



ConBREpro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Otimização da Co-Digestão Anaeróbia: Estratégias para Maximizar a Produção de Metano

Monique Schneider Simão

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) – Universidade Tecnológica do Paraná

Jose Eduardo Pecora Junior

Departamento de Administração Geral e Aplicada (DAGA) – Universidade Federal do Paraná

Roberto Defacio Padroni da Silva

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Marcell Mariano Corrêa Maceno

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) – Universidade Federal do Paraná

Resumo: O tratamento de resíduos visa mitigar a degradação ambiental e os efeitos adversos ao bem-estar humano, utilizando processos como a digestão anaeróbia, que decompõe matéria orgânica sem oxigênio, gerando biogás, rico em metano, usado para energia. Embora eficiente, a digestão anaeróbia enfrenta desafios na remoção de nitrogênio e fósforo. A co-digestão, combinando diferentes resíduos, pode melhorar a eficiência do processo, equilibrando o carbono/nitrogênio e aumentando a produção de metano. Este estudo utiliza o modelo de digestão anaeróbica (ADM1) e o algoritmo genético de classificação por não dominância II (NSGA-II) para otimizar proporções de lama, esterco e lodo em co-digestores, maximizando a produção de metano e avaliando a estabilidade do processo. Os resultados mostraram que altas proporções de lama aumentam a produção de metano, enquanto a adição de esterco e lodo pode melhorar a estabilidade, embora um equilíbrio entre ambos seja necessário. A validação das simulações demonstrou que o modelo implementado correspondeu adequadamente aos resultados da literatura. O NSGA-II mostrou-se eficaz na otimização das misturas, apesar das complexidades inerentes ao processo. Este trabalho contribui para o entendimento dos mecanismos da co-digestão anaeróbia e propõe métodos para sua otimização, promovendo o tratamento de resíduos e a geração de energia renovável, alinhando-se ao desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Co-digestão, Metano, ADM1, NSGA-II.

Optimization of Anaerobic Co-Digestion: Strategies to Maximize Methane Production

Abstract: Waste treatment aims to mitigate environmental degradation and adverse effects on human well-being by using processes such as anaerobic digestion, which decomposes organic matter without oxygen, generating biogas rich in methane used for energy. Although efficient, anaerobic digestion faces challenges in the removal of nitrogen and phosphorus. Co-digestion, combining different wastes, can improve process efficiency by balancing carbon/nitrogen and increasing methane production. This study uses the anaerobic digestion model (ADM1) and the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) to optimize proportions of sludge, manure, and

sewage in co-digesters, maximizing methane production and evaluating process stability. The results showed that high proportions of sludge increase methane production, while the addition of manure and sewage can improve stability, although a balance between them is necessary. Validation of the simulations demonstrated that the implemented model adequately matched the results from the literature. NSGA-II proved effective in optimizing the mixtures despite the inherent complexities of the process. This work contributes to understanding the mechanisms of anaerobic co-digestion and proposes methods for its optimization, promoting waste treatment and renewable energy generation, aligning with sustainable development.

Keywords: Co-digestion, Methane, ADM1, NSGA-II.

1. Introdução

O objetivo do tratamento de resíduos é diminuir a degradação ambiental e os efeitos prejudiciais ao bem-estar da população resultantes do lançamento de matérias em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. Isto é feito por meio da degradação de compostos e da redução de substâncias nocivas e de patógenos. A digestão anaeróbia é um processo natural de degradação da matéria orgânica que ocorre em locais isentos de oxigênio livre. Dentre suas vantagens estão a capacidade de operar com altas concentrações de sólidos e a produção de resíduo estabilizado e higienizado (JORDÃO; PESSOA, 1995). No entanto, este processo apresenta desvantagens como a dificuldade em satisfazer padrões de lançamento muito restritivos e a remoção insatisfatória de nitrogênio e de fósforo (JORDÃO; PESSOA, 1995). Não obstante, esse tipo de tratamento de efluentes vem ganhando grande notoriedade nos últimos anos, principalmente devido ao fato de que durante a degradação anaeróbia da matéria orgânica é gerado biogás: uma mistura gasosa contendo entre 55 a 70% de metano (CH_4) e 30 a 45% de dióxido de carbono (CO_2). O principal componente, o metano, possui um alto potencial energético e pode ser utilizado para aquecimento e produção de eletricidade (BELTRAMO et al, 2016). Além disso, podem ser obtidos benefícios ambientais ao evitar que o metano, que seria gerado na degradação natural destes compostos, seja lançado diretamente na atmosfera, diminuindo a geração de gases do efeito estufa (CHOI e PARK, 2018). Frequentemente um digestor é construído para tratar os diferentes tipos de resíduos gerados em uma região. A mistura de dois ou mais substratos como alimentação da digestão anaeróbia é chamada de co-digestão. Esse processo, além de possibilitar que diferentes resíduos sejam tratados de uma só vez, pode resultar em uma digestão mais eficiente. Isso ocorre porque a combinação de diferentes resíduos pode resultar na melhoria do balanço carbono/nitrogênio, na diminuição de efeitos inibitórios e no aumento na produção de metano (ENITAN, et al. 2017).

