

Panorama da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos: tendências e potencialidades

Panorama of dry anaerobia digestion of organic residues: trends and potentialities


- **Data de entrada:** 13/02/2019
- **Data de aprovação:** 05/02/2020

Solaine Ramos Sampaio^{1*} | Caio Rebuli de Oliveira¹ | Ricardo Franci Gonçalves¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.048>

ORCID ID

Sampaio SR  <https://orcid.org/0000-0002-6097-0047>

Gonçalves RF  <https://orcid.org/0000-0002-2048-9451>

Resumo

É crescente a quantidade de estudos que afirmam que a digestão anaeróbia (DA) representa não só uma saída para a grande geração de resíduo orgânico no mundo, mas uma alternativa às tradicionais fontes de energia. A referida tecnologia promove a recuperação de biomassas diversas por meio da geração de produtos potencialmente rentáveis e ambientalmente corretos, como o biofertilizante e o metano. Por se tratar de um processo biológico, a DA depende de uma série de variáveis que assumem configurações diversas, tais como: teor de sólidos totais, monodigestão e codigestão, faixas de temperatura mesofílica e termofílica, número de estágios, dentre outros. Nesse sentido, o presente artigo teve como objetivo o levantamento sistematizado de um portfólio bibliográfico com alto fator de impacto para identificar a abrangência da referida tecnologia, bem como verificar as tendências e potencialidades das configurações existentes.

Palavras-chave: Digestão anaeróbia. Resíduos orgânicos. Teor de sólidos totais. Bioenergia. Biometano. Biogás. Biofertilizante.

Abstract

There is a growing number of studies that claim that anaerobic digestion (AD) represents not only an outlet for the big generation of organic waste in the world, but an alternative to traditional sources of energy. This technology promotes the recovery of diverse biomasses through the generation of potentially profitable and environmentally friendly products, such as biofertilizer and biomethane. Because it is a biological process, AD depends on a series of variables that assume different configurations, such as: total solids content, monodigestion and codigestion, mesophilic and thermophilic temperature, number of stages and others. In this sense, the present article aimed to systematically survey a bibliographic portfolio with a high impact factor to identify the scope of that technology, as well as to verify the trends and potential of the existing configurations.

Keywords: Anaerobic digestion. Organic waste. Total solids content. Bioenergy. Biomethane. Biogas. Biofertilizer.

¹ Universidade Federal do Espírito Santo - UFES - Vitória - Espírito Santo - Brasil.

* **Autora correspondente:** solainers@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Diante do atual cenário mundial, onde o meio ambiente vem acusando esgotamento e perecimento, soluções tecnológicas de recuperação de recursos, bem como diversificação da matriz energética e nutricional, impõem-se.

Nesse contexto, a DA vem se destacando e atraindo investimentos crescentes, sobretudo em países desenvolvidos, dados os benefícios abarcados pelo aproveitamento dos resíduos orgânicos.

Ressalta-se a importância de uma destinação nobre para os resíduos orgânicos, visto que eles representam mais de 50% de todo o resíduo urbano gerado diariamente no Brasil (BRASIL, 2012).

Como os resíduos orgânicos não são coletados de forma segregada, eles acabam sendo encaminhados com os resíduos domiciliares para a destinação final, normalmente em aterros sanitários. Essa forma de destinação gera impactos ambientais e despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada na fonte e encaminhada para tratamento (BRASIL, 2012).

Além de tratar os resíduos, a DA propõe uma economia de fluxo circular. Esse tipo de economia visa desenvolver rotas interativas e mais inteligentes na produção, processamento e consumo, empenhando-se em incorporar os resíduos ao ciclo de uso (STAHEL, 2016).

Quando processados, os resíduos geram um gás caracterizado pelo alto poder calorífico e por sua aplicabilidade na geração de energia térmica e elétrica, além de ser uma alternativa de biocombustível.

Quando comparado com outras tecnologias de conversão de bioenergia, o processo de DA ainda possui aspectos mais interessantes. Eles estão relacionados à menor exigência de recursos naturais e recursos energéticos, ao não consumo de oxigênio e à geração de material residual aplicável à agricultura (RAJAMEENA; VELAYUTHAM, 2018; TIWARY et al., 2015).

