

# MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE REATORES ASSOCIADOS PARA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Gabriellen Kelly Amaral de Oliveira (Universidade Federal do Pará) E-mail:  
gabriellen.oliveira@icb.ufpa.br  
Simone de Aviz Cardoso (Universidade Federal do Pará)

**Resumo:** Por muitos anos o ser humano tem procurado formas de produzir energia limpa. Ainda assim, muitas questões são motivos de impedimento para a plena operação de meios energéticos ambientalmente favoráveis. Então, notou-se a possibilidade de produção energética a partir de resíduos agroalimentares, proveniente da digestão anaeróbia, mediada por bactérias em condições específicas. Outro produto desse processo, é o biofertilizante, fertilizante natural e mais seguro à saúde humana. Assim, este trabalho teve por objetivo, realizar a modelagem matemática e simulação de um sistema de biorreatores associados para produção de biogás. A melhor quantidade de metano gerado de acordo com os parâmetros ideais foi de 4000 ml em um período de 50 dias. A melhor taxa de produção do biogás foi de  $2,6 \text{ ml.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , produção de acordo com a quantidade de sólidos voláteis adicionados por dia. Enquanto que a melhor produção de biogás em termos de sólidos voláteis adicionados ao dia foi de  $57 \text{ ml/g}_{\text{SVTad}}$  no 50º dia. O sistema em série de biodigestores se mostrou mais eficiente, tanto em termos de degradação de matéria orgânica, como na produção de biogás.

**Palavras-chave:** biodigestão, biogás, modelagem matemática, simulação.

## MATHEMATICAL MODELING AND SIMULATION OF ASSOCIATED REACTORS FOR ANAEROBIC BIODIGESTION

**Abstract:** For many years humans have been looking for ways to produce clean energy. Even so, many issues are reasons for preventing the full operation of environmentally friendly energy resources. Thus, it was noted the possibility of energy production from agrifoods residues, from anaerobic digestion, mediated by bacteria under specific conditions. Another product of this process is biofertilizer, a natural fertilizer that is safer for human health. Therefore, this work objective is to reach out to the mathematical modeling and simulation of a system of associated bioreactors for biogas production. The best amount of methane generated according to the ideal parameters was 4000 ml in 50 days. The best biogas production rate was  $2.6 \text{ ml.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , production according to the amount of volatile solids added per day. While the best biogas production in terms of volatile solids added per day was  $57 \text{ ml/g}_{\text{SVTad}}$  on the 50th day. The system in series of biodigesters proved to be more efficient, both in terms of degradation of organic matter and in the production of biogas.

**Keywords:** biodigestion, biogas, mathematical modeling, simulation.

### 1. Introdução

Desde os tempos remotos, o ser humano procura formas de produzir energia, e desde

então utilizou o fogo, a água, o vento e combustíveis fósseis (NASCIMENTO, 2016). Nos últimos anos, devido a preocupação com o meio ambiente e formas de preservar ao máximo a vida natural, iniciou-se a busca por formas mais benéficas de produção de energia, entre elas a geração de energia a partir da biomassa, ou seja, matéria orgânica proveniente do consumo humano (GOLDEMBERG, 2007).

### **1.1 Biomassa**

Biomassa é a matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada na produção de energia (SOUZA, 2002). O biogás pode ser obtido através da decomposição de uma variedade de recursos renováveis, como plantas, madeira, resíduos agrícolas, restos de alimentos, excrementos e lixo. O Brasil é um país privilegiado na produção de biomassa em larga escala, pois existem extensas áreas de cultivo e condições climáticas favoráveis ao longo do ano. Inúmeros são os benefícios na utilização da energia da biomassa: baixo custo de aquisição e as emissões não contribuem para o efeito estufa, é menos agressiva ao meio ambiente do que as provenientes de combustíveis fósseis diminuindo assim o risco ambiental (SOUSA, 2020).