Na co-digestão as proporções dos substratos devem ser balanceadas adequadamente para assegurar que os parâmetros chave da digestão, como o pH e a concentração de nitrogênio, permaneçam dentro dos limites, garantindo que a operação seja estável (GARCÍA-GEN, et al., 2014). No entanto, alcançar a mistura correta dos resíduos que irão alimentar um co-digestor e ocasionar uma operação satisfatória, tanto em termos de estabilidade quanto de geração de metano, não é trivial, já que o processo envolve uma rede complexa de reações (GARCÍA-GEN, et al., 2014). Além disso, muitas vezes a melhoria na produção de metano caminha em direção oposta ao aumento da estabilidade (MAO et al., 2015).

Tanto a digestão quanto a co-digestão são processos microbiológicos complexos que envolvem diferentes tipos de bactérias e a maior parte dos problemas encontrados nestes processos estão associados com não-uniformidade, instabilidade, ou condições adversas na alimentação ou no digestor (PARKIN, 1986). A composição da alimentação é muito importante para o crescimento dos microrganismos e também para a estabilidade do processo (HAGOS, 2017). Concentrações adequadas de determinados nutrientes e

características apropriadas da alimentação, entre outros fatores, irão maximizar as chances de atingir uma operação eficiente (PARKIN, 1986). De acordo com Lee et al. (2019) ainda não existe um método estabelecido para se estimar as razões adequadas na co-digestão de forma a melhorar a performance do tratamento anaeróbio. Portanto, isso continua sendo um problema, especialmente nos casos onde mais de dois substratos são considerados (SAGHOURI et al., 2020).

Métodos estatísticos baseados em experimentos de superfície de resposta, chamados de design de misturas (por exemplo: simplex centroide, simplex centroide aumentado, simplex lattice entre outros), vem sendo amplamente utilizados para otimizar as razões de mistura na co-digestão (RAO e BARAL, 2011; WANG et al., 2012; RAHMAN et al., 2019; URANGA-SOTO et al., 2018; KASHI, 2017; CHOI, 2018). Contudo, o emprego destes métodos pode ser complicado, especialmente se o número de componentes for maior que três (SIMON, 2003). Em decorrência do citado acima, este trabalho almejou buscar um método eficiente para a resolução do problema de encontrar a proporção ideal de cada componente em uma mistura que irá alimentar um co-digestor.

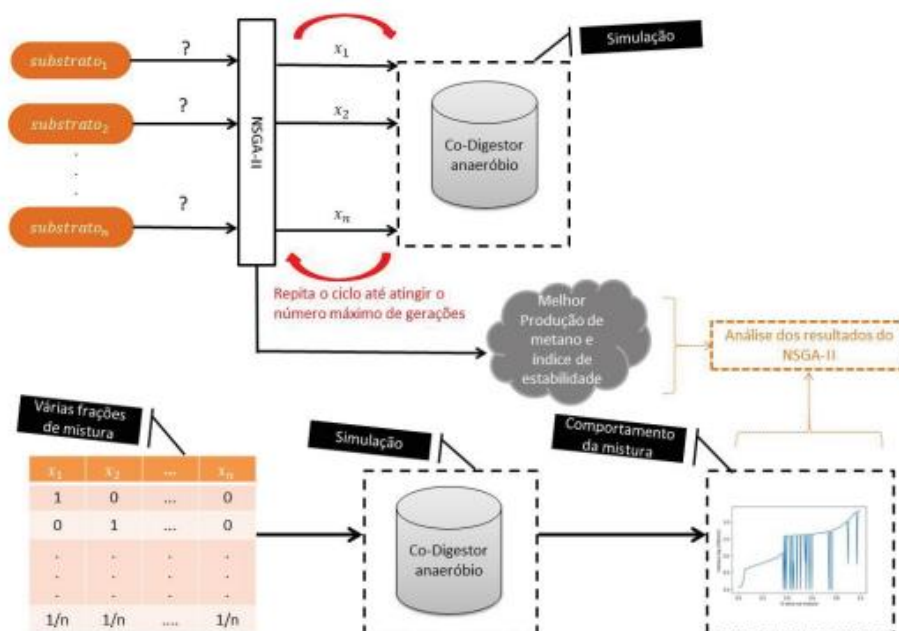
2. Metodologia

Nesta seção são apresentados o modelo de simulação da co-digestão, o modelo de otimização, o método de resolução das equações diferenciais relativas à simulação e todos os valores dos parâmetros necessários.

Primeiramente, o comportamento da produção de metano e da estabilidade mediante a variação das proporções dos componentes foi estudado detalhadamente simulando-se inúmeras misturas diferentes.

Em seguida, o NSGA-II foi utilizado para gerar misturas compostas por diferentes proporções de lama, esterco e lodo. Depois, cada mistura foi usada como entrada da simulação, feita usando o modelo ADM1. Os resultados da simulação forneceram a produção de metano e as concentrações usadas para calcular o índice de estabilidade, cujo cálculo será apresentado na seção 3. Por último, comparou-se a saída do NSGA-II com o comportamento da mistura a fim de verificar a otimalidade das respostas. Na FIGURA 1 é fornecida uma esquematização da metodologia desenvolvida.

