
Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani

Trabalho de Graduação

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”

FACULDADE NILO DE STÉFANI DE JABOTICABAL - SP (Fatec-JB)

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS

**BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO BOVINO E
BAGAÇO DE SORGO SACARINO**

GEISILLEIA TAILLA SILVA DA CRUZ

PROFA. ORIENTADORA: DRA ROSE MARIA DUDA

COORDINADORA: MS. ELIANE CRISTINE SOARES DA COSTA

JABOTICABAL, S.P.

2022

GEISILLEIA TAILLA SILVA DA CRUZ

**BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO BOVINO E
BAGAÇO DE SORGO SACARINO**

Trabalho de graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Coorientadora: Ms. Eliane Cristine Soares da Costa

JABOTICABAL, S.P.

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Cruz, Geisilleia Tailla Silva da

Biogás a partir da codigestão anaeróbia de dejetos bovinos e bagaço de sorgo sacarino / Geisilleia Tailla Silva da Cruz.— Jaboticabal: Fatec Nilo de Stéfani, 2022.

28p.

Orientadora: Rose Maria Duda

Coorientadora: Eliane Cristine Soares da Costa

Trabalho (graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani - Jaboticabal, 2022.

1. Resíduo. 2. Digestão anaeróbia. 3 Bioenergia. I. Duda, R. M. II. Da Costa, E. C. S. Biogás a partir da codigestão anaeróbia de dejetos bovinos e bagaço de sorgo sacarino.

GEISILLEIA TAILLA SILVA DA CRUZ

**BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETO BOVINO E
BAGAÇO DE SORGO SACARINO**

Trabalho de Graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Coorientadora: Ms. Eliane Cristine Soares da Costa

Data da apresentação e aprovação: 30/11/2022.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA

Presidente e Orientador: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)

Jaboticabal – SP- Brasil

Segundo membro da banca examinadora: Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza

Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)

Jaboticabal – SP- Brasil

Terceiro membro da banca examinadora: Prof. Dr. Valciney Gomes de Barros

Faculdade de tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)

Jaboticabal - SP- Brasil

Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB) Jaboticabal – SP – Brasil

Biogás a partir da codigestão de resíduo bovino e bagaço de sorgo sacarino

Biogas from the codigestion of bovine manure and sugar sorghum bagasse

Geisilleia Tailla Silva da Cruz
Rose Maria Duda
Eliane Cristine Soares da Costa

RESUMO

A produção de alimentos vem aumentando no Brasil e consequentemente a demanda de energia e a geração de resíduos. Entre os resíduos agroindustriais e agropecuários podemos destacar os da indústria sucroenergética e da bovinocultura, respectivamente. Nas indústrias sucroenergéticas que poderiam produzir o etanol da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino, geram-se grandes volumes de vinhaça e de bagaço. O uso dos resíduos da bovinocultura codigeridos com o bagaço, em biodigestores, pode ser uma alternativa para gerar energia de baixo custo e efluente estabilizado, que poderão ser utilizados como biocombustível e biofertilizante, respectivamente. Nesse sentido, este estudo teve por objetivo realizar uma busca bibliográfica sobre a codigestão dos resíduos supracitados, as etapas do processo de digestão anaeróbia e os fatores intervenientes. Percebeu-se a escassez de trabalhos neste sentido, revelando, portanto, a necessidade de estudos que envolvam a codigestão de resíduo bovino e bagaço de sorgo sacarino, dada a importância de ambos como potenciais geradores de energia e devido à elevada quantidade gerada, com clara necessidade de correta destinação e tratamento.

Palavras-chave: Resíduo. Digestão anaeróbia. Bioenergia.

ABSTRACT

Food production has been increasing in Brazil and consequently the demand for energy and waste generation. Among agro-industrial and agricultural residues, we can highlight those from the sugar-energy industry and cattle farming, respectively. In the sugar-energy industries that could produce ethanol from sugar cane and sweet sorghum, large volumes of vinasse are generated, but also of bagasse. The use of cattle residues co-digested with bagasse, in biodigesters, can be a source of low cost energy and stabilized effluent, which can be used as biofuel and biofertilizer, respectively. In this sense, this study aimed to carry out a bibliography on the co-digestion of the aforementioned residues, the stages of the anaerobic digestion process and the intervening factors. There was a shortage of work in this regard, revealing, therefore, the need for studies involving the co-digestion of bovine waste and sweet sorghum bagasse, given the importance of both as potential energy generators and due to the high amount generated, with clear need for proper disposal and treatment.

Keywords: Waste. anaerobic digestion. Bioenergy.

1 INTRODUÇÃO

A demanda global por fontes de energia é crescente (OCDE/FAO, 2021) e visa, prioritariamente, a redução das emissões de gases de efeito estufa, decorrentes do uso de combustíveis fósseis (ABDULLAH et al., 2019). Aliado a isto, há grande preocupação dada a limitação das reservas mundiais destes combustíveis, bem como a instabilidade de seus preços, intensificando, desta maneira, o interesse em novas pesquisas em fontes alternativas de energia.

O balanço energético nacional de 2021, aponta a participação das fontes energéticas renováveis no Brasil em 48,4% no ano de 2020, sendo 19% da biomassa da cana, 12,6% hidráulica, 8,9% da lenha e carvão vegetal e 7,7% de outras renováveis (EPE, 2021). Neste último grupo, o biogás representa apenas 1,4% o que justifica o desenvolvimento de pesquisas para explorar mais esse biocombustível.

O biogás desponta como uma alternativa para a sustentabilidade de atividades industriais, rurais e domésticas, agregando valor a diversos resíduos orgânicos, diminuindo custos energéticos e contribui para redução de gases de efeito estufa (LOHANI et al., 2021). A disponibilidade de biomassa da agropecuária em grandes quantidades representa uma fonte potencial de matéria prima para a produção de biogás.

As atividades da agropecuária, como a bovinocultura, geram grandes quantidades de dejetos, rico em matéria orgânica e microrganismos, cuja má gestão pode impactar diretamente o meio ambiente, com o aumento de nutrientes no solo, principalmente nitrogênio e fósforo, contaminação por medicamentos, hormônios, disseminação de patógenos, odores e emissões gasosas (ABDESHAHIAN et al., 2016).

Na agroindústria também são geradas grandes quantidades de subprodutos, fonte alternativa para geração de energia na forma de biogás, como o bagaço do sorgo sacarino. Essa cultura tem se destacado como complementar de bioenergia, principalmente em virtude da sua elevada produtividade, conseguida nos períodos da entressafra da cana-de-açúcar, com colmos ricos em açúcares fermentáveis (REGASSA e WORTMANN 2014, APPIAH-NKANSAH et al., 2019). Além disso, seu substrato apresenta teores de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas similares ao bagaço de cana-de-açúcar (BANERJEE e PANDEY, 2002, RODRIGUES, 2007; OLIVEIRA, 2011, HAN et al., 2013).

A digestão anaeróbia é a que mais se destaca na eficiência do tratamento destes resíduos, uma vez que, além da valorização dos subprodutos gerados, proporciona a redução da poluição (PEREIRA, 2013). Neste contexto, a codigestão tem recebido considerável

atenção, pelo fato de ser um processo de decomposição simultânea de dois ou mais substratos orgânicos.