### **1.2 Digestão Anaeróbia**

A digestão anaeróbia é um processo de degradação da matéria orgânica, em condições de ausência de oxigênio livre, com produção de biogás. O biogás é composto majoritariamente por metano (55 a 70%) e dióxido de carbono (30 a 45%) e, devido à presença do hidrocarboneto metano, é um gás energético, portanto, um biocombustível (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

O biogás é o gás produzido a partir da decomposição da matéria orgânica por bactérias. Na geração de energia do biogás, ocorre a conversão da energia química do gás em energia mecânica. Essa energia mecânica ativa um gerador que produz energia elétrica. O biogás também pode ser usado em caldeiras por meio de sua queima direta para a geração de energia. Segundo Chen et al. (2008), o biogás pode ser gerado de diversas fontes orgânicas que possuem composição de fácil biodegradabilidade e acesso aos micro-organismos, tendo maior destaque os resíduos agropecuários.

Grande vantagem da utilização desse tipo de produção de energia, é a redução do desperdício de alimentos, de acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura), um terço dos alimentos produzidos são desperdiçados diariamente, em todo o mundo. O Brasil está entre os dez países que mais desperdiçam alimentos. A Fundação Getulio Vargas (FGV) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em pesquisa, apontaram que, por ano, cada brasileiro desperdiça, em média, 41,6 kg de comida. Se considerar uma casa com quatro moradores esse volume é de 166,4 kg ao ano. Aproveitar o que foi desperdiçado ou perdido, produzindo energia, é uma das soluções mais viáveis, trazendo redução de gastos, menor agressão ao meio ambiente e reduzindo o desperdício de alimentos.

### **1.3 Biofertilizante**

O biofertilizante é o subproduto proveniente da fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos na produção de biogás. Sob forma líquida, o biofertilizante contém nutrientes essenciais às plantas, principalmente nitrogênio e fósforo, atuando como fertilizante e também como defensivo agrícola, erradicando pragas, doenças e insetos (EMBRAPA,

2007).

O biofertilizante é um aliado na redução total ou parcial do uso de insumos químicos para fertilização em plantas, pois pode possuir altos teores de nutrientes importantes para o desenvolvimento vegetal. Dessa forma, seu uso tem sido frequente, principalmente em culturas como: feijão, soja, tomate, hortaliças e várias frutíferas. (GONÇALVES et al, 2009; TESSEROLI-NETO, 2006).

#### **1.4 Simulação de Bioprocessos**

O uso de ferramentas *in silico*, ou seja, aquele realizado via simulação em computador, possibilita a avaliação de diferentes cenários em questão de desempenho técnico e de viabilidade econômica, de forma rápida e dinâmica, minimizando os esforços experimentais, como o tempo e materiais.

A simulação de processos e bioprocessos é uma ferramenta bastante utilizada na engenharia química, biotecnologia e engenharia de bioprocessos, devido à possibilidade de prever condições operacionais ou simular equipamentos. (PASSOS, 2016).

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais a fim de prever o comportamento destes, sendo empregada em diversos campos de estudo, tais como física, química, biologia, economia e engenharias. Ou seja, a modelagem matemática consiste na tentativa de descrever matematicamente um fenômeno.

#### **1.5 Justificativa**

O biogás é um biocombustível proveniente de materiais orgânicos e, portanto, é uma fonte alternativa de energia, o qual substitui o uso de combustíveis fósseis. No entanto, é preciso otimizar a produção de metano e biofertilizantes, através de modelagem matemática e simulação dos biorreatores envolvidos no processo.

### **2. Metodologia**

#### **2.1 Esquema do Problema**

O esquema de biodigestão em cascata possui um tanque de armazenamento, onde a biomassa é depositada. Possui três biodigestores onde acontecem, respectivamente, a hidrólise, acidogênese e, no último, acetogênese e metanogênese. O sistema tem dois reservatórios finais, um para o biogás e outro para o biofertilizante. O processo descrito em mais de uma etapa é preferível, pois há melhor aproveitamento dos resíduos em cada biodigestor, maior eficiência no processo e maior rentabilidade na produção (Albuquerque, 2019). O esquema do processo pode ser visualizado nas Figuras 1 e 2.