Figura 1 – Etapas da Metodologia



2.1 Simulação da co-digestão

Zaher et al. (2009) generalizaram o modelo ADM1 para considerar a degradação de dois ou mais resíduos que: (i) são diferentes em composição; (ii) possuem diferentes frações de carboidratos, proteínas, lipídios e inertes; e (iii) têm diferentes taxas de hidrólise de carboidratos, proteínas e lipídios. Ainda conforme Zaher et al. (2009), a seguinte adaptação ao ADM1 foi proposta: (i) considerar a hidrólise de carboidratos, proteínas e lipídios de cada resíduo em reatores separados; (ii) os produtos da hidrólise são combinados e usados como entrada para um único reator de digestão onde todas as reações biológicas do ADM1 são ativadas; e (iii) as frações não hidrolisadas ou não desintegradas não sofrem alterações no reator de digestão, já que a cinética de hidrólise no reator de digestão é aplicada apenas aos bio sólidos (bactérias mortas) em decomposição. A única diferença entre a abordagem de co-digestão descrita por Zaher et al. (2009) e este trabalho é que a desintegração ocorreu nos reatores de hidrólise.

2.2 Análise de estabilidade

Cook et al. (2017) propôs uma ferramenta de avaliação de estabilidade baseada em sete indicadores comumente utilizados: composição do biogás, pH, alcalinidade, amônia livre, ácidos graxos voláteis (AGV) totais, amônio e ácidos graxos de cadeia longa. O principal resultado da ferramenta proposta é a pontuação de estabilidade do digestor, que representa a estabilidade geral do processo com base nas informações fornecidas por cada indicador de estabilidade. A pontuação de estabilidade do digestor varia de zero, correspondendo a um digestor completamente instável, a um, correspondendo a um digestor altamente estável.

2.3 Algoritmo genético de classificação por não dominância II

No NSGA-II proposto, cada indivíduo carrega $(q-1)$ genes que equivalem à porcentagem de cada elemento q na mistura, sendo que o valor de uma das porcentagens fica sempre em função das demais, de forma a atingir uma soma igual a um. Isso foi feito para manter os valores dentro do espaço Simplex. A avaliação do quão adequado é o indivíduo é feita a partir da produção de metano e do índice de estabilidade obtidos pela simulação da co-digestão utilizando as porcentagens de mistura que ele carrega. A estabilidade é dada pelo indicador desenvolvido por Cook et al. (2017), apresentado na seção 2.2. Os objetivos a serem atingidos são maximizar tanto a produção de metano como o índice de estabilidade.

2.4 Caracterização do substrato

Para cada substrato o modelo ADM1 requer uma caracterização físico-química, em termos de sua composição bioquímica (carboidratos, proteínas, lipídios) e compostos portadores de carga (ácidos, bases, sais). As características cinéticas do substrato (conteúdo inerte e rapidez de degradação) também são necessárias como entradas (BATSTONE, 2002). Devido às limitações técnicas, neste trabalho optou-se por substratos previamente caracterizados disponíveis na literatura. Os dados foram obtidos do trabalho de Fisgativa et al. (2020), no qual os autores determinaram as variáveis de entrada do ADM1 utilizando as metodologias de análise físico-química e fracionamento; dos onze diferentes substratos caracterizados pelos autores, foram escolhidos para este trabalho apenas três tendo como critério de seleção a facilidade com que poderiam ser encontrados no território brasileiro: lama, esterco e lodo.

3. Resultados

Esta seção foi dividida em (i) validação da simulação do ADM1 entre mono-digestão e co-digestão; (ii) estudo do comportamento da mistura e (iii) otimização utilizando NSGA-II comparando a produção de metano com lama, esterco e lodo.

3.1 Validação da simulação do ADM1

Para verificar se o modelo ADM1 foi corretamente implementado, comparou-se os resultados obtidos pela simulação com os encontrados em Rosén e Jeppsson (2006), para os mesmos dados. Os valores de entrada que foram utilizados encontram-se na TABELA 1 e a comparação com os resultados obtidos na literatura são apresentados na TABELA 2.

TABELA 1 – Entrada da Simulação obtida da literatura

Variável	Valor	Unidade
S_{su}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{aa}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{fa}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{va}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{bu}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{pro}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{ac}	0,001	kgCOD. m ⁻³
S_{h2}	$1, 10^{-8}$	kgCOD. m ⁻³
S_{ch4}	$1, 10^{-5}$	kgCOD. m ⁻³
S_{IC}	0,04	kmol C. m ⁻³
S_{IN}	0,01	kmol N. m ⁻³
S_I	0,02	kgCOD. m ⁻³
X_C	2	kgCOD. m ⁻³
X_{ch}	5	kgCOD. m ⁻³
X_{pr}	20	kgCOD. m ⁻³
X_{li}	5	kgCOD. m ⁻³
X_{su}	0	kgCOD. m ⁻³
X_{aa}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_{fa}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_{c4}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_{pro}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_{ac}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_{h2}	0,01	kgCOD. m ⁻³
X_I	25	kgCOD. m ⁻³
S_{cat}	0,04	kmol. m ⁻³
S_{an}	0,02	kmol. m ⁻³

Fonte: Rosén e Jeppsson (2006)

As condições iniciais foram as mesmas de Rosén e Jeppsson (2006). Os desvios em relação ao valor da literatura podem ser atribuídos à diferença entre o solucionador de equações diferenciais e na utilização de outra linguagem de programação. O tempo necessário para que a simulação atingisse o estado estacionário (warm up period) foi de 400 dias, esse valor é maior que o encontrado em Rosén e Jeppsson (2006), que foi de 200 dias, e menor que o relatado por Nguyen (2014), que foi de 1000 dias. O tempo médio da simulação foi igual a 60 segundos.