Além disto, a codigestão é vista como uma opção de melhoramento da digestão anaeróbia, uma vez que, a associação de resíduos orgânicos com diferentes cargas de microrganismos pode proporcionar melhores condições para a produção de biogás, devido ao sinergismo positivo estabelecido durante a digestão, podendo fornecer nutrientes em falta (SUZUKI, 2012). A codigestão de substratos também garante boa relação C/N do meio, equilíbrio no teor de umidade e pode evitar a inibição causada por compostos presentes em determinados substratos, como por exemplo, alta concentração de amônia, que inibe a atividade das arqueas metanogênicas (ANGELIDAKI e AHRING, 1993; BOUALLAGUI et al., 2009; CHANDRA et al., 2012).

Nesse cenário, o beneficiamento simultâneo de dois ou mais resíduos orgânicos por meio da codigestão anaeróbia, representa uma estratégia promissora para otimizar a eficiência da monodigestão anaeróbica (AWOSUSI et al., 2021). Diante disso, este trabalho teve por finalidade, averiguar o potencial de produção de biogás a partir de estudos que utilizaram resíduos da bovinocultura e bagaço de sorgo, enquanto substratos, por meio da biotecnologia da codigestão anaeróbia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dejetos bovino

A bovinocultura é uma atividade agropecuária reconhecidamente importante para a economia do país, sendo o rebanho bovino brasileiro um dos maiores do mundo, com efetivo de 224,6 milhões de cabeças (IBGE, 2022). Contudo, esta mesma atividade é responsável pela geração de grande volume de águas residuárias, que necessitam de destinação e tratamento adequado.

Estudos estimam que uma vaca com peso médio de 400 kg pode produzir até 50 kg de dejetos por dia, com aproximadamente 20% de sólidos totais em sua composição (MATOS, 2005) e quando são criadas em sistemas de confinamento, a limpeza das instalações gera elevado volume de água residuária. Considerando que no Brasil, uma pessoa elimina em média 54 g DBO₅ por dia (VON SPERLING, 2005), e para Matos (2005), o equivalente populacional de uma vaca leiteira pode variar de 16 a 38 pessoas.

Sem o manejo correto destes resíduos, o equilíbrio ambiental pode ser afetado, considerando situações de disposição de dejetos na água ou no solo sem tratamento, que ao

chegar em leitos de rios ocasiona eutrofização destes corpos em função do excesso de nutrientes, como o fósforo e nitrogênio (ALBUQUERQUE et al., 2022; SILVA, 2018).

Os dejetos bovinos são materiais orgânicos com macro e micronutrientes, que possuem alto valor energético e quando são incorporados a outros resíduos sólidos, alteram as propriedades do processo de produção, por conter uma alta concentração de microrganismos, umidade, pH quase neutro e biomassa extensa (MENESES, 2011).

2.2 Sorgo sacarino

Para atender a demanda do mercado de biocombustíveis, o setor precisa estar em constante expansão, no que diz respeito à capacidade industrial, bem como à área cultivada com a matéria-prima, especialmente em períodos de entressafra da cana-de-açúcar. Fontes alternativas de rentabilidade e sustentabilidade são uma busca constante por parte do setor sucroenergético para manter os altos níveis de produtividade e competitividade

O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) tem ganhado destaque como cultura complementar de bioenergia (FERNANDES et al., 2014; AHMAD DAR et al., 2018), principalmente por apresentar boa produtividade e características de colmo semelhante as da cana-de-açúcar (REGASSA e WORTMANN 2014, APPIAH-NKANSAH et al., 2019). Além disso, pode reduzir os riscos de desabastecimento de etanol e ajudar na estabilização dos preços deste combustível que sofre oscilações.

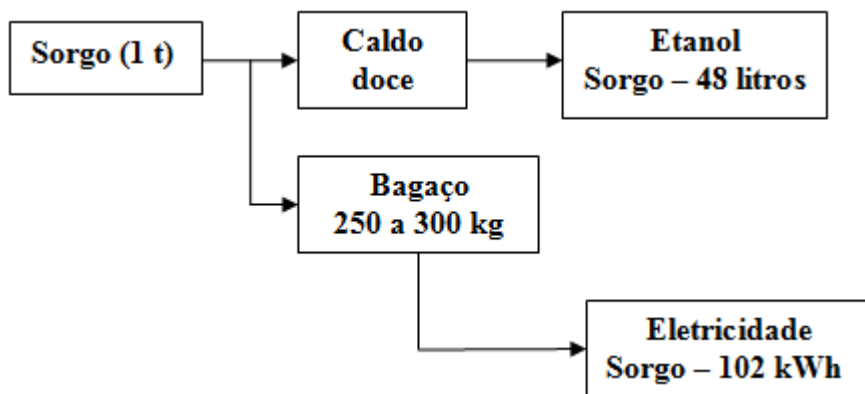
Porém, diante da possibilidade de elevação da produção de etanol pela utilização de culturas alternativas, tais como o sorgo sacarino, surgem também as preocupações relacionadas a quantidade e a destinação dos subprodutos gerados no processo, tornando-se necessário o estabelecimento de parâmetros operacionais que permitam o aproveitamento de todo o potencial desta matéria-prima.

O bagaço resultante do processo de extração de caldo dessa cultura, por exemplo, configura um subproduto que por vezes é usado para queima direta em caldeiras para geração de energia e calor pelas usinas sucroenergéticas (Figuras 1 e 2), porém representa um desperdício do potencial energético deste produto, principalmente devido à ineficiência do processo, que depende de vários fatores, como o teor de água.

De acordo com Appels et al. (2011a), para obter um balanço energético positivo na queima, o teor de água do bagaço deve ser menor que 60% e ainda neste caso, uma grande porcentagem da energia contida no produto vai ser consumida na evaporação dessa água.

Adicionalmente, a queima de biomassa tem um elevado índice de rejeição devido à liberação de compostos tóxicos.

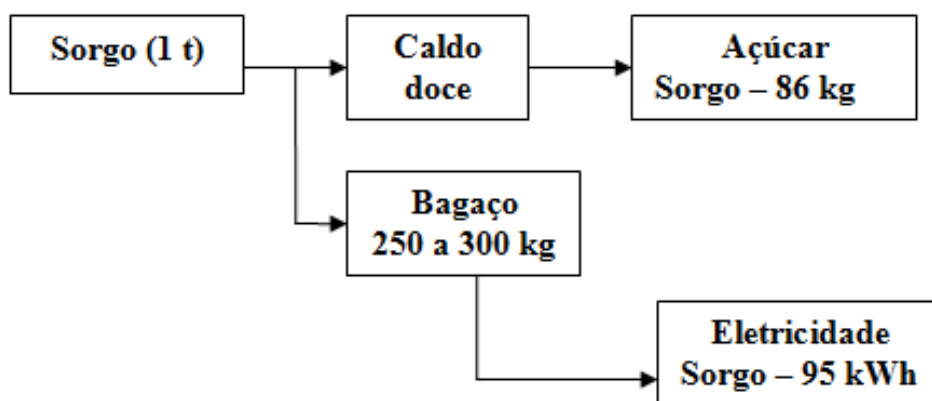
Figura 1- Rota de produção de etanol e eletricidade do caldo e do bagaço de sorgo, respectivamente.



