

# Estimativa da viabilidade de produção de biogás a partir do efluente de indústrias de laticínios no estado de Sergipe utilizando modelagem e simulação

*Feasibility estimation of biogas production from wastewater of the dairy industry in the state of Sergipe using modeling and simulation*

Jéssica Teles Siqueira Santos

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Sergipe – UFS. São Cristóvão, SE [Brasil]

Domingos Fabiano Santana Souza

Professor no Departamento de Engenharia Química na Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Caicó, RN [Brasil]

Ana Karla Souza Abud

Doutora em Engenharia Química pelo Programa de Engenharia Química da Coppe- Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Professora no Departamento de Tecnologia de Alimentos na Universidade Federal de Sergipe – UFS. São Cristóvão, SE [Brasil]

Antonio Martins Oliveira Junior

Doutor em Engenharia Química pela Universidade do Rio de Janeiro – UFRJ, Docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe – UFS. São Cristóvão, SE [Brasil]

## Resumo

Neste trabalho, objetivou-se mostrar, pela modelagem matemática, que os efluentes gerados pela indústria de laticínios podem ser utilizados na fabricação de biogás. O estudo foi realizado em Sergipe. O digestor anaeróbio empregado para tratamento do efluente foi modelado como um biorreator em batelada, sendo o comportamento cinético interpretado por um modelo de Monod. Levaram-se em consideração duas situações: um efluente que apresenta baixa demanda química de oxigênio (5,5 a 7,7 gO<sub>2</sub>/L), e um efluente com alta (21,3 e 23,9 gO<sub>2</sub>/L). O efluente com baixa DQO produziu 900 m<sup>3</sup> a 1250 m<sup>3</sup> de metano, em 28 dias, gerando energia em torno de 9963 a 13837,5 kWh, respectivamente. Já o efluente com alta DQO mostrou valores superiores, 6200 a 6600 m<sup>3</sup>, gerando 68634 e 73062 mil kWh, em 28 dias. Nas simulações, o biogás obtido poderia suprir parte da energia gasta pelas empresas, representando, assim, uma alternativa viável para as indústrias sergipanas.

**Palavras-chave:** Biogás. Efluente de laticínios. Geração de energia. Modelagem matemática.

## Abstract

The aim in this study was to show, through mathematical modeling, that effluents can be used to generate biogas. The study was conducted in the state of Sergipe. The anaerobic digester used for the treatment of effluents was modeled as a batch bioreactor, interpreting the kinetic behavior with a Monod model. Two situations were considered in this study: an effluent that has low chemical oxygen demand (from 5.5 to 7.7 gO<sub>2</sub> / L), and an effluent that has high COD (21.3 and 23.9 gO<sub>2</sub> / L). The effluent with low COD produced 900 m<sup>3</sup> to 1250 m<sup>3</sup> of methane in 28 days, which made it possible to generate around 9963 to 13,837.5 kWh of energy, respectively. As for the wastewater with high COD, these values were higher – 6200 to 6600 m<sup>3</sup> –, generating between 68,634 and 73,062 kWh in 28 days. The biogas obtained in the simulation could supply at least part of the energy expended by the companies, which is a viable alternative for Sergipe's dairy industry.

**Key words:** Biogas. Dairy effluents. Mathematical modeling. Power generation.

## 1 Introdução

O crescimento populacional está diretamente relacionado com o aumento de resíduos. Em julho de 2013, a Organização das Nações Unidas (ONU) publicou um relatório no qual constata-va que a população mundial era de 7,2 bilhões, e que esse número iria aumentar em 1 bilhão nos próximos 12 anos, chegando a 9,6 bilhões até 2050. Assim, devido ao crescimento popula-cional acelerado, principalmente nos países em desenvolvimento, são necessárias medidas de re-aproveitamento dos resíduos de maneira susten-tável (POLÔNIO et al. 2014).

No que se referem aos rejeitos das indústrias alimentícias, os gerados pela indústria de laticí-nios se destacam quando associados à poluição de águas e solos, sendo necessário e obrigatório o tratamento prévio desses resíduos, sejam líqui-dos ou sólidos, antes do lançamento para dispo-sição final em um curso d'água (NIRENBERG; FERREIRA, 2005).

