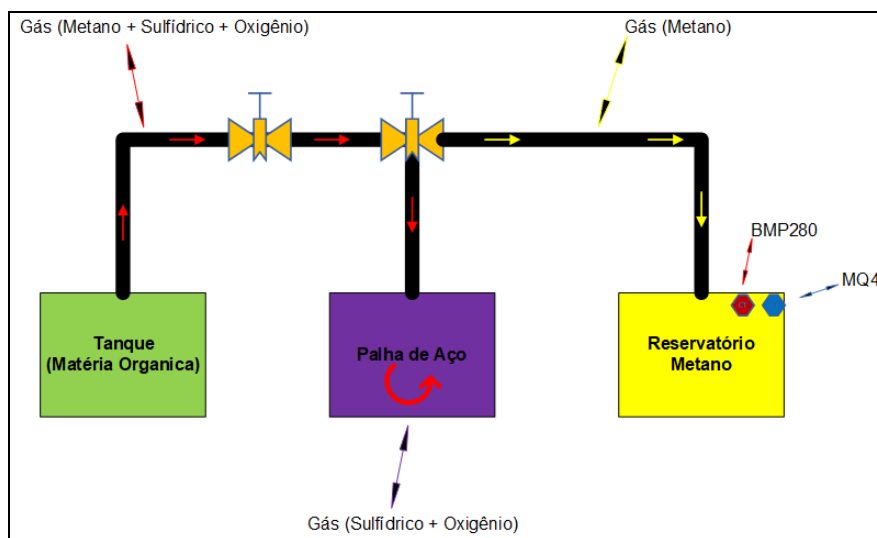
Os sensores que serão utilizados neste trabalho são:

- Sensor de gás metano MQ4, sensibilidade de 300ppm até 10.000 ppm, temperatura de -10°C a 50°C ; tensão de 5V a 150mA;
- Sensor de Pressão e Temperatura BMP280, tensão de 3V, $2,7\mu\text{A}$, (medição de pressão de 300 a 1100hPa, precisão de $\pm 0,12\text{hPa}$), (medição de temperatura de -40°C a 85°C , precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$);

- Placa de arduino UNO, Tensão de operação: 5V(+/- 5%), Tensão de operação no pino 3V3: 3,3V(+/- 15%), Microcontrolador: ATmega328;
- Fios e conectores.

A Figura 5 mostra o desenho esquemático do protótipo de retenção da biomassa para a formação do biogás e as ligações dos sensores no sistema.

Figura 5 – Formação do Protótipo Experimental.



Fonte: Desenvolvimento Próprio.

4. Metodologia

O lodo de esgoto e o esterco bovino são as duas biomassas aplicadas a este trabalho para a obtenção do metano. O lodo de esgoto foi retirado de um reservatório de primeira fase perto a cidade de Guararapes/SP, e o esterco bovino também é da região. A Figura 6 mostra o local de retirada do lodo de esgoto da primeira fase.

Figura 6 – Reservatório do Lodo de Esgoto (estação de tratamento).



Fonte: Região Próxima à cidade de Guararapes.

As Figuras 7, 8 e 9, mostram respectivamente, o lodo de esgoto, o esterco bovino, e o lodo de esgoto com o inóculo esterco bovino

Figura 7 – Lodo de Esgoto.



Fonte: Região próxima à cidade de Guararapes.

Figura 8 – Esterco Bovino.



Fonte: Região próxima à cidade de Guararapes.

Figura 9 – Lodo de Esgoto e Esterco Bovino



Fonte: Região próxima à cidade de Guararapes.

A metodologia experimental se inicia com a formação do protótipo de retenção da biomassa para a formação do gás metano, considerado um protótipo volumétrico com o objetivo de reter o gás para a aplicação de sensores de gás metano, temperatura e pressão. A Figura 10 mostra o protótipo de retenção do biogás com os sensores de metano, temperatura e pressão.

Figura 10 – Modelo Experimental de Retenção de Biomassa (Gás Metano).



Fonte: Desenv. Próprio

O protótipo é composto por dois galões de 5L de mercado, canos de pvc de mercado, válvula de vazão de pvc de mercado, adesivo para fixação de componentes de mercado, sensores de pressão e temperatura BMP280, sensor de metano MQ4, placa arduino UNO.

