



You are free: to copy, distribute and transmit the work; to adapt the work.
You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor

POTENCIAL ENERGÉTICO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA APLICADA A ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE CERVEJEIRAS

Lucas Tadeu Fuess¹; Julia Shitara²; Marcelo Loureiro Garcia³

RESUMO

Baseando-se na potencialidade de aplicação de processos anaeróbios ao tratamento de resíduos com elevadas concentrações de matéria orgânica, neste trabalho avaliou-se o potencial energético associado à produção de metano de reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de águas residuárias de cervejarias. Verificou-se que em sistemas operados em escalas reduzidas ($3,38 < V < 120L$), o volume reacional e a produção de energia correlacionaram-se aproximadamente segundo uma tendência linear ($R^2=0,9529$). A produção de energia calculada para diversos reatores anaeróbios com configurações e modos de operação diferentes variou de 0,00513 a 0,0716 kWh/L_r·d, indicando uma capacidade satisfatória de recuperação de energia a partir de resíduos de cervejaria. O balanço energético de dois reatores anaeróbios (escala de bancada vs. escala piloto/plena) aplicados ao tratamento de resíduos cervejeiros foi comparado. O reator em escala piloto/plena apresentou uma capacidade de recuperação energética aproximadamente 1.800 vezes superior à do reator em escala de bancada (razão produção/consumo de 1,654 vs. 0,000946).

Palavras-chave: águas residuárias de cervejarias; produção de metano; recuperação de energia.

ENERGETIC POTENTIAL OF ANAEROBIC DIGESTION APPLIED TO BREWERY WASTEWATER

ABSTRACT

Based on the potential application of anaerobic processes to the treatment of high-strength wastewater, the objective of this paper was to assess the energetic potential associated to the methane production of anaerobic reactors applied to the treatment of brewery wastewaters. In reduced scale ($3.38 < V < 120L$) systems, the reaction volume and the energy production were approximately linearly correlated ($R^2=0,9529$). The energy production calculated for several anaerobic reactors with different configurations and operating conditions ranged from 0.00513 to 0.0716 kWh.L_r⁻¹.d⁻¹, indicating a satisfactory energy recovery capacity from brewery wastewaters. The energy balance of two anaerobic reactors (bench-scale vs. pilot/full-scale) applied to the treatment of brewery residues was compared. The pilot/full-scale reactor showed an energy recovery capacity about 1,800 times higher than the bench-scale reactor (production/consumption ratio of 1.654 vs. 0.000946).

Keywords: brewery wastewater; methane production; energy recovery.

Trabalho recebido em 21/11/2012 e aceito para publicação em 12/04/2013.

¹ Doutorando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pelo Laboratório de Processos Biológicos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Avenida João Dagnone, 1100, CEP. 13563-120, São Carlos (SP), Brasil. e-mail: ltfuess@sc.usp.br;

² Engenheira Ambiental pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP – Univ. Estadual Paulista;

³ Professor Assistente Doutor, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP – Univ. Estadual Paulista. Avenida 24-A, 1515, CEP. 13506-900, Rio Claro (SP), Brasil. e-mail: mlgarcia@rc.unesp.br.

1. INTRODUÇÃO

O setor cervejeiro ocupa uma posição econômica estratégica na indústria alimentícia, uma vez que seu produto caracteriza-se como a quinta bebida mais consumida no mundo – o consumo *per capita* médio de cerveja é de 23L ao ano, sendo superado apenas pelo consumo de chá, refrigerantes, leite e café (Filladeau *et al.*, 2006). A produção de cerveja no Brasil em 2010 atingiu o volume de 12,4 bilhões de litros (terceira maior produção no mundo), representando um aumento de 18% em relação a 2009 (Reis, 2011).

A cerveja caracteriza-se como um produto resultante da fermentação alcoólica do malte (extrato de cereal, p.ex. de cevada), após este sofrer diversas etapas de beneficiamento. Nessas etapas são gerados diversos resíduos que, por apresentarem elevadas concentrações orgânicas (Leal *et al.*, 1998; Xiangwen *et al.*, 2008), normalmente não atendem aos padrões de lançamento determinados pela legislação ambiental. Dentre as tecnologias de tratamento usualmente aplicadas a resíduos industriais, destaca-se o emprego de processos biológicos anaeróbios, a partir dos quais se alia a remoção dos componentes orgânicos presentes nos resíduos à produção de metano, caracterizado como uma fonte de energia renovável. Segundo Borzacconi *et al.*

(1995), de 35 a 50% da energia utilizada nos processos industriais podem ser recuperados a partir da queima do metano, representando uma significativa redução no consumo de fontes de energia não-renovável.