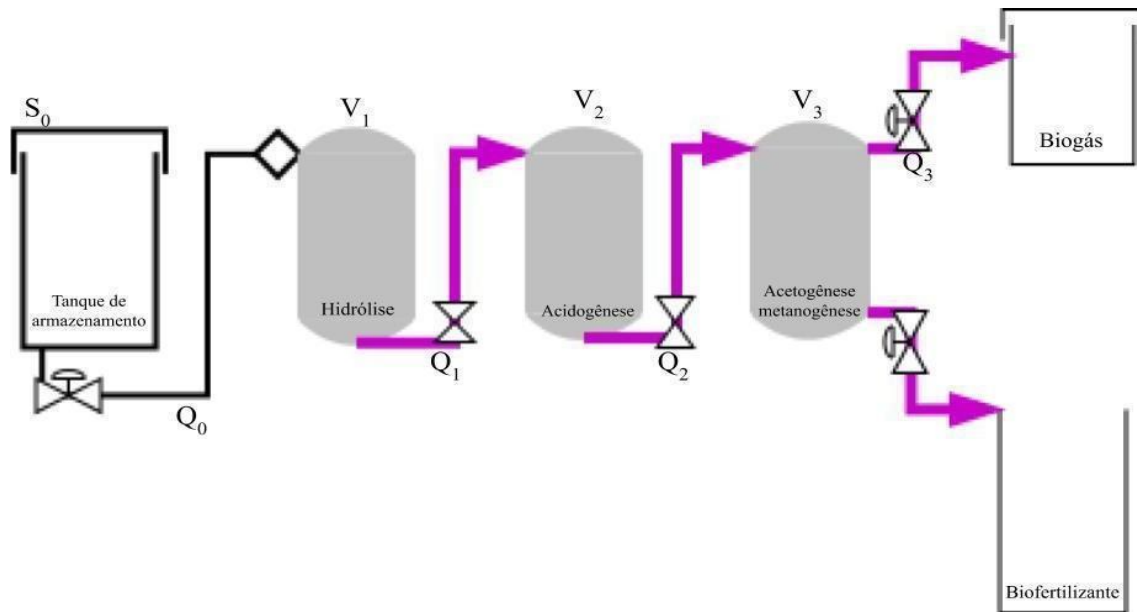


Figura 1 - Sistema de biodigestão do modelo proposto

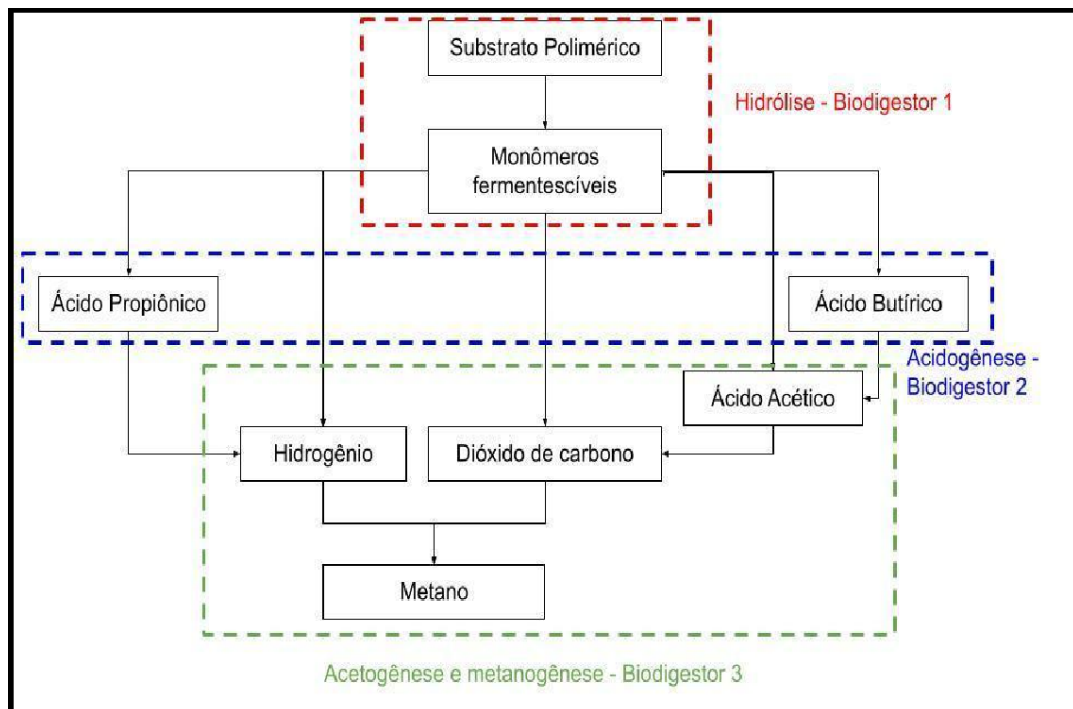


Figura 2 - Diagrama do modelo de digestão anaeróbio.

## 2.2 Modelagem Matemática

### 2.2.1 Balanços de Massa

Para desenvolver o modelo matemático, equações gerais de conservação de espécies que descrevem a conversão do substrato foram utilizadas. As equações propostas são uma adaptação do modelo proposto por Mello (2017) que aplicou as equações de conservação num único reator, tanto para as fases líquida e gasosa.

O presente modelo, apresenta um sistema com 3 reatores em série, assim, um balanço de massa para o substrato em cada recipiente reativo foi desenvolvido. Os dois primeiros

reatores em fase líquida, e último reator em duas fases, líquido e gás. A região do reator 3 que compreende a fase gás é comumente chamada de "head space". A Figura 3 apresenta o esquema para o desenvolvimento do modelo em cada reator. Foram admitidas para o modelo as seguintes hipóteses simplificadoras:

1. Três reatores tanque agitado em série;
2. Tempo de retenção para realização da reação de hidrólise no reator 1 igual a 4 dias;
3. Tempo de retenção no reator 2 para realização das reações de acidogênese igual a 9 dias;
4. Tempo de retenção no reator 3 para realização das reações de aceto-metanogênese igual a 13 dias;
5. Tempo total do processo de biodigestão em reatores associados de 30 dias;
6. O volume total da fase líquida igual a 5 L conforme Mello (2017);
7. Temperatura e pressão de operação constantes e iguais a 35°C e 1 atm, respectivamente, também conforme Mello (2017);
