

II-444 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA ÁGUA RESIDUÁRIA DE ABATEDOURO

Naassom Wagner Sales Morais

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutorando em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Erlon Lopes Pereira

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Mestre em Biotecnologia Industrial/Microbiologia Aplicada pela Universidade de São Paulo (USP) – Escola de Engenharia de Lorena (EEL). Doutor em Engenharia Agrícola/Recursos Hídricos e Ambientais pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Francisco Schiavon Souza Silva

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Tasso Jorge Tavares Ferreira

Cientista Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Engenheiro Ambiental pela Universidade de Fortaleza (UNIFOR).

André Bezerra dos Santos⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, Bloco 713, Pici - Fortaleza- CE - CEP: 60455-900 - Brasil - Tel: (85) 3366-9490 - e-mail: andre23@ufc.br

RESUMO

A digestão anaeróbia tem se mostrado como uma opção tecnológica muito interessante para o tratamento de águas residuárias ricas em matéria orgânica, como as produzidas no processo de abate bovino (ARB), especialmente pela não utilização de energia elétrica requerida nos sistemas de aeração dos processos aeróbios, menor geração de lodo e produção de energia na forma de biogás. Por esses motivos, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano da ARB visando analisar seu potencial energético, assim como realizar estudos de modelagem cinética. Os ensaios de potencial de produção de metano da ARB ocorreram em reatores batelada de borossilicato com volume útil de 50 mL e 60 mL de *headspace*, utilizando-se como fonte de inóculo lodo anaeróbio coletado em uma estação de tratamento de esgoto sanitário. As pressões no *headspace* foram medidas uma vez por semana ao longo do experimento por meio de um transmissor de pressão manométrica. Ao final do ensaio, os gases produzidos foram identificados e quantificados por cromatografia gasosa na qual as concentrações de CH₄ foram obtidas. Realizou-se a modelagem cinética, utilizando o modelo de Gompertz modificado, visando a descrever a produção cumulativa de metano durante a digestão anaeróbia da ARB e a levantar parâmetros cinéticos que possam alimentar *softwares* utilizados para a simulação e controle de bioprocessos. A ARB se mostrou altamente biodegradável sob condições anaeróbias, com rápida transformação de uma parte da fração orgânica em metano mesmo nos primeiros dias do experimento. Entretanto, apenas 33% da DQO aplicada foi direcionada à produção de metano. Apesar disso, o rendimento de metano encontrado em termos de DQO removida apresentou-se superior a rendimentos encontrados na literatura para a biometanização de outros substratos agroindustriais. O modelo cinético de Gompertz Modificado mostrou adequado para descrever a produção de metano a partir da ARB, sendo encontrados elevados valores de coeficiente de determinação (R² médio de 0,99). Devido aos elevados volumes de ARB produzidas no Brasil e no mundo, a biometanização se torna uma alternativa atraente para a recuperação de recursos. Contudo, verifica-se que talvez outras rotas tecnológicas anaeróbias de tratamento para a ARB possam ser consideradas, como para produção de ácidos carboxílicos, haja vista da grande produção dos mesmos nos sistemas investigados e do elevado valor agregado dos mesmos, superior inclusive ao próprio biogás.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Renovável, Modelo de Gompertz, Efluente Agroindustrial.

INTRODUÇÃO

A alteração do clima global e a demanda crescente por energia são dois problemas que se põem latentes no mundo atual. Na busca de soluções para ambos, pesquisas têm sido realizadas em todo o mundo no sentido de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) com a concomitante produção de energia renovável. Nesse sentido, o uso de biomassa tem se mostrado uma importante alternativa, especialmente para um país como o Brasil em que o agronegócio tem grande destaque como impulsionador da economia, mas que gera grandes quantidades de resíduos sólidos e líquidos.

