

II-1166 - ESTABILIDADE E PRODUÇÃO DE METANO EM DIGESTORES ANAERÓBIOS DE VINHAÇA E BIOMASSA DE MICROALGAS.

Agnes Adam Duarte Pinheiro⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pelo Instituto Federal do Ceará (IFCE). Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em tecnologia ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutoranda em Engenharia Civil pela UFPE.

Gabriel Tibérius Andrade Moreira⁽²⁾

Graduando em Engenharia Civil pela UFPE, bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE/BIC/UFPE).

Gisella Marília Santana Araújo⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), bolsista de iniciação científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PIBIC/PROPSQI/UFPE).

Maria de Lourdes Florencio dos Santos⁽⁴⁾

Engenheira Civil, pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em engenharia civil, com ênfase em hidráulica e saneamento, pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Doutora em Ciências Agrícolas e Ambiental, com ênfase em tecnologia ambiental, pela Universidade de Wageningen, Holanda. Professora titular do Departamento de Engenharia Civil da UFPE.

Wanderli Rogério Moreira Leite⁽⁵⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade do Estado do Pará (UEPA). Mestre e doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Endereço⁽¹⁾: Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária - Recife - PE - Brasil CEP: 50670-901 - Tel: (81) 2126-8000 - e-mail: agnes.duarte@ufpe.br

RESUMO

As microalgas são consideradas um substrato de fácil acesso e com grande potencial na recuperação de energia por meio de tecnologias como a digestão anaeróbia. Apesar disso, é de grande conhecimento que a composição da parede celular das microalgas e a baixa relação carbono nitrogênio (C/N) são fatores limitantes para a biodegradabilidade, tornando-a resistente quanto ao processo de hidrólise. Dessa forma, a fim de melhorar a relação C/N e a biodegradabilidade da biomassa algal (BA), utilizou-se a vinhaça de cana-de-açúcar (V) como um cosubstrato para a codigestão anaeróbia, visando um aumento do rendimento de metano (CH₄) e estabilidade do processo. Dessa forma, foi realizada a montagem de um sistema de dois estágios para o experimento de digestão e codigestão de BA e V (50:50) que obteve duração de 203 dias, um reator acidogênico (RA) que possuiu TDH e COV (com base em DQO) de 4 dias e 5,26 kg. m⁻³. d⁻¹ e um reator metanogênico (RM) com TDH e COV de 22 dias e 0,25 kg. m⁻³. d⁻¹. Verificou-se que um sistema de reatores de dois estágios pode ser direcionado para valorização de resíduos orgânicos de difícil biodegradabilidade, portanto, um tipo de pré-tratamento para substratos como a BA, principalmente aliadas a outros tipos de pré-tratamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Reatores de Dois Estágios, Produção de AGV, Estabilidade, Biodegradabilidade

INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por energia renovável e redução dos impactos ambientais, a digestão anaeróbia (DA) aplicada para produção de biogás tem atraído muita atenção na área de biotecnologia, energias renováveis, tratamento e aproveitamento de resíduos. A DA é um processo bioquímico que requer condições anaeróbias e depende da associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano (KUNZ et al., 2019).

Diversos resíduos orgânicos possuem o potencial para gerar energia. As microalgas têm sido consideradas um substrato com potencial energético visto que são ricas em carboidratos, proteínas e lipídios, os quais podem ser convertidos em biogás (AYALA-PARRA et al., 2017). São classificadas como a principal matéria prima

para estruturar a cadeia de biocombustíveis de terceira geração, em decorrência da sua alta eficiência fotossintética, capacidade de crescimento e produção elevadas em relação às culturas tradicionais (MUSSGUG et al. 2010).

Apesar de a DA ser eficiente na degradação de resíduos orgânicos e na produção de metano, as células das microalgas podem apresentar elevada concentração de proteínas (50-60%) que se convertem em amônia (NH_4^+) durante a degradação, podendo ser tóxica para as bactérias metanogênicas, que produzem metano, e desequilibrando a relação carbono/nitrogênio (C/N) ideal para a DA. Além disso, a parede celular das microalgas é geralmente rígida e recalcitrante (PASSOS et al., 2014; YOO et al., 2020). Nestes casos, a inserção de cosubstratos pode ser considerada uma solução para as limitações encontradas na degradação de um único substrato (LI et al., 2017; RODRIGUEZ et al., 2018).

A melhora na eficiência dos digestores anaeróbios ocorre pelo sinergismo da junção de dois substratos, a capacidade de digestibilidade é aumentada em decorrência do balanço de nutrientes e estímulo da produção de enzimas (AJEEJ et al., 2015). A vinhaça, resíduo da produção de etanol, é considerada uma alternativa para a digestão anaeróbia, visto que apresenta alto teor orgânico biodegradável para geração de biogás rico em metano. Portanto, a utilização da biomassa algal em codigestão com a vinhaça para aumento da produção de biogás parece ser uma alternativa promissora para aproveitamento energético destes resíduos, além de reduzir a grande problemática encontrada mundialmente que, no Brasil, é um desafio a ser solucionado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Para além da codigestão empregada no processo da DA, estudos envolvendo os sistemas de dois estágios comprovam o aumento da estabilidade do processo, como também, avanços na produção de metano e eficiência na remoção de matéria orgânica, o que implica afirmar que há uma maior produção de energia em detrimento ao sistema de estágio único e, do ponto de vista ambiental, uma redução da carga poluidora no meio ambiente.

