

ÁREA TEMÁTICA: Área 3: Reciclagem

## **SIMULAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LODO EM REATOR CSTR NÃO-IDEAL**

*Mariana S. Carvalho<sup>1</sup> (marianasalescarvalho3@gmail.com), Rodolpho L. R. Alves<sup>1</sup> (rodolpho.ufpb@gmail.com) Andrea L. O. Ferreira<sup>1</sup> (andreaferreira@ct.ufpb.br), Giovanilton Ferreira da Silva<sup>1</sup> (giovanilton@ct.ufpb.br),*

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química

### **RESUMO**

A digestão anaeróbia é o método de tratamento mais adequado para o tratamento de resíduos de alta resistência orgânica quando comparados com outros métodos de tratamento de resíduos, porque a energia é recuperada sobre a forma de metano e o lodo tratado também tem bons valores de condicionamento no solo. Este trabalho analisa a reação de digestão anaeróbica para tratamento de lodo de esgoto, a fim de modelar e simular um reator tipo tanque agitado não ideal. Neste trabalho um modelo matemático para reator foi desenvolvido como uma combinação de um CSTR ideal de volume  $V_s$ , uma zona morta de volume  $V_d$  e desvio (bypass) com vazão volumétrica  $Q_b$ . A vazão real do reator é  $Q_0$  e corrente afluyente no reator é  $Q_s$ . Os parâmetros do modelo são  $\beta$ , que representa a fração da vazão total que sofre desvio, e  $\alpha$  que representa a fração de volume total  $V$  ocupada pela região não estagnada. Foram analisados os parâmetros do modelo e as condições operacionais do reator. A maior produção de metano ( $CH_4$ ) teve os valores de parâmetro  $\alpha = 0,9$  e  $\beta = 0,01$ , onde o valor da concentração de metano foi de  $10 \text{ g/dm}^3$ .

**Palavras-chave:** Lodo, Modelagem, biogás.

## **SIMULATION OF ANAEROBIC SLUDGE DIGESTÃO IN NON-IDEAL CSTR REACTOR**

### **ABSTRACT**

The anaerobic digestion is the most appropriate treatment method for treatment of high strength organic waste when compared with other methods of waste treatment, because the energy is recovered in the form of methane and sludge. Sludge also has good soil conditioning values. This paper analyzes the reaction anaerobic digestion for treating sewage sludge, in order to model and simulate a ballast tank type agitated not ideal. In this paper a mathematical model for reactor was developed as a combination of an ideal CSTR  $V_s$  volume, a dead zone of  $V_d$  volume and bypass (bypass) with  $Q_b$  volumetric flow. The actual flow reactor is  $Q_0$  and tributary stream in the reactor is  $Q_s$ . The parameters of the model are  $\beta$  which represents the fraction of the total flow that suffers and deviation represents the fraction of total volume  $V$  occupied by non-stagnant. We analyzed the model parameters and the operating conditions of the reactor. The largest methane production ( $CH_4$ ) had the parameters values  $\alpha = 0,9$  e  $\beta = 0,01$ , where the methane concentration value was  $10 \text{ g/dm}^3$ .

**Keywords:** Sludge, modelling, biogas.

### **1. INTRODUÇÃO**

A biodigestão anaeróbica é um processo onde a matéria orgânica é degradada por bactérias. A biodigestão pode ser dividida em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise, as enzimas produzidas pelas bactérias transformam polímeros, como amidos e proteínas, em monômeros, como açúcares e aminoácidos. Na acidogênese, esses monômeros são transformados em ácidos graxos voláteis (AGV), como ácido butírico e ácido

propiónico. Na acetogênese, esses ácidos graxos voláteis são transformados em ácido acético, gás carbônico e hidrogênio gasoso. Na metanogênese, o ácido acético é transformado em metano e gás carbônico pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas e o gás carbônico e o hidrogênio são combinados, formando metano, pelas bactérias metanogênicas hidrogenotróficas, (DE BAERE, 2000), (MERLIN CHRISTY et. al., 2014), (Nogueira, 1992), (MATA-ALVAREZ et al., 2000).

