

II-347 - USO DE REATOR UASB PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS E TRATAMENTO DE SUBPRODUTO GERADO NA PRODUÇÃO DE PROTEÍNA CONCENTRADA DE SOJA (MELAÇO DE SOJA)

Bruna Sampaio de Mello⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Estadual de Maringá. Pesquisadora do IPBEN (Instituto de Pesquisa em Bioenergia/IQA). Mestranda em Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/ Instituto de Química *Campus* de Araraquara/SP).

Brenda Clara Gomes Rodrigues

Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Federal de Tocantins. Pesquisadora do IPBEN (Instituto de Pesquisa em Bioenergia/IQA). Doutoranda em Biotecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/ Instituto de Química *Campus* de Araraquara/SP).

Maria Lucia Gonsales da Costa Araujo

Engenheira Química pela Universidade de São Paulo. Professora Doutora do Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química na Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP/ Instituto de Química *Campus* de Araraquara/SP).

Arnaldo Sarti

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de São Carlos. Pesquisador do IPBEN (Instituto de Pesquisa em Bioenergia/IQA). Professor Doutor do Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química na Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP/ Instituto de Química de Araraquara/SP).

RESUMO

A produção de biogás a partir da digestão anaeróbia com resíduos industriais e agroindustriais tem se tornado bastante atrativa devido a suas vantagens econômicas, principalmente energética, pelo reaproveitamento do biogás. Neste sentido, o objetivo principal da pesquisa foi avaliar o potencial de produção de biogás para um subproduto agroindustrial ainda não estudado para produção de biogás com aplicação de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) cuja tecnologia é consolidada para efetivação do processo de digestão anaeróbia. O reator em escala de bancada (12 L) foi alimentado com melaço de soja (subproduto da produção de proteína de soja) como substrato para cinco condições operacionais ($0,28 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ a $3,91 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$), nas quais aumentou-se gradualmente a concentração de substrato (500 a $4.000 \text{ mgDQO}_{\text{Total}} \cdot \text{L}^{-1}$) e reduziu-se o tempo de detenção hidráulico (TDH) de 48 até 12 hs. Durante o período experimental (134 dias) verificou-se remoção média de matéria orgânica, em termos de $\text{DQO}_{\text{Total}}$ (Demanda Química de Oxigênio Total) de 77 a 83 % e a produção máxima de biogás atingiu cerca de $2,8 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$. O reator, mantido em sala climatizada (23°C a 25°C), foi alocado no Laboratório do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) no Instituto de Química - UNESP/Araraquara (SP). Os resultados satisfatórios obtidos neste trabalho permitem viabilizar a utilização do melaço de soja, substrato este ainda não estudado, para a produção de biogás. Desta forma, uma destinação mais adequada desse resíduo pode ser aplicada alternativamente para a atual queima em caldeiras quase na sua totalidade produzida.

PALAVRAS-CHAVE: Digestão anaeróbia, melaço de soja, biogás, reator UASB.

INTRODUÇÃO

A economia brasileira vem se fortalecendo, sendo considerada uma das principais potências econômicas mundiais baseadas na agricultura, produzindo e exportando variados grãos, gramíneas, frutas, entre outros (MAPA, 2015). Por outro lado, com a demanda em ascensão por décadas na industrialização de alimentos e a crescente produção de biocombustíveis de primeira geração, devido à expansão demográfica mundial, uma enorme quantidade de resíduos agroindustriais e subprodutos provindos da alta produtividade agrícola são gerados na mesma proporção em que avançam as fronteiras agrícolas (ONU, 2012).

Dentro desse cenário econômico, a soja é o principal produto da agricultura brasileira, pois é um grão versátil que dá origem a diversos produtos e subprodutos de interesse das agroindústrias, indústrias químicas, farmacêuticas e de alimentos (INCOPA, 2018). De acordo com o relatório trimestral de julho da FIESP (2018),

o Brasil se tornou o maior produtor mundial de soja, com produção de 120,5 milhões de toneladas na safra 2018/19, o principal exportador e o quarto maior consumidor de grãos de soja.

Projeções da FOA (2016) estimam que até 2025, o Brasil será responsável por cerca de 135 milhões de toneladas de grãos de soja por safra. Contudo, a produção de subprodutos sem interesse comercial e resíduos, também serão gerados, pois cerca de 79% da soja produzida no Brasil é destinada para a fabricação de rações animais e tem adquirido importância crescente na alimentação humana, 18% para produção de óleo de soja e 1% é considerado sem destinação (MAPA, 2015).