Fonte: GNANSOUNOU et al., 2004.

Segundo Açma (2003), a energia presente na biomassa pode ser transformada, através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos, em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. O objetivo desta conversão é transformar um material carbonáceo de baixa eficiência energética para uma eficiência economicamente viável.

Figura 2- Rota de produção de açúcar e eletricidade do caldo e do bagaço de sorgo, respectivamente.



Fonte: GNANSOUNOU et al., 2004.

Nesse sentido, o emprego deste material em processos de codigestão anaeróbia poderia ser conveniente, visto que, em mistura com outros substratos, o bagaço do sorgo poderia estimular o crescimento microbiano devido ao seu aporte de açúcares no meio,

balancear a relação C/N, e ajudar a controlar processos inibitórios por meio da adsorção de compostos problemáticos.

Palatsi et al. (2009), demonstrou em seu trabalho utilizando bagaço de cana-de-açúcar que, materiais fibrosos podem competir com a biomassa microbiana em adsorver ácidos graxos de cadeia longa, evitando assim a inibição do sistema pela obstrução nos processos metabólicos de transporte dos microrganismos. Além disso, no que diz respeito à conversão de matéria vegetal em bioenergia, digestão anaeróbia é termodinamicamente mais eficiente comparada com a produção de etanol (SAMSON et al., 2008).

2.3 Biodigestores

Os biodigestores se caracterizam essencialmente pela existência de uma câmara fechada na qual resíduos orgânicos são degradados e estabilizados a partir ação de microrganismos anaeróbios, tendo como produto o biogás. São muito utilizados devido à sua praticidade e simplicidade, com baixo custo operacional e de implantação, representando uma alternativa tecnológica para o correto gerenciamento de variados resíduos orgânicos. Há mais de dois séculos já se tem conhecimento sobre estes e sua boa resposta tanto na geração de energia quanto na produção de biofertilizantes (FERREIRA e SILVA, 2009).

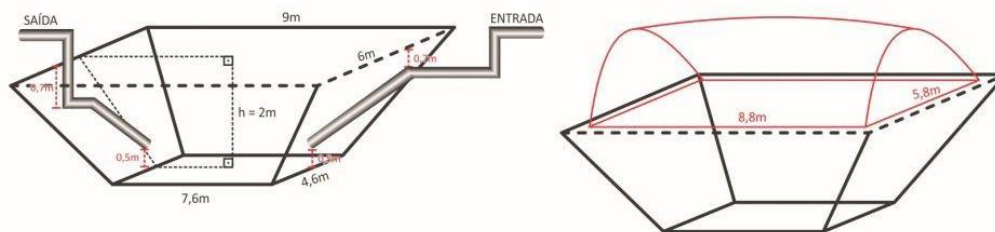
A classificação dos biodigestores é feita segundo diversos aspectos, dentre eles o teor de sólidos, forma de alimentação e número de estágios, bem como pela quantidade de resíduo orgânico tratado (FILHO, 2014). Em se tratando da forma de abastecimento, estes podem ser em batelada ou contínuos. Os primeiros são aqueles em que o carregamento de resíduo é realizado uma única vez e a substituição acontece somente após o período adequado de digestão de todo o lote. Já os modelos contínuos são aqueles abastecidos diariamente, tendo, portanto, a entrada de substrato orgânico que será digerido e a saída do material já tratado (OLIVER, 2008).

Devido às diversas possibilidades de emprego, os biodigestores são, na maioria das vezes, projetados intencionando o atendimento de uma ou mais utilidades. Para isso, diferentes modelos são propostos, pensando-se prioritariamente na obtenção de melhores rendimentos e nas propriedades que os tornam mais adequados ao tipo de substrato que se pretende utilizar, bem como na frequência com que são obtidos. Dentre os modelos mais utilizados tem-se o biodigestor balão, o modelo chinês, modelo indiano e o modelo batelada.

2.3.1 Biodigestor Balão

O biodigestor modelo balão é um modelo cuja construção é simples e de baixo custo; na maioria das vezes, a instalação é realizada diretamente sobre o terreno ou com pouca profundidade (figura 3). Também apresenta fácil limpeza, descarga e facilidade de transporte. No entanto, tem vida útil curta e é mais sensível às variações térmicas que os outros modelos, sendo sua utilização indicada para locais onde predominem temperaturas altas e constantes.

Figura 3- Biodigestor Balão

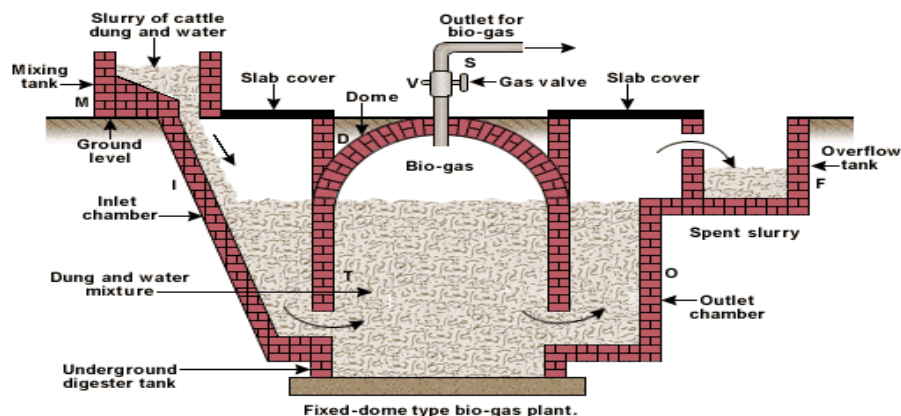


Fonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, 2020.

2.3.2 Biodigestor Modelo Chinês

Este tipo de biodigestor caracteriza-se pela presença de uma câmara cilíndrica em alvenaria onde ocorre a degradação do resíduo e um teto impermeável para armazenamento do biogás (cúpula fixa) (Figura 4).

Figura 4- Biodigestor modelo chinês



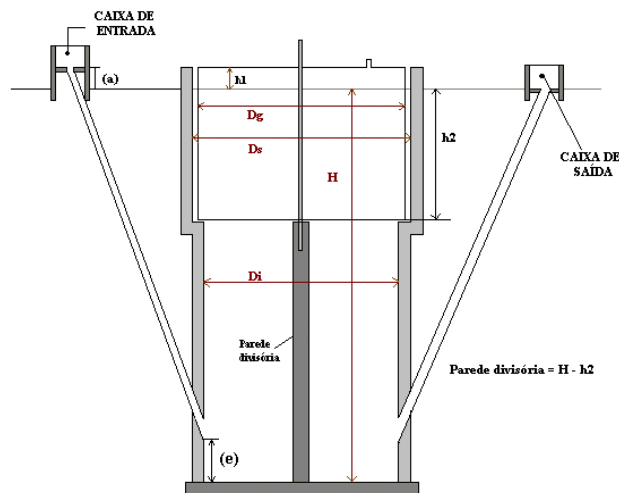
Fonte: Adaptado de Nogueira (1986)

O seu funcionamento baseia-se no princípio de prensa hidráulica, onde ocorrem aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás, resultando em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão. (JORGE e OMENA, 2012). Sua construção necessita de supervisão rigorosa, devendo ser bem impermeabilizado para evitar vazamentos tanto do resíduo quanto de biogás.