O banco de dados foi formado considerando que, durante 15 dias foram captados 4 sinais em horários diferentes durante 24h, cujo tamanho da amostra é de 1x4000 por sinal, assim, ao total, foram captados 60 sinais nos horários: 4h; 12h; 17h e 22h. O experimento para o sensoriamento do biogás, baseia-se em duas etapas, a primeira ocorre somente com a biomassa do esgoto de lodo de 1º geração; a segunda ocorre com a biomassa do esgoto de lodo de 1º geração introduzindo o inóculo de esterco bovino. Os valores do metano, obtidos pelos sensores estão na unidade de parte por milhão (ppm). A tabela 4 mostra os resultados das médias diárias da primeira etapa.

Tabela 4 – Banco de Dados do Metano (biomassa lodo de esgoto 1º geração) (ppm).

reservatório	Horário de coleta	PRODUÇÃO DIÁRIA DO METANO (média)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
com biomassa	4h	270,95	327,03	406,73	349,84	323,40	384,97	378,62	319,09	320,60	355,78	304,05	281,21	305,72	291,57	377,58
	12h	293,04	305,56	322,71	314,32	367,76	317,81	314,74	295,70	297,69	281,97	305,03	230,34	305,56	306,61	314,36
	17h	285,63	302,33	295,47	302,44	285,82	342,09	321,31	466,87	613,24	327,26	326,50	286,92	322,65	404,84	334,67
	22h	336,03	390,23	386,53	341,71	371,37	355,84	389,71	440,03	476,87	375,11	290,67	333,18	331,68	306,09	302,25
sem biomassa	4h	266,65	564,27	303,21	308,14	315,61	311,51	335,63	315,07	314,05	306,13	306,44	257,27	281,84	313,54	279,16
	12h	313,40	299,39	287,67	289,03	397,55	291,17	319,43	307,75	300,59	360,51	313,21	262,66	291,21	300,87	278,26
	17h	284,43	318,57	298,86	291,52	296,63	504,79	316,45	306,99	293,30	303,11	302,99	260,94	300,22	263,45	279,13
	22h	298,42	309,40	304,66	305,58	304,21	299,52	297,79	309,64	303,97	274,31	275,69	292,58	345,37	302,58	285,33

Fonte: Desenv. Próprio

A Tabela 5 mostra os resultados das médias diárias da segunda etapa.

Tabela 5 - Banco de Dados do Metano (Lodo + Esterco Bovino) (ppm).

reservatório	Horário de coleta	PRODUÇÃO DIÁRIA DO METANO (média)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
com biomassa (Lodo + Esterco)	4h	294,44	309,91	311,11	309,98	275,73	381,29	331,11	292,33	303,82	305,28	313,31	311,75	367,63	297,90	300,24
	12h	303,17	300,64	310,66	315,26	323,67	340,53	292,06	297,65	293,96	315,77	351,38	295,03	299,90	476,82	302,45
	17h	364,99	309,08	353,94	339,02	315,96	328,98	396,58	320,51	304,05	301,89	314,88	306,39	319,51	325,52	496,02
	22h	301,60	302,93	327,07	415,44	327,07	327,07	396,58	304,26	320,45	344,67	306,57	311,41	297,57	318,42	308,66
sem biomassa (Lodo + Esterco)	4h	311,11	330,66	309,08	407,46	303,31	342,09	303,31	308,97	330,12	310,99	325,94	311,64	302,75	274,45	305,62
	12h	312,99	303,58	303,58	361,04	342,09	315,96	407,46	297,07	342,73	318,54	314,88	321,23	308,16	311,38	317,49
	17h	298,61	292,06	407,46	325,24	324,09	343,59	313,90	305,12	314,85	315,21	322,57	307,34	334,39	311,54	699,06
	22h	330,05	342,35	342,09	318,71	319,13	335,89	313,90	314,50	299,35	304,79	296,36	359,53	316,74	327,88	315,96

Fonte: Desenv. Proprio.

A Tabela 6 mostra o resultado da média geral do banco de dados do metano.