Ao tratar águas residuais municipais, a eliminação das lamas é um problema de importância crescente, representando até 50% dos custos operacionais atuais de uma estação de tratamento de águas residuais. Apesar de diferentes vias de eliminação, a digestão anaeróbica desempenha um papel importante para as suas capacidades para transformar ainda mais a matéria orgânica em biogás (60-70% em volume de metano, CH<sub>4</sub>), assim como também reduz a quantidade de sólidos no lodo final para eliminação, enquanto destrói a maioria dos agentes patogênicos presentes na lama e no problemas de odor associados com a matéria residual putrescível. A digestão anaeróbica aperfeiçoa os custos de estação de tratamento esgoto ETE, o seu impacto ambiental é considerado uma parte e essencial de um ETE moderna. Os tipos de reatores utilizados como digestor convencional para o tratamento de águas residuais são reatores de tanque agitado ou tubular, (VAREL et al., 1977), (HILLS; MEHLSCHAN, 1984) e (ANGELIDAKI; AHRING, 1993).

Há uma clara necessidade de uma eficiente digestão de lodo anaeróbio. A mistura é um fator importante para o desempenho ideal de digestores anaeróbios. A necessidade de mistura eficaz nos reatores anaeróbio para o tratamento do lodo oriundo de ETE já foi amplamente discutido na literatura. Uma boa mistura promove a transferência de substratos e calor para os microrganismos, mantém a uniformidade de outros fatores importantes para reação e assegura o uso efetivo de todo o volume do reator, impedindo estratificação.

Por outro lado, uma mistura incompleta põe em perigo a eficiência do processo de tratamento e, por conseguinte, a estabilidade na produção do biogás. Estudos experimentais têm mostrado que a mistura tem efeitos significativos sobre a eficiência do tratamento de reatores anaeróbios. Devido à complexidade inerente de processos biológicos, além da engenharia biorreator envolvido, é difícil desenvolver modelos matemáticos que refletem a realidade. Portanto, os modelos desenvolvidos recorrem a simplificações. Uma dessas hipóteses simplificadoras amplamente utilizadas é o de uniformidade.

As implicações dessa hipótese sobre modelagem foram recentemente revistos pelo (Aris, 1993). Embora os padrões de mistura imperfeitos sejam mais comuns do que os ideais em reatores reais, modelos de digestão anaeróbia, muitas vezes assumem condições de mistura completa. Portanto, a sua aplicabilidade parece ser limitada. A necessidade de uma melhor compreensão da relação entre a mistura e o desempenho digestão anaeróbica e a falta de modelos matemáticos abordando este tema conduziu a este estudo.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo matemático, que combina o modelo de mistura de duas regiões com um modelo de cinética.

## **3. METODOLOGIA**

### **3.1 Modelo Matemático**

Neste trabalho um modelo matemático para biorreator, Figura 1, foi modelado como uma combinação de um CSTR ideal de volume  $V_s$ , uma zona morta de volume  $V_d$  e desvio (bypass) com vazão volumétrica  $Q_b$ . A vazão real do reator é  $Q_0$  e corrente afluyente no reator é  $Q_s$ . A corrente de desvio e a corrente do efluente do volume de reação são misturados no ponto 2. Na primeira condição assumida pelo modelo, uma parte da corrente de alimentação do reator deixa o bioreator imediatamente e retorna a corrente de saída. Na segunda condição há presença de uma zona de estagnação, em que parte do fluido presente no reator não sofre mistura alguma. Os

parâmetros do modelo são  $\beta$ , que representa a fração da vazão total que sofre desvio, e  $\alpha$  representa a fração de volume total  $V$  ocupada pela região não estagnada, Fogler, (1992).

$$Q_s = (1 - \beta)Q_0 \quad (1)$$

$$Q_b = \beta Q_0 \quad (2)$$

$$V_s = \alpha V \quad (3)$$

$$V_d = (1 - \alpha)V \quad (4)$$

A concentração para o biogás na saída do biorreator é:

$$C_{Pi} = \frac{Q_0 - Q_s}{Q_0} C_{Poi} + \frac{Q_s}{Q_0} C_{Pi} \quad (5)$$

O tempo de retenção hidráulica do biorreator é definido pela seguinte equação:

$$TRH = \frac{V_s}{Q_s} \quad (6)$$

O balanço de massa da biomassa requerida para hidrólise do lodo ativado:

$$\frac{dX_h^B}{dt} = \frac{X_{h0}^B - X_h^B}{TRH} - K_{dr} X_h^B \quad (7)$$

O balanço de massa de partículas sólidas voláteis exigindo na hidrólise.