Esse material residual apresenta propriedades de biofertilizante de excelente qualidade. Isso porque a mineralização da matéria orgânica gera produtos ricos em nitrogênio, fósforo e outros minerais que podem ser utilizados para melhorar as condições do solo.

Apesar dos benefícios, a DA ainda precisa avançar em suas concepções, visto que a tecnologia envolve relações biológicas sensíveis ao meio, onde as configurações adotadas interferem diretamente no sucesso do processo. Dentre as configurações emergentes, destaca-se a digestão anaeróbia com alto teor de sólidos, cujos benefícios vão desde o menor consumo de água e energia até menor área da instalação e simplicidade na operação, frente à digestão úmida.

Nesse sentido, o presente trabalho realizou um levantamento sistematizado de artigos com alto fator de impacto para analisar os aspectos bibliométricos e as variáveis mais estudadas sobre a DA nessas condições. Foram desenvolvidas reflexões sobre as potencialidades e as tendências sobre a referida tecnologia considerando diferentes cenários. Tais informações objetivaram compor um panorama atualizado da DA de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos.

2 METODOLOGIA

A metodologia baseou-se em um processo de seleção sistematizado de referências bibliográficas chamado PROKNOW-C, cujo objetivo é minimizar o uso de aleatoriedade e subjetividade no embasamento teórico (AFONSO et al., 2012).

O processo metodológico do PROKNOW-C consiste na aplicação sequencial de filtros (Fig. 1). A seleção busca os artigos científicos recentes e de alto fator de impacto, limitando um quantitativo de documentos (portfólio bibliográfico), cujo escopo se aproxime ao máximo dos interesses da pesquisa em questão.

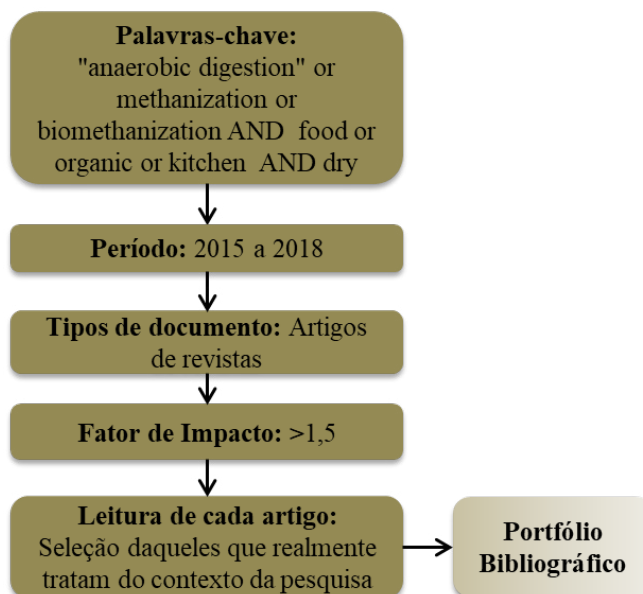


Figura 1 - Fluxograma dos filtros aplicados conforme metodologia do PROKNOW-C.

O primeiro filtro do PROKNOW-C compreende a busca de artigos em banco de dados acadêmicos utilizando as principais palavras-chave do tema desejado. O banco escolhido foi o SCOPUS, e nele se buscou identificar os artigos que traziam palavras como “anaerobic digestion” ou “methanization” ou “biomethanization”. Além dessas, o artigo também teria que contar com pelo menos uma destas palavras: “food” ou “organic” ou “kitchen”. Por fim, como o propósito era encontrar aqueles processos onde os resíduos orgânicos eram digeridos sem adição de água, adicionou-se na pesquisa a palavra “dry”.

O resultado dessa fase inicial foi a seleção de um montante preliminar de trabalhos acadêmicos. No decorrer dos filtros, esse importe foi se consubstanciando até atingir um montante mais enxuto de artigos, o chamado portfólio bibliográfico.

Após a seleção do portfólio bibliográfico, realizaram-se a leitura aprofundada dos artigos e o planilhamento das informações referentes às va-

riáveis estudadas em cada um, bem como demais informações que permitissem conclusões oportunas quanto às tendências e potencialidades do assunto em questão.

