



Análise da partida de um protótipo de biodigestor anaeróbico mesofílico alimentado por efluente de fecularia

Startup analysis of a mesophilic anaerobic digester prototype fed by starch effluent

Geovanny Broetto Bisinella¹, Matheus Vitor Diniz Gueri², Samuel Nelson Melegari de Souza¹, Armin Feiden³, Maritane Prior¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Cascavel, Paraná, Brasil

² Universidade Federal Integração Latino - Americana - UNILA, Foz do Iguaçu, Brasil

³ Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil

Contato: maritane.prior@unioeste.br

Palavras-Chave

biogás
biometano
digestão anaeróbia
mandioca

RESUMO

As indústrias de fécula de mandioca geram efluentes que, estabilizados em lagoas, desperdiçam o potencial de geração de biogás e poluem o meio ambiente. Assinalando mudar essa realidade, a pesquisa foi desenvolvida em um protótipo de reator anaeróbico monofásico de mistura completa, alimentando com efluente de fécula de mandioca. O protótipo de biodigestor anaeróbico de 408 L foi desenvolvido com mecanismos de agitação e controle de temperatura e foi operado em modo de alimentação contínuo. Foram verificados os parâmetros: sólidos, pH, Litro de metano por grama de Demanda Química de Oxigênio (DQO) consumida, ácidos graxos voláteis (AGV), alcalinidade total (AT), relação acidez volátil e alcalinidade total (AV/AT), açúcares redutores totais (ART) e carga orgânica. Após a partida do processo de digestão anaeróbia foi elevando-se gradativamente a carga orgânica no biodigestor, respeitando os limites aceitáveis representados relações AV/AT e pH. A produção de metano alcançou 1,26 LCH₄ por L de efluente, destaca-se também a produção de metano específica, alcançando 0,14 LCH₄ por gDQO consumida, 0,16 LCH₄ por gSV consumida e 0,18 LCH₄ por ART consumida. Além disso, a remoção média de matéria orgânica foi bastante eficaz, com taxas de remoção de 60% para DQO, 45% para SV e 75% para ART. Para manter a estabilidade operacional, foram necessárias três (3) etapas para ajustar a carga orgânica de alimentação, mantendo a relação AV/AT em 0,34, dentro da faixa ideal para operação (0,1 a 0,5). Esses resultados evidenciam a viabilidade técnica e ambiental dos biodigestores anaeróbicos no tratamento de efluentes industriais de fécula de mandioca, transformando resíduos em uma valiosa fonte de energia renovável. O estudo destaca-se por sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e energética da indústria, oferecendo uma solução eficiente para redução de resíduos e aproveitamento energético.

Keyword

biogas
biomethane
anaerobic digestion
cassava

ABSTRACT

Cassava starch industries generate effluents that, stabilized in ponds, waste the potential for biogas generation and pollute the environment. Signaling to change this reality, the research was developed in a prototype of a single-phase anaerobic reactor of complete mixture, feeding with cassava starch effluent. The 408 L anaerobic biodigester prototype was developed with agitation and temperature control mechanisms and was operated in continuous feeding mode. The following parameters were verified: solids, pH, Liter of methane per gram of Chemical Oxygen Demand (COD) consumed, volatile fatty acids (VFA), total alkalinity (TA), volatile acidity and total alkalinity (VA/TA), total reducing sugars (TRS) and organic load. After the start of the anaerobic digestion process, the organic load in the biodigester was gradually elevated, respecting the acceptable limits represented AV/AT and pH relationships. Methane production reached 1.26 LCH₄ per L of effluent, also stands out the production of specific methane, reaching 0.14 LCH₄ per gDQO consumed, 0.16 LCH₄ per gSV consumed and 0.18 LCH₄ per TRS consumed. In addition, the average removal of organic matter was quite effective, with removal rates of 60% for COD, 45% for SV and 75% for TRS. To maintain operational stability, three (3) steps were necessary to adjust the organic feed load, maintaining the AV/AT ratio at 0.34, within the ideal range for operation (0.1 to 0.5). These results show the technical and environmental feasibility of anaerobic biodigesters in the treatment of industrial cassava starch effluents, transforming waste into a valuable source of renewable energy. The study stands out for its contribution to the environmental and energy sustainability of the industry, offering an efficient solution for waste reduction and energy use.

Informações do artigo

Recebido: 12 de fevereiro, 2023

Aceito: 18 de abril, 2024

Publicado: 30 de abril, 2024

Introdução

De grande importância, a mandioca é considerada uma das fontes de aquisição de fécula, além de apresentar considerável importância econômica, o cultivo desse gênero apresenta grande acuidade social.

A parte mais significativa da mandioca é a raiz, de onde pode-se extrair o amido, que é adquirida na forma de fécula ou convertida em farinha por processos mecânicos na indústria de agro processamento. Seu processamento gera três grandes tipos de resíduos: sólidos (cascas, folhas, talos), líquidos (manipueira) e emissões atmosféricas (caldeira) (OLAOYE et al., 2020).

Os resíduos gerados no processamento da mandioca têm ocasionado sérias questões ambientais, devido ao manejo e descarte inadequado, tendo a manipueira como o principal deles (FIORDA et al., 2013; CORRÊA FILHO et al., 2017).

A manipueira presente na água residuária do processamento de mandioca, por exemplo, contém altos teores de nutrientes, mas geralmente é descartada erroneamente, causando sérios problemas ambientais, como contaminação do solo e eutrofização de corpos hídricos (BARRETO et al., 2014; AMORIM et al., 2014; ARAUJO et al., 2020; MEIER et al., 2020).

O tratamento e o reaproveitamento dos efluentes do processamento da mandioca quando adequadamente gerenciados, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e aumentar a rentabilidade da atividade, promovem a sustentabilidade.

Os tratamentos de efluentes da produção de farinha e fécula tem destaque através dos sistemas de tratamento biológicos, a exemplo das lagoas facultativas e biodigestores, além de alternativas biotecnológicas que apresentam melhor aproveitamento, como na produção de biocombustíveis e biofertilizantes (BARRETO et al., 2014; AMORIM et al., 2014; DANTAS et al., 2016; GUIMARÃES et al., 2017; AZEVEDO et al., 2020).

Dentre essas biotecnologias, a digestão anaeróbia é uma tecnologia que possibilita o correto gerenciamento destes resíduos com a produção simultânea de biocombustíveis. Segundo Gueri et al. (2021), a digestão anaeróbia é um processo microbiológico natural que interage com os resíduos orgânicos de forma enzimática e metabólica, principalmente convertendo-os em material estabilizado e biogás.

