

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NUM BIODIGESTOR URBANO

MODELING AND SIMULATION OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS IN AN URBAN BIODIGESTER

Neuza Terezinha Oro, Airam Teresa Zago Romcy Sausen, Paulo Sérgio Sausen

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI)
E-mails: neuza@upf.br, airam@unijui.edu.br, sausen@unijui.edu.br

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar um modelo matemático ajustado para biodigestor urbano. Para desenvolver este trabalho, inicialmente, foi realizado um estudo teórico acerca de biodigestão, modelos matemáticos que representam este processo, sistemas autônomos e estabilidade. Em um segundo momento, foram realizadas a simplificação do modelo matemático que descreve o processo de um biodigestor, o ajuste dos parâmetros no modelo, assim como, a análise da estabilidade do sistema e o comportamento da solução encontrada para a verificação da quantidade de bactérias e produção de biogás. As simulações foram realizadas em dois momentos: sem retirada de biogás e o com retirada de biogás. No primeiro caso foi analisado a produção de biogás e o crescimento das bactérias, na qual se confirmou que o ponto de equilíbrio fornece o crescimento máximo das bactérias e a produção máxima do biogás. No segundo caso, utilizou-se uma retirada de biogás em períodos de tempo regulares e novamente confirmou-se o ponto de equilíbrio e foi verificado que após esse ponto a produção de biogás e o crescimento das bactérias tornam-se estáveis.

Palavras Chaves: Biodigestor, modelo matemático, simulação, estabilidade, simulação.

ABSTRACT

This article aims to present a mathematical model adjusted for urban biodigester. For this work, initially, a theoretical study about the biodigester, mathematical models representing this process, autonomous systems and stability they was carried out. Second, a simplification of the mathematical model describing the process of a biodigester, the adjustment of the non-model parameters, as well as an analysis of the stability of the system and the behavior of the solution found, together with the graphs for a Quantity of bacteria and biogas production. As simulations were performed in two moments: no biogas removal and with biogas removal. In the first case, through the graph, we analyzed the production of biogas and the growth of bacteria, in quality it was confirmed that the break-even point for maximum growth of bacteria and maximum production of biogas. In the second case, a biogas withdrawal was used in regular time periods, the equilibrium was again confirmed and it was verified that after that point the biogas production and the growth of the bacteria became stable.

Keywords: biodigester, mathematical model, simulation, stability, simulation.

1. INTRODUÇÃO

É evidente a grande preocupação mundial com relação à preservação do meio ambiente. A cada dia, observa-se a incansável busca por alternativas de produção de energia renovável que possam substituir os recursos naturais não renováveis que estão em fase de escassez.

Convém lembrar de que o lixo constitui um dos principais problemas da sociedade moderna. Várias alternativas de solução estão sendo difundidas em maior ou menor escala tais como: incineração, compostagem, usina de reciclagem e aterro sanitário. Se as duas primeiras fogem ao amparo do orçamento municipal pelo elevado custo de instalação e operação, o aterro sanitário tem a desvantagem de ser uma solução provisória, pois com a conclusão do mesmo, o problema volta a preocupar. Com relação aos depósitos a céu aberto, os problemas criados são ainda maiores, por contribuírem de forma expressiva, para poluição do ar, da água e do solo.

A solução mais aceita, no momento, é a usina de reciclagem gerando, inclusive, vários empregos para a população de baixa renda. Porém, as usinas operam somente com o lixo sólido, não digerível como o vidro, plástico, papéis, etc. Restam ainda substâncias orgânicas das mais diversas, contidas no lixo domiciliar e que são constituídas, em grande parte, de sólidos voláteis, que não são recicladas nas usinas. Essas poderiam, quase que na sua totalidade, serem aproveitadas, mediante fermentação ou digestão, por meio da bactéria anaeróbia, para a produção de metano (CH_4), também chamado de gás dos pântanos e adubo orgânico enriquecido com nitrogênio (humos).