Vários tipos de tratamentos vêm sendo em-pregados para esse tipo de efluente desde os mais conhecidos, como gradeamento para remoção de sólidos grosseiros, seguido normalmente de tratamento primário com decantação, filtração, coagulação/floculação e/ou flotação, tratamen-to secundário com os processos de lodos, lagoas de estabilização, lagoas aeradas, filtros biológi-cos e até mesmo tratamento terciário com a ad-sorção de carvão ativo, osmose inversa e eletro-diálise. O objetivo principal destes tratamentos é a adequação química e biológica do efluente às condições impostas pela legislação ambien-tal e remoção de organismos patogênicos, bem como a opção de reuso do efluente. Porém, além da eficiência, é de suma importância focar o reaproveitamento de forma sustentável. Nesse caso, o sistema de biodigestores para produção de biogás mostra-se como uma alternativa pro-

missora, pois este tem sido utilizado como fonte renovável de energia, muitas vezes, substituín-do o gás natural (SILVA, 2013; FELIPPE, 2009; HALMEMAN et al., 2014).

O biogás é considerado um tipo de gás infla-mável produzido a partir da mistura de dióxido de carbono e metano, por meio da ação de bacté-rias fermentadoras de matéria orgânica. Neste contex-to, pode ser considerado como uma fonte de ener-gia renovável, uma vez que os resíduos orgânicos são utilizados como matérias-primas. O Brasil pro-duz 182.728 toneladas de resíduos orgânicos por dia e, Segundo o Ministério do Meio Ambiente, considerando os 56 maiores aterros nacionais, o biogás acumulado seria suficiente para abastecer de energia elétrica (311 MW/h) uma população equivalente à do município do Rio de Janeiro (5,6 milhões) (FREITAS, 2014; TRIGUEIRO, 2013). Deste modo, uma opção para reduzir os custos com o tratamento de efluente da indústria de lati-cínio e, concomitantemente, reduzir os custos com energia, é a reutilização do efluente para a produ-ção de biogás resultante da fermentação anaeróbi-ca dos produtos lácteos na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

A quantidade de biogás produzida pode su-prir as necessidades energéticas do laticínio, ou parte dela, podendo ser utilizada como fonte de energia direta, por meio da sua combustão. Segundo Prado et al. (2008), a energia térmica gerada pode alimentar sistemas como secadores, caldeiras, aquecedores, motores para a geração de energia elétrica e mecânica e turbinas a gás. Esta alternativa para reaproveitamento do efluente lí-quido apresenta resultados respeitáveis na literatu-ra, sendo um consenso em países como Alemanha, Holanda e Estados Unidos (ZHANG et al., 2014; CHRISTY et al, 2014; COSKUN, 2012).

A unidade básica de geração de biogás é com-posta por: tanque de acidificação e equalização (TAE); reator anaeróbio (um consenso na literatu-

ra é a utilização do reator de manta de lodo de fluxo ascendente – upflow anaerobic sludge blanket, UASB); lagoa aerada facultativa (LAF), equalizador de pressão e gasômetro. De acordo com Demirel et al. (2005), as eficiências de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda biológica de oxigênio (DBO) alcançam valores acima de 70% e com 0,6 m<sup>3</sup> de biogás produzido por kg de DBO removido.

Para a previsão de produção de metano, vários modelos cinéticos têm sido sugeridos, cada um com suas próprias vantagens e desvantagens. Um modelo de cinética de primeira ordem para o crescimento microbiano é o mais simples, com o pressuposto de que a hidrólise é limitante da taxa. O modelo Gompertz é útil para explicar o tempo de retardamento e curvas sigmoidais de crescimento; porém, o de Monod é um dos mais amplamente utilizados destes modelos cinéticos e produz resultados bastante satisfatórios (PHAM et al., 2014).

Com base nos argumentos apresentados acima, neste trabalho, objetivou-se avaliar a viabilidade de produção de biogás a partir do efluente de indústrias de laticínios do estado de Sergipe utilizando um modelo matemático representativo do processo e dados disponibilizados na literatura. O processo de digestão anaeróbica analisado foi modelado como um biorreator em batelada e os parâmetros pertinentes ao modelo foram estimados com base em informações da literatura referentes às estações de tratamento de indústria de laticínios. Para um melhor delineamento do estudo de viabilidade, duas situações foram tomadas como referência:

- a) Um efluente com baixa concentração de DQO.
- b) Um efluente com elevada concentração de DQO.