Para validar a simulação da co-digestão, procurou-se obter com o substrato segmentado em duas partes os mesmos resultados da digestão com somente um substrato. Procedeu-se da seguinte forma:

- 1) Para a co-digestão foram simulados dois substratos idênticos e com a mesma composição do substrato utilizado na simulação da mono-digestão. Consequentemente, como entrada de cada um dos reatores que são responsáveis apenas pela desintegração e hidrólise se utilizou os mesmos valores de entrada definidos na Tabela 16;
- 2) As saídas de cada um dos reatores de desintegração e hidrólise foram multiplicadas por 0,5 e somadas. Dessa forma, caso a simulação destes reatores estiver correta, a concentração obtida pela soma das saídas deve ser igual ao resultado apresentado em Rosén e Jeppsson (2006) para os produtos da hidrólise e desintegração. Esse procedimento é válido pois as reações de hidrólise e desintegração são lineares;
- 3) As variáveis de entrada S_{aa} , S_{su} , S_{fa} , X_{ch} , X_{pr} , X_{li} , X_I , S_I e X_C do reator de digestão foram iguais à mistura obtida da soma das saídas dos reatores de desintegração e hidrólise. As demais variáveis permaneceram iguais às definidas na Tabela 16.

Os resultados obtidos e o erro relativo percentual obtido com relação aos valores obtidos da literatura encontram-se nas colunas cinco e seis da TABELA 17, respectivamente.

TABELA 2 – Resultados da Validação da Simulação

		ROSÉN E JEPPSSON (2006)	SIMULAÇÃO DA MONO- DIGESTÃO	ERRO REL. (%)	SIMULAÇÃO DA CO- DIGESTÃO	ERRO REL. (%)
X_C	kgCOD. m ⁻³	0,308697664	0,307048231	-0,5343	0,307051671	-0,5332
X_{ch}	kgCOD. m ⁻³	0,02794724	0,027930828	-0,0587	0,027930862	-0,0586
X_{pr}	kgCOD. m ⁻³	0,102574106	0,102557694	-0,0160	0,102557728	-0,0160
X_{li}	kgCOD. m ⁻³	0,02948305	0,029458431	-0,0835	0,029458483	-0,0833
X_I	kgCOD. m ⁻³	25,61739533	25,61409622	-0,0129	25,61410335	-0,0129
S_{su}	kgCOD. m ⁻³	0,01195483	0,011954817	-0,0001	0,011954809	-0,0002
S_{aa}	kgCOD. m ⁻³	0,00531474	0,005314727	-0,0002	0,005314726	-0,0003
S_{fa}	kgCOD. m ⁻³	0,098621401	0,098616399	-0,0051	0,098616135	-0,0053
S_{va}	kgCOD. m ⁻³	0,011625006	0,011991173	3,1498	0,011989822	3,1382
S_{bu}	kgCOD. m ⁻³	0,01325073	0,012936349	-2,3726	0,012934889	-2,3836
S_{pro}	kgCOD. m ⁻³	0,015783666	0,015782938	-0,0046	0,015782898	-0,0049
S_{ac}	kgCOD. m ⁻³	0,197629717	0,200077178	1,2384	0,200043194	1,2212
S_{h2}	kgCOD. m ⁻³	2,35945E-07	2,35867E-07	-0,0331	2,3586E-07	-0,0360
S_{ch4}	kgCOD. m ⁻³	0,055088776	0,054804737	-0,5156	0,054804765	-0,5156
S_I	kgCOD. m ⁻³	0,328697664	0,327048111	-0,5018	0,327051666	-0,5008
S_{IC}	kmol C. m ⁻³	0,152677871	0,152849788	0,1126	0,152849901	0,1127
S_{IN}	kmol N. m ⁻³	0,130229816	0,130514699	0,2188	0,130514169	0,2183
X_{su}	kgCOD. m ⁻³	0,420165982	0,419913655	-0,0601	0,419914463	-0,0599
X_{aa}	kgCOD. m ⁻³	1,179171799	1,178984021	-0,0159	1,17898462	-0,0159
X_{fa}	kgCOD. m ⁻³	0,243035345	0,242834861	-0,0825	0,242835524	-0,0822
X_{c4}	kgCOD. m ⁻³	0,431921106	0,407537785	-5,6453	0,40758094	-5,6353
X_{pro}	kgCOD. m ⁻³	0,137305909	0,137261691	-0,0322	0,137261835	-0,0321
X_{ac}	kgCOD. m ⁻³	0,760562658	0,744982429	-2,0485	0,745011524	-2,0447
X_{h2}	kgCOD. m ⁻³	0,317022953	0,312323547	-1,4824	0,312332037	-1,4797
S_{cat}	kgCOD. m ⁻³	0,04	0,04	0,0000	0,04	0,0000
S_{an}	kgCOD. m ⁻³	0,02	0,02	0,0000	0,02	0,0000
S_{va^-}	kgCOD. m ⁻³	0,011596247	0,011961683	3,1513	0,011960332	3,1397
S_{bu^-}	kgCOD. m ⁻³	0,013220826	0,012907328	-2,3712	0,012905868	-2,3823
S_{pro^-}	kgCOD. m ⁻³	0,015742783	0,015742294	-0,0031	0,015742254	-0,0034
S_{ac^-}	kgCOD. m ⁻³	0,197241155	0,199686146	1,2396	0,199652169	1,2224