A digestão anaeróbia tem se mostrado como uma opção tecnológica muito interessante para o tratamento de águas residuárias ricas em matéria orgânica, como as produzidas no processo de abate bovino (ARB), especialmente pela não utilização de energia elétrica requerida nos sistemas de aeração dos processos aeróbios, menor geração de lodo e produção de energia na forma de biogás. Contudo, ARB apresenta uma carga orgânica composta por sangue, gorduras, fragmentos de tecidos, esterco e conteúdo estomacal e intestinal não digerido, portanto de elevada complexidade (PARDI *et al.*, 2006). Além disso, outras substâncias presentes na ARB podem interferir na sua biodegradabilidade em condições anaeróbias, assim como na transformação da matéria orgânica em biogás.

Em termos quantitativos, a ARB é um efluente líquido produzido em grandes volumes na indústria de abate de bovinos, com cerca de 3 m³ de efluentes gerados, em média, por bovino abatido (PEREIRA, DE PAIVA, DA SILVA, 2016). Uma instalação de processamento pode consumir entre 2,5 e 40 m³ de água por tonelada de carne produzida (BUSTILLO-LECOMPTE; MEHVAR, 2015). Por esses motivos, torna-se necessário propor alternativas de tratamento para a ARB, visando, inclusive, a recuperação de recursos, como o metano para a produção de energia.

O biogás, que é o produto obtido da decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos (SOARES *et al.*, 2017) é composto principalmente de metano e dióxido de carbono, com pequenas quantidades de outros gases como H₂S, mercaptanas, amônia, entre outros, pode ser utilizado em diversas aplicações, como a geração de energia elétrica, térmica, ou gás combustível (ZADINELO *et al.*, 2013). A composição do biogás varia em função do substrato utilizado na digestão anaeróbia, com valores médios de metano entre 40% a 75%, a depender das proporções entre proteínas, carboidratos e lipídeos presentes na matéria orgânica (CASTANÓN, 2002).

Para o biogás ser utilizado para geração de energia elétrica, devem ser realizados processos para remoção de compostos como CO₂ e H₂S, a fim de evitar corrosão de tubulações, reduzir a emissão de compostos tóxicos na atmosfera e melhorar a eficiência energética. Para isso, técnicas como absorção química em soluções aquosas, absorção física em adsorventes sólidos, separação criogênica, separação por membrana, fixação de CO₂ por métodos biológicos ou químicos têm sido empregadas (TIPPAYAWONG; THANOMPONGCHART, 2010).

A utilização do metano advindo do biogás através da digestão anaeróbia de substratos orgânicos como águas residuárias produzidas no processo de abate bovino, apresenta-se importante para a redução dos lançamentos de GEE na atmosfera, além de ser uma tecnologia promissora para a produção de bioenergia e recuperação de nutrientes (WANG *et al.*, 2018).

Apesar da extensa pesquisa sobre a digestão anaeróbia de resíduos agroindustriais o desempenho ótimo do processo de tratamento anaeróbio raramente é alcançado devido à falta de dados específicos de produção de metano a partir de determinado substrato, levando ao empirismo que prevalece no projeto e operação dos biorreatores anaeróbios. Na busca de solucionar este problema, a modelagem cinética da produção de metano ganhou ampla atenção, visando determinar parâmetros que aperfeiçoem o projeto de biorreatores anaeróbios bem como o entendimento dos balanços de massa e energia no processo (YANG *et al.*, 2016).

OBJETIVO

Avaliar o potencial de produção de metano da ARB visando analisar seu potencial energético, assim como realizar estudos de modelagem cinética.

METODOLOGIA

A água residuária de abatedouro (ARB) foi obtida no matadouro municipal da cidade de Itarema, Ceará, Brasil. A ARB foi caracterizada conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Foram utilizados três reatores batelada, dois controles químicos (sem o inóculo) e dois controles endógenos (sem o substrato), todos em borossilicato. Cada frasco possuía um volume reacional de 50 mL e *headspace* de 60 mL.