De acordo com Yang & Yu (2013), com a produção de farelo concentrado de soja (72% de proteína), que é um produto de grande interesse comercial no ramo alimentício, é produzido como subproduto final o melaço de soja, que é o líquido concentrado remanescente da extração com etanol do farelo de soja. Para cada 1 tonelada de farelo de soja, é produzido 768,1 kg de farelo concentrado de soja e 231,9 kg de melaço de soja (SIQUEIRA et al, 2008). Esse subproduto já vem sendo observado por pesquisadores e indústrias devido a sua composição rica em carboidratos (OBENDORF e KOSINA, 2011), sendo estudada como matéria prima para vários processos fermentativos para obtenção de produtos de valor agregado como etanol, ácido lático, goma xantana, ácido málico (SIQUEIRA et al, 2008; SILVA, 2010; LETTI et al, 2012; CHENG et al, 2017), recuperação de lecitina residual (emulsificante) (FERREIRA, 2008) e como fonte de geração de energia para as indústrias, pelo processo de queima em caldeiras.

No entanto, ainda não existem processos consolidados para a utilização do melaço de soja, devido aos polissacarídeos e fibras insolúveis presentes na composição, que necessitam de pré-tratamento para liberação dos monômeros fermentescíveis. Isso gera um aumento significativo de custos no processo industrial e limitaria a sua utilização como matéria prima para fins industriais (CHENG et al, 2017).

Dessa forma, com a expansão da produção e consumo de soja e seus derivados, faz-se necessário a destinação correta desses subprodutos ainda sem perspectivas de mercado, que é o caso do melaço de soja, que pode ser utilizado como substrato em processo biológico de digestão anaeróbia para a geração de biogás.

Com a crescente procura de fontes energéticas renováveis e na preocupação em diminuir a dependência de processos que gerem energia a partir de combustíveis fósseis, o processo de DA tem sido amplamente aplicado para conversão de resíduos orgânicos provindos de diversas fontes e prontamente biodegradáveis em biometano, que é então utilizado como fonte de energia, gerando calor e eletricidade (KAMDEM et al., 2011). DA é um bioprocessos em que o resíduo orgânico é biodegradado em biogás por um complexo de micro-organismos em um sistema livre de oxigênio; o biogás como produto, consiste principalmente de metano e dióxido de carbono (ABUDI et al, 2016).

De acordo com Evans et al. (2010), a energia gerada a partir da digestão anaeróbia apresenta diversas vantagens em relação a outras energias renováveis, como por exemplo o armazenamento do biogás que pode ser feita ao contrário da energia eólica ou solar, as quais a capacidade de geração de energia pode oscilar dependendo das condições de suas fontes específicas. Em termos de bioenergia, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia é um processo bem conhecido, aplicado em muitas instalações de tratamento de resíduos em grande escala, com baixo custo de operação e necessidades energéticas.

Dessa forma, tem-se utilizado reatores anaeróbios, em especial o reator (UASB), devido as suas vantagens no tratamento de diversos tipos de águas residuárias, permitindo a produção de biogás na maioria dos casos. Nas últimas décadas, o reator UASB vem sendo amplamente utilizado em escala plena no tratamento de diversos tipos de águas residuárias, sendo encontrado em várias indústrias que fazem seu próprio tratamento de efluentes ou parte dele (LI et al., 2014).

Uma característica interessante do UASB é o seu desempenho na manutenção de concentrações elevadas de biomassa, podendo reter os micro-organismos em forma de grânulos, flocos ou biomassa suspensa na sua parte inferior (CHERNICHARO, 1999). De acordo com Liu et al. (2015), a efetiva formação de grânulos pode melhorar significativamente a capacidade dos reatores UASB de tratar altas concentrações de matéria orgânica, além de ter uma versatilidade em tratar diversos substratos, inclusive compostos recalcitrantes ou tóxicos.

A Literatura até o momento não relata a utilização de melaço de soja para produzir biogás pelo processo de digestão anaeróbia. Portanto, este trabalho evidencia a aplicação do reator anaeróbio (UASB) cuja tecnologia é consolidada para um subproduto agroindustrial ainda não estudado para produção de biogás.

METODOLOGIA

Aparato experimental e Medidor de Biogás:

O aparato experimental foi instalado no Laboratório do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) dentro do Instituto de Química - UNESP/Araraquara (SP). A pesquisa foi realizada para avaliar o desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais (Fases 1 a 6) para produção de biogás, bem como o efetivo tratamento do substrato a base de melaço de soja. Na Tabela 1 estão apresentadas todas as Fases operacionais em termos de concentração de substrato (Demanda Química de Oxigênio - DQO) e tempo de detenção hidráulico (TDH). Vale ressaltar que a Fase 1, devido ao melaço ser ainda um produto não aplicado para o tratamento biológico anaeróbio, foi considerada como uma etapa de adaptação do inóculo (lodo anaeróbio) ao substrato alimentado ao reator UASB (500 mgDQO_{Total}.L⁻¹ e TDH de 48h).

Tabela 1. Condições operacionais aplicadas ao reator UASB.