8. O volume total reacional foi de 7 L conforme Mello (2017);
9. O volume do reator 1 foi  $V_1 = 0,66$  L e a solução reagente completamente na fase líquida;
10. O volume do reator 2 foi  $V_2 = 1,5$  L e a solução reagente completamente na fase líquida;
11. O volume do reator 3 na fase líquida foi igual a  $V_3 = 2,83$  L e  $V_g = 2,0$  L para a fase gasosa (biogás), volume do headspace  $V_g$ ;
12. Foi assumido vazão constante entre as misturas na fase líquida nos reatores 1 e 2, ou seja,  $Q_0$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$  em L/dia;
13. A vazão do biogás produzido  $Q_3$  em L/dia;
14. A vazão do digestado  $Q_4$  em L/dia; sendo  $Q_4 = Q_2 - Q_3$ ;
15. A pressão total no head space,  $P_T$ , foi mantida constante e igual a 1 atm conforme Mello (2017);
16. A reação de hidrólise com taxa de reação  $r_1$  no reator 1;
17. As reações de acidogênese no reator 2 com taxas de reação:  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$ ,  $r_5$ ,  $r_6$ ,  $r_7$  e  $r_8$ ;
18. As reações de aceto-metanogênese no reator 3 com taxas de reação:  $r_8$ ,  $r_9$ ,  $r_{10}$ ,  $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{13}$ ,  $r_{14}$ ,  $r_{15}$ ,  $r_{16}$ ,  $r_{17}$ ,  $r_{18}$  e  $r_{19}$ ;
19. As reações de transferência das espécies  $CO_2$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ , entre a fase líquida do reator 3 e fase gás no headspace do reator 3 com taxas  $r_{20}$ ,  $r_{21}$  e  $r_{22}$ ;
20. Os valores dos parâmetros cinéticos das taxas de reação de  $r_1$  até  $r_{22}$  foram os adotados por Mello (2017).