Várias regiões do Brasil estão aderindo a uma nova alternativa para a produção de energia renovável, o biodigestor, principalmente em regiões onde as características funcionais são compatíveis com o clima e a cultura agrícola. Além do Brasil, outros países do continente europeu têm realizado programas de disseminação e uso de biodigestores; sem falar nos países originários dos modelos mais difundidos como a Índia que possui aproximadamente 300 mil e a China com mais de oito milhões (DEGANUTTI, et al., 2002)

O biodigestor apresenta-se como uma alternativa de solução para o problema do lixo produzido em grande escala nas zonas rurais e, principalmente urbana, contribuindo para a redução da poluição ambiental. Além disso, no processo de biodigestão, o gás metano produzido e o resíduo da matéria orgânica depois de fermentada podem ser utilizados na indústria e na produção de húmus à agricultura. Esta alternativa é recomendável levando-se em conta a falta, cada vez maior, de combustível, a necessidade de encontrar fontes alternativas de energia e o constante empobrecimento da terra pelo uso contínuo de adubos químicos e defensivos agrícolas.

No Brasil, estudos envolvendo o uso de biodigestores têm sido utilizados principalmente em tratamento de efluentes, para melhorar a fertilidade de solo e, com isso, aumentar a sustentabilidade do sistema produtivo, e uso energético do biogás. (SILVA et al, 2012)

Basicamente um biodigestor é formado por um tanque de fermentação anaeróbica de matérias orgânicas, substrato ou biomassa, que produz um gás combustível composto essencialmente por metano, denominado de biogás (BASSANEZZI e FERREIRA, 1988). Segundo o comunicado técnico da Embrapa (1981), a variedade de matérias orgânicas (substratos) que podem ser usados para alimentar um biodigestor é bem diversificada, tais como, esterco, lixo orgânico e resíduos.

Uma das formas de aproveitamento da fermentação do substrato é a produção de biogás. Ele é produto resultante da fermentação, na ausência de ar, de matérias orgânicas, em condições adequadas de umidade. Esse processo é conhecido como digestão anaeróbica e ocorre em duas etapas: primeiramente é feita uma transformação das moléculas orgânicas em ácidos gordos, sais ou gás; após é feito a transformação destes em uma mistura gasosa constituída por metano e dióxido de carbono. (DEGANUTTI et al, 2002).

Segundo Holm-Nielsen, Al Seadi e Oleskowicz-Popiel (2009), o ciclo de produção de biogás representa uma alternativa integrada de produção de energia renovável, utilização de recursos, tratamento de resíduos orgânicos e reciclagem e redistribuição de nutrientes, gerando benefícios agrícolas e ambientais, tais como: produção de energia renovável; reciclagem de resíduos orgânicos barata e ambientalmente saudável; menos emissões de gases com efeito de estufa; redução de patógenos através de saneamento; melhoria da eficiência de fertilização (HOLM-NIELSEN et al., 1997); menos incômodo de odores e moscas (BIRKMOSE, 2007); e vantagens econômicas para os agricultores.

Neste contexto, este artigo tem por objetivo principal apresentar a modelagem matemática de um processo de biodigestão. Como dados experimentais, são considerados os coletados na cervejaria Brahma, Passo Fundo, RS, antes de seu fechamento.

O artigo está organizado como segue. Na Seção 1, aborda-se a modelagem matemática do processo de biodigestão. Na Seção 2 é apresentada a simulação numérica deste processo. Já, na Seção 3 é apresentada a análise dos resultados obtidos na simulação. E, na última seção, são apresentadas as conclusões a cerca do trabalho exposto.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A tradução de um fenômeno, ou problema de uma situação real, em um conjunto de símbolos e relações matemáticas, denomina-se modelo matemático. E este pode ser formulado utilizando-se expressões numéricas, fórmulas, diagramas, equações algébricas, tabelas, entre outros.

A palavra modelo possui vários significados, porém, nesta pesquisa, será utilizada a definição de Goldbarg e Luna (2005), ou seja, os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada.