## 2 Metodologia

### 2.1 Informações sobre o efluente

A fim de estimar a quantidade de biogás produzida, com foco no estado de Sergipe, fez-se necessária uma pesquisa sobre a produção de leite nos últimos anos. Os valores apresentados na Tabela 1 mostram a evolução da produção de leite no Estado.

**Tabela 1: Produção de leite bovino (mil litros) nos últimos anos no estado de Sergipe**

Fontes	Produção de leite em (mil litros)						
	2002	2003	2004	2005	2006	2010	2011
Sebrae (2013)	—	—	—	—	—	296.650	—
SEAB (2012)	—	—	—	—	—	—	315.968
APL-SE (2008)	112.168	139.003	156.989	191.306	242.568	—	—

Sebrae= Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas; SEAB= Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento; APL-SE= Arranjos Produtivos Locais em Sergipe

Fonte: Pesquisa de campo (2014).

Como o atual estudo se refere ao volume de efluente gerado, faz-se necessário converter as informações apresentadas na Tabela 1. Segundo Villa et al. (2007), estima-se que para cada litro de leite beneficiado sejam produzidos 2,5 L de efluente. No entanto, esse valor altera de acordo com o produto fabricado. Essa dependência do tipo de efluente também é válida para a variação da sua DQO, como mostra as Tabelas 2 e 3:

Na Tabela 3 está representada a quantidade de DQO do efluente de acordo com o produto fabricado. É notório que a quantidade de DQO nos efluentes das indústrias que produzem queijo é maior se comparada a de outros tipos de produtos, isso se deve ao soro e às gorduras insolúveis presentes na sua composição. Esse tipo de efluente

**Tabela 2: Volume de efluente gerado por litro de leite processado em um laticínio**

Atividade/Produto	Coefficiente de efluente gerado (L/L)
Recepção	0,243
Iogurte	10
Manteiga	1,1
Queijo mussarela	2,321
Ricota	1,1
Requeijão (barra)	1,4
Requeijão (pote)	1,4

Fonte: Silva (2013).

**Tabela 3: Quantidade de DQO gerado por tipo de efluente**

Produtos fabricados	DQO (g O <sub>2</sub> /L)
Leite pasteurizado, requeijão, ricota, manteiga e queijos	5,5 - 7,7
Queijos diversos	21,3 - 23,9

Fonte: Silva (2011).

torna-se interessante para os propósitos do trabalho devido às características químicas do substrato, que podem favorecer a geração de energia. Além disso, Sergipe é um produtor em potencial de queijo, principalmente no alto sertão sergipano.

## 2.2 Modelo de digestor anaeróbio

No desenvolvimento do modelo matemático para o digestor anaeróbio, considerou-se que este opera em condições isotérmicas e em batelada. Neste caso, partindo-se de um balanço de massa por componente e considerando  $X$  para concentração de biomassa,  $S$  para concentração de substrato e,  $r_1$  e  $r_2$ , como as constantes de reação, chegamos às equações 1 e 2.

$$\frac{dx}{dt} = r_1 \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = r_2 \quad (2)$$

Sendo  $r_1$  e  $r_2$ , as respectivas taxas de geração de biomassa e consumo de substrato, representados pelas equações 3 e 4, a seguir:

$$r_1 = \mu \cdot x \quad (3)$$

$$r_2 = \frac{-r_1}{Y_{x/s}} \quad (4)$$

O termo  $Y_{x/s}$  significa o rendimento em biomassa e é representado pela equação 5:

$$Y_{x/s} = \frac{x - x_0}{S_0 - S} \quad (5)$$

A velocidade específica de crescimento,  $\mu$ , é aqui representada seguindo o modelo cinético de Monod, o qual relaciona a taxa de crescimento microbiano no meio aquoso com a concentração de um nutriente limitante,  $S$ . No modelo cinético, o termo  $\mu_m$  representa a taxa máxima de crescimento alcançável (parâmetro cinético) e  $K_m$ , a constante de Monod (concentração de nutriente limitante na qual a velocidade específica de crescimento é metade do seu valor máximo). A equação 6 representa o modelo cinético de Monod utilizado no trabalho.