O biogás é uma mistura de gases obtida pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, seu uso vem aumentando devido as diversas iniciativas públicas e privadas, em função de seu aproveitamento energético (KUMAR e SAMADDER, 2020). Desta forma o gasto energético dessas agroindústrias de fecularia pode ser significativamente compensado se elas aproveitarem esse potencial energético.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a partida de um protótipo de biodigestor de mistura completa alimentado por águas residuais de uma fecularia do Oeste do Paraná, visando contribuir para a eficiência na partida e estabilidade.

Material e Métodos

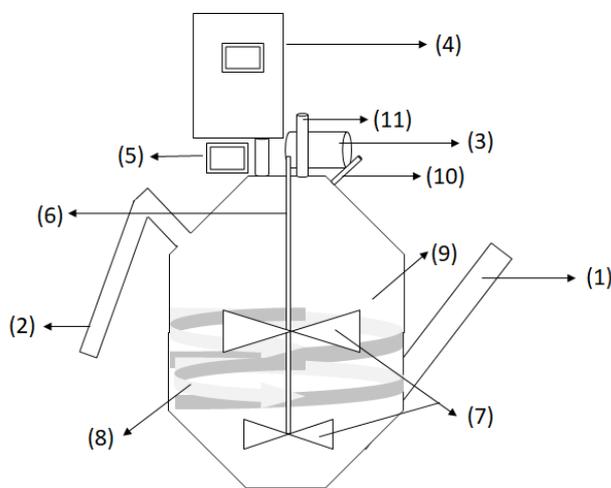
O reator anaeróbio piloto para o tratamento de manipueira foi instalado e operado no Laboratório de Gaseificação situado nas extensões da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *campus* Cascavel.

O desenvolvimento da parte laboral foi realizado no Laboratório de Saneamento, *campus* Cascavel.

Os efluentes foram fornecidos por uma fecularia, localizada na Estrada municipal, s/n, Distrito de Concordia do Oeste, município de Toledo, estado do Paraná, Brasil.

O protótipo de biodigestor anaeróbio utilizado no experimento possui um volume útil de 408 L. Possui um sistema de aquecimento interno e um sistema de agitação mecânica automatizado, conforme é apresentado na Figura 1.

Figura 1. Esquema do protótipo de biodigestor anaeróbio.



Legenda: 1 – Entrada; 2 – Saída; 3 – Motor elétrico; 4 – Painel de controle; 5 – Sensor de temperatura; 6 – Eixo de rotação; 7 – Pás de agitação; 8 – Serpentina interna de aquecimento; 9 – Câmara de digestão; 10 – Saída do Biogás; 11 – Manômetro digital.

Fonte: Autores (2023)

Conforme na Figura 1, o eixo de rotação vertical foi equipado com quatro pás agitadoras, duas na parte inferior e duas na altura intermediária do biodigestor. O eixo é conectado a um motor elétrico com potência de 12 V, acionado por um temporizador durante 15 minutos a cada hora, totalizando 20 acionamentos do agitador por dias, a uma velocidade de 180 rpm, no intuito de promover a homogeneidade da biomassa presente no reator.

As serpentinas internas serviram para conduzir a água aquecida do boiler para dentro do reator promovendo a troca de calor da água com a biomassa e manter a temperatura interna constante a 32 ± 1 °C. A eletrobomba era responsável pela recirculação da água, acionada por sensores de temperatura presentes no painel de controle. Acionada quando o sensor de temperatura alcançava temperaturas abaixo de 31 °C e desativada quando o sensor chegava à média 32 °C. O biogás produzido diariamente era armazenado em um balão de plástico (vinil) com capacidade de 1 m³.

Partida do biodigestor e frequência de alimentação

A partida do processo anaeróbico no biodigestor protótipo foi realizada com o auxílio do efluente de um biodigestor anaeróbico, alimentado por manipueira em operação há mais de 2 anos, localizado na mesma indústria onde foi coletado o efluente para o presente estudo. A inoculação se deu na proporção de 250:158 (v/v) em água e inóculo, respectivamente. Deste modo o percentual de inóculo utilizado na mistura foi acima da recomendação contida na metodologia apresentada por Foster-Carneiro, Perez e Romero (2008), que sugerem que o percentual de 30% do volume útil do digestor deva ser preenchido com inóculo.

A partir disso, arbitrou-se uma baixa carga orgânica, DQO e Açúcares Redutores Totais e monitorou-se o pH e a relação AV/AT. O biodigestor recebeu alimentações diárias de substrato, variando-se apenas as vazões volumétricas que gradativamente tiveram aumento até atingir a estabilidade do processo. Os indicadores para aumento diária de carga orgânica e de estabilidade do processo foram o pH e a relação AV/AT.

Três etapas foram necessárias para alcançar a estabilidade do biorreator: (I) primeira etapa deu-se em 31 dias, a qual ocorreu com a partida do reator sem alimentação diária; (II) segunda etapa a da alimentação inicial durou 31 dias; (III) terceira etapa, a de aumento de carga e estabilidade do reator durou 30 dias. No total foram 92 dias de operação onde alguns dos resultados estão expressos na Tabela 2.

Foram realizadas as coletas e armazenamento em refrigerador a -4 °C para preservar suas características até a realização da alimentação e análises físico-químicas de entrada. As amostras de análises físico-químicas de saída do substrato eram realizadas após homogeneização do substrato através do motor, coletas e armazenadas para posterior caracterização ou ensaios referentes à estabilidade do reator.

Análises físico-químicas e produção de biogás

Para controle de estabilidade do processo de biodigestão, foram realizadas análises de pH, Alcalinidade Total (AT), Acidez volátil (AV), sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), demanda química de oxigênio (DQO) e açúcares redutores totais (ART) conforme a metodologia APHA (2005).

Para a medição da vazão do biogás foi realizada por meio de um medidor de gás natural fabricado pela LAO Industrial® modelo G1, com uma vazão horária máxima e mínima variando entre 2,300 e 0,020 m³, respectivamente.

Foram realizadas 1 análise de gás apenas em cada uma das etapas (I, II e III). As análises qualitativas do biogás foram realizadas através de cromatografia gasosa em sistema Shimadzu® 2010 equipado com coluna capilar Carboxen® 1010 plot (30 m x 0,53 mm x 0,30 µm). Para o gás de arraste foi utilizado argônio com vazão de ar de make-up de 8 mL min⁻¹.

Resultados e Discussões

As características do efluente de fecularia utilizado neste estudo e de diferentes autores estão apresentadas na Tabela 1.

Com relação a DQO, SV e ART do efluente de fecularias, múltiplos estudos na literatura relatam que o material do substrato pode apresentar muitas variações em sua composição, afetando diretamente a carga orgânica do material (ANDREANI et al. 2015; ZHANG et al. 2016; PERES et al. 2018; CHOIGI et al. 2020).