Considerando as características das águas residuárias de cervejarias, verifica-se um grande potencial do emprego da digestão anaeróbia como tecnologia de tratamento (TABATABAEI *et al.*, 2010; XIANGWEN *et al.*, 2008; ZUPANČIČ *et al.*, 2007), uma vez que os compostos orgânicos presentes nas mesmas (açúcares, ácidos graxos voláteis e amido) tendem a ser facilmente biodegradados (ANGENENT *et al.*, 2004; BORZACCONI *et al.*, 1995; DRIESSEN e VEREIJKEN, 2003; HUIGE, 2006). A Tabela 1 apresenta valores de alguns parâmetros que caracterizam as águas residuárias das cervejarias, com destaque para a elevada concentração de matéria orgânica.

Desta forma, tendo em vista os benefícios ambientais e especialmente energéticos inerentes ao processo anaeróbio, neste estudo procurou-se introduzir aspectos da avaliação do potencial energético em termos da produção de metano de reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de águas residuárias de cervejarias.

Tabela 1 – Características físico-químicas de águas residuárias de cervejarias.

Referência	Parâmetros					
	DQO (g/L)	DBO (g/L)	pH	N (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SST (g/L)
Ahn <i>et al.</i> (2001)	1,3	0,9	6,7	23,0	(-)	0,2
Alvarado-Lassman <i>et al.</i> (2008)	2,1	1,4	10,0	13,3	4,8	0,7
Driessen e Vereijken (2003)	2,0-6,0	1,2-3,6	4,5-12,0	25,0-80,0	10,0-50,0	0,2-1,0
Leal <i>et al.</i> (1998)	2,8	(-)	6,7	20,0	9,0	(-)
Rao <i>et al.</i> (2007)	2,0-6,0	1,2-3,6	3,0-12,0	(-)	10,0-50,0	2,9-3,0
Yu e Gu (1996)	2,0-2,8	1,1-1,9	(-)	30,0-57,0	8,0-18,0	0,2-0,6

(-) Dado não disponível.

2. METODOLOGIA

Inicialmente estimou-se a produção de energia a partir das produções de metano reportadas em trabalhos científicos consultados na literatura. Em outra etapa deste estudo, procurou-se avaliar o balanço energético de dois reatores anaeróbios operados em diferentes escalas (bancada e piloto/plena), aplicados ao tratamento de resíduos cervejeiros. A análise energética foi realizada a partir do emprego dos parâmetros de operação e de monitoramento dos reatores (obtidos na literatura), bem como dos requerimentos energéticos dos equipamentos utilizados nos sistemas de tratamento.

2.1 Estimativa do potencial energético do metano

A estimativa do potencial energético (PE_{CH₄}) da digestão anaeróbia aplicada aos

resíduos cervejeiros foi feita a partir da análise dos resultados apresentados em alguns trabalhos científicos, que incluem: Agler *et al.* (2010), Bocher *et al.* (2008), Connaughton *et al.* (2006), Cronin e Lo (1998), Ince *et al.* (2001), Xiangwen *et al.* (2008), Yu e Gu (1996) e Zupančič *et al.* (2007). Exceto nos trabalhos de Agler *et al.* (2010) e Bocher *et al.* (2008), nos demais casos foram tratados resíduos brutos das cervejarias, isto é, constituídos por frações orgânicas provenientes de todas as etapas do processo produtivo.

Em relação aos cálculos, inicialmente determinou-se a produção volumétrica de metano (PVol_{CH₄}), em L/L_r·d (L_r=L_{reator}), buscando-se obter uma grandeza extensiva em relação à quantificação da produção de metano. Posteriormente, para a determinação do potencial energético, multiplicou-se a produção volumétrica de metano (L/L_r·d)

associada a cada sistema de tratamento pelo poder calorífico inferior do mesmo (MJ/L), sendo o resultado final reportado em kWh/L_r·d.