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{K_m + S} \quad (6)$$

Para a determinação da taxa de biogás produzido, utilizou-se a equação sugerida por Najafpour et al. (2009). Segundo os autores, a taxa de biogás produzida é diretamente proporcional à variação de substrato ( $S_0 - S$ ), em que  $S_0$  é a concentração inicial de substrato. A constante de proporcionalidade foi associada ao produto  $Y_M \cdot Q$ , sendo  $Q$  a vazão do efluente e  $Y_M$ , o rendimento

do metano. A equação 7 representa a versão utilizada no trabalho.

$$Q_M = Y_M \cdot Q \cdot (S_0 - S) \quad (7)$$

O modelo formado pelas equações 1 a 7 representa um sistema de equações algébrico-diferenciais que foi implementado em linguagem *python*. Para a integração numérica, utilizou-se o método de Runge-Kutta de quarta e quinta ordem, presente no pacote numérico Scipy.

Um aspecto importante, e que convém destacar, é que o modelo apresenta quatro parâmetros, a saber:  $Y_{x/s}$ ,  $\mu_m$ ,  $K_m$ ,  $Y_M$ . Contudo, o acoplamento paramétrico apresentado na equação 6 confere uma dificuldade adicional. Devido à escassez de informações cinéticas relacionadas a tratamentos anaeróbios de efluentes de indústria de laticínios no nordeste, os parâmetros cinéticos pertinentes do modelo foram reestimados tomando-se como base os dados cinéticos de Abu-Reesh (2014). A escolha deve-se à concentração de DQO nos experimentos, 18 g/L, que contempla a faixa de DQO para a indústria de laticínios nacional (ver Tabela 3). Destaca-se que Abu-Reesh (2014) utilizou o reator em batelada, com capacidade de 100 L, operando por 28 dias. Os parâmetros cinéticos reestimados neste trabalho são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4: Parâmetros cinéticos reestimados com base nos dados experimentais de Abu-Reesh (2014)**

$\mu_m$ (dia <sup>-1</sup> )	$K_m$ (g/L)	$Y_{x/s}$ (g/g)	$Y_M$ (g/g)
0,076	3,59	0,13	0,184

Fonte: Abu-Reesh (2014).

Em razão do acoplamento paramétrico, foi considerado na avaliação da qualidade de predição do modelo com os parâmetros reestimados o valor do coeficiente de determinação  $R^2$ , no caso, superior a 0,9.

## 2.3 Utilidade da energia gerada

Como exemplo de utilidade da energia gerada por meio do efluente de laticínio por digestão anaeróbica, pode-se citar a energia usada para o próprio processamento do leite, nos equipamentos utilizados pela empresa. Esse consumo de energia depende do tipo de instalação da planta, como pode ser visto na Tabela 5:

**Tabela 5: Consumo de energia em função das características da planta**

Tipo de instalação	Consumo total de energia (kwh/litro de leite processado)
Moderna com pasteurizador de alta eficiência e caldeira nova	0,09
Moderna com utilização de água quente para o processo	0,13
Antiga com uso de vapor	0,27

Fonte: Cetesb (2008).

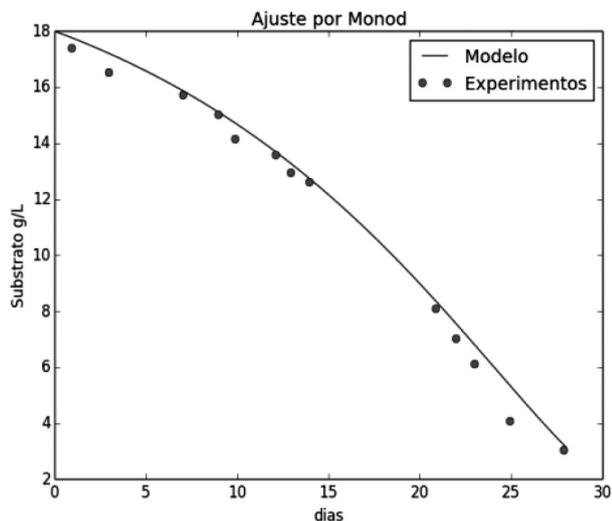
## 3 Resultados e discussão

Para delinear a apresentação dos resultados, estes foram subdivididos em duas partes. A primeira relacionada à validação do modelo utilizando dados da literatura; e a segunda, referente à simulação, utilizando as condições de vazão de efluentes previstas para o estado de Sergipe.