Os reatores batelada e controle endógeno foram inoculados com lodo sanitário obtido de um Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (UASB) que compunha uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada no município de Fortaleza, Ceará, Brasil e operava em condições mesofílicas no tratamento de esgoto sanitário. O inóculo após a coleta foi caracterizado, apresentando concentrações de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT) e sólidos fixos totais (SFT) de $55,5 \pm 0,8$; $37,9 \pm 0,6$; 18 ± 1 g L⁻¹, respectivamente, bem como relação SVT/ST média foi de 0,68, qualificando o lodo como inóculo com aproximadamente 68% de fração orgânica (microrganismos).

A ARB foi utilizada como substrato e a relação alimento/microrganismo (A/M) foi de $0,60 \pm 0,01$ g DQO·g SSV⁻¹, sendo anteriormente realizada a caracterização do lodo em termos de SSV para se obter a quantidade exata de sólidos a serem adicionados nas garrafas que continham lodo.

Os macro e micronutrientes que compuseram o meio basal foram adicionados conforme orientações de Angelidaki *et al.* (2009). O pH inicial foi ajustado para 7,0 com NaOH 1 N e, posteriormente, o bicarbonato de sódio (NaHCO₃) foi adicionado como tampão na proporção de 1 g de DQO para 1 g de NaHCO₃ (DOS SANTOS, 2005). Os biorreatores foram selados com rolhas de borracha butílica e purgados com N₂ a fim de manter a atmosfera anaeróbia. Em seguida, foram incubados em incubadora *shaker* (MA-420, Marconi LTDA, Brasil) sob agitação orbital de 150 rpm e temperatura de 35 °C durante 35 dias.

As pressões iniciais, intermediárias e finais no *headspace* foram determinadas por transmissor de pressão manométrica (Warme LTDA, Brasil). As pressões intermediárias foram medidas uma vez por semana ao longo do experimento. Ao final do ensaio, os gases produzidos foram identificados e quantificados por cromatografia gasosa com detecção por descarga por ionização de barreira dielétrica (GC-BID, *gas chromatography-barrier ionization discharge*) (GC BID-2010 Plus, Shimadzu Corporation, Japão), na qual as concentrações de CH₄ foram obtidas.

Posteriormente à análise de cromatografia, o volume acumulado de biogás no *headspace* foi medido a partir do deslocamento de solução salina (NaCl 25 g·L⁻¹) acidificada a pH 2,0 com H₂SO₄ P.A. em uma garrafa de Mariotte.

Para fins de balanço de massa (equações apresentadas nas Tabelas 1 e 2) e monitoramento da bioconversão e remoção de matéria orgânica durante o processo de digestão anaeróbia foram realizadas as análises de Demanda Química de Oxigênio nas frações total, solúvel e particulada segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) e análises de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC, *high performance liquid chromatography*) (HPLC LC-20A Prominence, Shimadzu Corporation, Japão) para a identificação e quantificação de ácidos carboxílicos (ácido acético, propiônico, butírico, isovalérico, valérico e capróico) produzidos. Para as análises cromatográficas e para as análises de DQO solúvel, as amostras foram filtradas em membrana de fibra de vidro com poro de 0,45 µm (EMD Millipore, EUA).

Tabela 1: Equações utilizadas no cálculo do balanço de massa.

Equação	Equação do Balanço de Massa
1	$DQO_{residual} = DQO_{solúvel} - DQO_{ácidos}$
2	$DQO_{convertida} = DQO_{total} - DQO_{residual}$
3	$DQO_{SSV} = DQO_{convertida} - DQO_{CH_4} - DQO_{ácidos}$
4	$\%DQO_{convertida} = \frac{DQO_{convertida}}{DQO_{total}} \times 100$
5	$\%DQO_{ácidos} = \frac{DQO_{ácidos}}{DQO_{total}} \times 100$
6	$\%DQO_{SSV} = \frac{DQO_{SSV}}{DQO_{total}} \times 100$
7	$\%DQO_{residual} = \frac{DQO_{residual}}{DQO_{total}} \times 100$
8	$\%DQO_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{DQO_{total}} \times 100$

Tabela 2: Descrição das variáveis das equações utilizadas no balanço de massa.