Destaca-se que, quando identificada a necessidade de complementação ou enriquecimento das discussões, adicionaram-se informações de outros trabalhos acadêmicos além daqueles levantados no PROKNOW-C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Bibliometria

Segundo os resultados do primeiro filtro, o grupo preliminar constituiu-se de 710 artigos que, após aplicação dos demais filtros, limitou-se a um montante de 49, todos publicados entre janeiro de 2015 e abril de 2018. O período escolhido traz a capacidade de trabalhar os aspectos mais modernos da tecnologia, com vistas às perspectivas futuras de sua aplicação.

Dentre as 49 publicações selecionadas, foi identificado um grande número de países (20) que trabalharam com o tema, o que mostra que esse assunto está globalizado e apresenta significância para diferentes realidades.

Os líderes isolados em publicações são a China e a Itália, respectivamente, com 8 e 7 publicações, sendo os únicos que publicaram ao menos um artigo por ano entre 2015 e 2018 (Fig. 2).

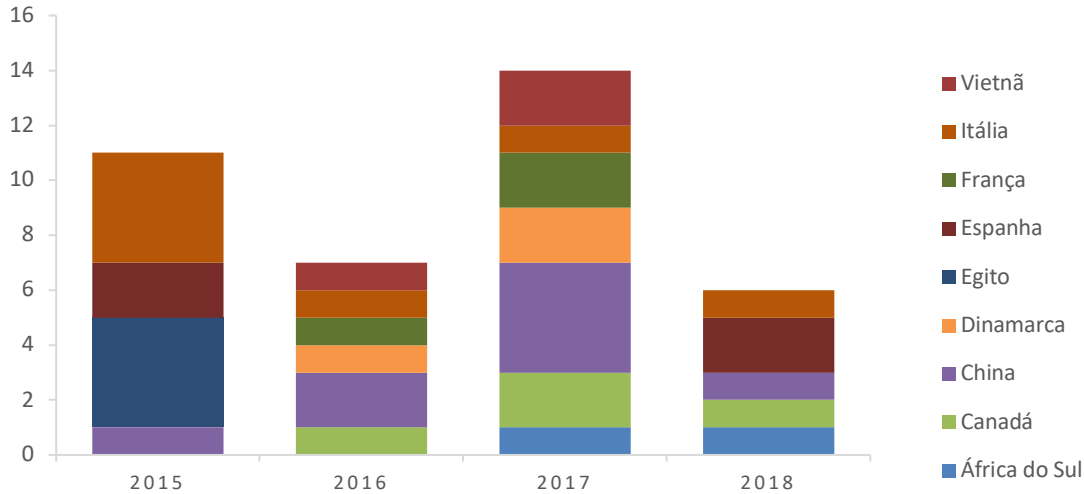


Figura 2 - Quantificação das publicações pelas principais nacionalidades.

Além do elevado número de países, uma diversidade grande de revistas altamente conceituadas também vem abordando o tema como escopo de suas edições.

Com relação aos artigos do portfólio, foram publicações realizadas em 22 revistas distintas, todas com Fator de Impacto JCR variando de 1,6 a 8,05. Aquelas com maior número de publicações são apresentadas na Fig. 3.