### 3.1 Validação do modelo

Conforme comentado na metodologia, o modelo para biorreator em batelada requer o ajuste dos parâmetros e, neste caso, foi utilizado como base o trabalho de Abu-Reesh (2014). A escolha deve-se à concentração de DQO de 18 g/L. Os resultados obtidos estão representados na Figura 1.

O coeficiente de determinação estabelece a comparação entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo e, desta forma, espera-se um



**Figura 1: Resultados da validação do modelo utilizando os dados experimentais de Abu-Reesh (2014) e concentração de DQO de 18 g/L em relação ao consumo de substrato**

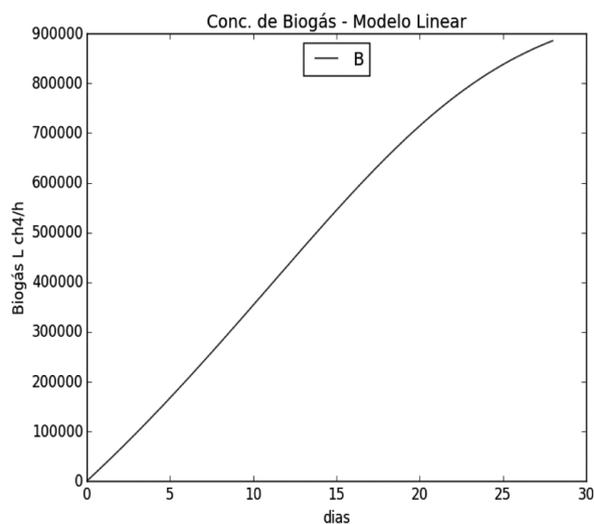
Fonte: Os autores (2014).

valor elevado para este coeficiente. Para a Figura 1 foi obtido um valor de coeficiente de determinação de 0,92, considerado satisfatório e que permite afirmar que o modelo se ajustou bem aos dados cinéticos. O modelo foi qualificado como preditivo e pode ser usado na avaliação da taxa de biogás produzido.

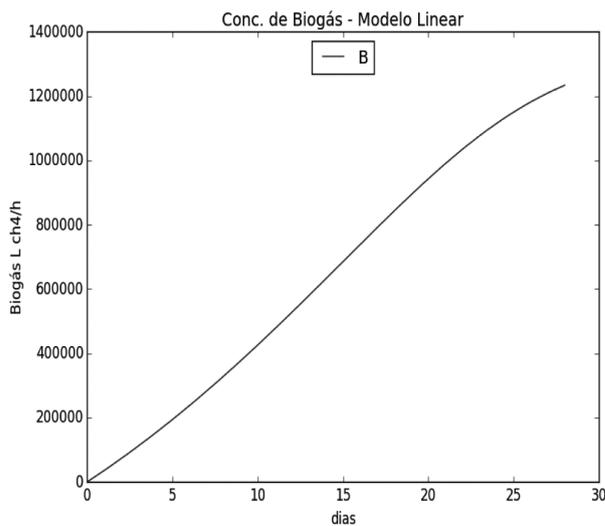
### 3.2 Simulação da produção de biogás para o estado de Sergipe

Devido à impossibilidade de execução de experimentos e obtenção de informações pertinentes nas estações de tratamento de efluentes pertencentes às empresas de laticínios do estado de Sergipe, utilizou-se o modelo matemático desenvolvido para prever a capacidade de produção de biogás. As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam os resultados referentes taxa de produção de biogás para concentrações de DQO de 5,5 g/L e 7,7 g/L.

Para geração das Figuras 2(a) e 2(b), foram usados os parâmetros cinéticos reportados na Tabela 4 a fim de prever a taxa de biogás gerado no estado de Sergipe, tomando-se como base o ano



(a)



(b)

**Figura 2: Volume de biogás produzido em Sergipe, por uma indústria com baixo DQO, com uma vazão de 952,23 m<sup>3</sup> de efluente/dia e diferentes concentrações de DQO. (a) 5,5 g O<sub>2</sub>/L e (b) 7,7 g O<sub>2</sub>/L**

Fonte: Os autores (2014).

de 2011, que teve uma produção de 315.968.000 litros de leite. Neste primeiro estudo, foi considerado que a indústria possui uma baixa demanda de DQO (5,5-7,7 g O<sub>2</sub>/L), isto é, uma indústria que produz, por exemplo, leite pasteurizado, requeijão, ricota, manteiga, que tem um coeficiente de 1,1 litro de efluente gerado por litro de leite processado. A vazão total de efluente estimada para

o Estado com base no volume de leite produzido e no coeficiente de efluente gerado foi 952,23 m<sup>3</sup> de efluente/dia.