Fases Operacionais	DQO (mg.L ⁻¹)	TDH (h)	Duração (dias)
1	500	48	52
2	1.000	48	21
3	2.000	48	16
4	2.000	24	14
5	4.000	24	19
6	4.000	12	12

O reator UASB construído em acrílico possuía uma altura total de 82 cm, sendo o corpo principal do reator, destinado à manta de lodo com 60,2 cm de comprimento e 12,25 cm de diâmetro. A parte superior, logo acima do corpo principal o comprimento era de 19,2 cm e 18,62 cm de diâmetro, perfazendo o volume total do reator de 12 L (Figura 1). A alimentação do reator foi realizada por bomba dosadora (EMEC/HCE 2001), sendo o substrato armazenado em recipiente de vidro de 20 L.

O separador trifásico (gás-liquido-sólido) foi alocado na região superior do reator no formato de cone invertido e interligado ao selo hidráulico (Erlemmeyer – 1,0L). A medida de produção de biogás foi realizada por meio de deslocamento de líquido em um tubo de vidro em formato de “U” acoplado ao selo hidráulico do UASB. O sistema de medição foi construído para atender a necessidade de mensurar o volume de biogás gerado no reator UASB entre 120 a 3.500 mL.d⁻¹, sendo estes valores relativos as concentrações de DQO mínima e máxima (500 e 4.000 mg.L⁻¹) previstas para o experimento dentro do cálculo teórico de produção de biogás proposto por Chernicharo (2007).

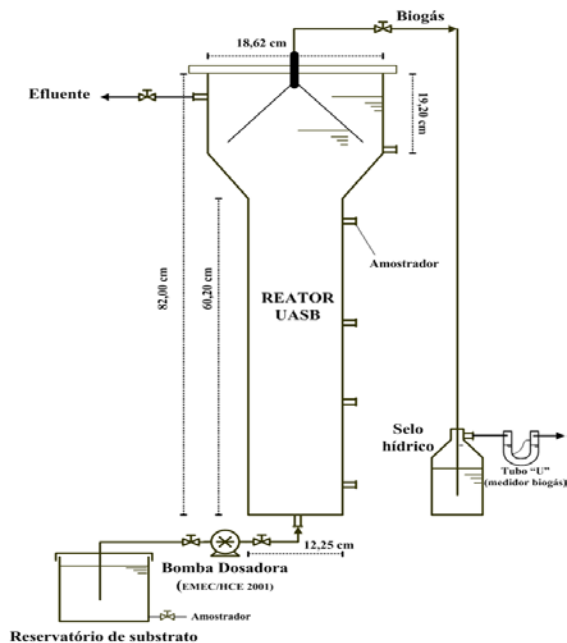


Figura 1. Reator UASB utilizado no experimento.

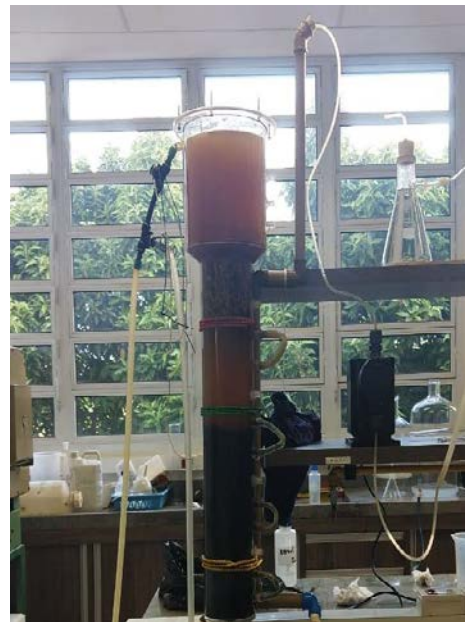


Figura 2. Foto do Reator UASB.

Este tubo em formato de “U” faz parte do medidor de biogás que foi confeccionado de acordo as referências de Neto et al. (2014) e Falk (2011), com adaptações para melhor se adequar ao trabalho realizado. Nesse tubo em forma de “U” (Figura 2) havia uma conexão entre os seus vasos, chamada de válvula hidráulica, em forma de “J”. Este tubo foi preenchido com líquido (KI - iodeto de potássio) para exercer funções selante e ponte salina. Nele foram ainda inseridos dois eletrodos de titânio separados fisicamente utilizados como eletroválvulas e ligados a uma placa “*Arduíno*”. Tal placa consiste de uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto com interface amigável, hardware e software de fácil utilização. A Figura 3 ilustra esquematicamente o medidor de biogás.