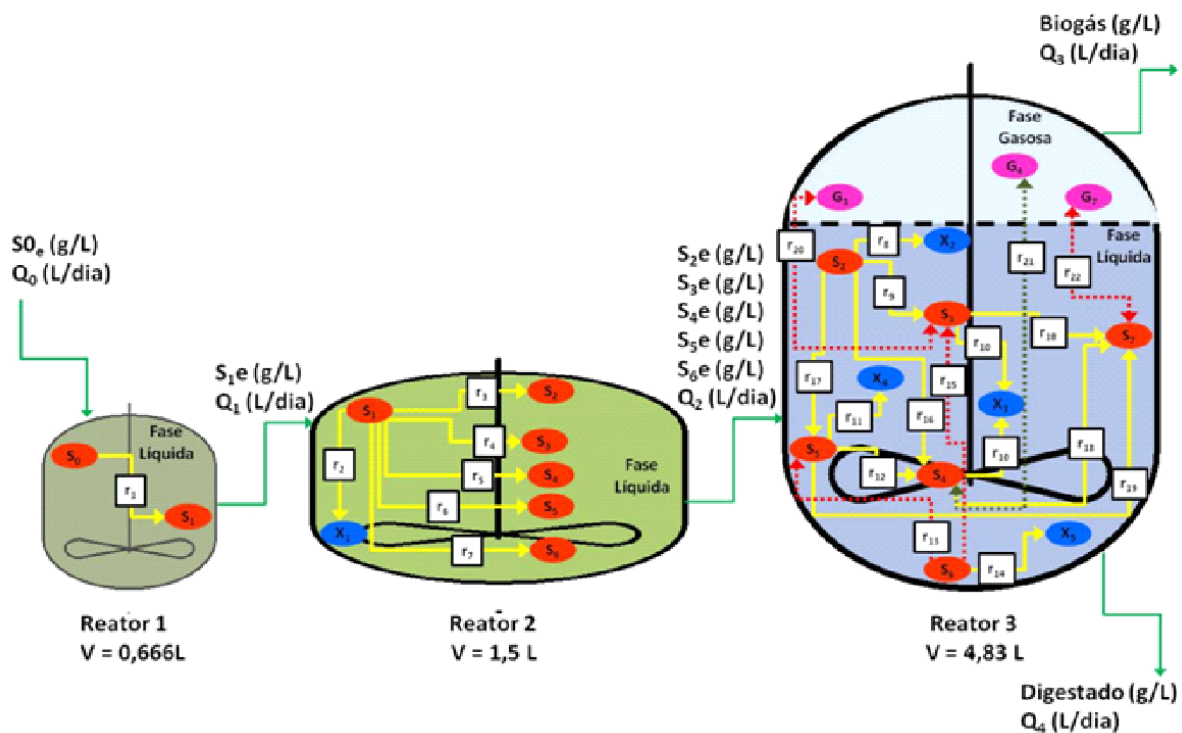


Figura 3 - Esquema dos biorreatores com todas as reações envolvidas no processo

### 2.3 Implementação do modelo no mathematica WOLFRAM

O objetivo deste trabalho é simular a formação de gás metano em um sistema de biodigestores em cascata, para isso foi utilizado o software Mathematica Wolfram, este contém pacotes de resolução de equações diferenciais.

Foi utilizado o comando NDSolve, ele encontra soluções numéricas para equações diferenciais ordinárias para uma função com a variável independente em um determinado intervalo. E também para sistema de equações diferenciais acopladas, como as equações do balanço de massa do presente trabalho. Foram desenvolvidas no presente trabalho 23 equações diferenciais ordinárias com suas respectivas condições iniciais e aplicou-se o comando NDSolve para o conjunto de EDO's em cada reator.