Os resultados da simulação reportados na Figura 2(a) apontam que 900 mil litros (900 m<sup>3</sup>) de metano podem ser gerados em 28 dias. Na Figura 2(b), o valor do metano gerado foi 1 250 000 L de biogás em 28 dias, equivalente a 1250 m<sup>3</sup>. Segundo Oliveira (2009), o poder calorífico superior do metano é de 11,07 kWh/m<sup>3</sup>, desta forma, é possível dizer que, com o valor de metano gerado, a quantidade produzida pode alcançar 9963 kWh de energia, como mostrado na Figura 2(a) e, em torno de 13 837,5 kWh de energia, Figura 2(b). Essa quantidade de energia é significativa e tem várias utilidades para a indústria, como, por exemplo, para o processamento do leite. Levando em consideração o consumo de energia em virtude das características da planta (Tabela 5), têm-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 6:

**Tabela 6: Litros (L) de leite processado pela quantidade de energia gerada**

Tipo de instalação	Litros (L) de leite processado para 9963 kWh	Litros (L) de leite processado para 13837,5 kWh
Moderna com pasteurizador de alta eficiência e caldeira nova	110700	153750
Moderna, com utilização de água quente para o processo	76638,46	106444,31
Antiga com uso de vapor	36900	51250

Fonte: Os autores (2014).

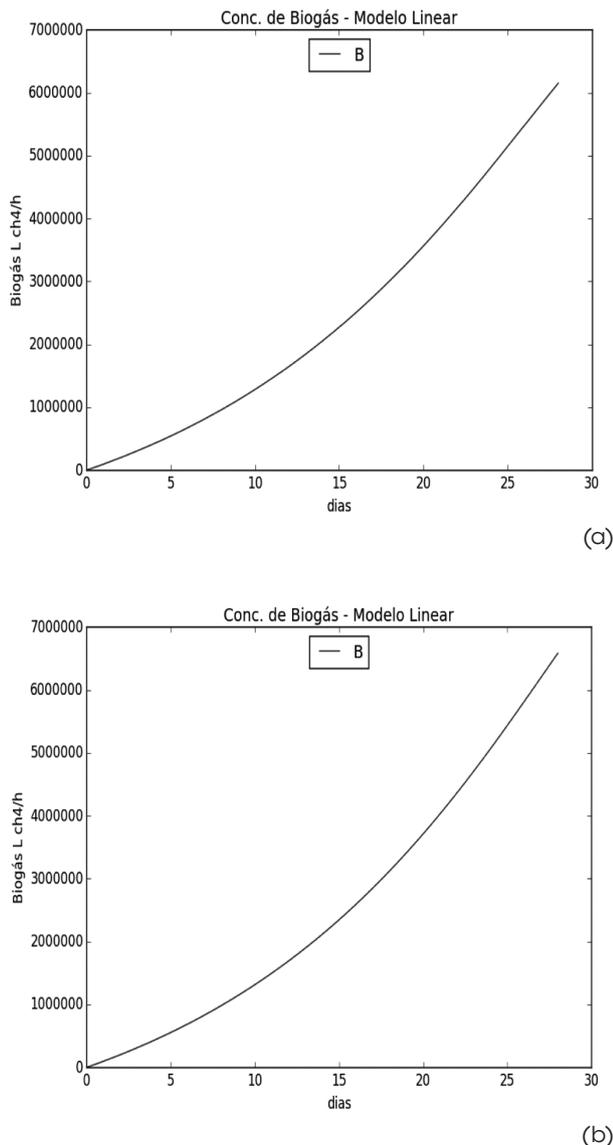
Um exemplo qualitativo da quantidade de energia gerada pode ser apresentado tomando-se como referência a produção diária da indústria de laticínios Natville, de 100 mil litros de leite (NATVILLE, 2014). A quantidade de energia ge-

rada é suficiente para processar todo, ou grande parte, desse volume, dependendo do tipo de instalação utilizada pela empresa, podendo torná-la autossuficiente.