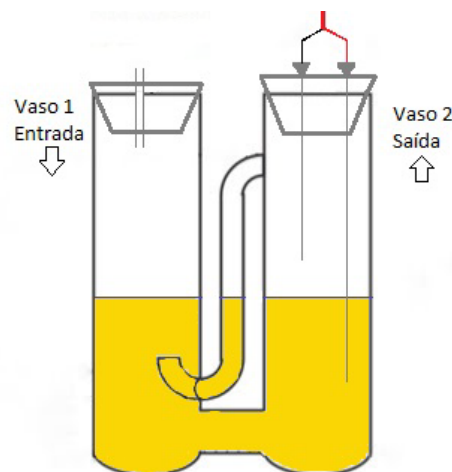


Figura 3. Esquema do medidor de biogás em tubo em “U”.

Fonte: Neto et al. (2014) com adaptações.

Essa configuração de vasos comunicantes permite mensurar o volume de biogás produzido a partir do princípio de deslocamento de líquido. A saída do selo hidráulico foi ligada ao medidor na entrada do vaso 1 do tubo em “U”, o qual era vedado para a atmosfera. A pressão crescente exercida pelo biogás no vaso 1 proporcionou o deslocamento da coluna de líquido no interior do tubo até entrar em contato com os eletrodos, os quais foram alocados no vaso 2 (aberto para a atmosfera). No caso, quando o líquido atingiu os eletrodos, simultaneamente

ocorria a recirculação pela válvula hidráulica (“J”) e um volume fixo de biogás era liberado para a atmosfera pela mesma válvula e o sistema voltava ao equilíbrio, ou seja, mesmo volume de líquido nos vasos do tubo em “U”. Assim, o sistema estava pronto para o próximo ciclo de deslocamento, sendo o ciclo completo estipulado para o deslocamento de 2,5 mL no tubo “U”.

A partir do simples contato do líquido com os eletrodos, a plataforma “Arduíno” fazia o controle eletrônico registrando cada ciclo. A calibração do sistema de medição foi feita conforme proposto por Neto et al. (2014), sendo a vazão de biogás máxima e mínima definidas entre 0,1 e 70 mL.min⁻¹, respectivamente.

Melaço de Soja

O melaço de soja “*in natura*” utilizado no experimento foi cedido pelo Grupo Caramuru de Alimentos S/A, situada na cidade de Sorriso/MT. Cada grama de melaço apresentou concentração média de 570±33 mgDQO_{Total}.L⁻¹ (8 amostras analisadas), sendo que para atingir as concentrações desejadas (Tabela 1) foi necessário diluir o melaço em água do sistema de abastecimento público. A composição do melaço de soja “*in natura*” está descrita na Tabela 2. Salienta-se que o pH do melaço de soja era de 5,3, por este motivo foi necessário utilizar bicarbonato de sódio (1 g.L⁻¹ até 4 g.L⁻¹) como alcalinizante na alimentação.

Tabela 2. Composição do melaço de soja (“<i>in natura</i>”).		
Composição	Unidades	Concentração (*)
Glicose	g.L ⁻¹	9,4
Frutose	g.L ⁻¹	10,1
Galactose	g.L ⁻¹	4,93
Sacarose	g.L ⁻¹	76,2
Rafinose	g.L ⁻¹	26,19
Estaquiase	g.L ⁻¹	80,6
Cálcio	mg/100mL	24,55
Fósforo	mg/100mL	60,16
Magnésio	mg/100mL	302,97
Potássio	mg/100mL	2.211
Enxofre	g/100mL	0,33
Sódio	mg/100mL	526,7
Cobre	mg/100mL	2,14
Zinco	mg/100mL	4,98
Proteína Bruta	g.kg ⁻¹ (mínimo)	50,0
Extrato Etéreo	g.kg ⁻¹ (máximo)	5,0
Fibra Bruta	g.kg ⁻¹ (máximo)	3,0
Cinza	g.kg ⁻¹ (máximo)	150,0

Fonte: Caramuru Alimentos S.A. (*) Dados não disponíveis para consulta aberta.

Inóculo

O inóculo anaeróbio utilizado para a conversão do melaço de soja era proveniente de um reator UASB utilizado na Estação de Tratamento de Águas Residuárias da Avícola Dacar de (Tietê/SP). A biomassa inoculada era de característica granular cuja concentração de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) foram de 28,5 g.L⁻¹ e 24,4 g.L⁻¹, respectivamente. O volume inoculado de biomassa foi de 1/3 do volume útil do reator UASB (3,5 L).

Análises de Monitoramento

Para o acompanhamento do desempenho da unidade de tratamento foram coletadas amostras do afluente e efluente do reator e realizadas as análises de Demanda Química De Oxigênio (DQO) bruta e filtrada (membrana de fibra de vidro de 1,2 µm), Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), Alcalinidade

a Bicarbonato (AB) e Ácidos Voláteis Totais (AVT). Além do acompanhamento de produção de biogás avaliou-se a temperatura ambiente, vazão de alimentação e pH. A frequência das análises e suas respectivas referências estão demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis analisadas e frequência de análises físico-químicas.