2.3.3 Biodigestor Modelo Indiano

O biodigestor de modelo indiano é composto por uma câmara de digestão e de um depósito de gás móvel. Possuem uma parede central para dividir o tanque de fermentação de duas câmaras, para assim permitir que o material possa circular pelo interior da câmara de fermentação (figura 5) (TARRENTO, 2006). Sua construção e manutenção podem ter custo elevado pela necessidade de uma campânula, geralmente metálica, que entra em corrosão resultando uma vida útil relativamente curta.

Figura 5- Biodigestor modelo indiano



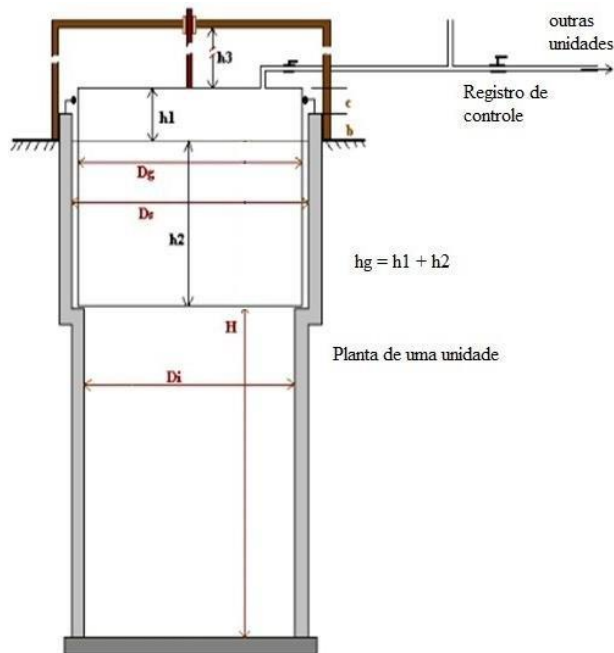
Fonte: DEGANUTTI et al., 2002

2.3.4 Biodigestor Modelo Batelada

Composto por um tanque anaeróbio ou vários tanques em série, o abastecimento deste

tipo de biodigestor é realizado de uma única vez. A biomassa permanece sob fermentação por um determinado período para a produção de biogás, sendo descarregado após completo ciclo de digestão anaeróbio (DEGANUTTI et al., 2002), sendo, por isto, recomendado quando a disponibilidade de resíduo ocorre em períodos mais longos (Figura 6).

Figura 6- Biodigestor modelo batelada



Fonte: DEGANUTTI et al., 2002

2.4 Codigestão anaeróbia

A codigestão é um processo de degradação simultânea, na mesma instalação, de dois ou mais tipos de resíduos, de composições e procedências diferentes, com características complementares (HARTMANN et al., 2002; FERNANDEZ et al., 2005), e o objetivo é aumentar a eficiência do processo de digestão anaeróbia, com impactos positivos não só nesta em si, mas também a nível econômico (BRAUN e WELLINGER, 2002; ALVES, 2015).

A digestão conjunta de múltiplos substratos é refletida no aumento da produção de metano e esta se dá de formas variadas. Primeiramente porque tende a equilibrar e otimizar a razão C:N:P e as necessidades de minerais e metais, segundo, porque as características dos diferentes substratos podem ser complementadas para minimizar efeitos inibidores ou tóxicos que ocorreriam na degradação de um único (BRAUN e WELLINGER, 2002; AGDAG e SPONZA, 2007). Além disso, aumenta a carga orgânica biodegradável (SOSNOWSKI et al.,

2003) e o poder tampão (MSHANDETE et al., 2004).

No processo de codigestão, a mistura é mais homogênea quando existem substratos líquidos ou com elevado teor de água, tais como lodo, lamas ou chorume (FERREIRA, 2008). Agregados de partículas, materiais flutuantes e resíduos com propriedades dinâmicas pouco favoráveis podem ser mais facilmente digeridos depois de misturados com estes substratos. Mata-Alvarez e Llabrés (2000) descrevem que, substrato é qualquer substância que contenha uma quantidade significativa de matéria orgânica, passível de ser convertida em biogás, e ainda que, as características destes, têm grande influência nos aspectos tecnológicos e de operação dos sistemas anaeróbios bem como, na qualidade dos produtos finais: o biogás e efluente.

Em termos econômicos, a codigestão de resíduos também é considerada favorável pois, por vezes, as quantidades de substratos orgânicos gerados, se considerados individualmente não são suficientes para viabilizar a construção de um sistema de digestão anaeróbia (MISI e FOSTER, 2001). Levando tal fato em consideração, diversos tipos de substratos podem ser utilizados na codigestão, a exemplo: águas residuárias de atividades domésticas ou industriais, resíduos não comestíveis de culturas alimentares, resíduos resultantes da atividade agropecuária, como dejetos bovinos, suínos e avícolas, resíduos de óleos e gorduras animais, fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, além dos substratos provenientes da indústria sucroenergética, da atividade propriamente dita, como melaço e vinhaça, e aqueles gerados no processamento, como o bagaço (de cana-de-açúcar, milho, sorgo).

Ress et al., (1998) afirma que, os resíduos não comestíveis de culturas alimentares, tais como folhas, bem como os substratos de culturas energéticas, como bagaço e palha de milho, trigo, arroz e sorgo, oferecem grande potencial para a digestão anaeróbia. A codigestão destes materiais com outros resíduos pode melhorar o rendimento da digestão anaeróbia, principalmente por fornecer os nutrientes necessários, aumentando a eficiência do digestor. No entanto, algumas vezes, a produção de metano de materiais como estes, com elevado teor de celulose, só será possível, mediante pré-tratamento, devido à elevada proporção de materiais não degradáveis presentes (PETERSSON et al., 2007).

Diversos são os estudos de codigestão de resíduos orgânicos de diferentes origens (MISI e FOSTER, 2002; CORTI e LOMBARDI, 2007; GOMEZ-LAHOZ et al., 2007; BAH, et al., 2014; ALBUQUERQUE e ARAÚJO, 2016; FREITAS, et al., 2019), no entanto a diversidade de parâmetros operacionais e de resultados obtidos é significativa, pois a variabilidade da composição da mistura de alimentação dos reatores anaeróbios afeta a

produção do biogás, quer em termos de quantidade, quer em termos de qualidade (DI PALMA et al., 1999).

Recentemente, novas combinações de substratos tem sido propostas, com maior enfoque para o uso de fontes orgânicas complexas, pois materiais facilmente biodegradáveis já estão sendo utilizados em outros processos ou não estão disponíveis (MATA-ALVAREZ et al., 2014). No entanto, ainda são escassos estudos que elucidem a codigestão de resíduos bovinos e bagaço de culturas sucroenergéticas, tais como o sorgo sacarino para a produção de biogás. Embora, outros substratos também lignocelulósicos já venham sendo usados para esta finalidade, com resultados satisfatórios.