Na literatura técnica são encontradas diferentes classificações para a modelagem matemática de sistemas dinâmicos, que dependem do enfoque que é dado em seu processo de elaboração. Quanto às propriedades, segundo Goldbarg e Luna (2005), os modelos podem ser classificados em três grupos: modelos icônicos, modelos analógicos e modelos simbólicos. Observa-se que esta última classificação, modelos simbólicos, é a utilizada em maior intensidade neste trabalho, pois as variáveis e as respectivas relações são representadas utilizando letras, números e outros símbolos, destacando as relações lógicas ou as relações matemáticas, que são as equações, por exemplo, algébricas e diferenciais.

Neste artigo, são propostos modelos que consideram a variação de quantidade de biogás no interior do biodigestor, que é proporcional à quantidade de bactérias presentes e sua diminuição pode ser traduzida pelo tipo de retirada efetuada. Assim, estão relacionadas apenas duas componentes básicas de um biodigestor com renovação de biomassa: a primeira que representa a quantidade de bactérias que produzem o biogás e, a segunda que representa a quantidade de biogás produzido que não é retirado.

Desta forma, as equações que regem estas hipóteses são descritas pelo sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDO), não linear, dado por:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(x) - pxy \\ \frac{dy}{dt} = kx - h(y,t) \end{cases} \quad (1)$$

Na equação (1),

$x(t)$ é a quantidade de bactérias anaeróbicas;

$y(t)$ é a quantidade de biogás;

t é o tempo;

p e k são constantes positivas;

$F(x)$ é o termo responsável pelo fator de inibição, fornece a variação das bactérias, independentemente da presença de biogás;

$h(y,t)$ é a função responsável pelo tipo de retirada de biogás que é efetuada.

Observa-se que a representação matemática da produção de biogás e o crescimento de bactérias anaeróbicas em um biodigestor, é um ajuste do modelo presa-predador de Lotka-Volterra (EDELSTEIN – KESHET, 1988), apresentado inicialmente em Bassanezzi e Ferreira (1988), no qual as bactérias anaeróbicas crescem em função do alimento que entra e este crescimento produz o biogás.

Contudo, no início não há biogás, logo não há presença do termo inibidor, já a medida que as bactérias crescem e se alimentam, produzem o biogás, momento no qual se estabelece o fator inibidor.

Assim, a análise do sistema apresentado na equação (1) será realizada em dois momentos, primeiramente considera-se que o gás no início é mantido dentro do biodigestor, e em seguida considera-se que o gás é retirado do biodigestor.

2.1. O gás no início é mantido no interior do biodigestor.

Neste caso, a função responsável pelo tipo de retirada de biogás $h(y,t)$ é igual a zero. Inicialmente, considera-se que o crescimento das bactérias é proporcional à quantidade de bactérias existentes naquele instante. Desta forma, o sistema descrito na equação (1) pode ser reescrito na forma

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - pxy, \\ \frac{dy}{dt} = kx. \end{cases} \quad (2)$$

Nesta situação, a reta de equilíbrio é dada por $x = 0$, pois não existindo bactérias, não haverá fermentação.

Na Figura 1 são mostradas algumas curvas-soluções no plano de fase do sistema apresentado na equação (1), traçadas no aplicativo *Maple 13*, sendo $\alpha = 2$; $p = 0,001$ e $k = 0,25$. Foram, também, consideradas as seguintes condições iniciais: $x(0) = 500, y(0) = 0$; $x(0) = 250, y(0) = 0$; $x(0) = 1000, y(0) = 0$; e $x(0) = 30, y(0) = 0$.

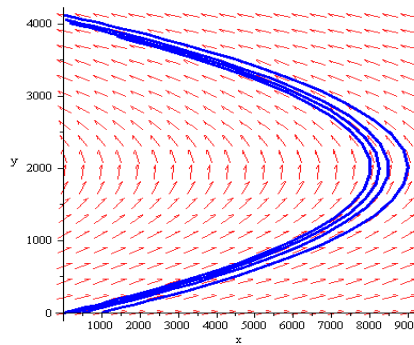


Figura 1: Curvas-soluções no plano de fase.