$S_{\text{hco}_3^-}$	kmol C. m ⁻³	0,142777479	0,142992119	0,1503	0,142992239	0,1504
S_{nh_3}	kmol N. m ⁻³	0,004090928	0,00412317	0,7881	0,004123069	0,7857
$S_{\text{gas,h}_2}$	kgCOD. m ⁻³	1,0241E-05	1,02672E-05	0,2558	1,0267E-05	0,2539
$S_{\text{gas,ch}_4}$	kgCOD. m ⁻³	1,62560721	1,620401625	-0,3202	1,620402337	-0,3202
$S_{\text{gas,co}_2}$	kmol C. m ⁻³	0,014150535	0,01409081	-0,4221	0,0140908	-0,4221

Fonte: Os autores (2024).

Analisando a TABELA 2, verifica-se que o modelo utilizado para a co-digestão obteve aproximadamente os mesmos resultados do modelo da mono-digestão, apresentando os mesmos desvios em relação aos valores da literatura, podendo-se concluir que sua implementação foi satisfatória.

3.2 Estudo do comportamento da mistura

Na TABELA 3, constam os valores obtidos para a simulação dos componentes isoladamente.

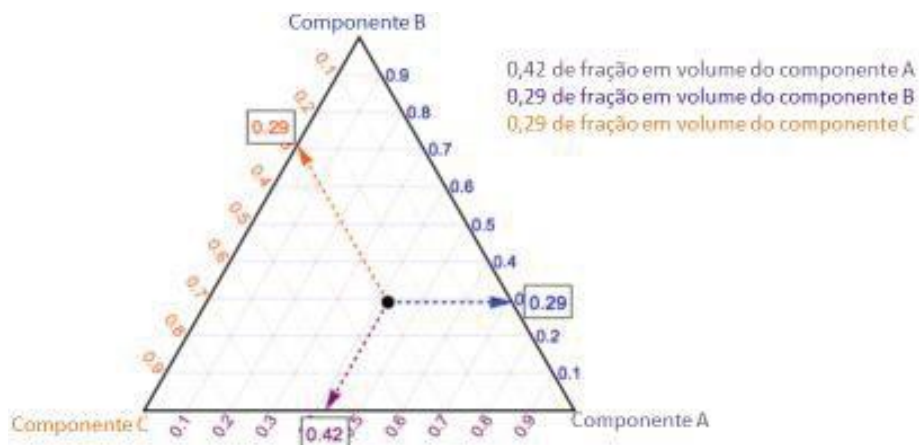
Tabela 3 – Resultados da simulação para os componentes isolados

Proporção (V/V)	Lama		Esterco		Lodo	
	Metano kgCOD. m ⁻³	Estabilidade	Metano kgCOD. m ⁻³	Estabilidade	Metano kgCOD. m ⁻³	Estabilidade
100%	2,3399	0,821	4,53E-05	0,5	5,19E-02	0,5

Fonte: Os autores (2024)

Para a análise das misturas contendo três componentes gerou-se 500 misturas com diferentes composições de forma aleatória. Para facilitar a leitura dos diagramas ternários que são apresentados nesta seção, a FIGURA 2 apresenta um exemplo de como obter as concentrações de um ponto representado no diagrama.

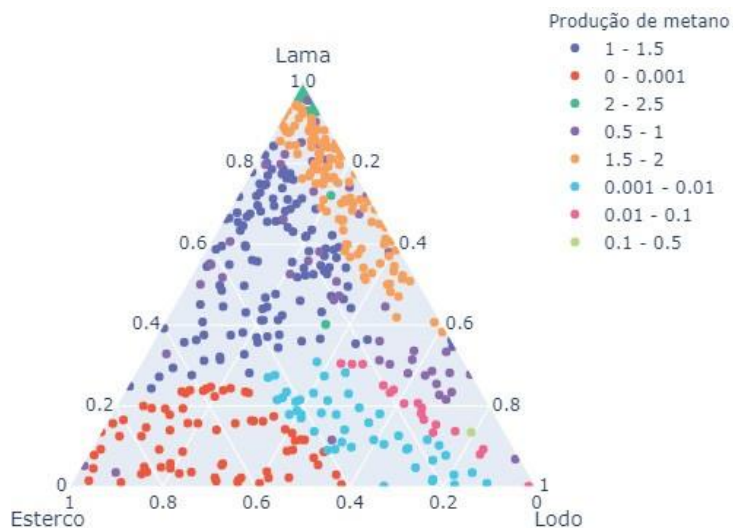
Figura 2 – Exemplo de leitura dos pontos em um diagrama ternário



Fonte: Os autores (2024)

Os pontos correspondentes às 500 misturas foram plotados nos diagramas ternários apresentados nas FIGURAS 3 e 4.