2.2 Balanço Energético

O cálculo do balanço de energia foi aplicado aos reatores estudados nos trabalhos de Agler *et al.* (2010) e Leal *et al.* (1998), sendo a metodologia empregada baseada nas seguintes etapas: (i) cálculo da energia consumida pelos aparelhos elétricos empregados nos sistemas de tratamento durante um dia de funcionamento, em termos de kWh/d; (ii) obtenção da produção diária de metano, em L/d, a partir multiplicação da carga orgânica (CO) inserida no reator (gSV/d; SV = sólidos voláteis) pela produção global de metano (L/gSV) corrigida para a temperatura do tratamento; (iii) obtenção da produção diária de energia fornecida pelo metano gerado no tratamento anaeróbio, em MJ/d, a partir da multiplicação da produção diária de metano (L/d) pelo seu poder calorífico inferior (MJ/L) a 25°C. Posteriormente converteu-se a unidade da produção diária de energia para kWh/d; (iv) obtenção do balanço energético líquido (kWh/d) a partir da subtração entre o valor da produção diária energética de metano e o consumo de energia dos equipamentos. Considerou-

se uma eficiência de 50% para a conversão do metano em energia (tal valor, em geral, representa a capacidade máxima de conversão de sistemas, tais como motores e turbinas, operados sob condições limite); e (v) obtenção da razão entre a produção e o consumo de energia (razão P/C), visando quantificar a capacidade de recuperação de energia do reator.

No estudo apresentado por Agler *et al.* (2010) foi analisado o desempenho de um reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais (ASBR) com capacidade volumétrica de 5L (escala de bancada). O reator foi alimentado manualmente com amostras de águas residuárias geradas na etapa de clarificação primária da cerveja na planta produtiva da *Anheuser-Bush Inc., St. Louis, MO*. O ASBR foi operado durante 250 dias em ciclos de 24h de duração: período de reação com mistura intermitente (23h); período de sedimentação da biomassa (1h); e período de decantação do efluente (2min). A mistura foi feita a uma taxa de 2min/h, com o emprego de um agitador mecânico modelo 5vb (*EMI Inc., Clinton, CT, EUA*) de potência elétrica (P_E) igual a 10W. A temperatura foi mantida a 37±1°C durante todo o período de operação do reator, por meio de um controlador de temperatura modelo 210 (*Polyscience, Niles, IL, EUA*) (P_E=792W). Na decantação do efluente utilizou-se uma

bomba peristáltica (*Cole Parmer Instrument Co., Vernon Hills, IL, EUA*) ($P_E=75W$).

No caso de Leal *et al.* (1998), o estudo foi baseado na avaliação de um filtro anaeróbio, de volume útil igual a 5.843L (escala piloto/plena), aplicado ao tratamento de águas residuárias de uma cervejaria venezuelana. A alimentação do digestor foi feita de maneira contínua, a uma taxa de 584,3L/h, por meio de uma bomba dosadora (*Milroyal, Model AMR 1-58A-142SM*), durante 255 dias. Não houve o emprego de aquecedores na operação do filtro anaeróbio, entretanto, dadas as condições do ambiente, foi possível a manutenção de temperaturas na faixa de 34 a 39°C durante a operação do mesmo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa do potencial energético do metano

Diversos estudos relacionados à aplicação da digestão anaeróbia aos resíduos da indústria cervejeira já foram apresentados, dentre os quais pode-se citar Connaughton *et al.* (2006), Cronin e Lo (1998), Parawira *et al.* (2005), Xiangwen *et al.* (2008), dentre outros. Entretanto, deve-se destacar que grande parte destes trabalhos foi desenvolvida a partir da operação de reatores em escala de bancada ou piloto, baseando-se principalmente na

análise da eficiência da remoção de matéria orgânica dos sistemas de tratamento. Na maioria dos casos, os trabalhos baseados na digestão anaeróbia de resíduos, independente da origem destes, tendem a abordar a produção de metano apenas como parâmetro de monitoramento de desempenho do processo. A Tabela 2 apresenta os potenciais energéticos calculados a partir das produções de metano reportadas em alguns trabalhos científicos nos quais águas residuárias de cervejarias foram tratadas na via anaeróbia, considerando volumes de reação crescentes.

A significativa flutuação dos valores calculados para o potencial energético pode ser atribuída às diferentes condições fornecidas aos sistemas de tratamento, tais como aquelas relacionadas à temperatura (T) e às cargas aplicadas aos reatores, bem como aos arranjos experimentais de cada estudo (tipo de reator, emprego ou não de agitação, dentre outros). Entretanto, dentre estes fatores, verificou-se uma significativa influência dos volumes dos reatores empregados sobre a produção volumétrica de metano, e conseqüentemente sobre o potencial energético do processo (Figura 1), tendo em vista uma correlação aproximadamente linear ($R^2=0,9529$ e F de significância = 0,000107).