Tabela 6 – Resumo Geral dos Dados Médios do Metano (ppm).

reservatório		PRODUÇÃO DIÁRIA DO METANO (média)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Lodo de Esgoto	Lodo de Esgoto Com Biomassa	296,41	331,29	352,86	327,08	337,09	350,18	351,10	380,42	427,10	335,03	306,56	282,91	316,40	327,28	332,21
	Lodo de Esgoto Sem Biomassa	290,73	372,91	298,60	298,57	328,50	351,75	317,32	309,86	302,98	311,02	299,58	268,36	304,66	295,11	280,47
Lodo de Esgoto + Esterco Bovino	Lodo de Esgoto + Esterco Bovino Com Biomassa	316,05	305,64	325,70	344,92	310,61	344,47	354,08	303,69	305,57	316,90	321,54	306,15	321,15	354,66	351,85
	Lodo de Esgoto + Esterco Bovino Sem Biomassa	313,19	317,16	340,55	353,11	322,15	334,38	334,64	306,42	321,76	312,38	314,94	324,94	315,51	306,31	409,53

Fonte: Desenv. Próprio.

A temperatura e pressão foram coletadas até o décimo dia, após este dia, o sensor parou de funcionar dado as condições de sensibilidade do equipamento. A temperatura está em Celsius (°C) e a pressão em Pascal (Pa). A Tabela 7 mostra o resultado da pressão e temperatura do interior de cada galão de 5L.

Tabela 7 – Resultado da Temperatura e Pressão de cada Recipiente.

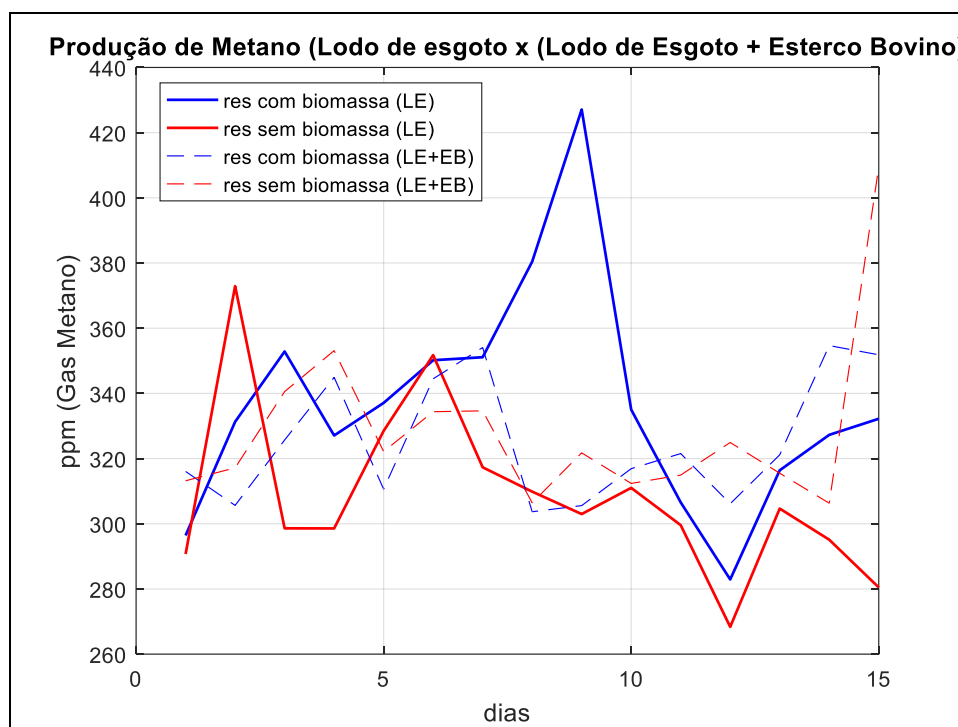
reservatório		PRODUÇÃO DIÁRIA DO METANO (média)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Temperatura (°C) com biomassa		26,64	45,63	47,35	47,10	46,50	33,71	41,79	50,68	46,06	29,04					
Temperatura (°C) sem biomassa		21,92	46,34	34,10	38,82	26,50	28,47	24,80	51,25	51,24	33,55					
Pressão Atmosférica (Pa) com biomassa		96.807,24	96.885,97	96.829,41	96.748,10	97.167,16	96.783,32	97.213,80	97.210,92	97.236,82	96.323,49					
Pressão Atmosférica (Pa) sem biomassa		96.955,63	96.958,89	96.888,17	96.751,64	96.419,36	96.449,46	97.086,26	97.222,44	97.231,06	96.772,80					