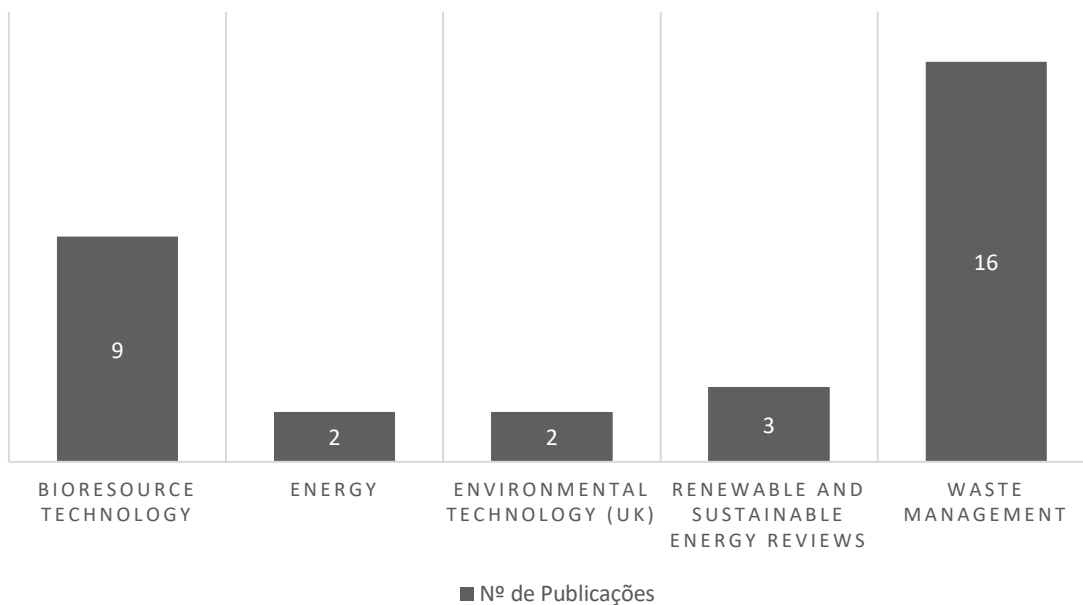


Figura 3 - Quantificação das publicações por revistas.

Dentre as revistas com o maior número de publicações relacionadas ao tema, destaca-se a Waste Management, revista internacional que discute assuntos sobre geração de resíduos sólidos, classificada como A1 no Qualis Capes (Engenharia A1) e com Fator de impacto JCR 4,03.

Em segundo lugar em publicação, a Bioresource Technology também vem abordando o assunto com frequência. A revista é direcionada a ciência e tecnologia envolvendo a área de estudos ambientais aplicados, está classificada como A1 no Qualis Capes (Engenharia A1) e tem Fator de impacto JCR 5,65.

3.2 Estudo das Variáveis: Tendências e Potencialidades

A DA consiste em um processo biológico desenvolvido por um consórcio de microrganismos,

no qual a constância das condições do meio é de grande importância para o equilíbrio do processo (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

Entre as variáveis estudadas nos artigos do portfólio bibliográfico com potencial de afetar o desempenho da DA, destaca-se o tipo da digestão, monodigestão ou codigestão. Em segundo lugar, um grande número de publicações buscou avaliar interferência dos sólidos totais (ST) no contexto da digestão anaeróbia.

Outros aspectos também foram estudados, como: a influência da temperatura no processo (mesofílica x termofílica), os efeitos de pré-tratamentos, estudos da influência da relação substrato/inóculos e tempo de detenção hidráulica.

Todas as variáveis estudadas foram contabilizadas e estão apresentadas no gráfico abaixo (Fig. 4).

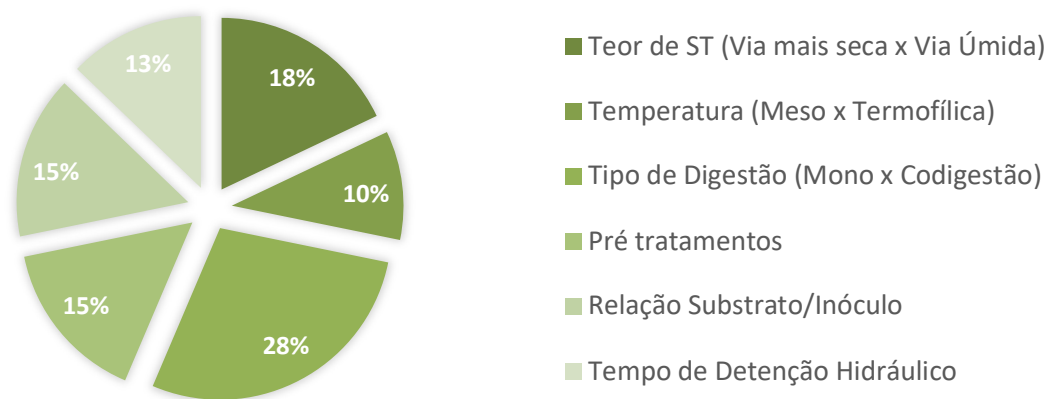


Figura 4 - Quantificação das variáveis mais estudadas.