Diante desse cenário, pode-se observar que o processo de codigestão e os sistema de dois estágios estão intimamente voltados ao contexto de biorrefinarias, e a aplicação em conjunto promove o estudo e a viabilidade técnica, econômica e ambiental, como estratégia de redução da disposição de resíduos e recuperação de subprodutos de valor agregado, como o biogás, que posteriormente pode ser aproveitado para recuperação energética a partir do metano.

De forma que constitui uma alternativa para o desenvolvimento sustentável da sociedade atual e futura, enquadrando-se nos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), tais como, ODS 6 "Reduzir à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentar substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente e o ODS 7 "Garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos" (WAINAINA et al., 2020).

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da codigestão anaeróbia de biomassa de microalgas e vinhaça de cana-de-açúcar em sistemas de reatores de dois estágios para fins de produção de gás metano.

MATERIAIS E MÉTODOS

COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS E DO INÓCULO

A biomassa algal (BA) foi coletada em uma lagoa de alta taxa (LAT), localizada na estação de tratamento de esgoto (ETE) Mangueira, em Recife/PE, destinada ao polimento do efluente de reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo tratando esgoto doméstico. A vinhaça (V) da cana-de-açúcar foi coletada em usina de produção de açúcar e etanol, localizada em Vitória de Santo Antão/PE. O lodo anaeróbio utilizado como inóculo foi proveniente de um reator anaeróbio de circulação interna tratando efluente de cervejaria.

A caracterização dos substratos (Tabela 1) foi realizada com relação ao seu potencial hidrogeniônico (pH), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), alcalinidade total e parcial, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017)

Tabela 1: Caracterização dos substratos

Parâmetros	Vinhaça	Biomassa algal
pH	3,7 ± 0,2	6,8 ± 0,2
DQO total (mg O ₂ .L ⁻¹)	25767 ± 115,4	45115,5 ± 103,3
DQO solúvel (mg O ₂ .L ⁻¹)	ND	522,47 ± 2
COT	10949	19172 ± 958
Nitrogênio total kjeldahl (mg. L ⁻¹)	180,6 ± 7	2326,8 ± 4
Nitrogênio amoniacal (mg. L ⁻¹)	7,5 ± 0,8	232,8 ± 8,5
C/N ¹	60,6	8,2
Fósforo total (mg. L ⁻¹)	76,4 ± 3,4	145,5 ± 8,5
Sólidos totais (mg. L ⁻¹)	24972 ± 196,5	51887,5 ± 786
Sólidos voláteis (mg. L ⁻¹)	17704 ± 145,3	34132,5 ± 622
SV/ST (%)	70,8	65,7

O inóculo foi caracterizado e obteve concentração de sólidos totais e voláteis de 4,6 e 3,8 g.L⁻¹, respectivamente, e pH na faixa da neutralidade (7,5).

CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, e constitui-se por um sistema de digestão anaeróbia de dois estágios em escala laboratorial, cada estágio com um reator do tipo mistura completa. O primeiro estágio foi caracterizado como reator acidogênico (RA), com volume útil de 1,8 L, e o segundo estágio caracterizado como reator metanogênico (RM), com volume útil de 2,75 L (Figura 1).