Figura 3 – Diagrama ternário para produção de metano das misturas contendo três componentes

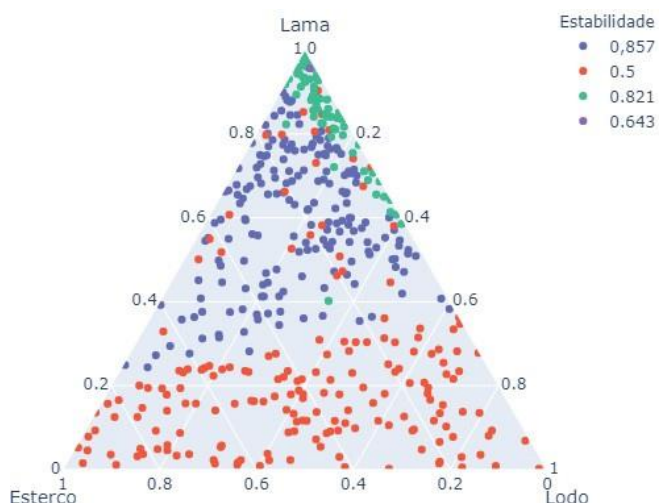


Fonte: Os autores (2024)

Pela análise da FIGURA 3, verifica-se que em geral produção de metano é:

- Muito alta para misturas compostas por, aproximadamente, mais de 92% de lama e menos de 1% de esterco;
- Alta para misturas compostas por em torno de 1% a 60% de lodo, 40 a 90% de lama e menos de 12% de esterco;
- Média para misturas contendo cerca de 30 a 80% de lama, menos de 80% de lodo e mais de 20% de esterco;
- Baixa para misturas com menos de 30% de lama;

Figura 4 – Diagrama ternário para a estabilidade das misturas contendo três componentes



Fonte: Os autores (2024)

Pela análise da FIGURA 4, verifica-se que em geral a estabilidade é:

- Muito alta para misturas contendo entre de 40 e 90% de lama;
- Alta para misturas com mais de 60% de lama, menos de 40% de lodo e menos de 7% esterco;

- Baixa para misturas com menos de 20% de lama, ou com entre 20 e 40% de lama e mais de 30% de lodo.

Na TABELA 4, encontram-se detalhadas as proporções das misturas com os melhores valores para produção de metano e estabilidade.

Tabela 4 – Misturas com os melhores indicadores

%Lama - %Esterco - %Lodo	Produção de metano	Estabilidade
0,91 - 0,09 - 0	1,6382	0,857
0,995 - 0,005 - 0	2,3286	0,821
0,995 - 0 - 0,005	2,3357	0,821
0,455 - 0 - 0,545	1,6010	0,857
0 - 0,9 - 0,1	0,5882	0,5
0,9988 - 1,68E-05 - 0,001	2,3390	0,821
0,7900 - 0,0557 - 0,1543	1,6324	0,857

Fonte: Os autores (2024)

Dessa forma, nota-se um aumento na estabilidade e na produção de metano conforme a porcentagem de lama na mistura aumenta. Com relação às proporções dos outros componentes, uma proporção predominante de lodo resulta em uma maior produção de metano do que uma proporção predominante de esterco.

Pode-se concluir que no caso estudado a mistura dos componentes não é vantajosa quando o objetivo principal é gerar metano. Porém, proporções corretas na mistura de lama, esterco e lodo produzem melhores resultados do que a utilização destes dois últimos componentes isoladamente, logo, consiste em uma boa alternativa para melhorar o tratamento destes resíduos. No entanto, não há evidência de que um aumento na produção de metano sempre resultará em uma diminuição da estabilidade, SAMBUSITI et al. (2013), por exemplo, conseguiu melhorar ambos os parâmetros realizando um pré-tratamento dos substratos com hidróxido de sódio.

3.3 Otimização utilizando NSGA-II

A população foi iniciada com dez indivíduos e o algoritmo foi executado até que se atingissem cinco gerações, o que foi suficiente para alcançar a convergência em todas as misturas. Os resultados da otimização são apresentados na TABELA 5.

Tabela 5 – Resultado do NSGA-II para a mistura

Mistura	Proporções na Mistura	Metano (kg.COD.m ⁻³)	Estabilidade	Tempo de Execução (s)
Lama e esterco	(0,8719 – 0,1281) (0,9800 - 0,0200)	1,5173	2,2597	1993
Lama e lodo	(0,4577- 0,5423) (0,9883 – 0,0117)	1,6014	2,3292	1940
Esterco e Lodo	(0,0172 – 0,9828)	0,0322	0,5	756
Lama, esterco e lodo	(0,9833 – 0,0157 – 0,001) (0,8893 – 0,0835 - 0,0272)	2,3344	1,6378	2511