### 3. Resultados

O gráfico da Figura 4 representa a simulação da taxa de produção de biogás, em mililitros por grama de sólidos voláteis adicionados ao dia. A taxa de produção de biogás é referente a carga orgânica de alimentação, ou seja, a quantidade de biogás produzido pelos processos anaeróbios para cada grama de sólido volátil adicionado no início do ensaio, para os dezessete dias de avaliação de potencial metanogênico.

O pico de produção se deu nos dias 13 e 14, com o valor máximo de  $2,6 \text{ ml.g}_{\text{SVTad}}^{-1}.\text{d}^{-1}$  e o mínimo de  $0,1 \text{ ml.g}_{\text{SVTad}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , esse pico de produção é evidenciado pelo fato da recente adição de substrato no biodigestor. No dia 15 houve um novo crescimento, atingindo  $0,4 \text{ ml.g}_{\text{SVTad}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ . A partir do dia 15 a produção se manteve linear e decrescente, chegando a  $0,3 \text{ ml.g}_{\text{SVTad}}^{-1}.\text{d}^{-1}$ .

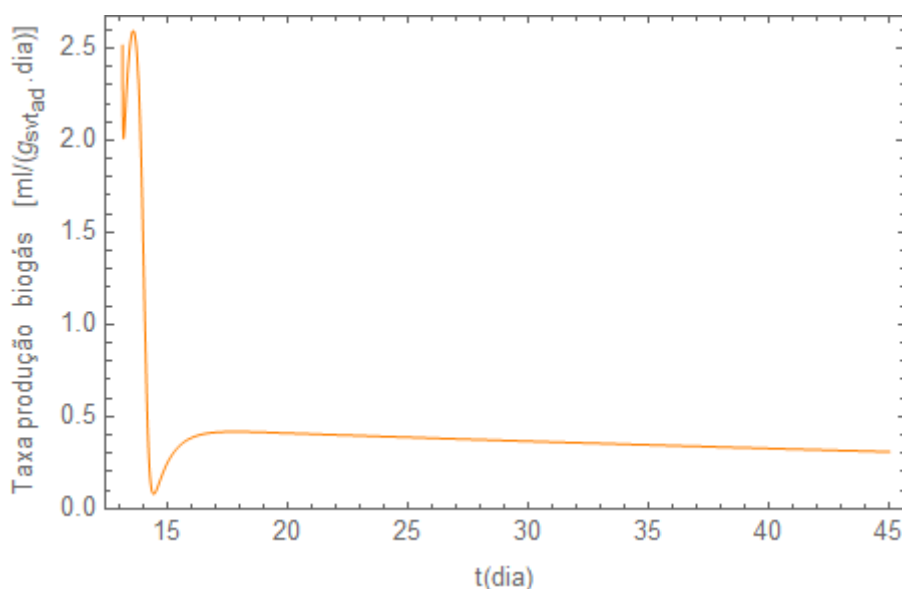


Figura 4 - Taxa da produção de Biogás.