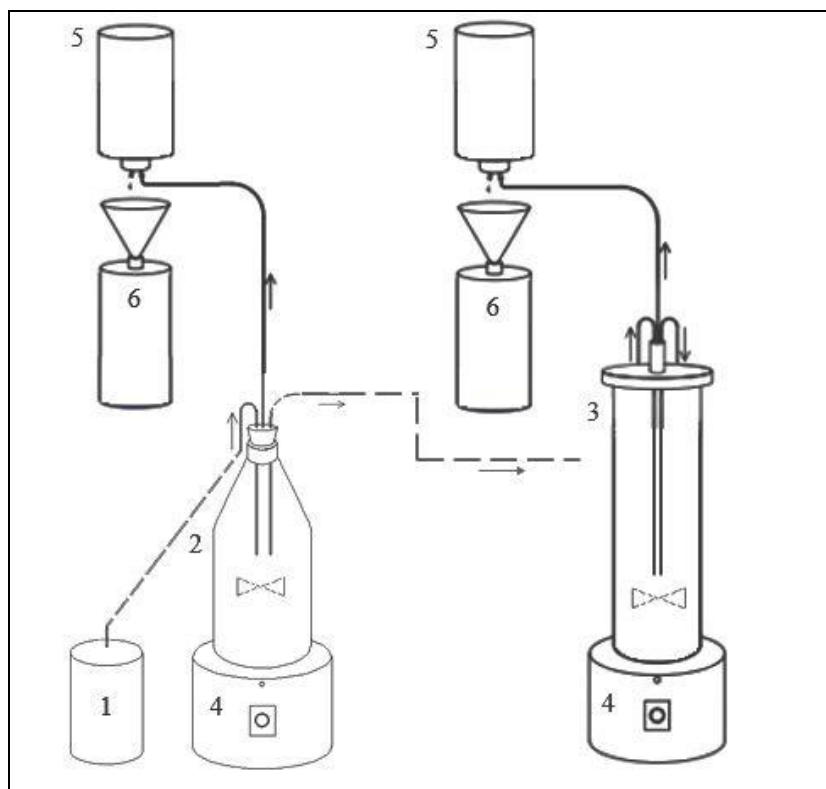


Figura 1: Representação esquemática do sistema semicontínuo de dois estágios (RA e RM). Nota: 1 – Alimentação do RA; 2 - reator acidogênico (RA); 3 – reator metanogênico (RM); 4 – agitador magnético; 5 – frasco mariotte com solução NaOH 3% (m/v); 6 – recipiente para quantificação do biogás; 6 – recipiente com solução NaOH 3% (m/v) para quantificação da evaporação. Nota 2: As setas indicam fluxo alfluente e efluente e saída de biogás de cada reator.

O sistema foi montado em sala termostatzada (30 °C), com mistura realizada por meio de agitação magnética e regime de alimentação semicontínua, realizada 1 vez ao dia, durante 5 dias por semana. O tempo de detenção hidráulico (TDH) adotado para o RA foi de 4 dias e carga orgânica volumétrica (COV) aplicada de 5,62 kg DQO. m⁻³.d⁻¹. O RM teve TDH de 22 dias e COV de 0,25 kg DQO.m⁻³.d⁻¹. Todas as condições experimentais adotadas foram mantidas constantes durante todo o período experimental.

O experimento foi conduzido durante 203 dias dos quais foram divididos em dois períodos, para o primeiro período foi utilizado apenas vinhaça como substrato, o qual obteve duração de 71 dias, e o segundo período foi caracterizado pela adição da BA na alimentação do sistema.

O start-up do RA foi constituído na inoculação a partir da fermentação natural da vinhaça, de modo a promover a adaptação da biomassa que seria introduzida no posterior período. Foram inseridos 1,8 litros de vinhaça ao reator e realizado ajuste de pH para 6,5 utilizando solução de hidróxido de sódio (NaOH) (40% m/v), tornando-se um preparo padrão ao decorrer do experimento.

Para a partida do RM, todo volume útil foi preenchido com inóculo proveniente da cervejaria e a alimentação foi realizada de modo semicontínuo, uma vez ao dia, desde o primeiro dia de operação, com o efluente do reator acidogênico, o líquido fermentado.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROCESSO

Os efluentes foram monitorados de 2 a 3 vezes por semana quanto a sólidos totais e voláteis, demanda química de oxigênio (DQO), ácidos graxos voláteis (AGV), alcalinidade total (AT) e alcalinidade parcial (AP) e

nitrogênio amoniacal. O pH e a produção quantitativa de biogás foram verificados diariamente. Todas as análises, exceto de AGV, foram realizadas de acordo com APHA (2017).

A análise e quantificação dos ácidos foi monitorada por meio de cromatógrafo gasoso com detecção de ionização de chama (GC-FID) (Agilent Technologies 7890A, com coluna J&W GC Column DB-WAXERT 122-7332; 260°C; 30 m 250 μm x 0,25 μm). A produção quantitativa de gás foi verificada em duas etapas, primeiramente por meio de micromedidor de vazão (Ritter Company), em seguida pelo método de deslocamento de solução 3% de hidróxido de sódio (Aquino et al., 2007). Os dados de produção de gás foram processados e apresentados em produção específica de gás para o RA e produção específica de metano para o RM, ambos calculados em função da DQO adicionada. A composição do biogás foi verificada com cromatógrafo gasoso.

RESULTADOS OBTIDOS

AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA

CONDIÇÕES AMBIENTAIS DOS REATORES

Após a autoinoculação do RA foi observado metabolismo fermentativo promovido pelo ajuste do pH do substrato, o qual foi submetido a uma correção para 6,5 na alimentação, conforme Ferraz Jr. et al. (2015), alcançando, conseqüentemente, aumento do pH, que inicialmente encontrava-se em torno de 3,3 e passou a estabilizar-se em $5,2 \pm 0,2$ mantendo-se assim até o início da codigestão (Figura 2a) e, de maneira similar, aumento na concentração de AT durante todo o período, partindo de 430 mg $\text{CaCO}_3\text{L}^{-1}$ no start-up, alcançando valores próximos de 1500 ± 98 mg $\text{CaCO}_3\text{L}^{-1}$ (Figura 2b). Os AGV tiveram aumento contínuo após correção do pH, chegando a um valor máximo de 7800 mg AGV.L⁻¹.