Analizando as curvas-soluções no plano de fase, apresentadas na Figura 1, tem-se uma EDO de variáveis separáveis, dada por:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\alpha - py}{k} \quad (x \neq 0) \quad (3)$$

Supondo que $x(0) = x_0 > 0$ e $y(0) = 0$, a solução particular é dada por:

$$x = \frac{\alpha}{k} y - \frac{p}{2k} y^2 + x_0. \quad (4)$$

A equação (4) fornece as curvas características, as quais formam o campo vetorial que representa a relação entre a quantidade de bactérias e a quantidade de biogás, que, neste caso, são parábolas. Dessa forma, observa-se que o sistema atinge seu valor máximo em $x_M(x_0) = x_0 + \frac{\alpha^2}{2kp}$, quando $y_M = \frac{\alpha}{p}$.

Substituindo a equação (4) na segunda equação do sistema (2) obtém-se:

$$\frac{dy}{dt} = \alpha y - \frac{p}{2} y^2 + kx_0. \quad (5)$$

Então, a solução da equação (5), assumindo que $y_* = \frac{\alpha - D}{p}$, $D = \sqrt{\alpha^2 + 2pkx_0}$ e $y(0) = 0$, é dada por:

$$y = \frac{y_M y_* (1 - e^{-tD})}{y_* - y_M e^{-tD}}. \quad (6)$$

Quando $t \rightarrow +\infty$, $y(t)$, tende a y_M , isto é, a produção do gás é limitada. Além disto, a quantidade máxima de bactérias, representada pela equação (7),

$$x = \frac{4D^2 e^{-tD} x_0}{[(\alpha - D) - (\alpha + D)e^{-tD}]^2} \quad (7)$$

é atingida quando $y = \frac{\alpha}{p}$ e $t = \frac{1}{D} \ln\left(\frac{D + \alpha}{D - \alpha}\right)$.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que a produção de biogás no interior do biodigestor é limitada por y_M .

Considera-se, neste momento, que o sistema apresentado na equação (1) pode ser reescrito conforme:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(\alpha - rx - py), x > 0 \\ \frac{dy}{dt} = kx \end{cases}. \quad (8)$$

Na equação (8), α e r são constantes positivas.

Assumindo que não há biogás no início da biodigestão, tem-se as seguintes condições iniciais: $x(0) = x_0 > 0$ e $y(0) = 0$. Neste caso, os pontos de equilíbrio não são isolados.

De fato, para a primeira equação do sistema apresentado em (8), tem-se que $y = \frac{\alpha - rx}{p} \geq 0$. E, para a segunda equação, $x = 0$.

A expressão matemática que representa o plano de fase é dada pela equação (9)

$$\frac{dx}{dy} + \frac{r}{k} x = \frac{\alpha}{k} - \frac{p}{k} y, \quad (9)$$

cuja solução particular é dada por

$$x(y) = \frac{\alpha}{r} + \frac{pk}{r^2} - \frac{p}{r} y + C_1 e^{-\frac{r}{k}y} \quad (10)$$

onde $C_1 = x_0 - \left(\frac{\alpha r + pk}{r^2} \right)$.

Os pontos críticos da equação (11) são obtidos a partir da relação:

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{p}{r} - \frac{r}{k} C_1 e^{\frac{r}{k}y} = 0. \quad (11)$$

Considere $A = x_0 - \frac{\alpha}{r} - \frac{pk}{r^2}$, então da equação (11), obtém-se $y_* = \frac{k}{r} \ln \left(-\frac{Ar^2}{pk} \right)$. Se $x_0 > \frac{\alpha}{r}$,