$$\frac{dP_h}{dt} = \frac{P_{h0} - P_h}{THR} - (1 - Y) K_{dr} X_h^B - K_h P_h \quad (8)$$

Balanço de massa para o substrato:

$$\frac{dS_h}{dt} = \frac{S_{h0} - S_h}{THR} + K_h P_h + Y K_{dr} X_h^B - \frac{k_s^a S_h X_h^A}{K_s^a + S_h} \quad (9)$$

Balanço de massa na acidogênese

$$\frac{dX_h^A}{dt} = \frac{X_{h0}^A - X_h^A}{THR} + Y_c \frac{k_s^a S_h X_h^A}{K_s^a + S_h} - D_A X_h^A \quad (10)$$

O balanço de massa para os ácidos graxos voláteis:

$$\frac{dV_h^A}{dt} = \frac{V_{h0}^A - V_h^A}{THR} + \frac{k_s^a S_h X_h^A}{K_s^a + S_h} - Y_c \frac{k_s^a S_h X_h^A}{K_s^a + S_h} - f_d D_A X_h^A - \frac{k_V^M V_h^A X_h^M}{K_V^M + V_h^A} \quad (11)$$

Balanço de massa na metanogênese:

$$\frac{d X_h^M}{dt} = \frac{V_{h0}^M - V_h^M}{THR} + Y_c^M \frac{k_v^M V_h^A X_h^M}{K_v^M + V_h^A} - D_M X_h^A \quad (12)$$

Balanço de massa para o metano:

$$\frac{d M_h^M}{dt} = \frac{M_{h0}^M - M_h^M}{THR} + \frac{k_v^M V_h^A X_h^M}{K_v^M + V_h^A} - Y_c^M \frac{k_v^M V_h^A X_h^M}{K_v^M + V_h^A} \quad (13)$$

Os parâmetros cinéticos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros cinéticos adaptado de Pavlostathis e Gossett (1986).

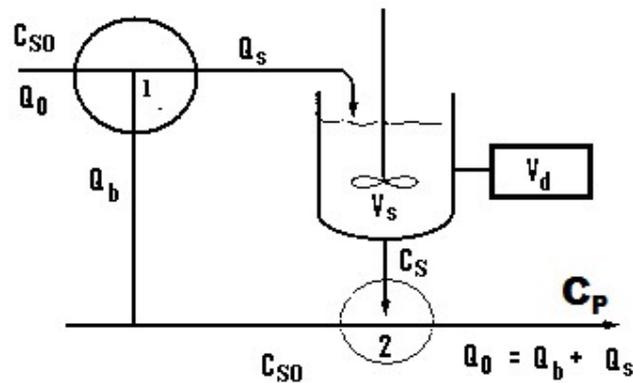
Parâmetros	Valor	DP (nm)
Kdr	2,0	dia <sup>-1</sup>
Y	0,3	adimensional
Kh	0,15	dia <sup>-1</sup>
K <sub>s</sub> <sup>a</sup>	0,045	g/dm <sup>3</sup>
k <sub>s</sub> <sup>a</sup>	8,0	g/g/dia
Y <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0,2	g/g
DA	0,1	dia <sup>-1</sup>
fd	0,73	adimensional
k <sub>v</sub> <sup>M</sup>	6,2	g/g/dia
K <sub>v</sub> <sup>M</sup>	0,045	g/dm <sup>3</sup>
DM	0,015	Dia <sup>-1</sup>
Y <sub>c</sub> <sup>a</sup>	0,057	g/g

As equações do modelo foram resolvidas simultaneamente usando o software Scilab 5.4 utilizando o método Runge-Kutta de quarta ordem. As condições para a simulações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições empregadas nas simulações.

Parâmetros	Valores
Temperatura de Operação (°C)	35
Quantidade de lodo (kg/dia)	24.000
Volume do biorreator (m <sup>3</sup> )	1680
Concentração inicial de biomassa (g/dm <sup>3</sup> )	11,31
Concentração Inicial de substrato (g/dm <sup>3</sup> )	48,12
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	48
Volume real do reator	0,9; 0,3 e 0,7
By-passing	0,01, 0,2, 0,4,0,6 e 0,8