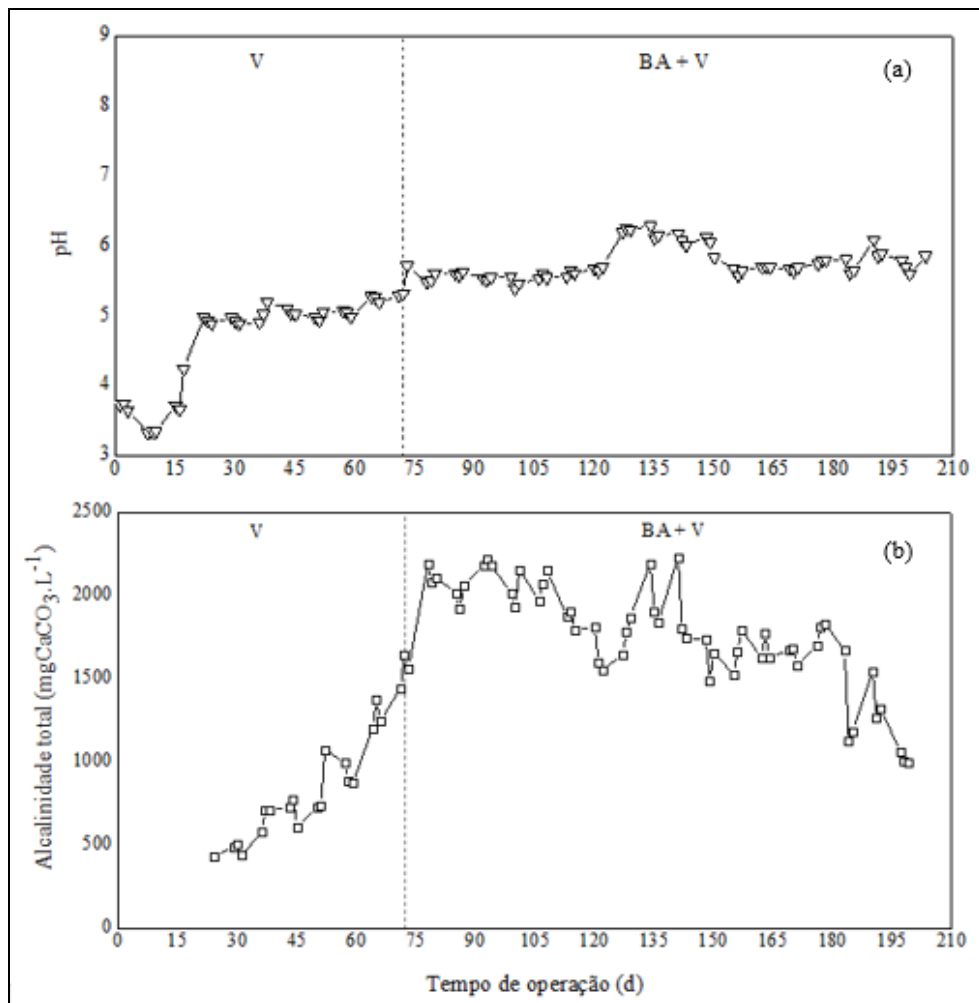


Figura 2: Variáveis de estabilidade do reator acidogênico (RA): (a) pH. (b) alcalinidade total (AT)

A alimentação do RM com o fermentado causou inicialmente acentuada redução no pH (de 8,0 para 6,7) e na AP (de 3855 para 2079 $\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$). Porém, a alcalinidade do inóculo garantiu a estabilidade, recuperando as condições próximas à neutralidade e benéficas para sistemas metanogênicos ($\text{pH} = 7,8$) o que proporcionou à desaceleração da redução do pH e da alcalinidade (Figura 3).