$x(y)$ é sempre decrescente. Desta forma, $x_* = \frac{\alpha}{r} - \frac{pk}{r^2} \ln \left(-\frac{Ar^2}{pk} \right)$ fornece a quantidade máxima de

bactéria. Por um lado, y é limitado, uma vez que a reta $x = \frac{p}{r}y + \frac{\alpha r + pk}{r^2}$ é uma assíntota da curva

$$x = x(y); \quad \frac{dx}{dt} > 0, \text{ se } x < x_* \text{ e } \frac{dx}{dt} < 0, \text{ se } x > x_*.$$

2.2 O gás é retirado do biodigestor.

A colheita do gás produzido por um biodigestor pode ser efetuada de vários modos, o que é traduzido pela função $h(y, t)$ do sistema apresentado na equação (1). Neste artigo é considerado o caso em que a retirada de biogás é proporcional a sua quantidade no interior do biodigestor, isto é, onde β é a taxa de coleta.

O sistema de EDOs quase-linear é dado por:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - pxy, \\ \frac{dy}{dt} = kx - \beta y. \end{cases} \quad (12)$$

onde: α, p, k, β são constantes positivas. Os pontos de equilíbrio do sistema, apresentado na equação (12), são $(0,0)$ e $\left(\frac{\alpha\beta}{kp}, \frac{\alpha}{p} \right)$.

Neste momento, lineariza-se o sistema apresentado em (12), para tanto considera-se $p = 0$, isto é:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x, \\ \frac{dy}{dt} = kx - \beta y. \end{cases} \quad (13)$$

Do sistema linearizado, apresentado em (13), tem-se o polinômio característico dado por $P(\lambda) = \lambda^2 + (\beta - \alpha)\lambda - \alpha\beta$, cujas raízes são $\lambda_1 = \alpha$ e $\lambda_2 = -\beta$.

O ponto de equilíbrio (0,0) é um ponto de sela. Neste ponto o sistema é instável. Logo, (0,0) não é um ponto de interesse, visto que procura-se por um ponto estável.

Desta forma, analisa-se a estabilidade do ponto $\left(\frac{\alpha\beta}{kp}, \frac{\alpha}{p}\right)$. Para tanto, admite-se que $x = u + \frac{\alpha\beta}{kp}$ e $y = v + \frac{\alpha}{p}$, ou seja, será demonstrado que pequenas perturbações não alteram a natureza do ponto crítico.

Assim tem-se o sistema apresentado na equação (12) e modificado em (13), é reescrito conforme:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{\alpha\beta}{k}v - puv, \\ \frac{dv}{dt} = ku - \beta v. \end{cases} \quad (14)$$

As raízes da equação característica correspondente ao sistema linearizado são $\lambda_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\beta}}{2}$. Se $\beta^2 - 4\alpha\beta > 0$, tem-se um nó e se $\beta^2 - 4\alpha\beta < 0$, obtém-se uma espiral.

Portanto, $\left(\frac{\alpha\beta}{kp}, \frac{\alpha}{p}\right)$ será assintoticamente estável e a aceleração do sistema para este ponto é positiva,

$$\text{isto é, } \left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{y=\frac{\alpha}{p}} = -px \left(kx - \frac{\beta\alpha}{p} \right) > 0.$$

$$\text{Se } x < \frac{\beta\alpha}{kp} \text{ ocorre um ponto de mínimo para } x = x(t), \text{ e se } x > \frac{\beta\alpha}{kp}, \text{ então } \left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{y=\frac{\alpha}{p}} < 0,$$

ocorrendo um ponto de máximo. E, finalmente, quando $t \rightarrow \infty$, $x(t) \rightarrow \frac{\beta\alpha}{kp}$ e $y(t) \rightarrow \frac{\alpha}{p}$. Em outras palavras, para que o sistema se mantenha estável, o crescimento das bactérias será limitado e a quantidade de biogás retirado também será limitada.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO MATLAB/SIMULINK®

Para o ajuste dos modelos, descritos no item anterior, foram considerados os dados coletados no biodigestor da fábrica da cerveja Brahma, Passo Fundo, RS, antes do fechamento da fábrica, na década de 90.