Tabela 2 – Potencial energético calculado para resultados apresentados em alguns estudos.

Referência	V _{reator} (L)	T (°C)	CO (gDQO/L _r ·d)	PVol _{CH₄} (L/L _r ·d)	PE _{CH₄} (kWh/L _r ·d)
Connaughton <i>et al.</i> (2006)	3,4	15	4,52	0,56	5,13·10 ⁻³
Connaughton <i>et al.</i> (2006)	3,4	15	4,04	0,95	8,64·10 ⁻³
Connaughton <i>et al.</i> (2006)	3,4	37	4,52	1,16	1,06·10 ⁻²
Connaughton <i>et al.</i> (2006)	3,4	37	4,04	1,06	9,70·10 ⁻³
Agler <i>et al.</i> (2010)	5,0	37	30,77	0,96	8,77·10 ⁻³
Bocher <i>et al.</i> (2008)	5,0	55	30,77	0,92	8,37·10 ⁻³
Yu e Gu (1996)	11,3	25	4,76	1,34	1,23·10 ⁻²
Yu e Gu (1996)	11,3	25	6,76	1,72	1,57·10 ⁻²
Yu e Gu (1996)	11,3	25	10,30	2,55	2,33·10 ⁻²
Yu e Gu (1996)	11,3	25	14,64	3,46	3,16·10 ⁻²
Cronin e Lo (1998)	16,0	19-24	0,63	0,55	5,03·10 ⁻³
Cronin e Lo (1998)	16,0	19-24	2,91	0,85	7,79·10 ⁻³
Zupančič <i>et al.</i> (2007)	30,0	55	5,40	2,04	1,86·10 ⁻²
Zupančič <i>et al.</i> (2007)	30,0	55	6,27	2,62	2,39·10 ⁻²
Xiangwen <i>et al.</i> (2008)	45,0	33	5,00	2,40	2,19·10 ⁻²
Ince <i>et al.</i> (2001)	120,0	36	28,50	7,83	7,16·10 ⁻²

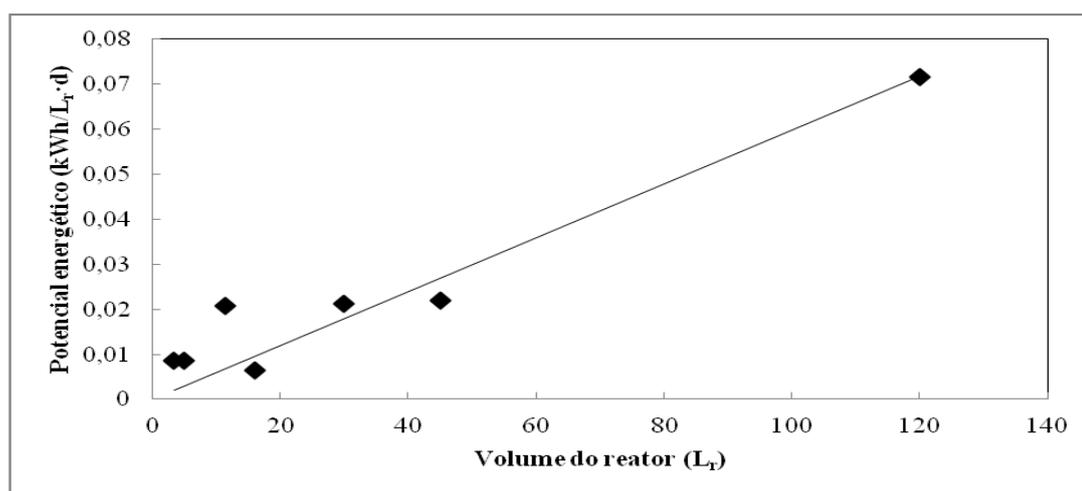


Figura 1. Correlação entre o volume dos reatores e o potencial energético do processo anaeróbio. Pontos experimentais (◆) dos trabalhos científicos reportados (Tabela 2) e reta aproximada via regressão linear (—). Equação da reta aproximada: $PE_{CH_4} = 0,0006 \cdot V_r$; coeficiente de determinação (R^2): 0,9529; F de significação: 0,000107.