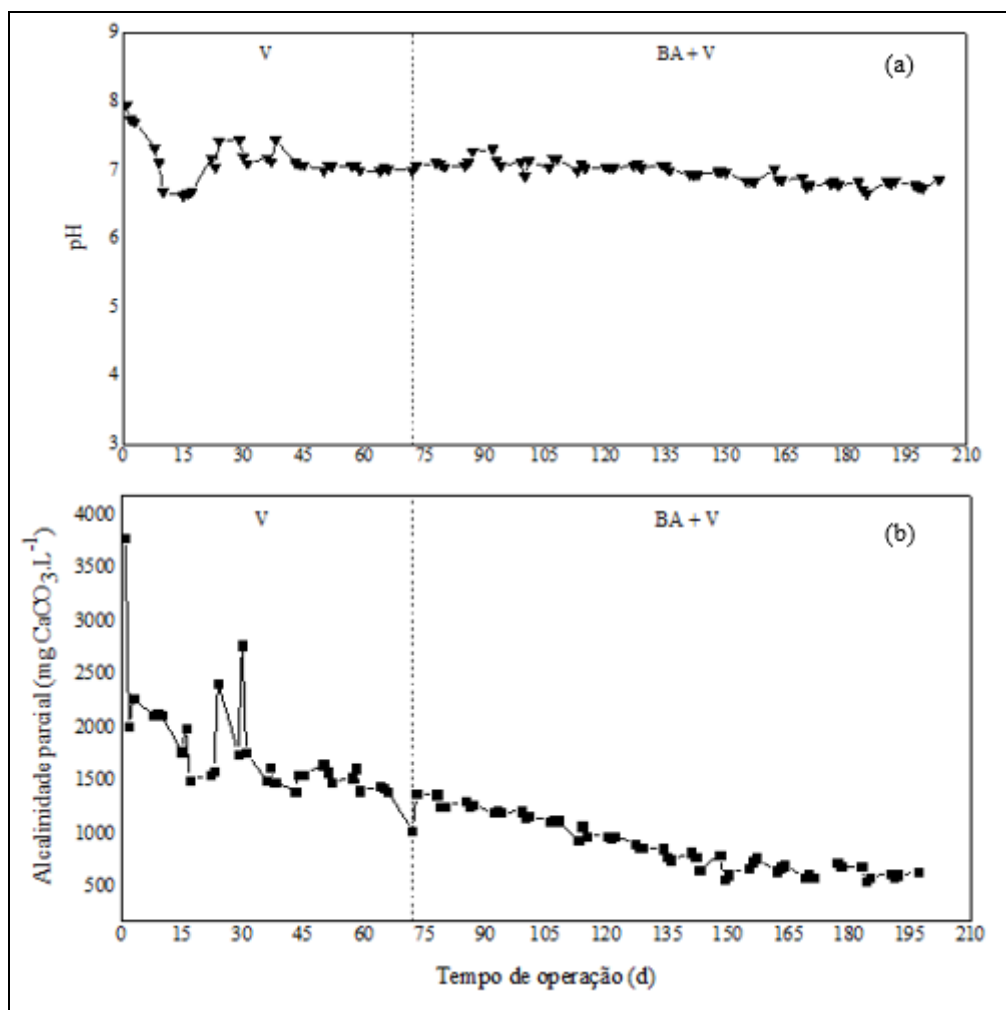


Figura 3: Variáveis de estabilidade do reator metanogênico (RM): (a) pH. (b) alcalinidade parcial (AP)

PRODUÇÃO DE METANO (CH₄)

Não foi observada produção de metano a partir da análise qualitativa do biogás presente no RA no processo de DA de vinhaça. O biogás quantificado só foi detectado a partir do 37º dia de operação, alcançando valores de produção específica de 33 NmL.gDQO⁻¹_{ad} (Figura 4). Após a análise cromatográfica, foi possível verificar que o biogás produzido no período V (DA de vinhaça) foi composto principalmente por dióxido de carbono (CO₂), 29,3% ± 7,0 e hidrogênio (H₂), 24,3% ± 7,8%.

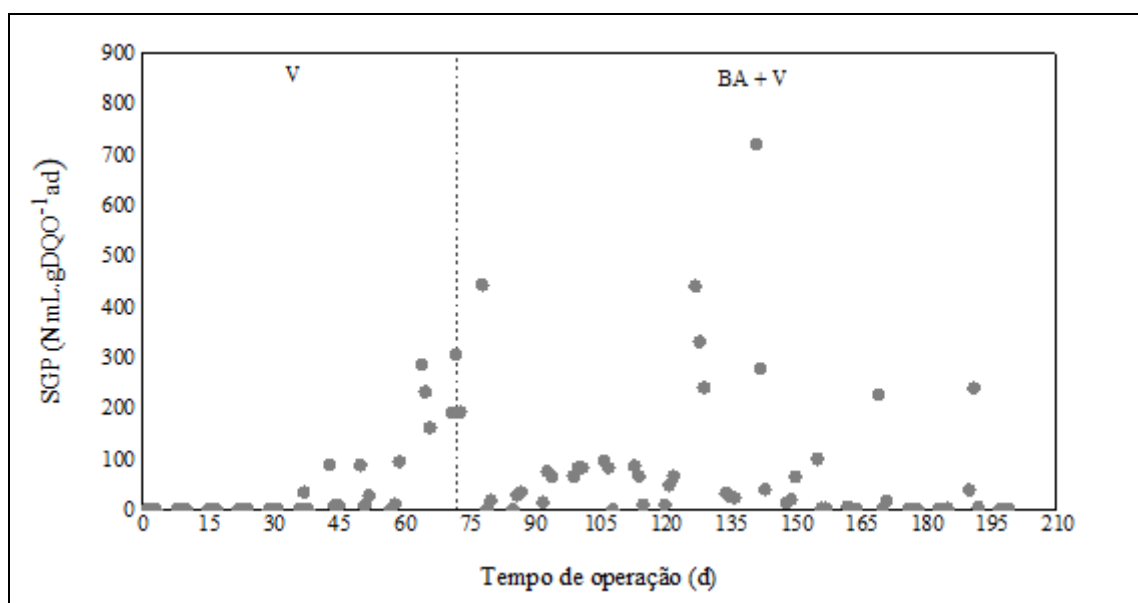


Figura 4: Produção específica de biogás (SGP) no reator acidogênico (RA).