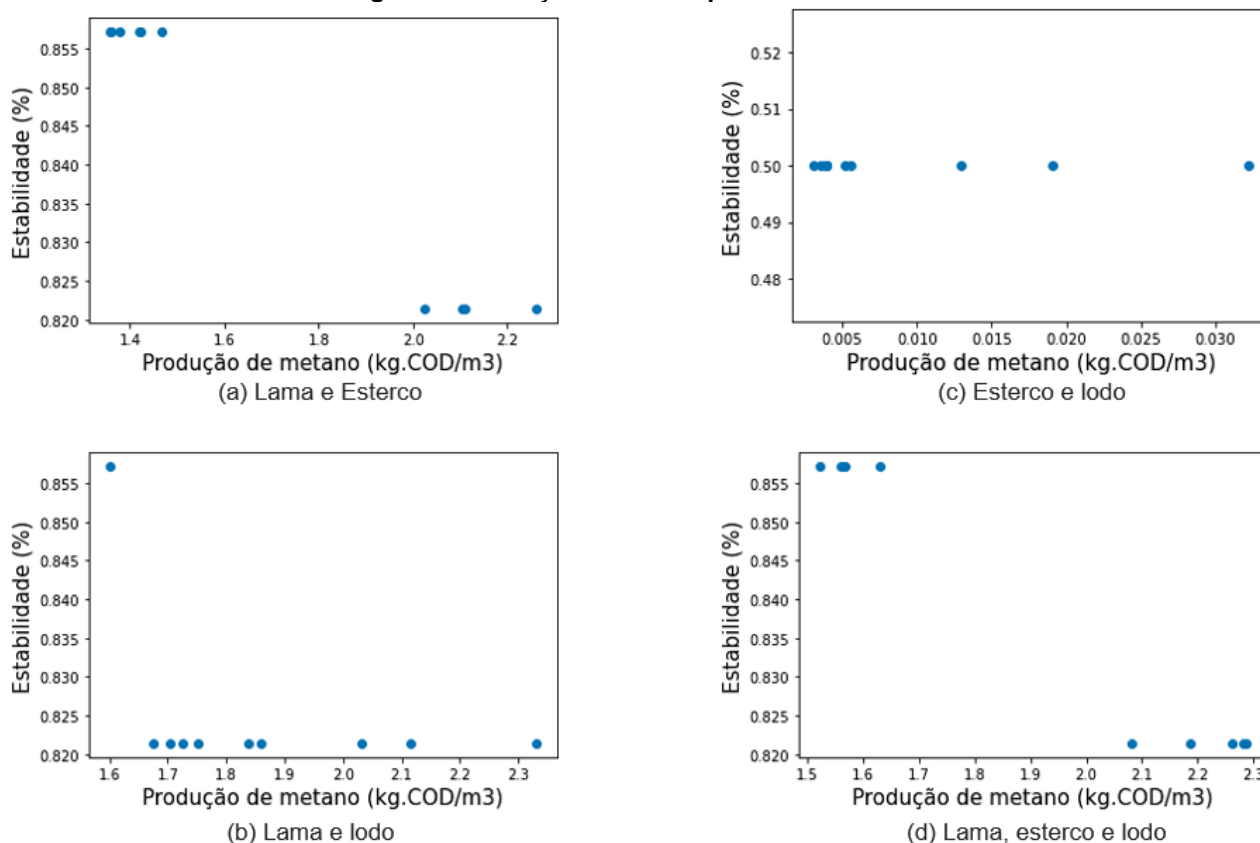
Fonte: Os autores (2024)

A partir da análise da TABELA 5 é possível verificar:

- Os resultados da mistura de lama e esterco ficaram próximos aos valores ótimos encontrados na seção 3.2;
- Os resultados da mistura de lama e lodo estão condizentes onde nota-se uma elevação da estabilidade para razões de lama na mistura em torno de 0,4 e uma maior produção de metano conforme a proporção de lama se aproxima de um.
- Os resultados para a mistura de esterco e lodo indicam que o algoritmo não conseguiu escapar do máximo local de produção de metano.
- Para a mistura dos três componentes, os valores retornados pelo NSGA-II ficaram muito próximos dos ótimos encontrados na seção 3.2.

A lista dos gráficos que apresentam todas as soluções obtidas para cada mistura é apresentada na FIGURA 5, onde cada ponto representa uma solução obtida pelo algoritmo e os eixos do gráfico correspondem aos valores de estabilidade e de produção de metano de cada solução.

Figura 5 – Soluções obtidas para cada mistura



Fonte: Os autores (2024)

Por fim, é possível concluir que o NSGA-II apresentou uma performance satisfatória, a despeito da não linearidade do problema e das inúmeras oscilações apresentadas geradas na simulação com o ADM1.

4. Conclusão

Este estudo explorou a aplicação do método NSGA-II, em conjunto com o modelo de simulação ADM1, para otimizar a proporção de componentes em misturas destinadas à alimentação de um co-digestor anaeróbico. As adaptações realizadas no modelo ADM1 para

simular a co-digestão mostraram-se eficazes, produzindo resultados equivalentes à mono-digestão quando um único componente foi utilizado de forma fracionada.