Para a simulação, os valores para as constantes foram: $\alpha = 2$, $p = 0.001$, $k = 0.25$ e $\beta = 1$. Como condições iniciais tem-se que $x_0 = 30$ ml de substrato e $y_0 = 0$. Além disto, considera-se uma retirada por dia de biogás. Os dados aqui considerados foram obtidos das entrevistas com os responsáveis pela coleta e manutenção do biodigestor. A partir das planilhas de dados, foi considerada a média dos valores encontrados, excluindo-se o maior e o menor valor coletado.

Nas figuras 2 e 3 são apresentados os diagramas de blocos construídos no MatLab/Simulink®, representando os modelos de produção de biogás e crescimento de bactérias anaeróbicas, considerando sem e com retirada de biogás, respectivamente.

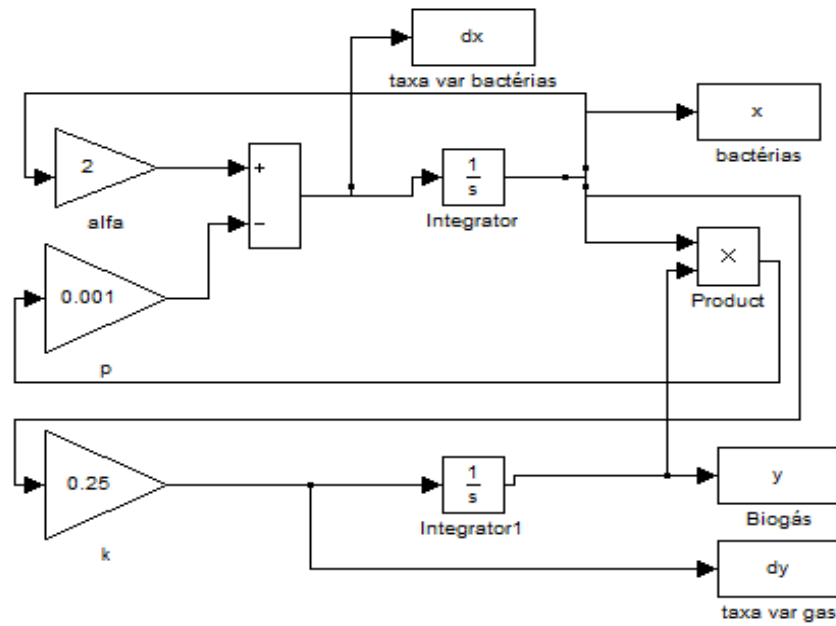


Figura 2: Diagrama de blocos para o modelo sem retirada de gás.

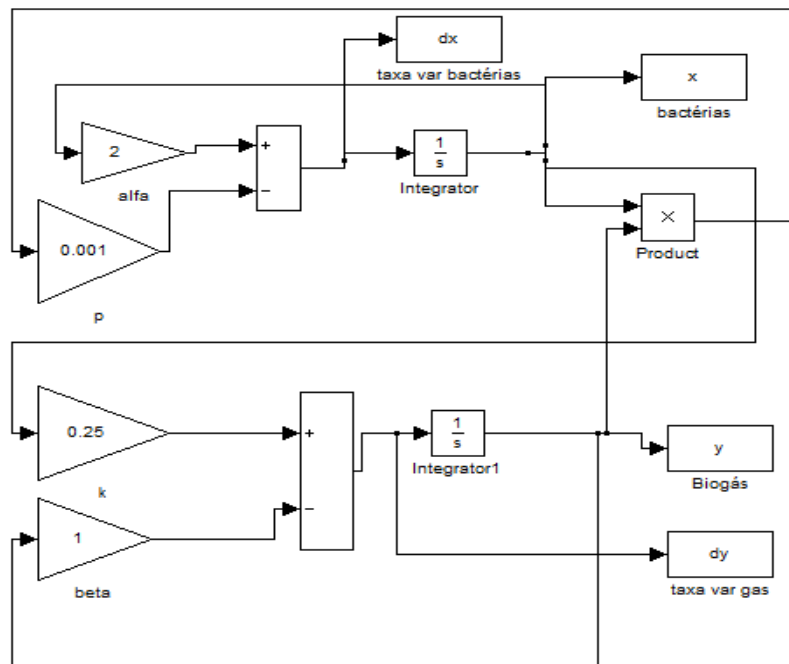


Figura 3: Diagrama de blocos para o modelo com retirada de gás.