A produção de biogás no RM, de maneira contrária ao que foi observado no RA, foi quantificada desde o start-up dos reatores, mesmo que de maneira instável. No 24º dia foi observada a maior produção de metano em todo o período de DA (V) com um rendimento de $155 \text{ NmL CH}_4.\text{gDQO}^{-1}.\text{ad}$, com valor médio de produção específica de $71 \pm 30 \text{ NmL CH}_4.\text{gDQO}^{-1}.\text{ad}$ (Figura 5), referente ao mesmo período (DA de vinhaça) observou-se que 61% do biogás produzido era composto por CH_4 .

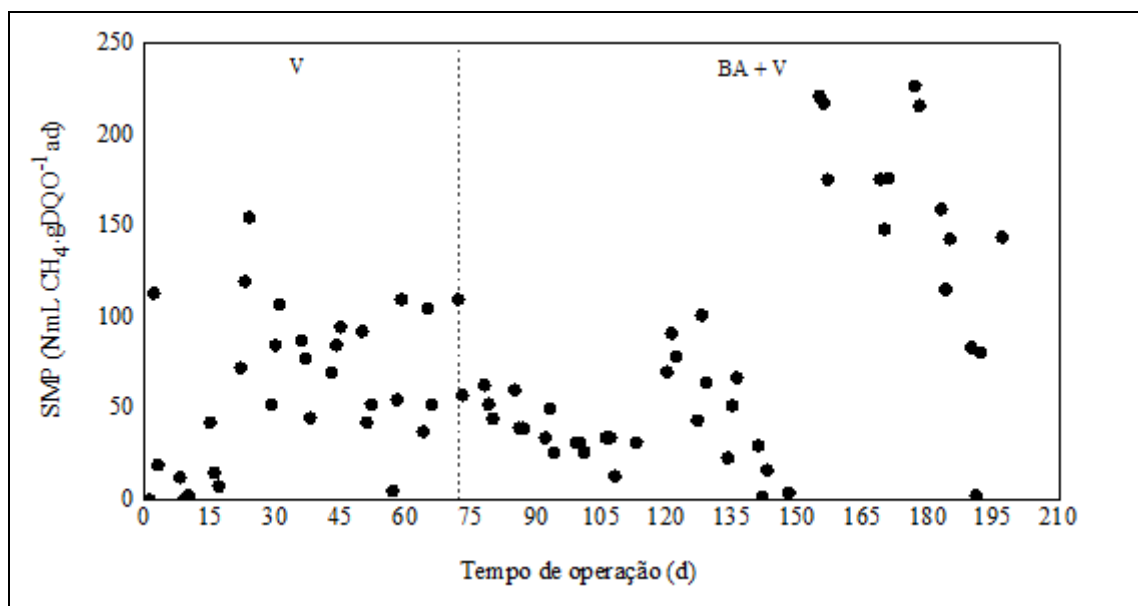


Figura 5: Produção específica de metano (SMP) no reator metanogênico (RM).

AVALIAÇÃO DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DA VINHAÇA E BIOMASSA ALGAL

CONDIÇÕES AMBIENTAIS DOS REATORES

A codigestão (BA + V), iniciada no 72º dia operacional resultou em uma pequena alteração do pH efluente, apresentando valores em torno de $5,5 \pm 0,2$ (Figura 2a), referente à característica de um pH mais próximo a neutralidade da BA, o qual foi mantido por um período de aproximadamente 50 dias. Após esse período de

estabilidade, foi observado instabilidade, sendo observadas alterações caracterizadas com aumento do pH efluente, condição diferente ao que estava sendo observado, alcançando valor médio de 6,2 por um período de 5 TDHs. Dessa forma, foi necessário realizar a interrupção da correção do pH do cosubstrato para 6,5, com isso, o pH efluente voltou a apresentar uma condição mais estável e favorável a acidogênese, similar ao que havia sido encontrado anteriormente ($5,5 \pm 0,2$) (Figura 2a).

Além do pH, após o período mais estável do RA na DA da V (início da codigestão), a AT também apresentou mudanças, alcançando valores próximos de $1248 \pm 172 \text{ mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}$ (Figura 2b). A inserção da BA no sistema possibilitou redução na produção de AGV, que anteriormente encontrava-se próximo a $8000 \text{ mg AGV.L}^{-1}$, para concentrações próximas a $5500 \text{ mg AGV.L}^{-1}$, as quais mantiveram-se estáveis por um período de 40 dias. Na sequência, os ácidos mantiveram-se instáveis, coincidente com a elevação do pH e redução da AT.

A alcalinidade do RM decresceu em redução estável, com AP de $1450 \text{ mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}$ no início da codigestão (72º dia) e $708 \text{ mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}$ ao final do experimento (203º dia). Apesar de o efeito imediato ter refletido no aumento de 0,3 nos primeiros 20 dias, o pH acompanhou a alcalinidade, decrescendo de 7,3 a 6,5.

PRODUÇÃO DE METANO (CH_4)

No período de codigestão o RA manteve-se com comportamento semelhante ao período de DA da vinhaça, em que não apresentou novamente produção de metano. Na codigestão (BA + V), a produção média de biogás foi de aproximadamente $86 \text{ NmL.gDQO}^{-1}\text{ad}$ com dispersão muito elevada em alguns períodos e composição qualitativa em dióxido de carbono.