Tabela 1. Característica comparativa do efluente de fecularia e do inóculo

	pH	DQO (g L ⁻¹)	SV (g L ⁻¹)	ART (g L ⁻¹)
Presente estudo				
Inoculo	5,55	2,62	6,32	-
Efluente Lote 1	4,63	5,54	4,83	1,63
Efluente Lote 2	4,32	5,99	6,34	5,09
Kuczman et al. (2011)	4,37	15,72	7,51	-
Andreani et al. (2015)	4,69	11,22	6,53	3,54
Torres et al. (2017)	4,8	8,15	-	2,1
Wadjeam et al. (2019)	5,18	21,69	16,48	-
Peres et al. (2018)	3,9	101,38	73,40	8,1
Andrade et al. (2020)	4,5	69,83	42,27	-
Chogi et al. (2020)	5,25	93,53	46,67	20,00

SV – Sólidos Voláteis; ART – Açúcares Redutores Totais.

Fonte: Autores (2022)

O Lote 1 foi utilizado na alimentação inicia (Etapa II), logo após o término do período de partida do biodigestor (Etapa I). Enquanto o Lote 2 foi utilizado no período de aumento de carga (Etapa III).

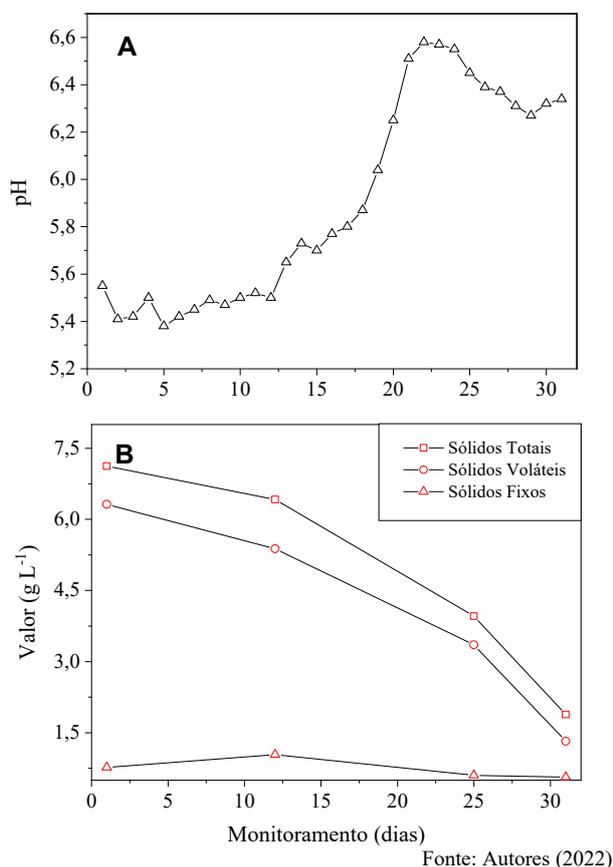
Os resultados obtidos indicam um pH ácido, com pouca variação em comparação com os estudos presentes na literatura. Essa manutenção do pH ácido pode ser atribuída a diversos fatores, como a presença de ácidos orgânicos provenientes da decomposição de matéria orgânica. Por outro lado, os valores de DQO, SV e ART mostraram oscilações significativas, o que pode ser explicado pela degradação de compostos complexos através de atividade metabólica dos microrganismos presentes no sistema. Essa atividade biológica é conhecida por contribuir para a variação das concentrações desses parâmetros ao longo do tempo.

Partida do protótipo de biodigestor anaeróbico

Promoveu-se a biodigestão do efluente de fecularia no protótipo de biodigestor anaeróbico, o qual foi especificamente projetado e construído para operar a digestão anaeróbica de resíduos alimentares, conforme foi utilizado por Gueri et al. (2021). Desde a partida do biodigestor foram necessárias três etapas para estabilizá-lo. Portanto, buscando encontrar a carga orgânica volumétrica ótima que o protótipo do biodigestor possa suportar.

A alimentação foi sistematicamente aumentada gradualmente para obter o real desempenho através de intensa análise de monitoramento de estabilidade do sistema. A partida da fermentação no biodigestor protótipo iniciou-se em 18/12/2021 a 18/01/2022, onde foi monitorado o pH e os ST conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Monitoramento do pH (A) e ST (B) durante o período (32 dias) de partida no protótipo de biodigestor.



Nas duas primeiras semanas da fermentação o pH se manteve próximo a média de 5,45. A faixa ácida do pH nas primeiras semanas pode ter ocorrido devido a rápida taxa de hidrólise, que promoveu a geração de ácidos orgânicos provenientes da fermentação da fécula, que também apresenta um pH ácido, devido à alta biodegradabilidade desse substrato. A partir da segunda semana (15º dia), observou-se um aumento do pH, que pode ser justificado pelo consumo de acetato pelas archaea metanogênicas.

A carga orgânica de SV no biodigestor piloto teve uma redução de 6,31 gSV L⁻¹ para 5,37 gSV L⁻¹, uma redução no SV de 62,29%. Portanto, pode-se justificar que o ambiente se tornou favorável para o desenvolvimento dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, que repercutiu em uma maior redução dos SV.

No início da quarta semana (21º dia) o biodigestor alcançou o ponto de pH de 6,5 onde nos dias seguintes houve a diminuição e estabilidade do pH próximo a 6,3, a média de remoção da carga orgânica de SV no protótipo de reator foi próxima a 80% durante a última semana.

Para verificação da a presença ação da metanogênese, foi realizada uma coleta e análise de amostra de biogás gerado do protótipo de biodigestor anaeróbio, onde se constatou a presença ainda que em baixos percentuais de biometano (23%).

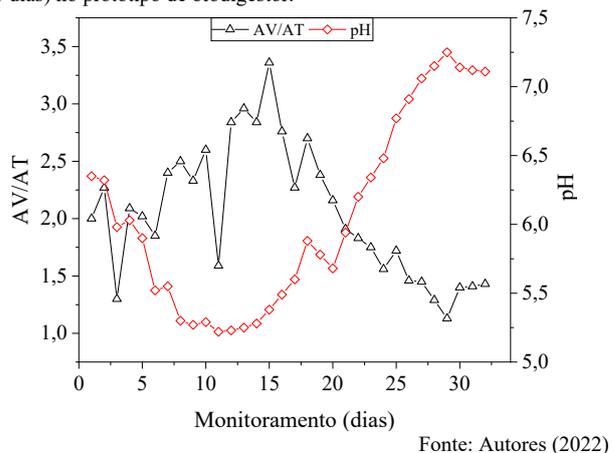
A partir desse momento, foi tomada a decisão de iniciar a alimentação do protótipo de maneira sistemática buscando encontrar a melhor configuração ao sistema, alimentado com efluente de fécula de mandioca.