De modo similar ao caso anterior, foram utilizados os parâmetros cinéticos apresentados na Tabela 4 para geração dos resultados reportados nas Figuras 3(a) e 3(b). Neste caso, tomou-se como base uma indústria com alta DQO (21,3 – 23,9 g O<sub>2</sub>/L), isto é, uma indústria que produz queijos diversos (Tabela 3). O produto de referência foi o queijo mussarela, que tem um coeficiente de geração de efluente de 2,321 L de efluente/ litro de leite processado (Tabela 2), e que, conforme Ribeiro et al. (2011), esse queijo tem o maior volume de produção no alto sertão sergipano. O volume de leite produzido utilizado como referência foi 315.968.000 litros de leite, tomando-se como base a produção no Estado no ano de 2011. A vazão de efluente estimada para este caso foi 2009,2 m<sup>3</sup> de efluente/ dia.

Uma comparação entre as Figuras 3(a) e 3(b) indica que a taxa de biogás produzida foi relativamente superior em razão de a concentração inicial de substrato ter sido maior. O valor calculado foi 6 600 000 L de metano em 28 dias, o que equivale a 6 600 m<sup>3</sup>. Levando em consideração o poder calorífico superior de metano ser de 11,07 kWh/m<sup>3</sup>, os volumes encontrados neste exemplo (6 200 m<sup>3</sup> e 6 600 m<sup>3</sup>) apresentam um poder calorífico de 68 634 kWh e 73 062 kWh, em 28 dias, respectivamente.

Tendo como exemplo a empresa Laticínios Guáira Ltda., entidade industrial produtora de alimentos lácteos, tais como queijo, requeijão, doce de leite, iogurte e bebidas lácteas, localizada na cidade de Guáira, extremo-oeste paranaense, que teve um consumo médio mensal de energia elétrica de 158 192 kWh em 2010 (LAWDER, 2012), o volume de energia mostrado neste trabalho poderia suprir de 43,4% a 46,2% do gasto energético



**Figura 3: Volume de biogás produzido em Sergipe, por uma indústria com alta DQO, com uma vazão de 2009,2 m<sup>3</sup> de efluente/dia e diferentes concentrações de DQO. (a) 21,3 g O<sub>2</sub>/L e (b) 23,9 g O<sub>2</sub>/L**

Fonte: Os autores (2014).

de empresas que apresentassem consumo médio mensal em torno do apresentado pela mencionada organização. Segundo a Aneel (2014), o valor do kWh para a concessionária Energisa Sergipe – Distribuidora de Energia S.A. é de 0,34479 (R\$/kWh) até abril de 2015. Assim, com base nesse valor, as empresas teriam uma economia de R\$ 23.664,00 a R\$ 25.191,00 por mês.

## 4 Conclusão

De posse dos resultados foi possível concluir que o modelo de Monod descreve satisfatoriamente o comportamento cinético, o que possibilitou mostrar que a geração de energia a partir de efluente da indústria de laticínio é uma solução promissora, pois além de reutilizar esse efluente, que tratado de maneira inadequada pode acarretar a poluição do meio ambiente, gera energia. Vale ressaltar que o volume de biogás gerado depende da composição do efluente, isto é, da quantidade de DQO nele presente. Os resultados das simulações mostram que a quantidade de biogás gerada pode suprir, em parte, as necessidades energéticas das indústrias, o que diminuiria seus custos fixos com energia e promoveria maximização do lucro, além disso, as indústrias se tornariam menos dependentes das empresas fornecedoras de energia.

## Referências

- ABU-REESH, I. M. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. *African Journal of Biotechnology*, v. 13, n. 16, p. 1745-1755, 2014.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Tarifas residenciais*. 2014 [internet]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 7 dez. 2014.
- APL-SE. Núcleo Estadual de arranjos produtivos locais. *Plano de desenvolvimento do arranjo produtivo de pecuária de leite e derivados do alto sertão sergipano*. Aracaju, 2008. Disponível em: <[http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl\\_1247147199.pdf](http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1247147199.pdf)>. Acesso em: 19 fev 2015.
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Guia técnico ambiental de produtos lácteos – série p+l. Produtos lácteos*. 2008. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao\\_limpa/documentos/laticinio.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao_limpa/documentos/laticinio.pdf)>. Acesso em: 6 mar. 2015.
- CHRISTY, P. M.; GOPINATH, L. R.; DIVYA, D. A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 34, p. 167-173, 2014.