Nos estudos de RABELO, (2018), a codigestão de palha de milho com resíduos da bovinocultura leiteira apresentou potencial de produção e qualidade de biogás em condições mesofílicas. Li et al. (2013), ao estudar a produção de metano a partir de digestão anaeróbia de resíduos de cozinha, palha de milho e estrume de frango, observaram que a partir do 11º dia o conteúdo de metano no biogás era de aproximadamente 58%, chegando ao final do experimento com valores entre aproximadamente 60 e 70%.

Trabalhando com a codigestão anaeróbia de bagaço de cana-de-açúcar tratado com CO_2 e resíduo gorduroso de laticínio, Henao (2017) observou que a produção metanogênica aumentou. Angelidaki e Ahring (1997), empregaram resíduos com elevado conteúdo de fibras lignocelulósicas na codigestão com efluente da indústria de óleo, aproveitando suas características físico químicas e favorecendo o balanço do sistema. Já Alino (2019), observou que a produção de metano do co-armazenamento de resíduos de fruta e vegetais com bagaço de cana-de-açúcar na proporção de 5% deste em relação ao primeiro, apresentou a melhor taxa de conversão em metano, com 27% de eficiência quando comparado a produção teórica de biogás com o pré-tratamento convencional do bagaço com NaOH.

2.4.1 Etapas da digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia, consiste fundamentalmente na conversão da matéria orgânica, através da mineralização parcial do carbono, por uma complexa interação de diferentes microrganismos, maioritariamente em biogás (Figura 7) e numa quantidade reduzida de biomassa bacteriana (MATA-ALVAREZ, 2002a).

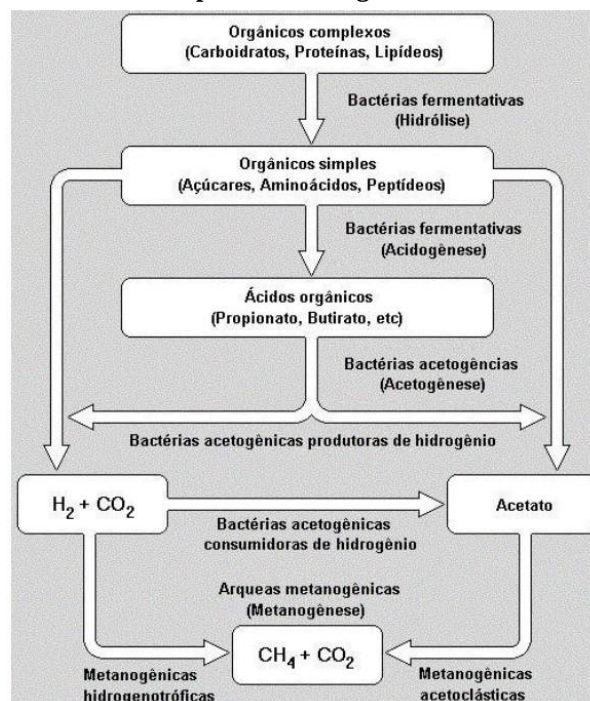
Figura 7: Composição do Biogás



Fonte: Portal energia e biogás, 2022.

Essa conversão é atingida através de várias etapas (Figura 7). Normalmente são consideradas quatro distintas, as quais envolvem uma população microbiana altamente variada, consistindo em grupos de bactérias estritas e facultativas (GUJER e ZEHNDER, 1983).

Figura 8: Rotas metabólicas envolvidas no processo de digestão anaeróbia



Fonte: Chernicharo (2007)

2.4.1.1 Hidrólise

A hidrólise representa a primeira etapa da digestão anaeróbia. Nela, enzimas

hidrolíticas, ou seja, aquelas excretadas por bactérias hidrolíticas extracelulares, degradam compostos de elevado peso molecular, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, em compostos monoméricos, que possam ser assimilados pelas bactérias fermentativas, os quais podem atravessar suas paredes celulares (CHERNICHARO, 2007).

Existe a possibilidade de esta etapa ser mais lenta que as demais, limitando o processo global da digestão anaeróbia, sendo determinada principalmente pelos fatores: tempo de residência do substrato no reator, temperatura, pH, tamanho e distribuição das partículas (LETTINGA et al., 1996).

Contudo, segundo Monnet (2003), essa etapa de degradação anaeróbia pode ser acelerada por meio da adição de compostos químicos, proporcionando um maior rendimento na produção de metano e ainda, segundo Anderson et al. (2003), a composição de microrganismos que são ativos nesta etapa está em função do tipo de substrato contido no sistema.

2.4.1.2 Acidogênese

Nesta fase, subsequente à hidrólise, os monômeros resultantes da primeira, são degradados pelas bactérias fermentativas anaeróbias obrigatórias e facultativas e produzem ácidos orgânicos voláteis, álcoois, ácido láctico, hidrogênio, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, amônia e novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2007).

A quantidade e o tipo de produtos obtidos na fase de acidogênese dependem fundamentalmente da pressão parcial de hidrogênio (H_2) no digestor, que está associada à atividade de bactérias utilizadoras de H_2 , como por exemplo, algumas espécies de bactérias metanogênicas e bactérias redutoras de sulfatos (McINERNEY, 1999).

Em boas condições operacionais, nos digestores, a concentração de H_2 é normalmente muito baixa, devido à enorme capacidade de utilização deste pelas bactérias, seguindo principalmente a via metabólica que resulta na produção de acetato. A via metabólica de produção de intermediários (ácidos orgânicos voláteis, álcoois e lactato) vai assumindo importância à medida que se verifica um aumento da pressão parcial de H_2 devido, por exemplo, a redução do valor do pH (<6). Uma redução do valor do pH igual ou inferior a 4 pode levar à inibição do processo fermentativo (HWANG, 2004).

2.4.1.3 Acetogênese

Na acetogênese, as bactérias acetogênicas procedem à degradação dos compostos formados durante a fase anterior (acidogênese), como os ácidos orgânicos voláteis, álcoois, alguns aminoácidos e compostos aromáticos. Os produtos resultantes da degradação destes

compostos são hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, que serão substrato para as bactérias metanogênicas (McINERNEY, 1999; CHERNICHARO, 2007).

Quando se formam os ácidos acético e propiônico, também se forma grande quantidade de hidrogênio, ocasionando decréscimo do pH do meio. Neste caso, há duas formas pelas quais o hidrogênio será consumido. A primeira, será pelas bactérias metanogênicas, uma vez que estas utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para produção de metano. A segunda, será através da formação de ácidos orgânicos, tais como o propiônico e butírico pela reação do hidrogênio com o dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007).

A temperatura é um dos principais fatores que influencia a termodinâmica das reações de Acetogênese. A formação de hidrogênio (H_2) a partir da oxidação de ácidos orgânicos é energeticamente mais favorável a temperaturas mais elevadas, enquanto o seu consumo pelos microrganismos metanogênicos é menos favorável a temperaturas superiores. No entanto, a velocidade de degradação dos ácidos orgânicos aumenta normalmente com temperaturas mais elevadas devido ao aumento da atividade microbiana, da sua taxa de crescimento e da degradação do substrato (SCHINK, 1997).