Alimentação inicial

Após o período de partida foi iniciada a segunda etapa. A etapa de alimentação do biodigestor foi realizada com uma vazão volumétrica de 9 L d⁻¹, equivalente a carga orgânica diária de DQO, SV e ART na alimentação, foi de 48,24 gDQO d⁻¹, 43,22 gSV d⁻¹ e 14,67 gART d⁻¹, respectivamente, intuito de fornecer nutrientes e favorecer o desenvolvimento dos microrganismos no biodigestor. Neste período o tempo de retenção hidráulica (TRH) ficou em torno de 45 dias.

O início da alimentação no biodigestor protótipo deu-se em 18/01/2022 a 18/02/2022, totalizando 31 dias, onde durante esse período foi realizado o monitoramento do pH e AV/AT conforme na Figura 3.

Figura 3. Relação AV/AT e pH durante o período de alimentação inicial (31 dias) no protótipo de biodigestor.



Conforme na Figura 3, durante os 20 primeiros dias de alimentação, foi constatada a diminuição do pH. Durante os 10 primeiros dias, a fase da fermentação, correspondente a hidrólise levou o pH inicial de 6,3 para próximo de 5,6.

Isto devido à grande produção de ácidos graxos voláteis no início da alimentação, já a relação AV/AT monitorada teve um aumento significativo. Partindo da relação AV/AT inicial de 2,0 para próximo de 3,4, evidenciando o acúmulo de AGV no biodigestor, desfavorecendo a comunidade microbiológica de metanogênese no protótipo. Devido a diminuição do pH, tal situação pode causar o colapso do sistema, resultando na inibição da fase metanogênica (KHALID et al., 2011).

Segundo Mari et al. (2019), se a alcalinidade não for suficiente para neutralizar ácidos voláteis, o acúmulo de ácidos orgânicos pode diminuir o pH e as bactérias acidogênicas podem predominar sobre as archaea metanogênicas.

Segundo Mao et al. (2015), devido à mistura e agitação contínua, ocorre uma rápida acidificação, resultando em grande produção de AGV, o que poderia levar à inibição do processo digestão anaeróbia.

Ainda, conforme Intanoo et al. (2015), o limite ácido a partir do qual ocorre a inibição da produção de metano e da remoção de DQO em reatores mesofílicos é de 400 mg AVc L⁻¹. Já em reatores de grande escala podem ser operados com relativa estabilidade, apresentando concentração de ácidos graxos voláteis de 1.500 mg AVc L⁻¹ (ANGELIDAKI et al. 2005).

Já ao longo da terceira semana (15º dia), ocorreu o aumento gradativo da alcalinidade, levando o pH de 6,0 para aproximadamente 7,3. O aumento significativo do pH, resultou na redução da relação AV/AT. Segundo Ward et al. (2008), a faixa de pH da digestão anaeróbia varia de 6,8 a 7,2, sendo considerada a melhor faixa de pH devido a sua compatibilidade com a atividade dos microrganismos responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia. Nessa faixa de pH, a maioria dos microrganismos envolvidos na decomposição da matéria orgânica apresenta sua máxima atividade metabólica, o que resulta em uma maior eficiência na degradação dos substratos orgânicos e na produção de biogás.

Na quarta semana (21º dia) de alimentação o pH apresentou uma elevação expressiva, evidenciando a alcalinidade presente no reator protótipo. Entretanto a relação AV/AT apresentou uma estabilidade média próxima a 1,45.

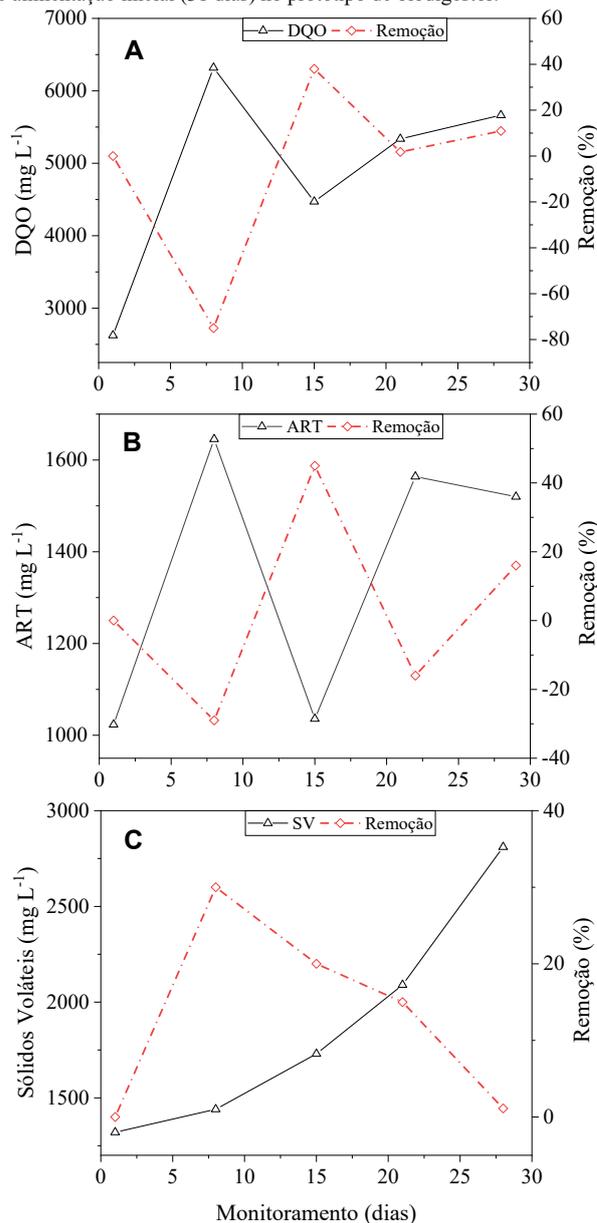
Os parâmetros analisados foram redução da carga orgânica de DQO, SV e ART, conforme presente na Figura 4. Segundo Fernandes (2016), a análise DQO proporciona a eficiência da redução de biomassa em um processo e descrever a condição do efluente em função da quantidade de matéria orgânica presente.

A Figura 4 apresenta as variações da DQO (A), ART (B) e SV (C) no biodigestor, é observável que na primeira semana houve significativo aumento na concentração de DQO e de ART no protótipo. No entanto conforme é possível observar na Figura 4 (C), os SV tiveram uma remoção próxima a 30%. O processo de fermentação e por consequência geração de hidrogênio não reduz significativamente o conteúdo orgânico do afluente. Conforme Torres et al. (2017), geralmente a remoção de DQO é de aproximadamente 20% durante o processo de fermentação. Ainda segundo o autor, o metabolismo do amido por microrganismo acidogênicos gera ácidos voláteis orgânicos, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono, portanto, a DQO inicial é convertida em DQO dos produtos de degradação.