Fonte: Desenv. Próprio

Durante o desenvolvimento do experimento, notou-se uma variação na quantidade de gás metano. No 2 dia, as 4h, a proporção de 564,27 ppm de metano. No dia 6, as 17h, a proporção de 504,79 ppm. No dia 9, as 17h, a proporção de 613,24 ppm. Note que, no dia 2 a temperatura média do dia é de 45,99°C; no dia 6 é de 31,09°C; no dia 9 é de 48,65°C. A quantidade de metano encontrado acima dos valores normais do experimento, pode ser entendido com um fator a ser analisado individualmente, porém, dado a limitação do experimento, este procedimento não foi estudado.

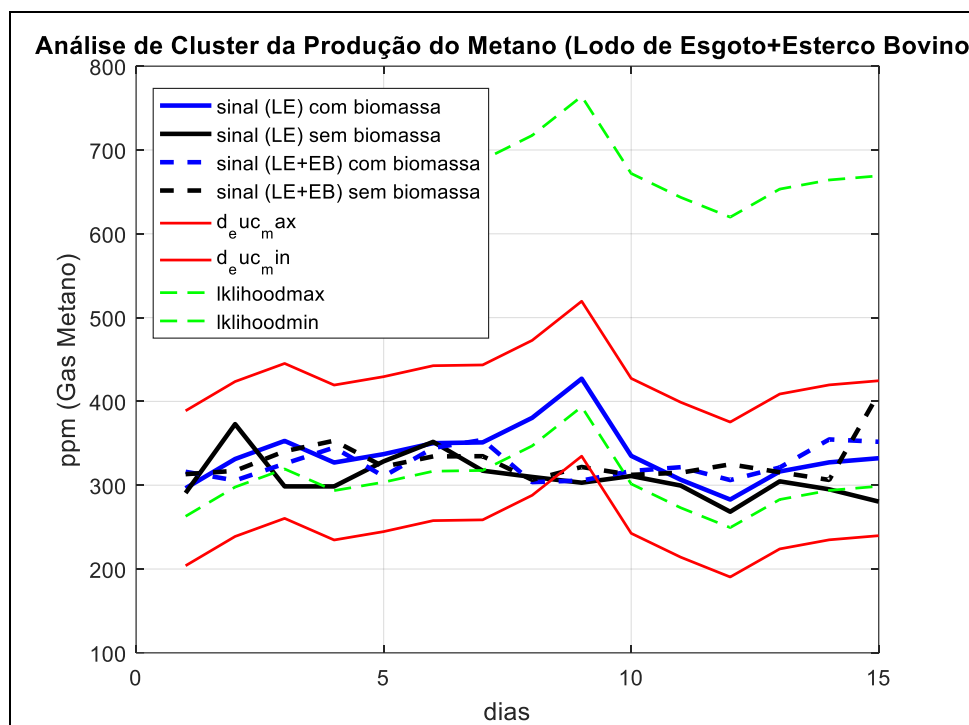
Utilizando o conceito de análise clusters no sinal digital do metano, foi possível classificá-lo e estabelecer um critério de padronização ao sistema. As Figuras 11 e 12 mostram respectivamente, o resultado do valor médio do gás metano do lodo e lodo com inóculo esterco de vaca; o resultado da aplicação do conceito de análise de clusters para padronização do sinal.

Figura 11 – Resultado da Produção Metano (Lodo e Lodo com Inóculo).



Fonte: Desenv. Próprio.

Figura 12 – Análise de Clusters Aplicado aos Sinais do Gás Metano.