Figura 1 – Biorreator com zona morta e by-passing.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram conduzidas a fim de avaliar o efeito da mistura incompleta sobre desempenho do biorreator de digestão anaeróbia por meio de mudanças nos parâmetros de mistura característicos  $\alpha$  e  $\beta$ . As Figuras 2, 3 e 4 são ilustrados para examinar os efeitos de  $\beta$  sobre os desempenhos globais do biorreator para os casos  $\alpha = 0,9, 0,7, \text{ e } 0,3$  respectivamente. Nas Figuras 2, 3 e 4 mostram que concentrações de metano permanecem superior para  $\beta = 0,01$ , para todos as faixas simuladas de  $\alpha$ . Para  $\alpha = 0,3$ , quando o comportamento não ideal se torna mais significativo, que conduz a uma maior diferença entre as concentrações do biogás. Na Figura 3, as concentrações diminuem quase pela metade, em que a região menos agitada torna-se possivelmente um espaço morto, que conduz ao longo tempo de residência da solução na região menos agitada. Como esperado, o tratamento do lodo, a eficiência do processo aumentou com o tempo e diminuição nos valores do parâmetro  $\alpha$ , isso influenciaram fortemente os resultados.

Recentemente, os modelos simples têm-se mostrado de precisão suficiente para simular padrões de mistura de líquidos em reator anaeróbico, Reinhold et. al. (1996) e Smith et.al.(1996). A característica da mistura de parâmetros destes modelos, que são semelhantes ao modelo de mistura de duas regiões, foi calculada a partir de dados experimentais de curvas de resposta do traçador e por meio dos próprios modelos matemáticos, utilizando os mínimos quadrados método para o ajuste dos dados experimentais. Além disso, Reinhold et. al.(1996) encontrou uma boa concordância entre os valores dos parâmetros de mistura calculada com esse método e os medidos experimentalmente por meio de sondas.

Figura 2 – Simulação dinâmica da digestão anaeróbia de lodos ativados para  $\alpha=0,9$ .

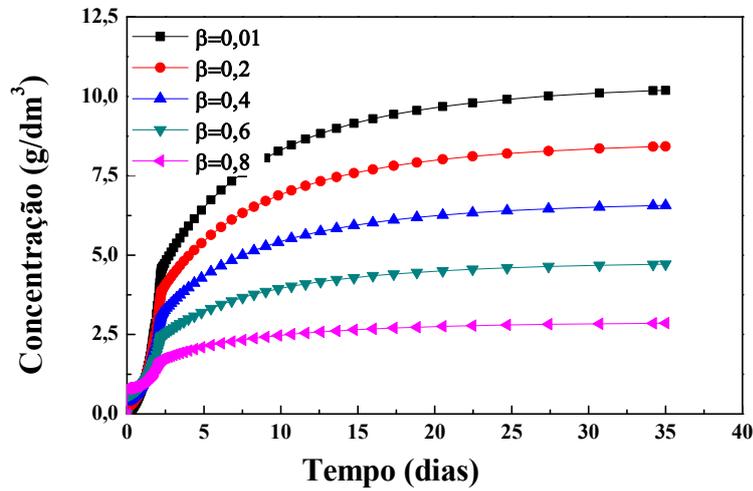


Figura 3 – Simulação dinâmica da digestão anaeróbia de lodos ativados para  $\alpha=0,7$ .

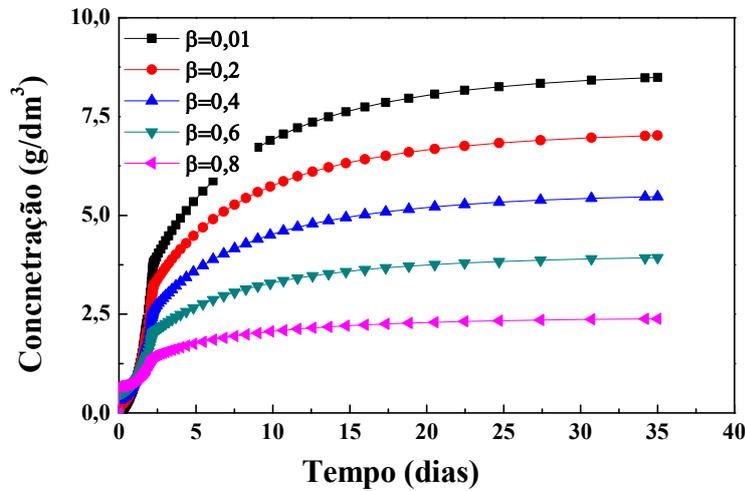
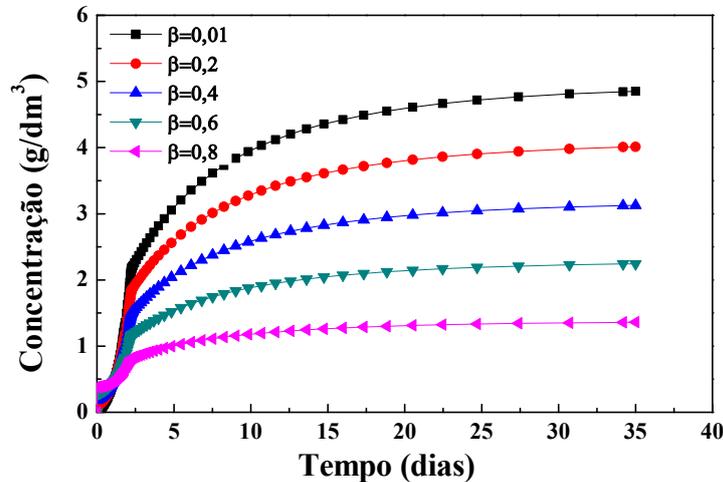