Variável	Equação	Unidade	Descrição
$DQO_{residual}$	(1) (2) (7)	mg DQO	Massa de DQO solúvel lábil não bioconvertida em ácidos carboxílicos ou outros bioprodutos que possuem demanda química de oxigênio.
$DQO_{solúvel}$	(1)	mg DQO	Massa de DQO solúvel total (bioconvertida + não bioconvertida).
$DQO_{ácidos}$	(1) (3) (5)	mg DQO	Massa de DQO solúvel bioconvertida em ácidos carboxílicos.
$DQO_{convertida}$	(2) (3) (4)	mg DQO	Massa de DQO direcionada para a produção de ácidos carboxílicos, formação de metano e crescimento celular.
DQO_{Total}	(1) (4)-(8)	mg DQO	Massa de DQO total inserida no reator batelada.
DQO_{SSV}	(3) (6)	mg DQO	Massa de DQO direcionada ao crescimento celular.
DQO_{CH_4}	(3) (8)	mg DQO	Massa de DQO removida por produção de metano.
$\%DQO_{convertida}$	(4)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à produção de ácidos carboxílicos, formação de metano e crescimento celular.
$\%DQO_{ácidos}$	(5)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à produção de ácidos.
$\%DQO_{SSV}$	(6)	%	Porcentagem da DQO total direcionada ao crescimento celular.
$\%DQO_{residual}$	(7)	%	Porcentagem da DQO total ainda passível de ser convertida a bioprodutos ao final do experimento.
$\%DQO_{CH_4}$	(8)	%	Porcentagem da DQO total direcionada à formação de metano.

A equação de Gompertz modificada (Equação 9), amplamente utilizada na literatura, foi aplicada para descrever a produção cumulativa de metano durante a digestão anaeróbia (MATHERI *et al.*, 2016).

$$Bt = B \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_b - e}{B} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \text{Equação (9)}$$

Nessa equação, B_t representa o metano acumulado em um tempo t ; B é o potencial de produção de metano (L); R_b é a taxa máxima de produção de metano ($L \cdot d^{-1}$); λ é o tempo de fase *lag* (d), que corresponde ao tempo necessário para que os microrganismos se adaptem ao ambiente ou o tempo necessário para a produção de biogás; e corresponde ao Número de Euler; t é o tempo de experimento adotado.

A equação modificada de Gompertz é baseada na consideração de que a taxa de produção de biogás pelas *arqueias* metanogênicas corresponde a sua taxa de crescimento específica em um reator batelada (ABU-REESH, 2014). A modelagem da cinética de produção de biogás foi feita no *software* Statistica versão 10.0 (StatSoft Power Solution, USA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que o CH_4 foi o gás produzido em maiores concentrações (71,7% v/v), seguido pelo CO_2 (28,1% v/v) e pelo H_2S (0,2% v/v). O elevado percentual de metano no biogás indica que a utilização de ARB tem potencial para prospecção de um biogás com alto poder calorífero (SHEN *et al.*, 2015).

Os reatores utilizados como controles não apresentaram produção significativa de metano, visto que se situaram abaixo do limite de detecção do método cromatográfico. A relação entre as massas de DQO e os rendimentos de CH₄ obtidos no experimento para cada reator são resumidos na Tabela 3.

Tabela 3: Relações entre as massas de DQO e os rendimentos de CH₄ encontrados.

Reator	DQO removida (mg)	DQO convertida CH ₄ (mg)	Y _{1CH₄} (mL CH ₄ /g DQO removida)	Y _{2CH₄} (mL CH ₄ /g DQO aplicada)
R1	80,2	45,9	227	121
R2	70,5	50,2	282	132
R3	76,6	52,0	269	137
Média	76,0 ± 5,0	49,0 ± 3,0	259 ± 3	130 ± 1,0

Os reatores apresentaram, em média, rendimento de 259 mL CH₄/g DQO removida e 130 mL CH₄/g DQO aplicada, valores superiores a de outros substratos agroindustriais já investigados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores médios de rendimento da produção de metano por DQO removida (Y_{1CH₄}) a partir da biometanificação de substratos agroindustriais.