3.2.1 Tipo da Digestão (Mono X Codigestão)

A DA consegue transformar qualquer material que tenha como principais componentes carboidrato, proteína, gorduras, celulose e hemicelulose em biogás e biofertilizante (CHOI et al., 2018).

Por esse motivo, existe uma variedade muito grande de resíduos orgânicos que podem servir

de matéria-prima para essa tecnologia, como, por exemplo: restos de alimentos, esterco de animais, resíduos agrícolas, podas, fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e resíduos industriais (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018; MATHERI et al., 2018; KUMAR; GOUD; KALAMBHDAD, 2016).

Nos artigos do portfólio, foram avaliadas duas abordagens (Fig. 5)

- A primeira foi aquela em que os autores estudaram, como um de seus objetivos, a comparação da monodigestão com a codigestão, totalizando 11 artigos.
- A segunda abordagem contabilizou os demais estudos que tiveram o objetivo de avaliar outros aspectos, mas que, para isso, fixaram um tipo de digestão (monodigestão ou codigestão). Entre estes, 17 adotaram a monodigestão em suas pesquisas e 10 a codigestão (Fig. 6).

Dentre os artigos que trabalharam com a comparação, todos os resultados apontaram a codigestão como a opção mais interessante (ARELLI et al., 2018; ARNÒ et al. 2017; RAJAGOPAL et al. 2017; MATHERI et al., 2017; CAPSON-TOJO et al., 2017a; MEYER-KOHLSTOCK et al., 2016; CAI et al., 2016; ANGERIZ-CAMPOY et al. 2015; EL-

SAMADONY e TAWFIK, 2015; YANG et al., 2015; JABEEN et al., 2015).

Entre os benefícios levantados pela codigestão estão a melhora das condições no processo de digestão, uma vez que possui potencial para propiciar relações mais adequadas de carbono/nitrogênio, disponibilização de maior variedade de macro e micronutrientes, evitando inibidores e compostos tóxicos, além de promover um efeito tampão ao meio.

A vantagem da codigestão também é evidenciada pela inversão apresentada no gráfico da Fig. 6, com o decaimento do número de estudos adotando a monodigestão e a ascensão dos estudos trabalhando com a codigestão. Portanto, fica clara a tendência da combinação dos resíduos como uma forma de melhorar a eficiência do processo.

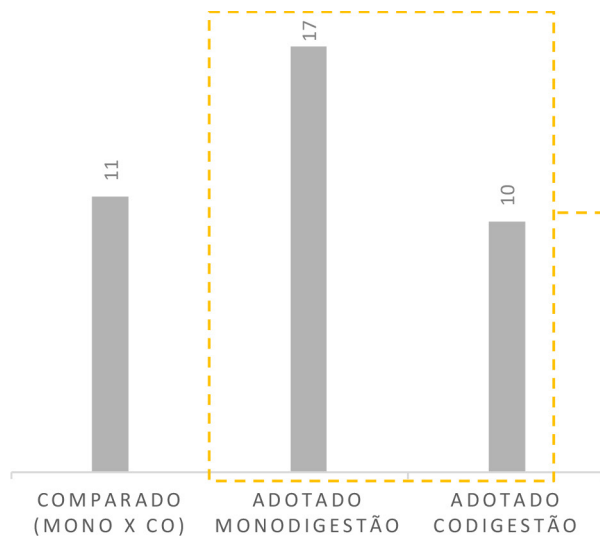


Figura 5 - Quantificação das publicações conforme o tipo de abordagem (Mono e Codigestão).

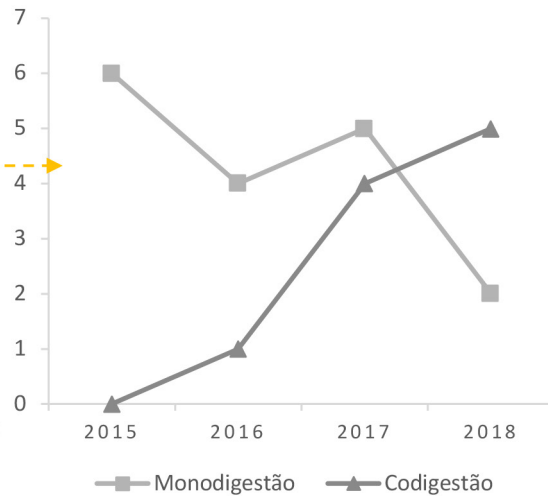


Figura 6 - Relação ao longo dos anos (Mono x Codigestão).