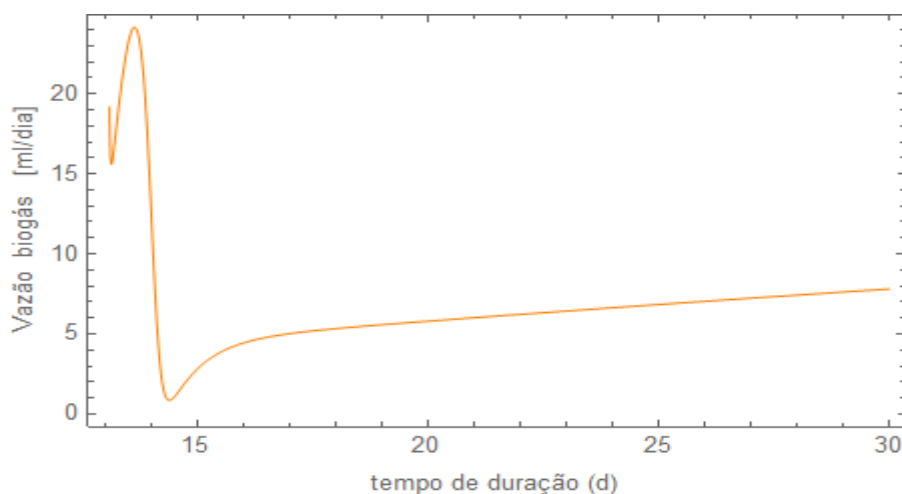


Figura 5 - Vazão de biogás (ml/dia).

O gráfico da Figura 5 demonstra a vazão de biogás simulada ocorrida no período de 17 dias, o gráfico inicia no 13º dia, sendo esse o início da alimentação do biodigestor número 3, onde ocorre as fases acetogênese e metanogênese, simultaneamente. No 13º dia ocorre diminuição da vazão do biogás, visto que o substrato proveniente do biodigestor 2 está em fase de adaptação ao sistema do biodigestor 3. No 14º dia há um crescimento abrupto



da vazão, alcançando 24 ml/dia, seguido de uma queda rápida, voltando a crescer a partir do terceiro dia (15º dia) no biodigestor, atingindo 8 ml/dia no 30º dia.

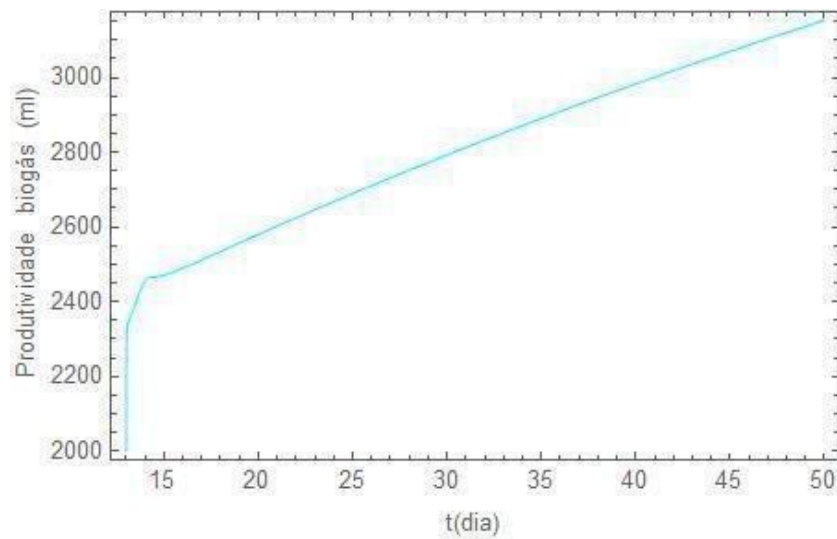


Figura 6 - Produtividade de biogás.

Na figura 6, é possível verificar a produção acumulada de biogás durante a simulação, entre os dias 15 à 50, a produção ocorre de forma crescente, chegando a 4000 ml no 50º dia. No início da produção ocorre um rápido crescimento, isso ocorre pela recente alimentação e adequação do biodigestor.