Substrato	Y _{1CH₄} (mL CH ₄ /g DQOremovida ⁻¹)	Referência
Resíduo de Banana	63,89	González-Sánchez <i>et al.</i> (2015)
Resíduo de Manga	53,50	
Resíduo de Mamão	54,80	
Dejetos sólidos de suínos	228	Vu <i>et al.</i> 2016

Contudo, pela análise do balanço de massa ao final do experimento realizado por meio das equações apresentadas nas Tabelas 1 e 2, 33% da DQO aplicada foi convertida em metano, 33% em ácidos carboxílicos, 17% ainda estava passível de ser biodegradada e 18% foram utilizados para crescimento celular, somando 83% de DQO convertida.

Uma rota tecnológica talvez interessante a ser considerada seria a realização da digestão anaeróbia com foco na produção de ácidos carboxílicos, já que no supracitado balanço de massa representaria 33% da DQO aplicada. Segundo Liang e Wan (2015), a produção anaeróbia de ácidos orgânicos, apresenta-se como concorrente potencial da digestão anaeróbia tradicional e vem sendo defendida como uma maneira eficaz de gerar combustíveis e produtos químicos sustentáveis a partir de biomassa e resíduos orgânicos. Estima-se que o valor agregado dos ACCC seja de 50-130 dólares/tonelada, valor maior do que o metano, que é de 0,72 dólares/m³ (ZHOU *et al.*, 2017). Até onde se sabe, não há relatos na literatura de estudos relacionados à produção de ácidos carboxílicos com ARB.

Os parâmetros da equação de Gompertz modificada são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros utilizados para a equação de Gompertz modificada.

Reator	B (mL)	R _b (mL CH ₄ d ⁻¹)	λ (d)	R ²
R1	18,2	0,93	1,28	0,98
R2	19,9	1,01	0,80	0,99
R3	20,6	1,10	1,43	0,99
Média	19,6 ± 1,2	1,01 ± 0,08	1,2 ± 0,3	0,99

O modelo cinético de Gompertz Modificado se mostrou adequado para descrever a produção acumulada de metano a partir da ARB, sendo encontrados elevados valores de coeficiente de determinação (R² médio de 0,99) (Figura 1). A taxa máxima de produção de metano foi em média de 1,01 ± 0,08 mL de CH₄d⁻¹ e a produção média dos reatores foi de 19,56 mL de metano ao longo do experimento. A fase *lag* foi em média de

1,2 ± 0,3 dias, revelando assim a presença de compostos de elevada biodegradabilidade e de bioconversão em metano. Verifica-se que 60% do volume de metano foi produzido até o 14º dia do experimento. O teor de metano no biogás de 71,7% foi próximo ao valor de 66,0% reportado na pesquisa de Borja *et al.* (1998), na qual se utilizava um sistema híbrido UASB seguido de filtro anaeróbico no tratamento de uma ARB.

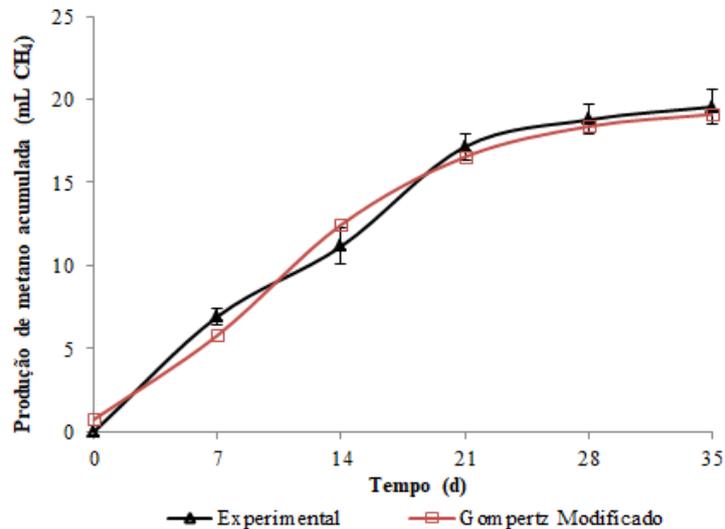


Figura 1: Modelagem cinética da produção de CH₄ durante o processo de digestão anaeróbia de ARB.