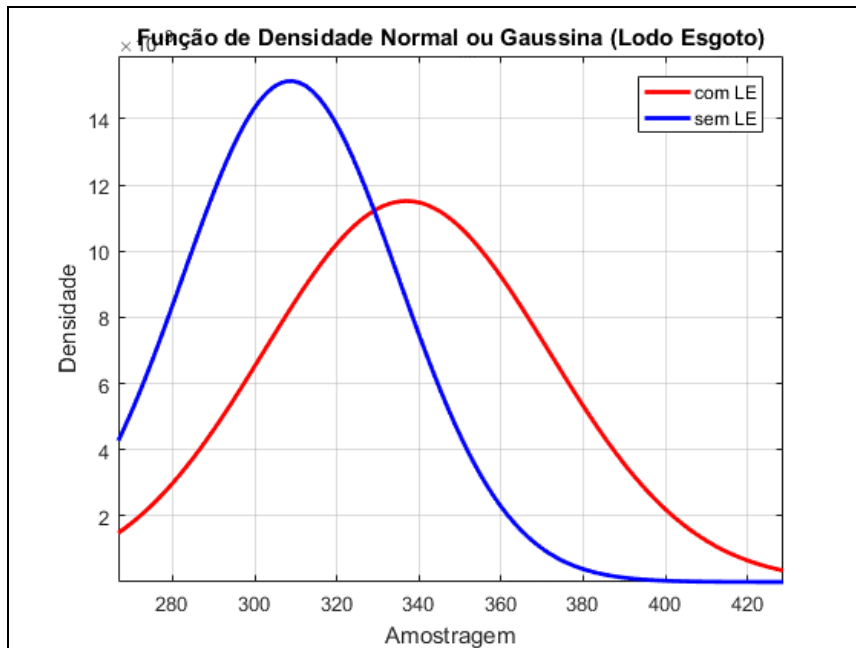
Fonte: Desenv. Próprio.

O gráfico que representa a aplicação do conceito da análise de clusters no sinal do gás metano, demonstra claramente a condição de que, adotando-se um sinal de referência, considerado normal, é possível separar e determinar limites estratégicos para a análise e formação dos gases de metano, tanto para o sinal do lodo, e do sinal do lodo com inóculo.

A referência do sinal, para a aplicação do conceito de análise de clusters em que referencia a técnica da distância euclidiana (linha vermelha contínua) e *likelihood* (linha verde pontilhada), é o sinal do lodo contido (linha azul contínua) no reservatório da biomassa. Dado esta condição, é possível de se afirmar que as linhas limites da distância euclidiana, dada a proximidade, determinam a referência de uma aplicação de constância de produção de metano. A linhas correspondentes a técnica *likelihood* tendem a considerar um limite superior à linha de referência com maior tolerância, compondo assim, uma condição de comportamento do sinal sobre o nível de correspondência, condicionando outros sinais a comparação de graus diferentes.

Um outro aspecto pode ser mostrado quando introduzido a técnica de estatística experimental, no caso, a função de densidade normal ou gaussiana que demonstra a chance real de ocorrer um determinado evento sobre um intervalo de tempo. A Figura 13 mostra a relação entre os dois sinais de cada reservatório do lodo de esgoto.

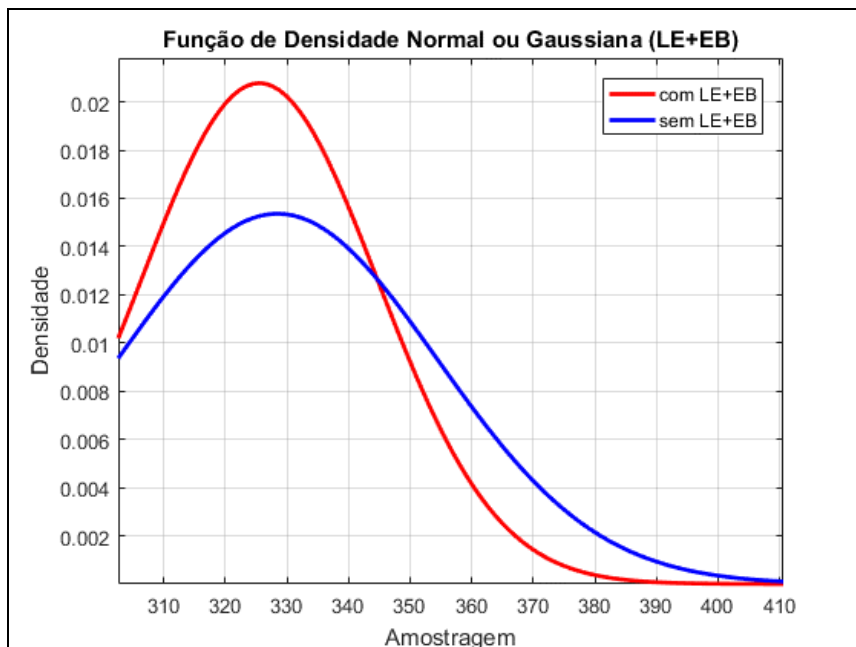
Figura 13 – Função de Densidade Normal ou Gaussiana – Lodo de Esgoto.