A partir da segunda semana (8º dia) da alimentação ocorreu a redução na DQO e ART, exibindo remoção média de 40% e 45%, respectivamente. Já a remoção de SV apresentou uma eficiência, saindo dos 30% da primeira semana para 20%. No mesmo período ocorreu aumento significativo da relação AV/AT e a estabilidade do pH próximo a 5,3.

Contudo, já na terceira semana (15º dia), houve o retorno do acúmulo de carga orgânica de DQO e ART. Os ART são consumidos enquanto baixas reduções nos valores de DQO são verificadas, uma vez que metabólitos intermediários permaneceram no sistema (REIS e SILVA, 2011; THANWISED et al., 2012).

Figura 4. Variações de DQO (A), ART (B) e SV (C) de saída no período de alimentação inicial (31 dias) no protótipo de biodigestor.



Fonte: Autores (2022)

Devido ao grande acúmulo de ácido nas primeiras duas semanas, o que pode acarretar no desfavorecimento da biota microbiana presente no reator, reduzindo a eficiência na redução da carga orgânica. Esse desequilíbrio inicial pode resultar em condições adversas para os microrganismos, afetando sua capacidade de degradar os substratos orgânicos de forma eficiente. Consequentemente, isso pode prolongar o tempo necessário para a estabilização do processo de digestão anaeróbia e para a produção de biogás em níveis desejáveis.

Este efeito de inibição nos microrganismos no reator se estendeu a quarta semana (21º dia) de alimentação, onde os valores da concentração de DQO e SV voltaram a apresentar aumento. Já os ART, que são facilmente convertidos, sofreram pouca redução, uma eficiência de remoção de 16%.

Os dados de geração de biogás e biometano estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2. Geração de biogás na etapa de alimentação inicial, metano e dióxido de carbono por carga orgânica reduzida.

Parâmetro	Unidade	Alimentação inicial
Biogás total	L	650
CH ₄ total	L	474
CO ₂ Total	L	175
CH ₄ por dia	L d ⁻¹	15
CH ₄ por L de efluente	LCH ₄ L ⁻¹	1,69
CH ₄ por DQO consumida	LCH ₄ gDQO	0,36
CH ₄ por SV consumida	LCH ₄ gSV	0,84
CH ₄ por ART consumida	LCH ₄ gATR	1,05

SV – Sólidos Voláteis; ART – Açúcares Redutores Totais.

Fonte: Autores (2022)

Conforme os dados presentes na Tabela 2, a produção de biogás e de metano durante a etapa inicial de alimentação foram satisfatórias, apresentando uma produção volumétrica de metano a partir de DQO consumida de 0,36 L CH₄ gDQO⁻¹, já para os ART a geração em média de 1,05 L CH₄ gART⁻¹.

Valores abaixo comparado aos encontrados por Gueri et al. (2021), que obteve valores de 0,506 LCH₄ gDQO⁻¹ e SV de 0,444 LCH₄ gSV⁻¹ operando o mesmo protótipo de biodigestor anaeróbico, porém alimentado com resíduos alimentares e em um período estabilizado. A produção de metano foi superior ao rendimento de metano de 0,16 LCH₄ gDQO⁻¹ em reator UASB alimentado com efluente de fecularia (INTANOO et al., 2015).

Enquanto para os SV consumidos a geração de metano foi de 0,84 L CH₄ gSV⁻¹. Colacionado com o estudo realizado por Nathao et al. (2013) em reator de fase única alimentado por resíduos alimentares, os valores de produção de metano por gSV se mostraram superior, uma vez que o autor alcançou a geração de metano de 0,082 LCH₄ gSV⁻¹ contra de 0,84 L CH₄ gSV⁻¹ deste estudo.

Ainda foi obtido uma relação de produção de biometano por L de efluente de 1,69 LCH₄ L.

Com a estabilidade do pH próxima a faixa ideal de geração de metano e a relação AV/AT estabilizada durante alguns dias, deu-se sequência a adjunta etapa de aumento de carga.

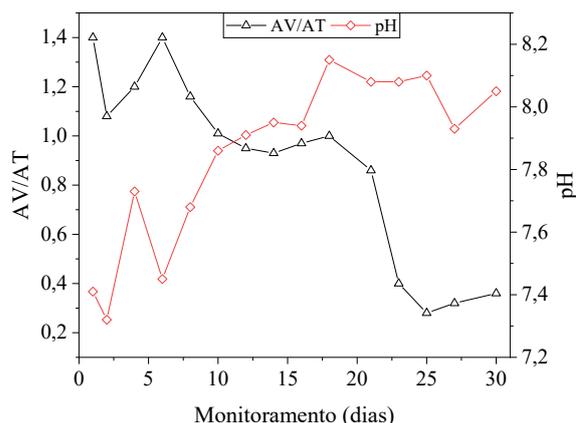
Aumento de carga

Com a relação de AV/AT de 1,45, iniciou-se um novo período, aumentando-se gradativamente o volume de alimentação, considerando a razão entre os ácidos e a capacidade tampão da biomassa em fermentação.

O aumento de carga objetivando atingir o limite de estabilidade, referenciada na relação acidez/alcalinidade e atingir o período de coleta de dados. O aumento de carga ocorreu no período de 20/02/2022 a 23/03/2022, partindo da vazão volumétrica de alimentação de 10 L d⁻¹ com o aumento de 2 L d⁻¹ a cada dia até a vazão de estabilidade de 20 L d⁻¹.

A partir de 03/03/2022 a 23/03/2022 onde ocorreu a repetição da carga (20 L d⁻¹) para sair do efeito de seu aumento, quando é necessário operar o biodigestor no mínimo, por um período igual ao de retenção hidráulica, que nesta fase permanecia em 20 dias. Durante esse período, foi realizado o monitorado o pH e AV/AT conforme na Figura 5.

Figura 5. Relação AV/AT e pH durante o período (30 dias) de aumento de carga no protótipo de biodigestor.



Fonte: Autores (2022)

Na primeira semana de aumento na vazão de alimentação ocorreu uma pequena oscilação, resultando no aumento da relação AV/AT próxima a inicial de 1,41. Todavia a partir da segunda semana (7º dia) a relação AV/AT diminuiu, chegando uma relação igual a 0,92. O que foi corroborado pelo aumento da alcalinidade, com o pH próximo a 7,6. O consumo de acetato por archaea metanogênica pode gerar alcalinidade. Conforme Fuess et al. (2017), em reatores metanogênico a alcalinidade desempenha um papel fundamental, pois fornece tamponamento capacidade do sistema na presença de ácidos graxos voláteis como resultado da decomposição da matéria orgânica.