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O crescimento máximo das bactérias, sem retirada de gás, é atingido quando tem-se 8000 ml de substrato e 2000 ml de biogás, ponto no qual o sistema entra em equilíbrio.

A produção máxima de biogás ocorre entre a terceira e quarta hora, e depois disto a produção tende a se estabilizar em aproximadamente 4000 ml de biogás. E, o crescimento das bactérias, por sua vez, ocorre no intervalo de 0 a aproximadamente 3,5 h, atingindo seu valor máximo em 8000 ml. Após, decrescem, tendendo à extinção em aproximadamente 7 h.

Estas constatações podem ser observadas através da Figura 4, sendo que a curva azul representa o comportamento das bactérias anaeróbicas e a curva vermelha, a produção de biogás no interior do biodigestor.

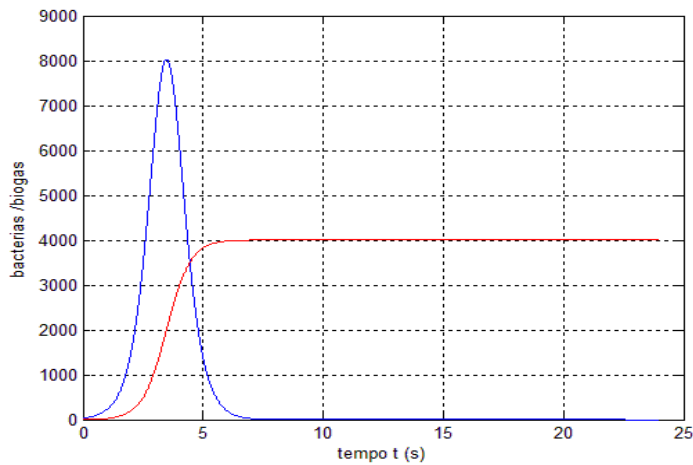


Figura 4: Crescimento de bactérias e a produção de biogás em relação ao tempo, sendo: $\alpha = 2$, $p = 0.001$, $k = 0.25$, $\beta = 1$, $x(0) = 30$ e $y(0) = 0$.

A relação entre tempo e biogás, levando-se em consideração uma retirada de gás, está representada na Figura 5. Da mesma forma, a curva azul representa o comportamento das bactérias e a curva a vermelha ilustra a produção de biogás no interior do biodigestor.

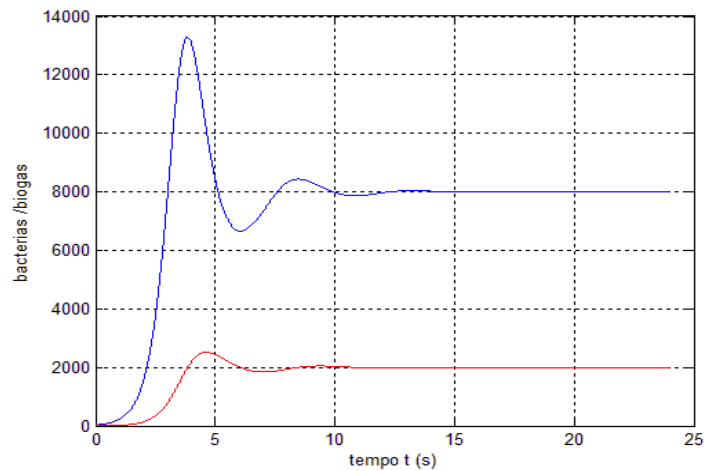


Figura 5: Crescimento de bactérias anaeróbicas no interior do biodigestor e produção de biogás, com retirada de biogás, sendo: $\alpha = 2$, $p = 0.001$, $k = 0.25$, $\beta = 1$, $x(0) = 30$ e $y(0) = 0$.