Ressalta-se que a faixa de volumes considerada na análise engloba reatores operados em escala de bancada e piloto, fato que pode representar uma limitação na extrapolação do comportamento verificado para reatores operados em escala plena. Considerando cenários reais, antecipa-se que com o aumento do volume do reator, a produção volumétrica de metano, e consequentemente a produção de energia (por volume de reator), podem apresentar decréscimos, devido a maiores dificuldades de se controlar o processo anaeróbio. Tais dificuldades resultam, por exemplo, na ocorrência de zonas mortas ou de curtos-circuitos nos reatores, de modo a afetar negativamente o desempenho do processo devido a reduções na atividade das populações metanogênicas. Como exemplo, pode-se citar o estudo de Parawira *et al.* (2005), no qual foi avaliado o desempenho de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo, operado em escala plena (volume de 500 m³), aplicado ao tratamento de águas residuárias geradas em uma cervejaria localizada em Harare, Zimbábue. Neste caso, os autores verificaram uma eficiência de remoção de DQO de apenas 57%, valor pouco expressivo quando comparado aos resultados obtidos a partir da operação de reatores em escalas menores (eficiência média de remoção na faixa de 80 a 90%). No entanto, a avaliação do balanço

energético apresentada no próximo tópico, baseada não apenas na produção volumétrica de metano e no volume do reator, mas também nos consumos de energia necessários para o funcionamento dos reatores, revelou cenários energéticos mais favoráveis para os reatores em escalas maiores. Desta forma, eventuais decréscimos na produção de metano seriam compensados pela redução do consumo de energia em sistemas escalonados.

Valores, em porcentagem, para a recuperação de energia foram obtidos comparando-se os potenciais energéticos previamente calculados, baseando-se nos valores extremos obtidos (Tabela 2), e o consumo energético de equipamentos usualmente empregados em sistemas de tratamento anaeróbios (p.ex. bombas, agitadores e aquecedores) (Tabela 3). Uma análise geral da Tabela 3 indica valores expressivos para a capacidade de recuperação de energia (em geral superiores a 100%), comprovando o potencial do gás metano em relação à capacidade de suprir os gastos dos equipamentos e até mesmo possibilitando a geração de energia excedente passível de comercialização, dependendo da potência elétrica total consumida na planta produtiva. Comparativamente, processos aeróbios, cuja energia requerida para aeração do meio reacional chega a valores próximos a 0,75 kWh/kgDQO (KHANAL,

2008), tendem a consumir os mesmos níveis de energia passível de produção a partir do metano. Baseando-se nas cargas orgânicas aplicadas descritas na Tabela 2, o consumo de energia a partir da aplicação da digestão aeróbia aos trabalhos analisados apresentaria valores na faixa de $4,72 \cdot 10^{-4}$ a $2,31 \cdot 10^{-2}$ kWh/Lr.d.

As situações mais desfavoráveis foram obtidas para os equipamentos operados em regime contínuo, especialmente no caso do controlador de temperatura utilizado por Agler *et al.* (2008) e (2010), cuja recuperação de energia seria de apenas 1,88% mesmo para o maior potencial energético. Este valor

indica que o emprego de controladores de temperatura, especialmente em escalas reduzidas, tende a inviabilizar a operação dos reatores do ponto de vista da recuperação de energia (neste caso não se faz menção à capacidade de remoção de matéria orgânica dos sistemas). Deve-se destacar a vantagem de regiões com condições climáticas tropicais em relação às de clima mais frio, visto que naquelas a temperatura pode atingir naturalmente valores em torno de 25°C, caracterizando condições adequadas para a operação de reatores anaeróbios sem a necessidade do emprego de controladores.

Tabela 3 – Recuperação de energia estimada a partir do potencial energético do metano.

Referência	Equipamento	Regime de Operação	Consumo de energia (kWh/L _r ·d)	Recuperação de energia (%)	
				Menor potencial (0,00503 kWh/L _r ·d)	Maior potencial (0,0716 kWh/L _r ·d)
Agler <i>et al.</i> (2008)	bomba	1 min/h	0,00572	87,94	1.251,75
	peristáltica	4 min/h	0,0230	21,87	311,30
	controlador de temperatura	contínua	3,802	0,13	1,88
Agler <i>et al.</i> (2010)	agitador mecânico	2 min/h	0,00153	328,76	4.679,74
	bomba peristáltica	2 min/h	0,0005	1.006,00	14.320,00
	controlador de temperatura	contínua	3,802	0,13	1,88
Bocher <i>et al.</i> (2008)	agitador mecânico	contínua	0,0480	10,48	149,17
Ince <i>et al.</i> (2001)	agitador mecânico	nd	0,0150	33,53	477,33
	bomba dosadora	nd	0,000694	724,78	10.317,00

nd: Dado não disponível.