- COSKUN, C. et al. Investigation of biogas and hydrogen production from waste water of milk-processing industry in Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, p.16498 e16504, 2012.
- DEMIREL, B.; YENIGUN, O.; ONAY, T. T. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. *Process Biochemistry*, v. 40, p. 2583-2595, 2005.
- FELIPPE, S. W. *Caracterização e tratabilidade do efluente líquido da Indústria de Laticínios Fortuna, Rio Fortuna, SC*. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental)–Universidade do extremo sul catarinense – Unesc, Criciúma, 2009.
- FREITAS, E. *Biogás*. Brasil Escola. 2014. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/geografia/biogas.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2015.
- HALMEMAN, M. C. R. et al. The deployment of biodigester systems in rural properties. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 8, n. 4, p. 351-360, 2014.
- LAWDER, J. H. Análise energética e econômica em uma agroindústria de laticínios. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)–Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.
- NAJAFPOUR, G. D. et al. Kinetic model for an up-flow anaerobic packed bed bioreactor: dairy wastewater treatment. *African Journal of Biotechnology*, v. 8, n. 15, p. 3590-3596, 2009.
- NATVILLE. 2014. *Sobre a Natville* [internet]. Disponível em: <<http://www.natville.com.br/sobre.php>>. Acesso em: 6 março 2015.
- NIRENBERG, L. P.; FERREIRA, O. M. *Tratamento de águas residuárias de indústria de laticínios: eficiência e análise de modelos matemáticos do projeto da Nestlé*. Goiânia: Universidade Católica de Goiás, 2005.
- OLIVEIRA, R. D. *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono*. 2005. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- PHAM, C. H.; TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G. Predicting methane production in simple and unheated biogas digesters at low temperatures. *Applied Energy*, v.136, p. 1-6, 2014.
- POLONIO, J. C. et al. Potencial biorremediador de microrganismos: levantamento de resíduos industriais e urbanos tratáveis no município de Maringá-PR. *BBR - Biochemistry and Biotechnology Reports*. v. 3, n. 2, p. 31-45, jul./dez., 2014.
- PRADO, M. A. C.; CAMPOS, C. M. M. Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos do processamento de *Coffea arabica L.* em reator anaeróbico UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café. *Ciências Agrotécnicas*, v. 32, n. 3, p. 938-947, Lavras, 2008.
- RIBEIRO, J. V.; BOMFIM, A. O. R.; SILVA, S. W. S. *Determinação do perfil sócio-econômico das unidades produtoras de derivados do leite – fabriquetas, localizadas no território do alto sertão sergipano*. Nossa Senhora da Glória- SE: Emdagro- Empresa de desenvolvimento agropecuário de Sergipe, 2011. Série: agroindústria.
- SEAB. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Cultura. *Análise da Conjuntura Agropecuária Ano 2012/13. Leite*. 2012. Disponível em: <[http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/leite\\_2012\\_13.pdf](http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/leite_2012_13.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- SEBRAE. *Cenário para o leite e derivados na região Nordeste em 2020*. Raimundo REIS FILHO, J. C. dos (ed.). p. 21, Recife, 2013. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/estudo-Cenarios-para-leite-e%20derivados-NE.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- SILVA, A. R. B. *Tratamento de efluentes na indústria de laticínios*. 2013. 26 f. Monografia (Engenharia Química)–Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- SILVA, D. J. P. da. *Resíduos na indústria de laticínios*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2011. Série Sistema de Gestão Ambiental. 21 f.
- TRIGUEIRO, A. *Projetos de produção de biogás no Brasil começam a liderar*. *Envolverde*, 2013. Disponível em: <<http://envolverde.com.br/ambiente/projetos-de-producao-de-biogas-no-brasil-comecam-a-liderar/>>. Acesso em: 16 mar. 2015.
- VILLA, R. D.; SILVA, M. R. A.; NOGUEIRA, R.F. P. Potencial de aplicação do processo foto-fenton/ solar como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios. *Química Nova*, v. 30, n. 8, p. 1799-1803, 2007.
- ZHANG, C. et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, p. 383-392, 2014.

Recebido em 22 abr. 2015 / aprovado em 9 nov. 2015

#### Para referenciar este texto

SANTOS, J. T. S. et al. Estimativa da viabilidade da produção de biogás a partir do efluente de indústrias de laticínios no estado de Sergipe utilizando modelagem e simulação. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 229-237, 2015.