A codigestão causou inicialmente instabilidade em termos de produção de metano, em que foi possível perceber um decréscimo no SMP em comparação ao que estava sendo alcançado, ou seja, foi observado rendimento médio de $39 \pm 14 \text{ NmL CH}_4\text{.gDQO}^{-1}\text{ad}$ por um período de aproximadamente 2 TDHs. Porém, a partir do 150º dia operacional foi observada estabilização da produção de metano com valor médio de $176 \pm 37 \text{ NmL CH}_4\text{.gDQO}^{-1}\text{ad}$, além de ter sido quantificado um rendimento máximo de $230 \text{ NmL CH}_4\text{.gDQO}^{-1}\text{ad}$. A análise cromatográfica também apresentou composição semelhante à fase de DA da V, com 61% de presença de CH_4 no biogás.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na etapa de codigestão, a elevação do pH do RA foi corrigida com o interrompimento da correção do pH do cosubstrato, a fim de impulsionar atividade das bactérias hidrolíticas e continuar o processo de fermentação e maior produção dos ácidos, o que foi alcançado retornando o pH ao valor favorável até o fim da fermentação.

A alta concentração de AGV levaram à acidificação e à diminuição da AT no RA, ficando abaixo de $1900 \text{ mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}$ a partir do dia 114. A instabilidade do RA é indicada por do SGP e da produção de AGV, que pode ser explicada pelo consumo da AT, acentuada pela baixa biodegradabilidade da BM e pela baixa COV empregada para um reator acidogênico, com valor mínimo indicado por Voelklein et al., (2016) em torno de $6 \text{ kg DQO.m}^{-3}\text{.d}^{-1}$ e valor ótimo de $15 \text{ kg DQO.m}^{-3}\text{.d}^{-1}$ quando realizou estudo da influência da COV sobre a solubilização de produtos da fermentação, AGV e etanol, em reator de primeiro estágio tratando resíduos alimentares.

A ausência de produção de CH_4 no RA se deve às condições operacionais mais favoráveis à acidogênese, que foram adotadas para o primeiro reator, como um pH na faixa mais ácida (entre 5,0 e 6,0) e TDH mais curto, o que dificulta o metabolismo da comunidade metanogênica, caso esteja presente no reator ou até mesmo nos substratos utilizados. A exigência para produção de hidrogênio por bactérias fermentativas é que os substratos sejam ricos em hidratos de carbono, que haja comunidade que contemple as etapas da conversão e que os processos inibitórios sejam controlados, entre eles consumidores de H_2 e bactérias do ácido láctico, íons de metais leves e pesados, derivados de furano e compostos fenólicos (BUNDHOO; MOHEE, 2016). Uma vez que a vinhaça é rica em carboidratos e o RA foi autoinoculado, as exigências foram atendidas, o que explica a produção de H_2 . A produção de hidrogênio em reator acidogênico também foi registrada por Shen et al., (2013) na codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e vegetais com resíduos alimentares em sistema de dois estágios.

A redução do rendimento de metano no início da codigestão, mesmo com concentrações elevadas de AGV no fermentado afluente ao RM, indica que a microbiota sofreu com a inserção da BA e teve o metabolismo reduzido até adaptar-se. A partir do 150º dia operacional constatou-se que a comunidade microbiana estava mais adaptada ao novo cosubstrato e passou a valores expressivos de SMP, com média de $176 \pm 37 \text{ NmL.CH}_4 \cdot \text{gDQO}^{-1}_{\text{ad}}$.

A produção encontrada no presente estudo apresentou-se superior ao encontrado por Tena et al., (2021), na codigestão de vinhaça com lodo de esgoto (proporção 50:50) em sistema semicontínuo de dois estágios com COV de $3,0 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ e TDH de 20 dias. Valores inferiores a este trabalho também foram encontrados por Olsson et al., (2018), em torno de $100 \pm 27 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{gDQO}^{-1}_{\text{rem}}$, na codigestão de microalgas com lodo de esgoto em sistema semicontínuo de dois estágios com COV de $4,8 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ e TDH de 15 dias. Llamas et al., (2021) apresentou valor médio de rendimento de metano de $169 \pm 24 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{gDQO}^{-1}_{\text{ad}}$ na DA de microalgas em sistema semicontínuo de dois estágios com aplicação de COV de $1,5 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ e TDH de 20 dias.

CONCLUSÕES

A codigestão anaeróbia de biomassa algal e vinhaça em sistema semicontínuo de dois estágios apresenta resultados satisfatórios em termos de rendimento de metano, maiores inclusive do que o encontrado para a codigestão de biomassa algal ou de vinhaça, com outros resíduos orgânicos em sistema de dois estágios e de estágio único.

A configuração utilizada (sistema de dois estágios) é favorável para a produção e acúmulo de ácidos no reator de primeiro estágio, o que possibilita melhores condições ambientais em ambos os reatores utilizados, beneficiando o rendimento de metano.