Fonte: Desenv. Próprio.

A Figura 14 mostra a relação entre os sinais de cada reservatório do lodo de esgoto com o inóculo.

Figura 14 - Função de Densidade Normal ou Gaussiana – Lodo de Esgoto.



Fonte: Desenv. Próprio.

Os sinais aplicados à técnica da estatística experimental permitem demonstrar que o sinal do metano do lodo de esgoto, e o sinal do metano do lodo de esgoto com o esterco de vaca podem ser considerados a representação do padrão experimental deste trabalho, cujos trabalhos futuros, poderão ser conduzidos e até identificados com as curvas dos sinais aqui demonstrados.

5. Discussão

Através da análise das tabelas demonstradas neste trabalho, é possível notar que com a variação da temperatura e pressão, ocorreu a oscilação do gás metano na unidade de ppm. Um outro fator notado e não investigado por limitação do experimento, foi que em determinados dias, a quantidade de metano ficou acima de valores médios. Um dos fatores a serem analisados pode ser o pH e os níveis químicos qualitativos e quantitativos da biomassa.

Na análise do banco de dados, formado durante os 15 dias de medição do metano, foi possível introduzir o conceito de análise de clusters, cujo objetivo desta etapa é o de formar um conceito de sinais padrão, para que, em um futuro próximo, este banco de dados produzidos por duas biomassas pode ser utilizado para reconhecer outros sinais de mesmo material estudado. As técnicas da distância euclidiana e a *likelihood*, são duas ferramentas poderosas, à partir de que adotado uma referência, que permitem entender e classificar grupos de sinais. Neste caso é possível de se afirmar que se inicia a introdução de reconhecimento de padrões a sinais de metano da biomassa de lodo de esgoto e lodo de esgoto com inóculo de esterco bovino.

Outro conceito utilizado para reconhecimento de possíveis sinais de mesmo banco de dados é o da estatística experimental, que através da função de densidade normal ou gaussiana, demonstrou que os sinais do metano das duas biomassas, podem se tornar fontes de identificação de falhas, em sistemas de produção de metano. De um certo modo, as curvas da função de densidade normal ou gaussiana, quando comparado a outros sinais, permite informar a ocorrência de um evento diferente em um determinado intervalo temporal.

6. Conclusão

Este trabalho tende a introduzir conceitos de sistemas cibernéticos na bioengenharia utilizando conceitos da engenharia computacional e mecânica. O princípio é entender o comportamento de produção do gás metano utilizando duas biomassas, uma o lodo de esgoto de primeira fase, e o segundo, o lodo de esgoto de primeira fase incluindo um inóculo de esterco de vaca.

O objetivo principal deste trabalho foi o de identificar métodos de reconhecimentos de padrões para identificar sinais de gás metano, produzidos da biomassa de lodo de esgoto de primeira fase e do lodo de esgoto de primeira fase com inóculo de esterco bovino. Os métodos de reconhecimento de padrões estão relacionados a métodos matemáticos aplicados na análise de clusters da área da ciência da computação. Os teoremas utilizados na aplicação deste conceito foram o da distância euclidiana e *likelihood*.

O resultado apresentado demonstra que é possível a aplicação dos teoremas matemáticos na área da bioengenharia, e que os resultados demonstram com sucesso o princípio de conceitos de reconhecimento de padrões em sinais de metano.