Variáveis	Frequência	Método	Referência
pH	Três vezes/semana	4500 H+B	APHA (2005)
Vazão	Três vezes/semana	Proveta graduada e cronômetro	-
Produção	Diária	Deslocamento de líquido	Neto et al (2014); Falk (2011)
Temperatura	Três vezes/semana	Termômetro	-
DQO Total/Filtrada	Três vezes/semana	5220-B	APHA (2005)
SST/SSV	Duas vezes/semana	2540-C e 2540-E	APHA (2005)
AB/AVT	Três vezes/semana	Titulométrico	Ripley et al (1986); Dilallo & Albertson (1961)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O monitoramento físico-químico do reator UASB durou 134 dias, sendo este dividido em fases conforme a mudança de concentração do substrato e TDH (Tabela 1). Inicialmente estão apresentados na Tabela 4, os resultados médios (M) e desvio padrão (dp) obtidos das variáveis relativas ao substrato (melaço de soja) nas várias etapas (fases) referentes aos 134 dias de operação da unidade de operação. Já na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos das análises físico-químicas do efluente do reator UASB.

A avaliação do reator foi realizada desde a partida (Fase 1 - 52 dias), sendo mantido em operação com concentração média de $515 \pm 80 \text{ mgDQO}_{\text{Total}} \cdot \text{L}^{-1}$ e $384 \pm 92 \text{ mgDQO}_{\text{Filtrada}} \cdot \text{L}^{-1}$ e o TDH era superior (48 h) a outros de etapas subsequentes, cujo intuito específico foi a adaptação da biomassa inoculada ao substrato alimentado ao reator. Vale ressaltar que o período de partida é crucial para o estabelecimento específico da população microbiana necessária ao tratamento anaeróbio. Em relação à eficiência de remoção em termos de DQO durante esse período, o efluente apresentou valores médios de $107 \pm 23 \text{ mgDQO}_{\text{Total}} \cdot \text{L}^{-1}$ e $75 \pm 18 \text{ mgDQO}_{\text{Filtrada}} \cdot \text{L}^{-1}$, o que corresponde as médias de 79% ($\text{DQO}_{\text{Total}}$) e 85% ($\text{DQO}_{\text{Filtrada}}$). A respeito das frações sólidas presentes no sistema, o afluente apresentou valores médios de $71 \pm 46 \text{ mgSST} \cdot \text{L}^{-1}$ e $81 \pm 38 \text{ mgSSV} \cdot \text{L}^{-1}$, e o efluente $32 \pm 15 \text{ mgSST} \cdot \text{L}^{-1}$ e $33 \pm 7 \text{ mgSSV} \cdot \text{L}^{-1}$. Os reduzidos valores de sólidos suspensos presentes no efluente indicaram que o sistema teve reduzida perda de biomassa na fase de adaptação (fase 1) com rápida assimilação do substrato pelo inóculo anaeróbio presente.

Tabela 4. Valores médios (M) e desvio padrão (dp) das variáveis aplicadas ao reator UASB nas várias etapas de operação. CO = carga orgânica.

Variáveis	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp
Tempo operação (dias)	52	21	16	14	19	12
TDH total (h)	48	48	48	24	24	12
Temperatura ambiente (°C)	23±1	25±1	23±2	24±2	24±1	25±1,6
CO _{Aplicada} (kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	0,28±0,02	0,46±0,05	1,0±0,12	1,88±0,10	3,91±0,10	6,98±0,2
DQO _{Total} (mg.L ⁻¹)	515 ±80	947 ±71	1903 ±147	1951 ±278	4038 ±604	4086±511
DQO _{Filtrada} (mg.L ⁻¹)	384 ±92	753 ±88	1506 ±168	1529 ±140	3483 ±669	3569±763
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	147 ±52	172 ±61	234 ±82	371 ±116	950 ±300	1193±302
AVT (mgHac.L ⁻¹)	96 ±27	172 ±68	583 ±96	639 ±80	873 ±141	785±123
pH	7,7	7,6	7,4	7,3	7,5	7,8
SST (mg.L ⁻¹)	71 ±46	127 ±104	276 ±130	186 ±21	298 ±193	323±199
SSV (mg.L ⁻¹)	81 ±38	115 ±93	251 ±131	176 ±24	265 ±164	303±175

Tabela 5. Valores médios (M) e desvio padrão (dp) das variáveis obtidas pelo reator UASB nas várias etapas de operação. CO = carga orgânica.