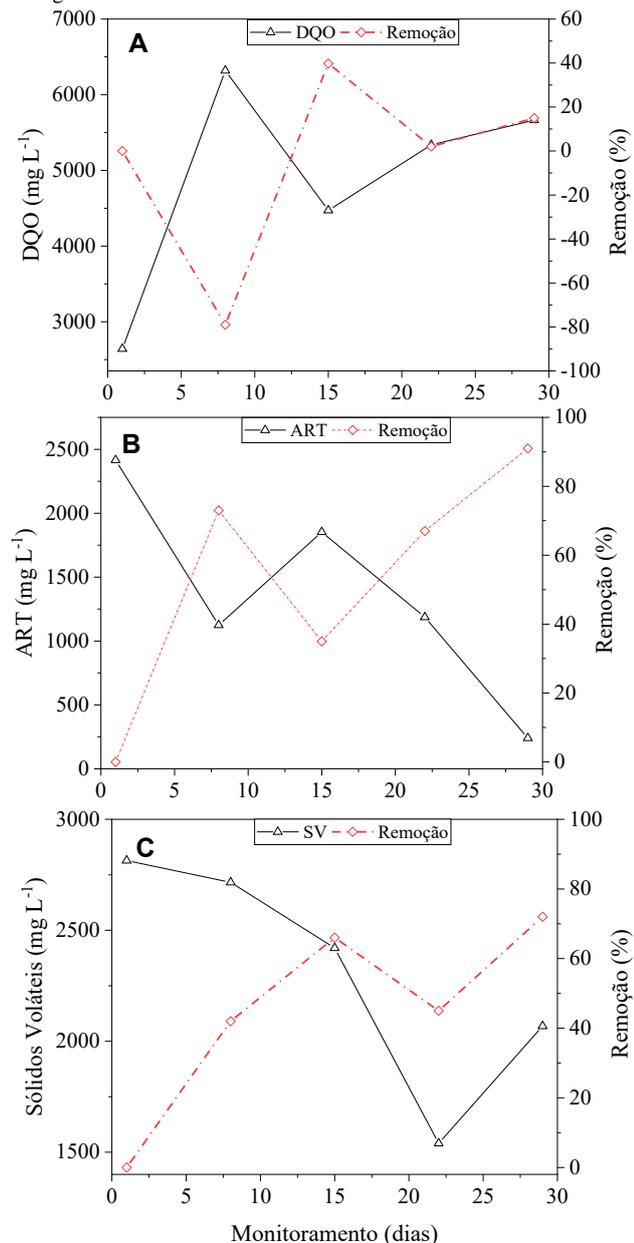
Nos dias de alimentação estabilizada com a carga volumétrica de 20 L d⁻¹ o pH mostrou estabilidade em 8,1 enquanto a relação de AV/AT teve uma redução significativa, chegando à estabilidade próxima a faixa ideal. A relação AV/AT saiu de 1,01 para 0,28, de modo que chegou ao a faixa de referência ideal. Segundo Sanchez et al. (2005), a relação ideal de AV/AT deve estar entre 0,1 e 0,5. O reator diminuiu a concentração de ácidos, favorecendo a atividade metanogênica.

A estabilidade do reator piloto foi obtida após 92 dias depois a partida do protótipo. A capacidade ótima do protótipo de biodigestor anaeróbico foi encontrada quando a alimentação volumétrica de 20 L d⁻¹ de efluente de fecularia, uma carga diária de DQO de 119,8 gDQO d⁻¹. Enquanto a carga diária de SV foi de 126,8 gSV d⁻¹, já para os ART foi de 101,8 g d⁻¹. A carga orgânica total de DQO, SV e ART na alimentação no período de aumento de carga e estabilização foi de 2.923 gDQO, 3.284 gSV e 3.823 gART, respectivamente.

Na figura Figura 6 estão dispostas as variações de carga orgânica de DQO, ART e SV no reator protótipo durante a fase de aumento de carga.

Durante a primeira semana de aumento de carga, onde a vazão volumétrica de alimentação teve um aumento de 2 L a cada dia acarretou o aumento no reator da carga orgânica de DQO. Conforme Watthier et al. (2019), o aumento de cargas orgânicas e hidráulicas podem causar distúrbios na microbiota estrutura da comunidade do reator.

Figura 6. Variações de DQO (A), ART (B) e SV (C) na saída no período de aumento de carga no protótipo de biodigestor.



Fonte: Autores (2022)

Com o aumento da vazão volumétrica o TRH ficou em 20 dias, um fator que possivelmente tenha favorecido no decréscimo da remoção de DQO. As reduções de DQO ocorrem com o aumentando no TRH, porque o substrato tem mais tempo para se degradar (FENG et al., 2008; KUCZMAN et al., 2013). De acordo com Mao et al. (2015), uma duração média de retenção de 15 a 30 dias é necessária para tratar resíduos sob temperatura mesófila.

No entanto, em referência a carga de ART houve uma significativa redução, observando uma remoção próxima a 75%, uma vez que esses compostos são facilmente metabolizados.

Já a concentração de SV no protótipo obteve reduções positivas, com remoções em média em torno de 45%. Quando o tempo de retenção sólida é maior do que o tempo de retenção hidráulica, a alta densidade de microrganismos permite a aplicação de carga orgânica elevada em menor TRH (INTANOO et al., 2015).

Após o aumento da carga estabilizar em uma vazão volumétrica de 20 L d⁻¹ houve uma redução na DQO, que se estendeu por todo o período final. A remoção de DQO apresentou uma média de 40% chegando a máxima remoção de 60%. Segundo Nualsri et al. (2016), um baixo tempo de retenção hidráulica pode fortemente afetar a eficiência do consumo de substrato, a população microbiana e as vias metabólicas. Isso ocorre porque um tempo de retenção hidráulica insuficiente pode não permitir que os microrganismos tenham tempo adequado para degradar os substratos presentes no sistema. O que pode resultar em uma menor eficiência na remoção de matéria orgânica, além de causar um desequilíbrio na população microbiana, afetando negativamente as vias metabólicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia.

Enquanto no período de aumento de carga até a estabilidade na alimentação, a remoção de ART apresentou significativos valores. A variação de remoção dos açúcares oscilou durante todo o período, partindo da menor remoção na terceira semana (15^o dia) de 38% até a maior remoção na última semana (21^o dia) de 91%.

Como pode ser observado na Tabela 3, os dados de geração de biogás, CH₄ e CO₂ para a etapa de aumento e estabilização do protótipo.

Tabela 3. Geração de biogás na etapa de aumento e estabilização de carga, metano e dióxido de carbono por carga orgânica reduzida.

Parâmetro	Unidade	Aumento de carga
Biogás total	L	795
CH ₄ total	L	556
CO ₂ Total	L	238
CH ₄ por dia	L d ⁻¹	22,2
CH ₄ por L de efluente	LCH ₄ L ⁻¹	1,26
CH ₄ por DQO consumida	LCH ₄ g ⁻¹ DQO	0,14
CH ₄ por SV consumida	LCH ₄ g ⁻¹ SV	0,16
CH ₄ por ART consumida	LCH ₄ g ⁻¹ ART	0,18

Fonte: Autores (2022).