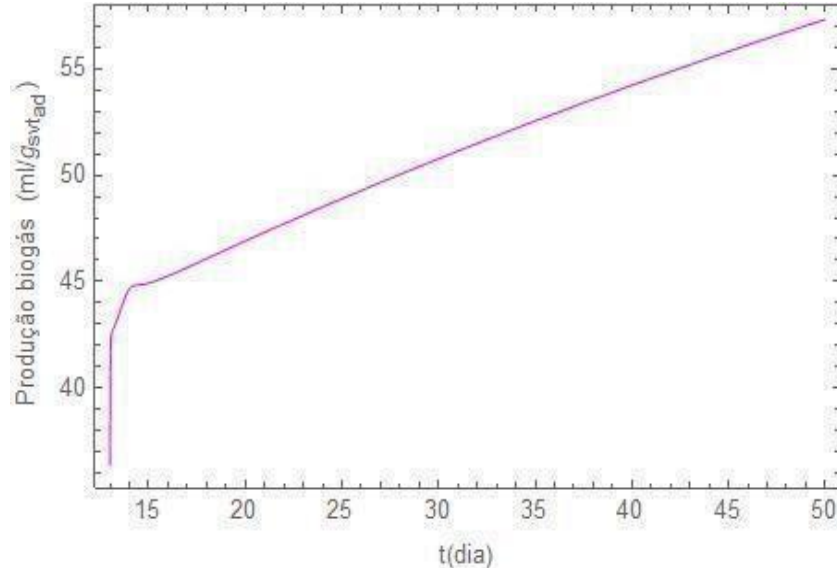


Figura 7 - Produção de biogás em ml por grama de sólidos voláteis adicionados.

De acordo com a simulação, no 13º dia, início da acetogênese e metanogênese, ocorreu um crescimento abrupto, demonstrado na figura 7, atingindo 45 ml/g<sub>SVTad</sub>, aumentando a produção continuamente, atingindo 50 ml/g<sub>SVTad</sub> no 30º dia e 57 ml/g<sub>SVTad</sub> no 50º dia.

#### 4. Conclusão



- i. O modelo de biodigestores associados é mais eficiente em termos produtivos, em relação a produção de biogás em um único estágio;
- ii. Espera-se que uma análise mais precisa sobre as taxas de reação possam melhorar ainda mais o desempenho do modelo proposto, que utilizou os modelos cinéticos de Mello (2017), e que foi proposto para as reações simultâneas num único reator, diferentemente do modelo proposto no presente estudo, que separou as etapas de biodigestão em três reatores tanque agitados;
- iii. O volume máximo de produção de biogás foi de 4000 ml no 50º dia, em um volume de 4,83L no biodigestor 3.

## Referências

- BIOFERTILIZANTE: Aprenda como se faz.* EMBRAPA. Brasília, 11/2007.
- CHEN, Y. CHENG, J. J. CREAMER, K. S.** *Inhibition of anaerobic digestion process: a review.* Bioresource Technology, v. 99, p. 4044-4064, 2008.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A.** *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction,* first ed. Wiley-VCH, Weinheim. 2011.
- FOME aumenta no mundo e afeta 821 milhões de pessoas.** ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Brasília.
- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo.** *Energia e meio ambiente no Brasil.* Estud. av. São Paulo , v. 21, n. 59, p. 7-20, Abr. 2007 .
- GONÇALVES, H. F. E.; LIMA, R. S.; WEISS, V. A. B.; MENEZES, V. S.** *O biodigestor como princípio de sustentabilidade de uma propriedade rural.* Projetos: Universidade Católica. Tocantins, Palmas, TO, 11p. 2009.
- MELLO, Thiago Carvalho de.** *Validação Experimental De Modelo Matemático De Reatores De Biodigestão Anaeróbia E Avaliação Do Impacto Da Adição De Microalgas Na Produtividade.* 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M.** *Fontes Alternativas E Renováveis De Energia No Brasil: Métodos E Benefícios Ambientais.* Educação e Ciência para a Cidadania Global, UNIVAP, 2016.
- PASSOS, Thaís da Rosa.** *MODELAGEM E SIMULAÇÃO ATRELADA À ENGENHARIA QUÍMICA.* BetaEQ, 2016.
- SOUSA, Isabelle de P. et al.** *ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS FROM PIG FARMS IN THE STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL.* Eng. Agríc., Jaboticabal , v.40, n. 3, p. 396-404, June 2020.
- SOUZA, Samuel N. M. de, SORDI, Alexandre e OLIVA, Carlos A.** *Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná: 4º Encontro de Energia no Meio Rural..* In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Proceedings online.
- TESSEROLI-NETO, E. A.** *Biofertilizantes: Caracterização química, qualidade sanitária e eficiência em diferentes concentrações na cultura de alface.* 72p. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