2.4.1.4 Metanogênese

No último passo da digestão anaeróbia forma-se o metano, por dois processos, a metanogênese hidrogenotrófica, na qual o CO_2 é um receptor de elétrons, sendo convertido a metano juntamente com o hidrogênio, e a metanogênese acetoclástica, que utiliza o acetato como substrato para produzir metano e dióxido de carbono. Este último processo é o que contribui para a maior parte do metano produzido (GARCIA-HERAS, 2002, CHERNICHARO, 2007).

As bactérias metanogênicas são dependentes do bom funcionamento de todas as fases anteriores para o fornecimento dos substratos adequados para a sua atividade (SILVEIRA, 2009).

2.5 Fatores intervenientes na digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia envolve uma população de microrganismos dependente do controle das condições ambientais, principalmente em se tratando da interação que é requerida entre bactérias fermentativas e metanogênicas, sendo, portanto, o sucesso do processo, condicionado ao balanço minucioso do sistema ecológico (CHERNICHARO, 2007). Nesse sentido, dentre os parâmetros que afetam o processo e suas etapas, salienta-se a temperatura, pH, alcalinidade e nutrientes.

2.5.1 Temperatura

Este é um dos fatores físicos mais importantes na seleção das espécies, isto porque, como os microrganismos não conseguem controlar a temperatura interna de suas células, esta será então controlada pela temperatura ambiente externa (CHERNICHARO, 2007).

Existem diferentes faixas de temperatura nas quais o processo de digestão anaeróbia pode ocorrer, mas três principais estão associados ao crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos, sendo estas as faixas psicrófila, que compreende de 0 a 20°C, a mesófila, de 20 a 45°C e a termófila, maior que 45°C (LETTINGA et al., 1996). A cada uma dessas faixas, estão associados três valores de temperatura que caracterizam o crescimento microbiano, sendo: temperatura mínima, a faixa abaixo da qual não é possível o crescimento microbiano; temperatura ótima, aquela onde o crescimento é máximo e temperatura máxima, aquela acima da qual o crescimento microbiano também não é possível (CHERNICHARO, 2007).

A faixa de temperaturas mesófilas é a mais utilizada nos sistemas de tratamento por digestão anaeróbia devido ao seu desempenho operacional, no entanto a de temperaturas termófilas revela-se mais eficaz, porque permite a destruição de microrganismos patogênicos e uma boa separação entre a fração sólida e líquida. Os sistemas termófilos suportam efluentes com elevadas cargas orgânicas, apresentando uma taxa de crescimento superior à dos sistemas mesófilos e uma taxa de produção de metano superior. Contudo, tem a desvantagem de necessitar de temperaturas mais elevadas, e desse modo, o custo intrínseco à energia torna um gargalo para a operação (KIM, et al., 2002).

O monitoramento da temperatura sobre a população microbiana é de extrema importância, uma vez que, em temperaturas ótimas pode-se conseguir considerável redução no volume do reator, já que a taxa de crescimento máxima desta população cresce com o aumento da temperatura. Porém, ainda que elevadas temperaturas sejam desejadas, a manutenção de uma temperatura de forma uniforme dentro do sistema é importante, uma vez que o processo de digestão anaeróbia em si é sensível a mudanças acentuadas de temperatura, podendo ocasionar desequilíbrio as populações microbianas e consequentemente, falha no processo (CHERNICHARO, 2007).

2.5.2 pH

O processo de digestão anaeróbia está intimamente relacionado e dependente do pH, uma vez que, as bactérias metanogênicas apresentam atividade significativa quando este se

mantém aproximadamente neutro, isto é, na faixa de 6,6 a 7,4 (CHERNICHARO, 2007). Este parâmetro também manifesta efeito sobre o sistema de outras formas, seja sobre as atividades das enzimas, ocasionando alterações em suas estruturas proteicas, ou ainda, afetando a toxicidade de alguns compostos (LETTINGA et al., 1996).

A estabilização do pH no processo biológico é sobretudo influenciada pela composição do substrato, uma vez que a rápida acumulação de ácidos orgânicos voláteis pode promover uma diminuição deste para níveis de inibição. Nestes casos a correção do mesmo poderá efetuar-se pela adição de produtos alcalinos (FERREIRA, 2008). Em geral, o bicarbonato de sódio é utilizado para esta função, uma vez que desloca o equilíbrio suavemente para o valor desejado, sem perturbar o equilíbrio físico e químico da população microbiana frágil (RAJESHWARI et al., 2000).

Este parâmetro também permite inferir sobre a estabilidade do meio em que ocorre o processo de digestão anaeróbia, dado que a sua variação depende da capacidade tampão deste meio. Quando operado abaixo de 6,5 ou acima de 8,0 constantemente, o sistema poderá ter a sua produção de metano severamente comprometida. Aliado a isto, mudanças muito acentuadas de pH também poderão afetar negativamente o processo como um todo, sendo necessário sua recuperação, que por sua vez, dependerá do tipo de dano causado à população microbiana, se permanente ou temporário (CHERNICHARO, 2007).

2.5.3 Alcalinidade

A alcalinidade confere a capacidade tampão do sistema, ou seja, a resistência a variações no pH. No processo de digestão anaeróbia, o ácido orgânico e os ácidos voláteis são os principais fatores que interferem diretamente no pH. Valores de pH entre 6,0 e 7,5 levam a capacidade de tamponamento do sistema a ser quase que totalmente dependente da relação gás carbônico e alcalinidade, o qual em equilíbrio com a dissociação do ácido carbônico tende a regular a concentração de íons de hidrogênio (CHERNICHARO, 2007).

A verificação cotidiana da alcalinidade é mais importante que o monitoramento do pH, isto porque, a escala logarítmica do pH indica que pequenas diminuições no seu valor, poderá levar ao consumo de grande quantidade de alcalinidade, que por sua vez, diminui a capacidade de tamponamento do sistema (CHERNICHARO, 2007).

A alcalinidade total de um sistema de digestão anaeróbia é composta pela alcalinidade parcial (AP), equivalente à alcalinidade dos bicarbonatos, e a alcalinidade intermediária (AI), praticamente equivalente à alcalinidade dos ácidos voláteis. A relação entre estas duas alcalinidades (AI/AP) é considerada um parâmetro extremamente útil para indicar a

ocorrência de distúrbios do processo anaeróbio, uma vez que, o desbalanceamento na produção e no consumo de ácidos voláteis provoca o aumento dessa relação. Valores próximos de 0,3 indicam estabilidade do processo, sendo que valores acima de 0,3 indicam distúrbios (RIPLEY, 1986). Também sendo possível observar estabilidade com valores acima deste, no entanto, sugere-se a averiguação de cada caso pontualmente (FORESTI, 1994).

2.5.4 Nutrientes

As necessidades nutricionais da população microbiana do sistema de digestão anaeróbia é determinada pela composição química de suas células e, portanto, de forma empírica, já que esta nem sempre é conhecida (CHERNICHARO, 2007). Para que o processo como um todo seja bem-sucedido, nutrientes inorgânicos devem ser fornecidos para o crescimento dos microrganismos e em quantidades satisfatória, caso contrário, é necessário considerar alguma alternativa de compensação, seja através da aplicação de cargas menores, ou admitindo menor eficiência do sistema.