Figura 4 – Simulação dinâmica da digestão anaeróbia de lodos ativados para  $\alpha=0,3$ .



## 5. CONCLUSÃO

Um modelo de dinâmica foi utilizado para investigar os efeitos de mistura no desempenho do reator CSTR para digestão anaeróbica de lodo ativado para produção de biogás. Simulação de reatores anaeróbios em condições que se aproximam intimamente da idealidade, bem como reatores não ideais foi possível. Isto demonstra a aplicabilidade potencial do modelo para uma ampla gama de níveis de mistura. A mistura incompleta no interior do reator anaeróbico resulta em menor geração de metano e diminuição da eficiência de tratamento de resíduos. Reatores com mistura incompleta requerem um tempo de retenção maior do que os digestores completamente misturados para conseguir a mesma eficiência de tratamento de lodos. Isso claramente tem um impacto sobre os custos do tratamento. Mesmo uma pequena queda na eficiência pode levar à necessidade de equipamento significativamente maior e com elevado custo.

## REFERÊNCIAS

- ANGELIDAKI, I., AHRING, B. K. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: The effect of ammonia. *Applied Microbiology Biotechnology* v. 38, p. 560–564, 1993.
- ARIS, R., *Ends and beginnings in the mathematical modeling of chemical engineering systems. Chemical Engineering Science*, v. 48, p. 2507-2517, 1993.
- DE BAERE, L. Anaerobic Digestion of Solid Waste: State of the Art. *Water Science Technology*, v. 41, p. 283-290, 2000.
- FOGLER, S. H. *Elements of chemical reaction engineering* (3rd ed.). New Jersey: Prentice-Hall Inc. 1992.
- HILLS, D. J., MEHLSCHAN, I. J. Plug flow digestion of dairy manure of different solids concentration. *Trans. ASAE*, v. 27 (3), p. 889–893, 1984.
- MATA-ALVAREZ J., MACÉ S., LLABRÉS P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*.v. 74, p. 3-16, 2000.

MERLIN CHRISTY, P., GOPINATH, L. R. e DIVYA, D. A Review on Anaerobic Decomposition and Enhancement of Biogas Production through Enzymes and Microorganisms. *Renewable. Sustainable Energy Reviews.*, v. 34, p. 167-173, 2014.

NOGUEIRA, L. A. H., *Biodigestão: a alternativa energética*. São Paulo: Nobel, 1992.

PAVLOSTATHIS, S. G. & GOSSETT, J. M., A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge. *Biotechnology and Bioengineering*, V.28, p. 1519-1530, 1986.

REINHOLD, G., MERRATH, S., LENNEMANN, F. & MARKL, H., Modelling the hydrodynamics and the liquid-mixing behaviour of a biogas tower reactor. *Chemical Engineering. Science.*, v. 51, p. 4065-4073, 1996.

Smith, L. C., Elliot, D. J. & James, A., Mixing in upflow anaerobic filters and its influence on performance and scale-up. *Water. Research*, v. 12, p. 3061-3073, 1996.

VAREL, V. H., ISAACSON, H. R., BRYANT, M. P., Thermophilic methane production from cattle wastes. *Applied and Environmental Microbiology.*, v. 29, p. 374–381, 1977.