Nos dados presentes na Tabela 3, observa-se a produção de biogás e de metano durante a etapa de aumento de carga de alimentação novamente foram satisfatórias, apresentando uma produção volumétrica de metano a partir de DQO consumida de 0,14 LCH₄ gDQO⁻¹, já para os ART a geração em média de 0,18 LCH₄ gART⁻¹. Os valores encontrados para a produção de metano mostraram se superiores aos encontrados em estudos semelhantes.

Um estudo realizado sobre o tratamento de efluente de fecularia mostra que um UASB mesofílico de dois estágios com carga orgânica de DQO de 5 gDQO L⁻¹ d⁻¹ apresentou produção de metano de 0,11 LCH₄ L⁻¹ d⁻¹ (INTANOO et al. 2015). Em contrapartida um UASB metanogênico termofílico de dois estágios com carga orgânica de DQO de 10,29 gDQO L⁻¹ d⁻¹ apresentou produção média de metano de 0,25 LCH₄ L⁻¹ d⁻¹ (YESHANEW et al. 2016). Já um estudo realizado por Araújo et al. (2020), obteve uma geração de metano de 0,22 LCH₄ gDQO⁻¹ em um estágio único mesofílico reator anaeróbio de leite empacotado (APBR) alimentado com uma carga orgânica de 10 gDQO L⁻¹ d⁻¹.

Para os SV consumidos o rendimento de metano foi de 0,16 LCH₄ gSV⁻¹, valor relativamente baixo comparado aos encontrados em estudos com outros substratos.

Um estudo realizado por Luo et al. (2010), alcançou rendimento estável de metano 0,24 LCH₄ gSV⁻¹ em condições de alta taxa de carga orgânica (> 10 gSV L d⁻¹). Em um reator anaeróbico de fase única, alimentado por esterco suíno e resíduo de farinha de arroz, obteve uma produção média de metano 0,29 LCH₄ gSV⁻¹ (SCHIEVANO et al. 2014). No entanto conforme Gonçalves (2012) e Neto (2015) relatam que a diminuição de sólidos voláteis se refere apenas à matéria orgânica em base seca e não indica a conversão de matéria orgânica em biogás e metano. Isto significa que os percentuais de diminuição não são diretamente iguais à quantidade de biogás gerada.

Conclusão

Os efluentes de fecúliarias mostraram-se promissores à produção de metano, devido a sua grande disponibilidade bem como por suas características biodegradáveis, verificadas no processo de digestão anaeróbia.

O biodigestor anaeróbico protótipo foi eficiente na remoção média de matéria orgânica de DQO (60%), SV (45%) e ART (75%). Durante o estudo em questão, foi necessário implementar três etapas distintas para alcançar a estabilidade do reator. Essas etapas incluíram a partida do reator (Etapa I), a alimentação inicial (Etapa II) e o aumento gradual da carga orgânica (Etapa III). Essas etapas foram fundamentais para garantir que o reator atingisse um estado de operação estável e eficiente.

O principal objetivo dessas etapas foi determinar a carga orgânica adequada para a alimentação do biodigestor protótipo, visando a alcançar a estabilidade, que foi avaliada com base na relação AV/AT. Os resultados obtidos revelaram um valor médio de 0,34 para essa relação, indicando a estabilidade do reator e a eficácia do processo. No total foram necessários 92 dias após a partida do reator para se alcançar a estabilidade e a carga orgânica de alimentação. O reator piloto apresentou a possibilidade de estabilidade sem a necessidade de correção de pH em um pequeno período (92 dias).

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa, apoios fundamentais para viabilização deste trabalho.

Referências

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION -APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 21.ed. Washington. 2005.
- ANDRADE, L. R. S.; CRUZ, I. A.; DE MELO, L.; VILAR, D.; FUESS, L. T.; REIS E SILVA, G.; FIGUEIREDO, R. T. Oyster shell-based alkalization and photocatalytic removal of cyanide as low-cost stabilization approaches for enhanced biogas production from cassava starch wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 139, p. 47-59, 2020.
- ANDREANI, C. L.; TORRES, D. G. B.; SCHULTZ, L.; CARVALHO, K. Q.; DE GOMES; S. D. Hydrogen production from cassava processing wastewater in an anaerobic fixed bed reactor with bamboo as a support material. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 3, p. 578-587, 2015.
- ANGELIDAKI, I.; BOE, K.; ELLEGAARD, L. (2005). Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science and Technology*, v. 52, n. 1-2, p. 189-194, 2005.
- ARAUJO, G. S.; SANTIAGO, C. S.; MOREIRA, R. T.; DANTAS NETO, M. P.; FERNANDES, F. A. N. Nutrient removal by *Arthrospira platensis* cyanobacteria in cassava processing wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, p. 1-7, 2020.
- AZEVEDO, J. M. A.; DA SILVA, E. A. JR.; DA CRUZ, J. F.; SOUZA, E. B.; LIMA, M. O.; AZEVEDO, DA SILVA. H. S. F. Agroecological seedlings of yellow passion fruit using manure, cow urine and forage peanut biofertilizer. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, p. 35521-35536, 2020.
- BARRETO, M. T. L.; MAGALHÃES, A. G.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; DUARTE, A. S.; TAVARES, U. E. Desenvolvimento e acúmulo de macronutrientes em plantas de milho biofertilizadas com manipueira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 5, p. 487-494, 2014.
- CHOGLI, M. A. N.; ARAUJO, A. C. V.; PRADO, P. F.; SILVA, D. B.; SILVA, A. J.; SILVA, G. F.; DUARTE, I. C. S. D. Produção de biocombustível e ácidos orgânicos para agregar valor ao efluente de mandioca. *Revista Virtual de Química*, v. 12, n. 1, p. 89-98, 2020.
- CORRÊA F. H.; PONTE, M. X.; SOARES, S. R. Avaliação do Ciclo de Vida da Farinha de Mandioca. *Revista Espacios*, v. 38, n. 59, 1-19, 2017.
- DANTAS, M. S. M.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; BEZERRA NETO, E.; SILVA, G. F. DA; SILVA, Ê. F. Accumulation of macronutrients in different parts of sunflower fertilized with cassava wastewater. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 7, p. 630-636, 2016.
- FENG, H-J.; HU, L-F.; SHAN, D.; FANG, C-R.; SHEN, D-S. Effects of Temperature and Hydraulic Residence Time (HRT) on Treatment of Dilute Wastewater in a Carrier Anaerobic Baffled Reactor. *Biomedical and Environmental Sciences, Beijing*, v. 21, p. 460-466, 2008.
- FERNANDES, A. J. *Variáveis microbiológicas e físico-químicas em biodigestores anaeróbios escala piloto alimentados com dejetos de bovinos leiteiros e suínos*. Dissertação Mestrado do Programa de Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados). Juiz de Fora, 2016.
- FIORDA, F. A.; JÚNIOR, M. S. S.; SILVA, F. A.; SOUTO, L. R. F.; GROSSMANN, M. V. E.: Farinha de bagaço de mandioca: aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2013.
- FOSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactor treating food waste. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 6994-7002, 2008.
- FUESS, L. T.; KIYUNA, L. S. M.; FERRAZ, A. D. N.; PERSINOTI, G. F.; SQUINA, F. M.; GARCIA, M. L.; ZAIAT, M. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. *Applied Energy*, v. 189, p. 480-491, 2017.
- GONÇALVES, C. D. C. *Modelação do processo de digestão anaeróbia da FORSU à escala industrial*. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Instituição de Engenharia, Arquitectura, Ciência e Tecnologia Técnico Lisboa. Lisboa, Portugal, 2012.
- GUERI, M. V. D.; FURTADO, A. C.; NAGEL SCHIRMER, W.; KUCZMAN, O. Análise de estabilidade de um protótipo de biodigestor anaeróbico mesofílico digerindo resíduo alimentar. *Revista Geama*, v. 7, n. 3, p. 05-12, 2021.