Os principais nutrientes requeridos no processo são nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes. O primeiro é requerido em maiores quantidades para o crescimento dos microrganismos, sendo a amônia e o nitrogênio orgânico liberado da degradação as principais fontes de nitrogênio utilizadas por estes. O fósforo é requerido em menores quantidades que o nitrogênio, e a maioria dos microrganismos é capaz de utilizar o ortofosfato inorgânico, que pode ser incorporado pelas células em crescimento, através da mediação de enzimas fosfatases. O enxofre é requerido em quantidades relativamente baixas, em magnitudes semelhantes ao fósforo. Sua presença na forma de sulfatos pode limitar a metanogênese, uma vez que as bactérias redutoras de sulfato competem por substratos como hidrogênio e acetato. Em contrapartida, estas mesmas bactérias necessitam de sulfeto para seu crescimento. Já em se tratando dos micronutrientes, ferro, cobalto, níquel e molibdênio são os principais requeridos, essencialmente pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas (CHERNICHARO, 2007).

3 Considerações finais

Diante do que foi abordado, é possível considerar que a elevada produção de dejetos animais e lignocelulósicos provenientes de atividades agropecuárias e sucroenergética, respectivamente, requer urgente destinação, e esta pode ser viabilizada pela codigestão anaeróbia, que dentre outras vantagens, possibilita a produção de bioenergia. Porém, apesar da vasta gama de trabalhos envolvendo a digestão anaeróbia de resíduos agropecuários como

fonte de energia, estudos neste mesmo sentido ainda não são tão elucidados para o uso de biomassa vegetal, combinada ou não, para esta mesma finalidade.

É necessário especial atenção e interesse no desenvolvimento de estudos que explorem as potencialidades do bagaço do sorgo na digestão anaeróbia para fins energéticos, principalmente ao se comparar com o bagaço de outras culturas, pois este apresenta ciclo curto, quantidade significativa de produção de biomassa e condições favoráveis de plantio, sendo portanto, por estas vantagens, estudado para complementar a cana no período de entressafra.

Por fim, conclui-se, que dadas as potencialidades de ambos os resíduos abordados neste trabalho, estudos que avaliem sua codigestão são indispensáveis, uma vez que, existe grande interesse em encontrar alternativas que, gradualmente possam complementar ou mesmo substituir a atual matriz energética baseada na extração de combustíveis fósseis. Isto porque, o tema ambiental vem ganhando cada vez mais a atenção mundial. As mudanças climáticas, caracterizadas pelo aquecimento global, em grande parte decorrente das emissões de dióxido de carbono (CO₂), evidenciam a necessidade de diminuir a dependência mundial em relação aos combustíveis fósseis, por serem estes grandes contribuintes para esta problemática.

4 Referências bibliográficas

ABDESHAHIAN, P.; LIM, J.S.; HO, W.S HASHIM, H.; LEE, C.T. Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 714-723, 2016

ABDULLAH, B.; SYED MUHAMMAD, S. A. F.; SHOKRAVI, Z.; ISMAIL, S.; KASSIM, K.A.; MAHMOOD, A. N.; AZIZ M. M. A. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.107, p.37-50, 2019.

AÇMA, H. H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion e Management**, Istambul, v. 44, n. 1, p. 155-162, 2003.

AGDAG, O. N; SPONZA, D. T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. **Journal of Hazardous Materials**. v. 140, p. 75–85, 2007.

AHMAD DAR, R.; AHMAD DAR, E.; KAUR, A. GUPTA PHUTELA, U. Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p.4070-4090, 2018.

ALBUQUERQUE, L. S.; ARAÚJO, J. C. S. Biogas production by co-digestion using a mixture of cow manure and conilon coffee husks. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 2, n. 3, p. 44-54, 2016.

ALBUQUERQUE, M. G.; SOUSA, S. S. O.; ARRUDA, V. C. M.; EL-DEIR, S. G. Impactos socioambientais dos dejetos da pecuária no âmbito rural: uma revisão de literatura. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 15, p. 517-529, 2022.

ANDERSON, K.; SALLIS, P.; UYANIK, S. **Anaerobic treatment processes**. In: MARA, D.; HORAN, N. (Eds.) The handbook of water and wastewater microbiology. Academic Press, p. 391-396, 2003.

ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K.; Thermophilic anerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia, **Enviromental Biotechnology**, v. 38, p. 560-564, 1993.

ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure , household waste or sewage sludge. **Biodegradation**, n. 8, p. 221–226, 1997.

APPELS, L.; LAUWERS, J.; DEGRÈVE, J.; HELSEN, L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; VAN IMPE, J.; DEWIL, R. Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295–4301, 2011a.

APPIAH-NKANSAH, N. B.; LI, J.; ROONEY, W.; WANG, D. A. review of sweet sorghum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. **Renewable Energy**, v.143, p. 1121-1132, 2019.

AWOSUSI, A.; SETHUNYA, V.; MATAMBO, T. Synergistic effect of anaerobic co-digestion of South African food waste with cow manure: Role of low density-polyethylene in process modulation. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 793-803, 2021.

BAH, H.; ZHANG, W.; WU, S.; QI, D.; KIZITO, S.; DONG, R. Evaluation of batch anaerobic co-digestion of palm pressed fiber and cattle manure under mesophilic conditions. **Waste Management**, v. 34, p. 1984-1991, 2014.

BANERJEE, R.; PANDEY, A. Bio-industrial applications of sugarcane bagasse: a technological perspective. **International Sugar Journal**, v. 104, n. 1238, p. 64-67, 2002.

BOUALLAGUI, H.; LAHDHEB, H.; ROMDAN, E.B.; RACHDI, B.; HAMDI, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 1844-1849, 2009.

BRAUN, R.; WELLINGER, A. Potential of Co-digestion. **IEA Bioenergy**, p.1–16, 2002.

CHANDRA, R.; TAKEUCHI, H.; HASEGAWA, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 1462-1476, 2012.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CORTI, A.; LOMBARDI, L. Anaerobic co-digestion of source selected organic waste and sewage sludge, in Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italia, 2007.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: **Encontro de energia no meio rural**, 4., 2002, Campinas. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 24 Nov. 2022.

DI PALMA, L.; MEDICI, F.; MERLI, C.; PETRUCCI, E. Optimizing gas production in the anaerobic co-digestion of the organic fraction of solid waste from markets, in **II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste**, Barcelona, 1999.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021 - Relatório Síntese/Ano Base 2020**. Rio de Janeiro-RJ, 2021.

FERNANDES, G.; BRAGA, T. G.; FISCHER, J.; PARRELLA, R. A. C.; RESENDE, M. M.; CARDOSO, V. L. Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. **Renewable Energy**, v.71, p. 518-524, 2014.

FERNÁNDEZ, A.; SÁNCHEZ, A.; FONT, X. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. **Biochemical Engineering Journal**, v. 26, p. 22-28, 2005.

FERREIRA, Luís Manuel Vicente. **Contribuição para o estudo da modelação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos. Estudo da influência da geometria do reator na cinética do processo**. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2008.

FERREIRA, J. C. B.; SILVA, J. N. Biodigestor: aplicações e potencialidades. Um estudo de caso do IFMG campus Bambuí. In: **Semana de Ciência e Tecnologia do IFMG campus Bambuí**, 2. Jornada Científica, Bambuí, 2009.