Pereira (2014), avaliando o tratamento da ARB em reatores anaeróbios com biofilme, apresentou vazões diárias de três abatedouros industriais brasileiros, sendo a vazão média igual a $1350 \pm 150 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$. Considerando esta vazão média como representativa de um abatedouro industrial no contexto agroindustrial brasileiro e a DQO da ARB *in natura* utilizada nesse experimento ($11,3 \text{ g L}^{-1}$), obtém-se uma carga orgânica de $15.255 \text{ kgDQO d}^{-1}$ gerados por um abatedouro industrial. Considerando a taxa de produção de metano por DQO aplicada de $0,13 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kgDQO}^{-1}$ (Tabela 3) obtida nesse estudo, obtém-se um potencial de geração de metano de $1.983 \pm 141,18 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$ em um abatedouro industrial.

Segundo Bressani-Ribeiro *et al.* (2017), o metano possui potencial energético $9,97 \text{ kWh m}^{-3} \text{ CH}_4$, sendo que na conversão de metano em energia há um aproveitamento (eficiência) de 30% do potencial energético, ou seja, 1 m^3 de metano produz cerca de $2,99 \text{ kWh}$ de energia. Considerando um potencial de geração de metano de $1.837,21 \pm 141,18 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ d}^{-1}$, obtém-se um potencial energético de 5.929 kWh d^{-1} .

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2017), com ano base de 2016, o consumo *per capita* anual de energia elétrica no Brasil foi de $2.228 \text{ kWh hab}^{-1}$ o que corresponde a $6,10 \text{ kWh hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, assim, estima-se que seria possível abastecer com energia elétrica uma comunidade com aproximadamente 950 habitantes a partir da biometanização da ARB gerada em um abatedouro industrial.

CONCLUSÕES

A ARB se mostrou altamente biodegradável sob condições anaeróbias, com rápida transformação de uma parte da fração orgânica em metano mesmo nos primeiros dias do experimento. Entretanto, apenas 33% da DQO aplicada foi direcionada à produção de metano. Apesar disso, o rendimento de metano encontrado em termos de DQO removida apresentou-se superior a rendimentos encontrados na literatura para a biometanização de outros substratos agroindustriais.

O modelo cinético de Gompertz Modificado de mostrou adequado para descrever a produção de metano a partir da ARB, sendo encontrados elevados valores de coeficiente de determinação (R^2 médio de 0,99).

Devido aos elevados volumes de ARB produzidas no Brasil e no mundo, a biometanização se torna uma alternativa atraente para a recuperação de recursos. Contudo, verifica-se que talvez outras rotas tecnológicas anaeróbias de tratamento para a ARB possam ser consideradas, como para produção de ácidos carboxílicos,