A alcalinidade total do reator acidogênico tende a reduzir com a continuidade da fermentação dos cosubstratos, o que requer monitoramento contínuo e adição de alcalinidade se necessário para manutenção da concentração na faixa ideal. Com a continuidade do aporte de AGV no reator metanogênico, a alcalinidade parcial tende a diminuir, afetando diretamente o pH e reduzindo este também, exigindo acompanhamento constante e acréscimo de alcalinidade se necessário.

Carga orgânica volumétrica maiores podem favorecer a eficiência de hidrólise e consequente produção de AGV em reator acidogênico, gerando maior estabilidade para essa produção. Sobretudo para aumentar a atividade enzimática hidrolítica que atua sobre a parede celular recalcitrante de baixa biodegradabilidade das microalgas, sugere-se o estudo de outros meios de pré-tratamentos a serem utilizados para facilitar a hidrólise da BA.

A codigestão anaeróbia de biomassa algal e vinhaça com proporções diferentes entre os dois cosubstratos, sobretudo proporções menores de biomassa, pode ser benéfica em termos de rendimento de metano. Sugere-se, portanto, o estudo mais aprofundado de demais combinações em trabalhos posteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AJEEJ, A.; THANIKAL, J. V.; NARAYANAN, C. M.; KUMAR, R. S. An overview of bio augmentation of methane by anaerobic co-digestion of municipal sludge along with microalgae and waste paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 270-276, Oct. 2015.
2. APHA, AWWA, and WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 25th ed. Baltimore: Port City Press, 2017.
3. AYALA-PARRA, P., LIU, Y., FIELD, J. A., SIERRA-ALVAREZ, R. Nutrient recovery and biogas generation from the anaerobic digestion of waste biomass from algal biofuel production. *Renewable Energy*, v. 108, p. 410-416, Aug. 2017.
4. BUNDHOO, M. A. Z.; MOHEE, R. Inhibition of dark fermentative bio-hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 16, p. 6713– 6733, 4 maio 2016.

5. FERRAZ JÚNIOR, A. D. N.; ETCHEBEHERE, C.; ZAIAT, M. Mesophilic hydrogen production in acidogenic packed-bed reactors (APBR) using raw sugarcane vinasse as substrate: Influence of support materials. *Anaerobe*, v. 34, p. 94–105, 1 ago. 2015.
6. KUNZ, A. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato- Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.
7. KIANI, Mostafa Kiani Deh et al. Different bioreactor configurations for biogas production from sugarcane vinasse: A comprehensive review. *Biomass and Bioenergy*, v. 161, p. 106446, 2022.
8. LI, R.; DUAN, N.; ZHANG, Y.; LIU, Z.; LI, B.; ZHANG, D.; LU, H.; DONG, T. Co-digestion of chicken manure and microalgae *Chlorella* 1067 grown in the recycled digestate: Nutrients reuse and biogas enhancement. *Waste Management*, v. 70, p. 247-254, Dec. 2017.
9. LLAMAS, M. et al. Tuning microbial community in non-conventional two-stage anaerobic bioprocess for microalgae biomass valorization into targeted bioproducts. *Bioresource Technology*, v. 337, p. 125387, 1 out. 2021.
10. M.A. Voelklein, A. Jacob, R. Oâ€™™ Shea, J.D. Murphy. Assessment of increasing loading rate on two-stage digestion of food waste, *Bioresource Technology*, Volume 202, 2016, Pages 172-180, ISSN 0960-8524.
11. MUSSGUG, J. H.; KLASSEN, V.; SCHLÜTER, A.; KRUSE, O. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of Biotechnology*, v. 150, n. 1, p. 51–56, 2010.
12. OLSSON, J. et al. Anaerobic co-digestion of sludge and microalgae grown in municipal wastewater – a feasibility study. *Water Science and Technology*, v. 77, n. 3, p. 682–694, 12 fev. 2018.
13. PASSOS, F., ASTALS, S., & FERRER, I. (2014). Anaerobic digestion of microalgal biomass after ultrasound pretreatment. *Waste Manag.*, 34(11), 2098-2103
14. RODRIGUEZ, C. et al. Waste paper and macroalgae co-digestion effect on methane production. *Energy*, v. 154, p. 119–125, 1 jul. 2018.
15. TENA, M.; PEREZ, M.; SOLERA, R. Effect of hydraulic retention time on the methanogenic step of a two-stage anaerobic digestion system from sewage sludge and wine vinasse: Microbial and kinetic evaluation. *Fuel*, v. 296, p. 120674, 15 jul. 2021.
16. VOELKLEIN, M. A. et al. Assessment of increasing loading rate on two-stage digestion of food waste. *Bioresource technology*, v. 202, p. 172-180, 2016.
17. WAINAINA, S. et al. Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*, v. 301, p. 122778, 1 abr. 2020.
18. YOO, C. G., MENG, X., PU, Y., & RAGAUSKAS, A. J. (2020). The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review. *Biores. Technol.*, 301, 122784.