Este trabalho atende ainda áreas como a da confiabilidade aplicada a gestão da manutenção industrial, considerando a detecção de falhas estruturais no conceito de *structural health monitoring* (SHM). Os benefícios a comunidade acadêmico-científica são notados à partir do desenvolvimento do experimento, que permitem a interação de dados e pesquisa, entre professores e estudantes de forma rápida e de baixo custo. Promove ainda a melhora de habilidades práticas que abrangem a inteligência artificial.

Portanto, este trabalho pode ser considerado como que realizado e de sucesso.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Paula Souza – CPS; ao Laboratório de Sistemas Complexos (SISPLEXOS), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP Proc. 2019 / 10515-4), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Proc. Nº 312972 / 2019-9), pelo incentivo e desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Abonyi, J., & Feil, B., (2007). Cluster analysis for data mining and system identification: Birkhäuser Verlag AG.
- Batista, X. R. F., (2017), Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia.
- De Prado, P. P. L., (2014), Probabilidade, inferência estatística e testes: utilizando matlab e excel, Editora SENAI.
- De Santana, M. S. A., De Carvalho, E. C., & Callado, N. H. (2021), Influência do uso de inóculo na estimativa de gás metano dos resíduos orgânicos do aterro sanitário dos municípios do agreste alagoano, *Research, Society and Development*, 10 (6), 1-11. 10.33448/rsd-v10i6.15407.
- Deganutti, R., Plhaci, M. C. J. P., Rossi, M., Tavares, R., & dos Santos, C., (2002), Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada, Agência CNPTIA Embrapa.
- Demirbas, A., (2010), Methane gas hydrate, Springer-Verlag.
- Dos Santos, C. A. A. S., Cutrim Junior, C. F., Oliveira, L. L., da Silva, P. H. F., Maia, I. C. C. D., Nascimento, B. L. M., Serra, M. A. A. O., & Façanha Filho, P. F., Biodigestor anaeróbico para produção sustentável de biogás em propriedade rural da cidade de Açailândia, *Research, Society and Development*, 9 (7), 1-25. doi: 10.33448/rsd-v9i7.4262.
- Epstein, E., (2003), *Land application sewage sludge biosolids*, New York, CRC Press.
- Ferreira, L. R. A., Otto, R. B., Silva, F. P., Souza, S. N. M., Souza, S. S., & Ando Junior, O.H., (2018), Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(1), 440-455. 10.1016/j.rser.2018.06.034.
- Guebitz, G.M., Bauer, A., Bochmann, G., Gronauer, A., & Weiss, S., (2015), Biogas science and technology, Switzerland, Springer International Publishing.
- Holman, J.O., (2012), *Experimental methods for engineers*, (8a ed.), McGraw-Hill.
- Iwaki, G., (2018), Destinação Final de Lodos de ETAs e ETES, Portal Tratamento de Agua.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J., (1990), Finding groups in data: an introduction to cluster analysis, John Wiley & Sons.
- Laughton, M. A., (1990), Renewable energy sources, Savoy Hill, The Watt Committee on Energy.
- Mito, J. Y. L., Kerkhoff, S., Silva, J. L. G., Vendrame, M. G., Steinmetz, R. L. R., & Kunz, A., (2018), Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil, Concórdia: Embrapa Suínos e Aves.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C., (2003), *Applied statistics and probability for engineers*, (3a ed.), John Wiley & Sons.
- Moraes, S. L., Massola, C. P., Saccoccio, E. M., Silva, D.P., & Guimarães, Y. B. T., (2017), Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada, Revista IPT, 1(4), 58-73.
- Reay, D., Smith, P., & Van Amstel, A., (2010), *Methane and climate change*, Dunstan House, Earthscan Ltd.
- Roe, B. P., (2001), *Probability and statistics in experimental physics*, (2a ed.), Springer-Verlag.
- Sacomano, J. B., Gonçalves, R. F., da Silva, M. T., Bonila, S. H., & Sátyro, W. C., (2018), Indústria 4.0: conceitos e fundamentos, Editora Blucher.
- Tabatabaei, M., & Ghanavati, H., (2018), Biogas: fundamentals, process, and operation: Springer International Publishing.
- Van Basshuysen, R., (2016), *Natural gas and renewable methane for powertrains: future strategies for a climate-neutral mobility*: Springer International.
- Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D., (2013), *The biogas handbook: science, production and applications*: Woodhead Publishing.