haja vista da grande produção dos mesmos nos sistemas investigados e do elevado valor agregado dos mesmos, superior inclusive ao próprio biogás.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABU-REESH, I. M. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. *African Journal of Biotechnology*, v. 13, n. 16, 2014.
2. ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.
3. APHA. *Standard Methods: for the examination of water and wastewater*. 22. ed. Washington, D.C.: APHA - American Public Health Association, 2012.
4. BORJA, Rafael *et al.* Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater using a combination sludge blanket and filter arrangement in a single reactor. *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 65, n. 1-2, p.125-133, jul. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524\(98\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524(98)00004-2).
5. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016*. Brasília, p.7, 2017.
6. BRESSANI-RIBEIRO, T. *et al.* Potential of resource recovery in UASB/trickling filter systems treating domestic sewage in developing countries. *Water Science And Technology*, [s.l.], v. 75, n. 7, p.1659-1666, 23 jan. 2017. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2017.038>.
7. BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*, v. 161, p. 287-302, 2015.
8. CASTANÓN, N. J. B. *Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais*. Universidade de São Paulo. São Paulo, p.66. 2002.
9. CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2º. ed. ampl. e atual. Belo Horizonte, MG: UFMG. 2016. 379 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 5).
10. COELHO, S. T., VELÁSQUEZ, M. S. G., DA SILVA, O. C., *et al.* Geração de energia elétrica a partir de biogás proveniente do tratamento de esgoto. Universidade de São Paulo, 2006.
11. DOS SANTOS, A. B. Aplicação conjunta de tratamento anaeróbio termofílico por lodo granular e de mediadores redox na remoção de cor de águas residuárias têxteis. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 253-259, 2005.
12. GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, M. E. *et al.* Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, v. 47, n. 3, p. 229-235, 2015.
13. LIANG, S., WAN, C., 2015. Carboxylic acid production from brewer's spent grain via mixed culture fermentation. *Bioresour. Technol.* v. 182, p. 179-183.
14. MATHERI, A. N., BELAID, M., SEODIGENG, T., *et al.* Modelling the Kinetic of Biogas Production from Co-digestion of Pig Waste and Grass Clippings. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2016*, v.2, n.1, Jul. 2016.
15. PARDI, M. C.; SANTOS, I. F.; SOUZA, E. R.; PARDI, H. S. *Ciência, higiene e tecnologia da carne*. Goiânia, ed: 2 UFG; v.1 p. 624, 2006.
16. PEREIRA, E. L. *Tratamento de água residuária de matadouro utilizando um sistema constituído de reatores com biofilme*. Lorena, 2014. Dissertação de mestrado-Escola de Engenharia de Lorena-Universidade de São Paulo, 2014.
17. PEREIRA, E. L.; DE PAIVA, T. C. B.; DA SILVA, F. T. Physico-chemical and Ecotoxicological Characterization of Slaughterhouse Wastewater Resulting from Green Line Slaughter. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 227, n. 6, p. 199, 2016.



18. PEREIRA, E. L; DE PAIVA, T. C. B; DA SILVA, F. T. (2016), Physico-chemical and Ecotoxicological Characterization of Slaughterhouse Wastewater Resulting from Green Line Slaughter. *Water Air Soil Pollut*, v.227, p. 199-212.
19. SHEN, Y. *et al.* An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 346–362, 2015.
20. SOARES, C. M., FEIDEN, A., TAVARES, S.G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. *Nativa, Sinop*, v.5, p.509-514, Dez. 2017.
21. TIPPAYAWONG, N.; THANOMPONGCHART, P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, [s.l.], v. 35, n. 12, p.4531-4535, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.014>.
22. VIANA, M. B. *et al.* Biodegradability and methane production potential of glycerol generated by biodiesel industry. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 10, p. 2217–2222, 2012.
23. VU, P. T. *et al.* Composition and biogas yield of a novel source segregation system for pig excreta. *Biosystems Engineering*, v. 145, p. 29-38, 2016.
24. WANG, S., JENA, U., DAS, K. C. Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States. *Energy Conversion and Management*. n.173, p.143-157, Jul. 2018.
25. YANG, H. *et al.* A model for methane production in anaerobic digestion of swine wastewater. *Water Research*, v. 102, p. 464-474, 2016.
26. ZADINELO, I. V., SERENISK, R. M., BORIN, R., *et al.* Potencial de produção de biogás a partir de efluente pré-tratado de abatedouro de aves da região oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. v.2, p.61-71, 2013.
27. ZHOU, M. *et al.* Enhanced volatile fatty acids production from anaerobic fermentation of food waste: A mini-review focusing on acidogenic metabolic pathways. *Bioresource Technology*, 2017.