3.2 Balanço de energia em reatores anaeróbios

Considerando o trabalho de Agler *et al.* (2010), foram verificados rendimentos de metano iguais a 0,347 L/gSV (período 1-183) e 0,197 L/gSV (período 184-255). Segundo os autores, a queda na produção de metano decorreu do acúmulo excessivo de sólidos no reator, devido a variações nas características da água resíduária inserida no mesmo. Entretanto, a partir de uma avaliação dos dados apresentados na Tabela 4, verifica-se que a redução da produção de metano não exerceu impacto significativo na recuperação de energia do sistema, a qual se apresentou consideravelmente baixa durante toda a operação do reator. Apenas para exemplificar, a razão P/C foi de apenas $9,46 \cdot 10^{-4}$ para a carga de 20,0 gSV/d (maior carga aplicada), representando uma

recuperação energética de pouco mais de 0,009%.

Conforme apresentado na seção anterior, o significativo déficit de energia observado pode ser associado à elevada potência do controlador de temperatura. Neste caso, uma alternativa ao tratamento compreenderia a remoção do controlador do sistema, sendo que, desde que condições adequadas de temperatura fossem mantidas, a recuperação de energia atingiria níveis extremamente satisfatórios. Neste cenário hipotético, assumindo-se $T=25^{\circ}\text{C}$, a razão P/C compreenderia valores na faixa de 0,621 (carga de 4,00 gSV/d) a 1,765 (carga de 20,00 gSV/d), indicando uma recuperação mínima de 62,1% da energia consumida pelo sistema de tratamento.

Tabela 4 – Balanço de energia estimado para o ASBR operado por Agler *et al.* (2010).

CO (gSV/d)	Produção de metano (L/d)	Produção de energia ^a (kWh/d)	Balanço energético ^b (kWh/d)	Razão P/C
4,00	1,39	$6,34 \cdot 10^{-3}$	-19,013	$3,33 \cdot 10^{-4}$
5,00	1,73	$7,90 \cdot 10^{-3}$	-19,011	$4,15 \cdot 10^{-4}$
6,50	2,26	$1,03 \cdot 10^{-2}$	-19,009	$5,41 \cdot 10^{-4}$
8,00	2,78	$1,27 \cdot 10^{-2}$	-19,006	$6,68 \cdot 10^{-4}$
10,00	3,47	$1,58 \cdot 10^{-2}$	-19,003	$8,31 \cdot 10^{-4}$
10,00	1,97	$9,00 \cdot 10^{-3}$	-19,010	$4,73 \cdot 10^{-4}$
13,50	2,66	$1,21 \cdot 10^{-2}$	-19,007	$6,36 \cdot 10^{-4}$
17,50	3,45	$1,57 \cdot 10^{-2}$	-19,003	$8,25 \cdot 10^{-4}$
20,00	3,94	$1,80 \cdot 10^{-2}$	-19,001	$9,46 \cdot 10^{-4}$

^aEficiência de conversão energética de 50%.

^bConsumo de energia (controlador de temperatura + agitador + bomba peristáltica): 19,019 kWh/d.

No caso de Leal *et al.* (1998), foram reportados diretamente os volumes gerados de biogás de 6,1 m³/d (período 71-180) e 7,1 m³/d (período 181-255), e suas respectivas proporções de metano (aproximadamente 70 e 90%). De maneira distinta da situação observada para o reator operado em escala de bancada, no caso de Leal *et al.* (1998) os resultados demonstraram uma significativa capacidade do sistema de tratamento em

recuperar energia, atingindo inclusive a autossuficiência energética, conforme apresentado na Tabela 5. Deve-se destacar que o próprio tipo de reator utilizado (filtro anaeróbio) contribuiu para a obtenção de balanços positivos, uma vez que não houve o emprego de agitadores. A ausência de controlador de temperatura também se caracterizou como um fator positivo na determinação do balanço de energia.

Tabela 5. Balanço energético diário do filtro anaeróbio operado por Leal *et al.* (1998).

CO (kgDQO/d)	Produção de metano (L/d)	Produção de energia ^a (kWh/d)	Balanço energético ^b (kWh.d ⁻¹)	Razão P/C
29,21	4.270,0	19,506	1,854	1,105
46,74	4.270,0	19,506	1,854	1,105
46,74	6.390,0	29,190	11,538	1,654

^aEficiência de conversão energética de 50%.