Após, as bactérias apresentam um crescimento mínimo e tendem a estabilizar seu crescimento em 8000 ml. O ponto de equilíbrio assintótico do sistema está representado na Figura 6.

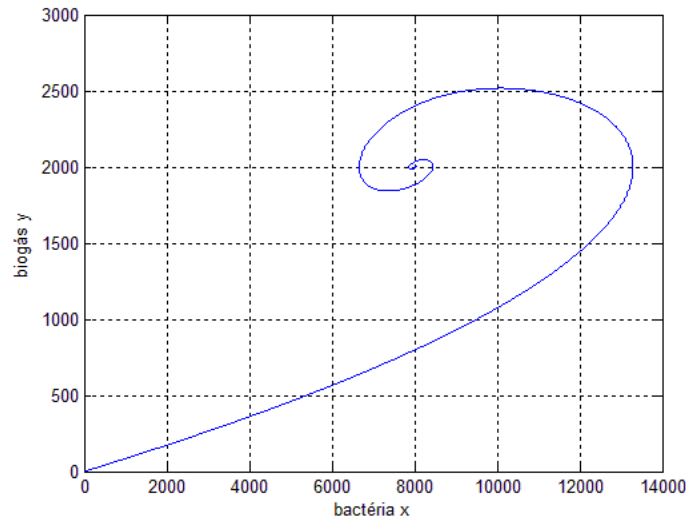


Figura 6: Comportamento assintótico do sistema biomassa-gás.

5. CONCLUSÕES

Os modelos apresentados, apesar de simplificados, representam o processo de biodigestão e de produção de biogás, considerando a concentração inicial do substrato.

Neste artigo foi apresentados o ajuste e a simulação de um modelo para o processamento do substrato, decorrente da fermentação da bactéria anaeróbia a partir da decomposição. Verificou-se, o que após o ponto de equilíbrio a produção de biogás e o crescimento das bactérias tornam-se estáveis.

A composição das bactérias que atuam na fermentação do substrato, assim como o processo de formação do biogás são extremamente complexos. Portanto, o modelo requer um aprimoramento considerando a variação de outros parâmetros no processo da biodigestão, ou seja, considerar as relações estequiométricas entre os diferentes componentes que compõem a biodigestão e o próprio biogás, as reações cinéticas, as características do reator, entre outras.

6. REFERÊNCIAS

- BASSANEZI, R. C.; FERREIRA, W. C. Jr. **Equações diferenciais com aplicações**. São Paulo: Harbra Ltda., 1988.
- BIRKMOSE, T. Digested manure is a valuable fertilizer. In: **Proceedings of European Biogas Workshop** – The Future of Biogas in Europe III, University of Southern Denmark, junho 2007 , p. 89–94.
- DEGANUTTI, R. P. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Arquitetura, Artes e Representações Gráficas, UNESP: Bauru, 2002.
- EDELSTEIN - KESHET, L. **Mathematical Models in Biology**, Mc-Graw-Hill, 1988.
- EMBRAPA, **Comunicado Técnico**, nº27, 1981.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HOLM-NIELSEN, J.B., AL SEADI, T., OLESKOWICZ-POPIEL, P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5478–5484, 2009

HOLM-NIELSEN, J.B., et al. Joint biogas plant. Agricultural Advantages – Circulation of N, P and K. **Report Made for The Danish Energy Agency**, Revised and Emendated Edition, 1997.

MARI, A., et al. Performance of up-flow anaerobic digester in solids removal and biogas production. **International Journal of Food Agriculture and Environment** , v.12 , p. 1135-1139, 2014.

MÖLLER, K., MÜLLER, T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. **Engineering in Life Sciences**, v. 12, n.3 p. 242-257, 2012.

SILVA, W. T. L. da et al. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. **Química Nova**, v. 35, p. 35-40, 2012.