- GUIMARÃES, C. E.; TEIXEIRA, C. E.; CIRANI, C. B. S.; SANTOS, M. R. dos. Avaliação do Desempenho Ambiental do Aproveitamento do Biogás em Fecularias de Mandioca no Estado do Paraná. **Desenvolvimento em Questão**, v. 15, n. 39, p. 171–202, 2017.
- INTANOO, P.; CHAIMONGKOL, P.; CHAVADEJ, S. Hydrogen and methane production from cassava wastewater using twostage upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) with an emphasis on maximum hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 1-8, 2015.
- KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1737–1744, 2011.
- KUCZMAN, O.; TAVARES, M. H. F.; DAMASCENO, S. D.; TORRES, D. G. B.; FLECK, L. Influence of hydraulic retention time on the anaerobic treatment of cassava starch extraction effluent using a one-phase horizontal reactor. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.11, n.1, p. 1118-1120, 2013.
- KUCZMAN, O.; TORRES, D. G. B.; DAMASCENO, S. D.; TAVARES, M. H. F.; ALCANTARA, M. S. Specific biogas production from manipueira at one phase reactor. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 143, p. 1-9, 2011.
- KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. **Energy**, v. 197, p. 1-13, 2020.
- MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015.
- MARI, A. G.; ANDREANI, C. L.; TONELLO, T. U.; LEITE, L. C. C.; FERNANDES, J. R., LOPES, D. D.; GOMES, S. D. Biohydrogen and biomethane production from cassava wastewater in a two-stage anaerobic sequencing batch biofilm reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, p. 1-10, 2019.
- MEIER, W. T. R.; CREMONEZ, P. A.; MANIGLIA, T. C.; SAMPAIO, S. C.; TELEKEN, J. G.; ANTÔNIO DA SILVA, E. Production of biohydrogen by an anaerobic digestion process using the residual glycerol from biodiesel production as additive to cassava wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 1-11, 2020.
- MORIM, N. C. S.; ALVES, I.; MARTINS, J. S.; & AMORIM, E. L. C. Biohydrogen production from cassava wastewater in an anaerobic fluidized bed reactor. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 3, p. 603–612, 2014.
- NETO, F. G. **Tratamento de frações orgânicas de resíduos sólidos de restaurantes em reator anaeróbico no município de Blumenau-SC**. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB. Blumenau, SC. 2015.
- NUALSRI, C.; KONGJAN, P.; REUNGSANG, A. Direct integration of CSTR-UASB reactors for two-stage hydrogen and methane production from sugarcane syrup. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 40, p. 17884–17895, 2016.
- OLAOYE, R. A.; AFOLAYAN, O. D.; ADEYEMI, K. A.; AJISOPE, L. O.; ADEKUNLE, O. S. Adsorption of selected metals from cassava processing wastewater using cow-bone ash. **Scientific African**, v. 10, p. 1-9, 2020.
- PERES, S.; MONTEIRO, M. R.; FERREIRA, M. L.; DO NASCIMENTO JUNIOR, A. F.; DE LOS ANGELES; PEREZ, F. P. M. Anaerobic Digestion Process for the Production of Biogas from Cassava and Sewage Treatment Plant Sludge in Brazil. **BioEnergy Research**. p. 1-8, 2018.
- REIS, C. M.; SILVA, E. L. Effect of upflow velocity and hydraulic retention time in anaerobic fluidized-bed reactors. **Chemical Engineering Journal**, New York, v.172, p. 28–36, 2011.
- SANCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO L.; MARTÍN, A.; COLMENAREJO, M. F. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 3, p. 335–344, 2005.
- SCHIEVANO, A.; TENCA, A.; LONATI, S.; MANZINI, E.; ADANI, F. Can two-stage instead of one-stage anaerobic digestion really increase energy recovery from biomass? **Applied Energy**, v. 124, p. 335–342, 2014.
- THANWISED, P.; WIROJANAGUD, W.; REUNGSANG, A. Effect of hydraulic retention time on hydrogen production and chemical oxygen demand removal from tapioca wastewater using anaerobic mixed cultures in anaerobic baffled reactor (ABR). **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 37, p. 15503-15510, 2012.
- TORRES, D. G. B.; LUCAS, S. D. M.; ANDREANI, C. L.; CARVALHO, K. Q. DE, COELHO, S. R. M.; GOMES, S. D. Hydrogen production and performance of anaerobic fixed-bed reactors using three support arrangements from cassava starch wastewater. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 1, p. 160–172, 2017.
- WADJEAM, P.; REUNGSANG, A.; IMAI, T.; PLANGKLANG, P. Co-digestion of cassava starch wastewater with buffalo dung for biohydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, p. 1-13, 2019.
- WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928–7940, 2008.
- WATTHIER, E.; ANDREANI, C. L.; TORRES, D. G. B.; KUCZMAN, O., TAVARES, M. H. F.; LOPES, D. D.; GOMES, S. D. (2019). Cassava Wastewater Treatment in Fixed-Bed Reactors: Organic Matter Removal and Biogas Production. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, n. 6, p. 1-8, 2019.
- YESHANEW M. M, FRUNZO L, PIROZZI F, LENS PNL, ESPOSITO G. Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 36, 2016.
- ZHANG, M.; XIE, L.; YIN, Z.; KHANAL, S. K.; ZHOU, Q. Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: Current status and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 215, p. 50–62, 2016.