^bConsumo de energia: 17,652 kWh/d (bomba de 735,5W operada em regime contínuo; valor adotado baseado em potências de bombas que apresentam vazões semelhantes).

(-) Valores não calculados.

As potências elétricas geradas a partir da queima do metano no trabalho de Leal *et al.* (1998) chegariam a 812,75W (1,1CV) e 1.216,25W (1,65CV), respectivamente para os períodos 70-180 e 181-255. Tais valores superam em muito a potência gerada a partir da maior carga orgânica utilizada por Agler *et al.* (2010), correspondente a 0,75W (0,001CV). Desta forma, dada a grande discrepância observada na comparação entre reatores operados em escala de bancada e escala

piloto/plena, enfatiza-se a necessidade de se desenvolver estudos do potencial energético em sistemas operados em escala plena. Os valores da produção de metano e do consumo dos equipamentos elétricos utilizados nos arranjos experimentais certamente apresentarão significativas diferenças em reatores de escala plena, resultando, portanto, na obtenção de cenários energéticos distintos do que aqueles analisados neste trabalho, a partir da subestimação ou superestimação de

valores. Tomando por exemplo o caso do controlador de temperatura, embora seu emprego tenha sido o fator limitante da capacidade de recuperação de energia do sistema operado por Agler *et al.* (2010), em sistemas de escala plena seu consumo tende a ser totalmente suprido pelo potencial energético do metano. Comparativamente, o potencial energético do reator estudado por Leal *et al.* (1998) já seria suficiente para suprir totalmente o consumo do controlador.

4. CONCLUSÕES

As análises indicaram um elevado potencial energético associado à digestão anaeróbia aplicada a águas residuárias de cervejarias, observando-se patamares de até 0,0716 kWh/L_r·d. Comparando-se os potenciais calculados com o consumo energético de equipamentos usualmente utilizados nos sistemas de tratamento, verificou-se uma capacidade satisfatória de recuperação de energia, incluindo o potencial para geração de níveis significativos de energia excedente. Embora o potencial energético tenha sido considerado elevado, o balanço de energia global de sistemas anaeróbios pode ainda ser negativo, sobretudo na operação de sistemas sob condições termofílicas. Mesmo para o tratamento de águas residuárias de alta carga, processos

termofílicos tendem a ser mais indicados para o tratamento de efluentes gerados a elevadas temperaturas, como por exemplo, em indústrias que empregam processos de destilação. Ressalta-se que esta conclusão baseia-se unicamente em critérios energéticos, ou seja, não se levou em consideração parâmetros como a capacidade de remoção de matéria orgânica ou a estabilidade operacional nos sistemas.

Destaca-se que a partir do presente trabalho procurou-se introduzir/verificar uma metodologia passível de aplicação ao estudo energético de plantas industriais em geral, capaz de demonstrar tendências importantes quanto à recuperação de energia associada a processos anaeróbios por meio do emprego de um roteiro relativamente simples. Entretanto, para o estabelecimento de cenários energéticos condizentes com condições operacionais reais é imprescindível a implantação de plantas de tratamento anaeróbio em escala plena, sobretudo na agroindústria brasileira. Estudos como o presente, embora escassos, indicam a possibilidade de um aproveitamento pleno da digestão anaeróbia (aspectos ambientais, energéticos e econômicos) a partir do emprego de tecnologias consolidadas (p.ex. sistemas de alta taxa), devendo-se utilizá-los como base para verificações em escala industrial.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), processos 2010/04101-8 e 2012/15606-9 e à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (PROPe) pelo apoio financeiro à realização deste projeto.