Variáveis	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp	M±dp
Temperatura líquido (°C)	22±2	24±3	23±2	24±1	25±2	26±1
CO _{Removida} (kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	0,06±0,02	0,09±0,05	0,17±0,12	0,37±0,10	0,87±0,10	2,08±0,01
DQO _{Total} (mg.L ⁻¹)	107 ±23	189 ±42	326 ±100	387 ±88	899 ±340	1219±131
Remoção (%)	79	80	83	80	77	70
DQO _{Filtrada} (mg.L ⁻¹)	75 ±18	146 ±29	230 ±46	243 ±57	683 ±200	1036±200
Remoção (%)	85	84	88	88	83	75
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	201 ±29	309 ±81	653 ±171	942 ±150	1841 ±200	2112±50
AVT (mgHac.L ⁻¹)	81 ±21	177 ±62	228 ±71	259 ±58	272 ±135	219±57
pH	7,6	7,6	7,7	7,6	7,9	7,8
SST (mg.L ⁻¹)	71 ±46	127 ±104	276 ±130	186 ±21	298 ±193	171±14
SSV (mg.L ⁻¹)	81 ±38	115 ±93	251 ±131	176 ±24	265 ±164	154±15

Durante a fase 1 (adaptação) não foi possível afirmar a estabilidade do processo anaeróbio em função da uma efetiva produção de AB e o respectivo consumo de AVT durante o processo. Este fato está relacionado com a presença inicial no substrato de AVT e a introdução de bicarbonato de sódio na alimentação do reator para manter o sistema tamponado. As concentrações médias em termos de AB foram de 147±52 mgCaCO₃.L⁻¹ (afluente) e 201±29 mgCaCO₃.L⁻¹ (efluente) e as concentrações médias de AVT atingiram 96±27 mgHac.L⁻¹ (afluente) e 81±21 mgHac.L⁻¹ (efluente). Os valores médios de pH para afluente e efluente durante a fase 1 foram de 7,7 e 7,6, respectivamente. As médias de temperatura do meio líquido (efluente) chegaram a 22±2 °C. O equilíbrio na concentração de AVT é um indicador do funcionamento adequado de reator anaeróbio em função da atividade das bactérias acidogênicas e arqueas metanogênicas, visto que a inibição do processo anaeróbio por AVT está associada ao pH, pois baixos valores de pH geralmente estão relacionados a altas concentrações de AVT e consequentemente levar à falência do processo (SILVA & NOUR, 2005; KUS & WIESMANN, 1995).

O comportamento das variáveis físico-químicas durante as fases 2 (21 dias), 3 (16 dias), 4 (14 dias), 5 (19 dias) e 6 (12 dias) do reator UASB foi dependente das condições operacionais aplicadas (Tabela 1). Vale salientar que a mudança de condição de operação em cada fase foi feita a partir da constatação da estabilidade do sistema por meio dos parâmetros físico-químicos, principalmente DQO e AVT.

Nas seis fases as eficiências médias de remoção mantiveram-se entre 70 e 83% e de 75 a 88%, tanto para DQO_{Total} como para a $DQO_{Filtrada}$, respectivamente (Tabela 5). Em relação à qualidade do efluente em termos de DQO_{Total} foram obtidos valores médios de $189 \pm 42 \text{ mg.L}^{-1}$ (fase 2), $326 \pm 100 \text{ mg.L}^{-1}$ (fase 3), $387 \pm 88 \text{ mg.L}^{-1}$ (fase 4), $899 \pm 340 \text{ mg.L}^{-1}$ (fase 5) e $1.219 \pm 131 \text{ mg.L}^{-1}$ (fase 6). Conforme pode ser observado na Tabela 5, a comparação nas referidas fases entre os valores médios de DQO_{Total} e $DQO_{Filtrada}$, nota-se apenas diferença acentuada na fase 5 com TDH de 24 h e concentração média afluente de $4.038 \pm 604 \text{ mgDQO}_{Total} \cdot \text{L}^{-1}$. Este fato em parte está relacionado com os valores de SST e SSV no efluente, sendo que nas fases 2, 3 e 4, as baixas concentrações de DQO particulada no efluente, ou seja, relativa à presença de sólidos suspensos, pode indicar alta retenção de sólidos e pouca perda de biomassa.

Quanto ao comportamento de geração de AB e ao consumo de AVT presente no reator, a fim de caracterizar o equilíbrio entre os microrganismos acidogênicos e metanogênicos, foi constatada a partir da fase 3. Portanto, nesta fase a geração de AB e o consumo de AVT foi mais efetiva, com concentrações médias no efluente de $653 \pm 171 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $228 \pm 71 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ (fase 3), $942 \pm 150 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $259 \pm 58 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ na fase 4, $1.841 \pm 200 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $272 \pm 135 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ na fase 5, e $2.112 \pm 50 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ e $219 \pm 57 \text{ mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$ na fase 6. Nesse caso, as respostas aos aumentos de concentrações de substrato (carga orgânica) e redução de TDH foram positivas para o processo anaeróbio. Durante estas fases, o pH do efluente manteve-se entre 7,6 e 7,9 e a temperatura do efluente de 21 a 27 °C.