A investigação sobre a produção de metano e a estabilidade do processo, em função das variações nas proporções dos componentes, revelou que misturas com altas porcentagens de lama promovem uma maior produção de metano. Além disso, a estabilidade da digestão pode ser aprimorada com a adição de esterco e/ou lodo. No entanto, notou-se um trade-off entre estabilidade e produção de metano, já que não foi possível identificar uma mistura que maximizasse ambos os indicadores simultaneamente.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a experimentação com misturas de componentes distintos dos analisados neste estudo. Também é crucial investigar outras abordagens para a resolução do sistema de equações diferenciais, visando uma simulação mais precisa da co-digestão. Espera-se que esta pesquisa tenha ampliado o entendimento sobre os mecanismos complexos da co-digestão anaeróbia e que a otimização proposta incentive sua aplicação no tratamento de resíduos e na geração de energia renovável. Assim, almeja-se contribuir para o desenvolvimento sustentável e o bem-estar ambiental e socioeconômico das futuras gerações.

Referências

- BATSTONE, D. J., KELLER, J., ANGELIDAKI, I., KALYUZHNYI, S. V., PAVLOSTATHIS, S. G., ROZZI, A., SANDERS, W. T. M., SIEGRIST, H., VAVILIN, V. A. The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). **Water Science and technology**, v. 45, n. 10, p. 65-73, 2002.
- BELTRAMO, T., RANZAN, C., HINRICHS, J., HITZMANN, B. Artificial neural network prediction of the biogas flow rate optimised with an ant colony algorithm. **Biosystems Engineering**. 143. 68-78, 2016.
- CHOI, A. E. S., PARK, H. S. Fuzzy multi-objective optimization case study based on an anaerobic co-digestion process of food waste leachate and piggery wastewater. **Journal of environmental management**, v. 223, p. 314-323, 2018.
- COOK, S. M., SKERLOS, S. J., RASKIN, L., LOVE, N. G. A stability assessment tool for anaerobic codigestion. **Water research**, v. 112, p. 19-28, 2017.
- ENITAN, A. M., ADEYEMO, J., SWALHA, F. M., KUMARI, S. Optimization of biogas generation using anaerobic digestion models and computational intelligence approaches. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 309-335, 2017.
- FISGATIVA, H., ZENNARO, B., CHARNIER, C., RICHARD, C., ACCARION, G., BÉLINE, F. Comprehensive determination of input state variables dataset required for anaerobic digestion modelling (ADM1) based on characterisation of organic substrates. **Data in brief**, v. 29, p. 105212, 2020.
- GARCÍA-GEN, S., RODRÍGUEZ, J., LEMA, J. M. Optimisation of substrate blends in anaerobic co-digestion using adaptive linear programming. **Bioresource technology**, v. 173, p. 159-167, 2014.
- HAGOS, K., JIANPENG, Z., DONGXUE, L., CHANG, L., XIAOHUA, L. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1485-1496, 2017.
- JORDÃO, Eduardo P. e PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- KASHI, S., SATARI, B., LUNDIN, M., HORVÁTH, I. S., OTHMAN, M. Application of a mixture design to identify the effects of substrates ratios and interactions on anaerobic co-digestion of municipal sludge, grease trap waste, and meat processing waste. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 5, n. 6, p. 6156-6164, 2017.

- LEE, B., PARK, J., SHIN, W. KIM, B., BYUN, B. JUN, H. Maximizing biogas production by pretreatment and by optimizing the mixture ratio of co-digestion with organic wastes. **Environmental Engineering Research**, v. 24, n. 4, p. 662-669, 2019.
- MAO, C., YONGZHONG, F., XIAOJJAO, W., GUANGXIN, R. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.
- PARKIN, G. F., OWEN, W. F. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. **Journal of environmental engineering**, v. 112, n. 5, p. 867- 920, 1986.
- RAHMAN, M. A., SAHA, C. K., WARD, A. J., MOLLER, H. B., ALAM, M. M. Anaerobic co-digestions of agro-industrial waste blends using mixture design. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 156-164, 2019.
- RAO, P. V., BARAL, S. S. Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, n. 2-3, p. 977-986, 2011.
- ROSÉN, C., JEPPSSON, U. Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework. **Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University**, Lund, Sweden, p. 1-35, 2006.
- SAGHOURI, M., ABDI, R., EBRAHIMI-NIK, M., ROHANI, A., MAYSAMI, M. Modeling and optimization of biomethane production from solid-state anaerobic co-digestion of organic fraction municipal solid waste and other co-substrates. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, p. 1-17, 2020.
- SIMON, M.J. **Concrete Mixture Optimization Using Statistical Methods**. FHWA, 2003.
- URANGA-SOTO, M. A., VALDEZ-TORRES, J. B., BÁEZ-SAÑUDO, M. A., HEREDIA, J. B., SILLER-CEPEDA, J. H., MUY-RANGES, M. D. Optimizing feedstock mixtures of livestock farming wastes to enhance methane yield in biogas production by co-digestion. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 5, p. 053105, 2018.
- WANG, X., YANG, G., FENG, Y., REN, G., HAN, X. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.
- ZAHER, U., LI, R., JEPPSSON, U., STEYER, J., CHEN, S. GISCOD: general integrated solid waste co-digestion model. **Water research**, v. 43, n. 10, p. 2717-2727, 2009.