6. REFERÊNCIAS

- AGLER, M.T.; AYDINKAYA, Z.; CUMMINGS, I.A.; BEERS, A.R.; ANGENENT, L.T. Anaerobic digestion of brewery primary sludge to enhance bioenergy generation: a comparison between low- and high-rate solids treatment and different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 5842-5851, 2010.
- AGLER, M.T.; GARCIA, M.L.; LEE, E.S.; SCHLICHER, M.; ANGENENT L.T. Thermophilic anaerobic digestion to increase the net energy balance of corn grain ethanol. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 17, p. 6723-6729, 2008.
- AHN, Y.H.; MIN, K.S.; SPEECE, R.E. Pre-acidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater. **Water Research**, v. 35, n. 18, p. 4267-4276, 2001.
- ALVARADO-LASSMAN, A.; RUSTRIÁN, E.; GARCÍA-ALVARADO, M.A.; RODRÍGUEZ-JIMÉNEZ, G.C. HOUBRON, E. Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactors. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 3009-3015, 2008.
- ANGENENT, L.T.; KARIN, K.; AL-DAHMAN, M.H.; WRENN, B.A.; DOMÍNGUEZ-ESPINOSA, R. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. **Trends in Biotechnology**, v. 32, n. 9, p. 477-485, 2004.
- BOCHER, B.T.; AGLER, M.T.; GARCIA, M.L.; ANGENENT, L.T. Anaerobic digestion of secondary residuals from an anaerobic bioreactor at a brewery to enhance bioenergy generation. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 35, p. 321-329, 2008.
- BORZACCONI, L.; LÓPEZ, I.; VIÑAS, M. Application of anaerobic digestion to the treatment of agroindustrial effluents in Latin America. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 12, p. 105-111, 1995.
- CONNAUGHTON, S.; COLLINS, G.; O'FLAHERTY, V. Psychrophilic and mesophilic anaerobic digestion of brewery effluent: a comparative study. **Water Research**, v. 40, p. 2503-2510, 2006.
- CRONIN, C.; LO, K.V. Anaerobic treatment of brewery wastewater using UASB reactors seeded with activated sludge. **Bioresource Technology**, v. 64, p. 33-38, 1998.
- DRIESSEN, W.; VEREIJKEN, T. Recent developments in biological treatment of brewery effluent. In: THE INSTITUTE AND GUILD OF BREWING CONVENTION, 2003, Livingstone, Zambia.
- FILLAUDEAU, L.; BLANPAIN-AVET, P.; DAUFIN, G. Water, wastewater and waste management in brewing

- industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, p. 463-471, 2006.
- HUIGE, N.J. Brewery by-products and effluents. In: PRIEST, F.G.; STEWART, G.G. (eds.). **Handbook of brewing**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. pp. 655-713.
- INCE, B.K.; INCE, O.; ANDERSON, G.K.; ARAYICI, S. Assessment of biogas use as an energy source from anaerobic digestion of brewery wastewater. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 126, p. 239-251, 2001.
- KHANAL, S.K. **Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications**. 1st edition. New Delhi, India: Blackwell Publishing, 2008. 301 p.
- LEAL, K.; CHACIN, E.; BEHLING, E.; GUTIEREZ, E.; FERNANDEZA, N.; FORSTEF, C.F. A mesophilic digestion of brewery wastewater in an unheated anaerobic filter. **Bioresource Technology**, v. 65, p. 51-55, 1998.
- PARAWIRA, W.; KUBITA, I.; NYANDOROH, M.G.; ZVAUYA, R. A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. **Process Biochemistry**, v. 40, p. 593-599, 2005.
- RAO, A.G.; REDDY, T.S.K.; PRAKASH, S.S.; VANAJAKSHI, J.; JOSEPH, J.; SARMA, P.N. pH regulation of alkaline wastewater with carbon dioxide: a case study of treatment of brewery wastewater in UASB reactor coupled with absorber. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 2131-2136, 2007.
- REIS, G. Brasil passa Alemanha e Rússia e é o 3º produtor mundial de cerveja. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 16 jan. 2011. Economia. Disponível em: http://www.em.com.br/app/noticia/economia/2011/01/16/internas_economia,203997/brasil-passa-alemanha-e-russia-e-e-o-3-produtor-mundial-de-cerveja.shtml. Acesso em: 06 set. 2011.
- TABATABAEI, M.; RAHIM, R.A.; ABDULLAH, N.; WRIGHT, A.D.G.; SHIRAI, Y.; SAKAI, K.; SULAIMAN, A.; HASSAN, M.A. Importance of the methanogenic archaea populations in anaerobic wastewater treatments. **Process Biochemistry**, v. 45, p. 1214-1225, 2010.
- XIANGWEN, S.; DANGCONG, P.; ZHAOHUA, T.E.; XINGHUA, J. Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR). **Bioresource Technology**, v. 99, p. 3182-3186, 2008.
- YU, H.; GU, G. Biomethanation of brewery wastewater using an anaerobic upflow blanket filter. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 219-223, 1996.
- ZUPANČIČ, G.D.; STRAŽIŠČAR, M.; ROŠ, M. Treatment of brewery slurry in thermophilic anaerobic sequencing batch reactor. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 2714-2722, 2007.