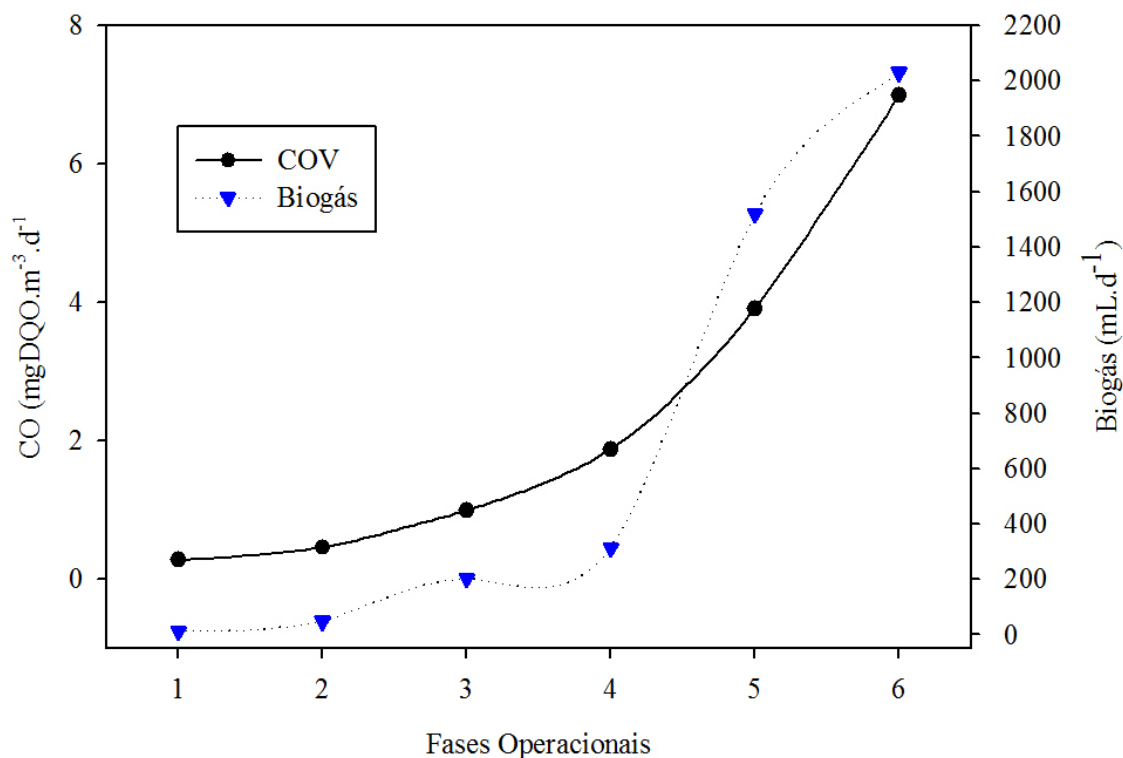
A produção de biogás com a utilização do medidor de tubo “U”, após as calibrações necessárias para o experimento, foi quantificada para as várias fases de operação do UASB, (Tabela 1) demonstrando a viabilidade de tratamento do melaço de soja pela via anaeróbia. Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios, máximos e mínimos de produção de biogás para as fases de operação.

Neste caso, é possível notar que a produção de biogás aumentou de acordo com o aumento da carga orgânica (CO) aplicada em cada fase, entre $0,28 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (fase 1) a $6,98 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ (fase 6), em conjunto com a redução do TDH. Esse fato pode ser levado em consideração, tendo em conta que o abaixamento do TDH aumentou significativamente a produção de biogás em um menor intervalo de tempo e desta forma permitiu a manutenção da elevada eficiência de remoção de carga orgânica no reator. Além disso, foram utilizados de 20 a 320 g de melaço de soja durante o experimento, nota-se que com a quantidade máxima de melaço utilizada (320 g), foi possível produzir quase 3,0L de biogás (tabela 6), o que demonstra o potencial da utilização do melaço de soja para produção de biogás. Na Figura 5 é mostrada a variação temporal da produção de biogás para as várias fases de operação do reator UASB, em função da carga orgânica aplicada.

Tabela 6. Produção de biogás no reator UASB (fases 1 a 6).

Fases	Produção média ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	Produção Máxima ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)	Produção Mínima ($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)
1	12 ± 5	16,5	4,5
2	47 ± 30	90	7,5
3	202 ± 161	447	25
4	313 ± 162	465	135
5	1.519 ± 333	1.822	1.000
6	2.030 ± 1.014	2.747	1.312,5

Figura 4. Variação média da produção de biogás em função da CO aplicada.



CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos, foi possível constatar que o melaço de soja pode ser convertido a biogás pelo processo de digestão anaeróbio em reator UASB de forma satisfatória, em que o aumento da concentração de CO e a redução do TDH fez com que a produção de biogás aumentasse, sem impactar negativamente o sistema. Além disso, a unidade de tratamento demonstrou boa eficiência de remoção de matéria orgânica (melaço de soja). Dessa forma, é possível concluir que o melaço de soja é um substrato conivente para geração de bioenergia de forma sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABUDI, Z.N. et al. Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *Energy*, v. 107, p. 131–140. 2016.
2. APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th edition. Washington. American Public Health Association (Washington). 2005.
3. CHENG, C. et al. Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pullulans* for malic acid production from soybean hull and soy molasses: Fermentation kinetics and economic analysis. *Bioresource Technology*, v. 223, p. 166–174. 2017.
4. CHERNICHARO, C.A.L. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios*. 2 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Belo Horizonte. 1999.
5. CHERNICHARO, C.A.L. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: Politécnica, p. 379. 2007.
6. DILALLO, R., ALBERTSON E. Volatile acids by direct titration. *Journal Water Pollution Control Federation*. Alexandria, v. 33, n. 4, p. 356 – 365. 1961.
7. EVANS, A. et al. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 1419 – 1427. 2010.

8. FALK, H.M. Monitoring the anaerobic digestion process. Tese (Doctor of Philosophy in Biochemical Engineering) – Jacobs University (Bremen). 2011.
9. FAO/OECD. OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025. OECD Publishing (Paris). 2016.
10. FERREIRA, P. Pioneirismo mundial troca resíduos de soja por soluções. *Inovação em Pauta*, v. 3, p. 41-43. 2008.
11. FIESP. Safra Mundial de Soja 2017/18 – 11º Levantamento do USDA. Informativo DEAGRO. Março de 2018.
12. IMCOPA. Texto sobre a soja. Disponível em: <<http://www.imcopa.com.br/index.php>>. Acesso em: 24 de Março de 2019.
13. KAMDEM, L., TOMEKPE, K., THONART, P. Production potentielle de bioéthanol, de biométhane et de pellets a' partir des de'chets de biomasse lignocellulosique du bananier (*Musa spp.*) au Cameroun. *Biotechnol Agron Soc Environ*, v. 15, n. 3, p. 461–73. 2011.
14. KUS, F., WIESMANN, U. Degradation kinetics of acetate and propionate by immobilized anaerobic mixed cultures. *Water Research*, v. 29, n. 6, p. 1437-1443. 1995.
15. LETTI, L.A.J. et al . Ethanol production from soybean molasses by *Zymomonas mobilis*. *Biomass and Bioenergy*, v. 44, p. 80-86. 2012.
16. LI, J., YU, L., YU, D., WANG, D., ZHANG, P., JI, Z. Performance and granulation in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating saline sulfate wastewater. *Biodegradation*, v. 25, p. 127 – 136. 2014.
17. LIU, Y., ZHANG, Y., NI, B. Zero valent iron simultaneously enhances methane production and sulfate reduction in anaerobic granular sludge reactors. *Water Research*, v. 75, p. 292 – 300. 2015.
18. MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento). Projeções do agronegócio: Brasil 2014/15 a 2024/25, Projeções de Longo Prazo. Ed 6. Brasília/DF. 2015.
19. NETO, J.G., SANTOS, V.G., ANDREGUETTO, L.G., LANGE, G.H., SILVA , J.D., VALLE, J.A.B., PINHEIRO, I.G. Quantificação de biogás em reatores anaeróbios através do método de deslocamento de volume de água. *REA – Revista de estudos ambientais (Online)*, v.16, n. 1, p. 45 – 53, jan./jun. 2014.
20. OBENDORF, R.L., KOSINA, S.M. Soluble Carbohydrates in Soybean.T.-B. Ng. Soybean – Biochemistry, Chemistry and Physiology. InTech, p. 201–228. 2011.
21. ONU. Rio +20 o futuro que queremos. Departamento de Informação Pública das Nações Unidas. Rio de Janeiro. 2012.
22. RIPLEY, L.E., BOYLE, W.C., CONVERSE, J.C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. *Journal WPCF*, v. 58, p. 406 – 411. 1986.
23. SILVA, C.R. Remoção de galactooligossacarídeos em melão de soja para obtenção de produtos de interesse industrial. Tese (Doctor Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa. 2010.
24. SILVA, G.H.R., NOUR, E.A.A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 2, p. 268-275. 2005.
25. SIQUEIRA, P.F. et al. Production of bio-ethanol from soybean molasses by *Saccharomyces cerevisiae* at laboratory, pilot and industrial scales. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 8156–8163. 2008.
26. YANG, S.T., YU, M. Integrated biorefinery for sustainable production of fuels, chemicals and polymers. El-Enshasy, H. A. Thongchul N. Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals and Polymers, p. 1–26. 2013.