FILHO, I. O. S. **Avaliação da Toxicidade e Remoção de Matéria Orgânica de Efluente de Biodigestor de Resíduos Sólidos Orgânicos Tratado em Wetlands**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

FORESTI, E. **Fundamentos do processo de digestão anaeróbia**. In: Taller y Seminario Latinoamericano, 3., memorias... Montevideo: ICA. p. 96-109, 1994.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A. C.; ZAIAT, M & CAVALCANTI, P.F.F. **Fundamentos do tratamento anaeróbio**. In Campos, J. R. (org). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

FREITAS, Kleber Alves de. **Co-digestão anaeróbia de águas residuárias da bovinocultura de leite e do despulpamento de frutos do cafeeiro em reatores UASB em dois estágios**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2019.

GARCIA-HERAS, J. L. **Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes**, in Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, J. Mata-Alvarez Ed., IWA Publishing, p. 21-62, 2002.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A.; WYMAN, C. E. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. **Bioresource Technology**, vol. 96, p. 985-1002, 2004.

GOMEZ-LAHOZ, C.; FERNÁNDEZ-GIMÉNEZ, B.; GARCIA-HERRUZO, F.; RODRIGUEZ-MAROTO, J. M.; VEREDA-ALONSO, C. Biomethanization of mixtures of fruits and vegetables solid wastes and sludge from a municipal wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Science and Health Part A**, v. 42, n. 4, p. 481-48, 2007.

GUJER, W.; ZEHNDER, A. J. B. Conversion Processes in Anaerobic Digestion. **Water Science and Technology**, v. 15, p. 127-167, 1983.

HAN, K.; PITMAN, W. D.; KIM, M.; DAYS, D. F.; ALISON M. W.; McCORMICK, M. E.; AITA, G. Ethanol production potential of sweet sorghum assessed using forage fiber analysis procedures. **GCB Bioenergy**, v. 5, p. 358-366, 2013.

HARTMANN, H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. **Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types**, in Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, J. Mata-Alvarez Ed., IWA Publishing, p. 180-199, 2002.

HWANG, M. H.; JANG, N. J.; HYUN, S. H.; KIM, I. S. Anaerobic bio-hydrogen production from ethanol fermentation: **The role of pH**. **Journal of Biotechnology**, v. 111, p. 297–309, 2004.

IBGE (ed.). Pesquisa Trimestral do Leite: quantidade de leite cru adquirido e industrializado no mês e no trimestre (mil litros), 1º trimestre 2022.

JORGE, L., H. A.; OMENA, E. Biodigestor. Dossiê Técnico. SENAI/ AM- Escola SENAI Antônio Simões. Março, 2012.

KIM, M.; AHN, Y. H.; SPEECE, R. E. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. **Water Research**, v. 36, p. 4369–4385, 2002.

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L.W.; ZEEMAN G. **Biological wastewater treatment. Part I: Anaerobic wastewater treatment**. Lecture notes. Wageningen Agricultural University, 1996.

LI, Y.; ZHANG, R.; LIU, X.; CHEN, C.; XIAO, X.; FENG, L.; HE, Y.; LIU, G. Evaluating methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste, corn stover, and chicken manure. **Energy Fuels**, v. 4, n.27, p. 2085-2091, 2013.

LOHANI, S.P.; DHUNGANA, B.; HORN, H.; KHATIWADA, D. Small-scale biogas technology and clean cooking fuel: Assessing the potential and links with SDGs in low-income countries – A case study of Nepal. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p.101301, 2021.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GUIZA, M. S.; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTAL, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 412–427, 2014.

MATOS, A. T. **Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais**. Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental / UFV. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2005.

MENESES, Silvana Lourença. **Cana-de-açúcar e silagem de cana em codigestão com esterco bovino na produção de biogás**. 2011. Tese (Doutorado em Zootecnia), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2011.

MISI, S. N.; FORSTER, C. F. Batch co-digestion of multi-component agro-wastes, **Bioresource Technology**, v. 80, n. 1, p. 19-28, 2001.

MONNET, F. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. **Remade Scotland**, p. 48, 2003.

MSHANDETE, A.; KIVAIISI, A.; RUBINDAMAYUGI, M.; MATTIASSON, B. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish waste. **Bioresource Technology**, v. 95, n. 1, p. 19-24, 2004.

OCDE/FAO (2021) Perspectivas agrícolas OCDE-FAO 2021-2030. OCDE, Paris, p.337.

OLIVEIRA, Fábio Martins. **Hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado com uréia**. 2011. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2011.

PALATSI, J. et al. Strategies for recovering inhibition caused by long chain fatty acids on anaerobic thermophilic biogas reactors. **Bioresource technology**, v. 100, p. 4588–96, 2009.

PETERSSON, A.; THOMSEN, M. H.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; THOMSEN, A. B. Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, p. 812–9, 2007.

RABELO, ENOCK ALVES. **Palhas de milho e de feijão como co-substratos na digestão anaeróbia de esterco bovino leiteiro**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2018.

RAJESHWARI, K.; BALAKRISHNAN, M.; KANSAL, A.; LATA, K.; KISHORE, V. V. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. **Renewable and Sustainable Energy**, v. 4, p. 135–156, 2000.

REGASSA, T. H.; WORTMANN, C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. **Biomass Bioenergy**, v.64, p.348-355, 2014.

RESS, B. B.; CALVERT, P. P.; PETTIGREW, C. A.; BARLAZ, M. A. Testing anaerobic biodegradability of polymers in a laboratory-scale simulated landfill. **Environmental Science and Technology**, v. 32, p. 821–7, 1998.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RODRIGUES, Fábio de Ávila. **Avaliação da tecnologia de hidrólise ácida de bagaço de cana**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ROSETO HENAO, Jenny Carolina. **Digestão anaeróbia de resíduo de caixa de gordura de laticínio e bagaço de cana de açúcar pré-tratado com CO₂ sub e supercrítico**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

SAMSON, R. et al. **Developing Energy Crops for Thermal Applications: Optimizing Fuel Quality, Energy Security and GHG Mitigation**. In: PIMENTEL, D. 1.ed. Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems. Netherlands: Springer Netherlands, 2008.

SCHINK, B. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 61, p. 262–280, 1997.

SILVA, H. W. Produção de biogás utilizando dejetos de vacas leiteiras—uma alternativa viável para redução de impactos ambientais. **Revista Técnico-Científica**, 13, 2018.

SILVEIRA, Gonçalo dos Santos. **Estudo de codigestão anaeróbia de lamas domésticas como efluente da indústria da fermentação da levedura do pão da empresa Mauri Fermentos**. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia), Faculdade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

SOSNOWSKI, P.; WIECZOREK, A. LEDAKOWICZ, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. **Advances in Environmental Research**, v. 7, n. 3, p. 609-616, 2003.

SUZUKI, Beatryz Prenzier. **Geração de biogás utilizando cama, aviário e manipueira.** Dissertação (Mestrado em Energia na agricultura) - Universidade Estadual Do Oeste Do Paraná, 2012.

TARRENTO. G. E.; MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedade rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: **SIMPEP**, 13. 2006. Bauru, SP, Brasil.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**, 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.