Daqueles artigos que abordaram a combinação de resíduos, a maioria realizou a codigestão de resíduos alimentares com dejetos de animais (45%) e,

em segundo lugar, com resíduo de papelão (20%) seguido do lodo anaeróbico (15%). Os demais resíduos utilizados podem ser vistos na Fig. 7.

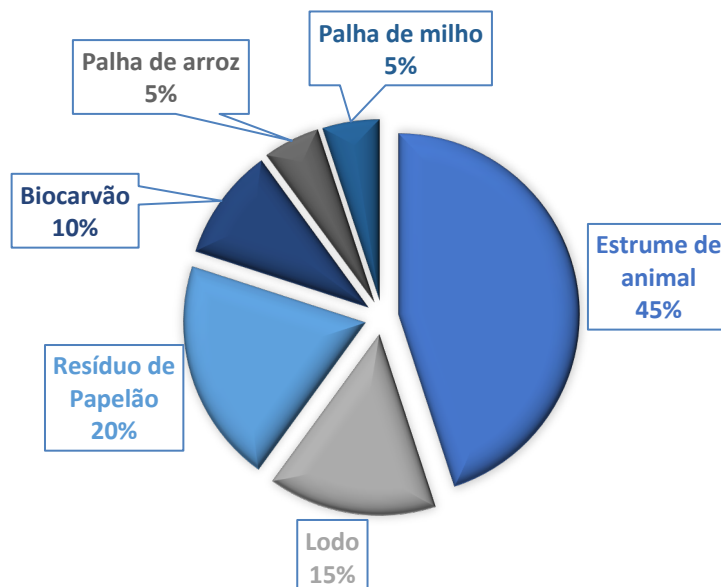


Figura 7 - Tipos de resíduos utilizados para codigerir com os resíduos de alimentos.

Os resultados mostram que um dos principais motivos do sucesso da codigestão está na sua capacidade de combinar composições nutricionais adequadas aos microrganismos envolvidos, uma vez que a relação C:N ideal para o processo varia entre 16:1 e 35:1 (DEUBLEIN, D.; STEINHAU-SER, A., 2011). Isto é, um resíduo rico em carbono (relação C:N elevada), quando digerido, não alcança produções satisfatórias de biometano por apresentar deficiência nutricional. O mesmo vale para o resíduo ricos em nitrogênio (C:N muito baixa), que acaba comprometendo sua produção de biometano devido aos efeitos inibitórios da amônia (MATHERI et al., 2018).

Portanto, uma composição equilibrada entre os resíduos é extremamente necessária para o bom desempenho da DA, onde o material biodegradável de alta relação C:N deve ser misturado com o material biodegradável de baixa relação C:N, resultando, assim, em produções ótimas de metano (MATHERI et al., 2017).

3.2.2 Teor de Sólidos Totais

Entre os 49 artigos analisados, 7 tiveram como um dos objetivos a avaliação do desempenho operacional do reator a partir da variação do teor de sólidos totais, onde as porcentagens mais baixas foram de 13% a 25% de ST e as mais altas de 27% a 37% de ST.

Todos os estudos supracitados relataram que o aumento do teor de sólidos não afetou negativamente o desempenho do reator (ARELLI et al., 2018; CHIUMENTI et al 2018; CAPSON-TOJO et al., 2017a; ARNÒ et al 2017; CAPSON-TOJO et al., 2017b; RAJAGOPAL et al 2017; COLAZO et al., 2015).

Entretanto, Arno et al. (2017) ponderam que processos mais úmidos com produção de metano são, em geral, a melhor escolha para as plantas grandes (> 500 kW). Por outro lado, para plantas menores são preferíveis processos secos combinados com o uso de biogás em sistemas de cogeração.

Destaca-se que a via extra seca (alto teor de ST) vem sendo amplamente estudada, pois requer menor quantidade de energia para mistura devido à menor carga hidráulica no digestor e por gerar um material digerido com baixa umidade (ARELLI et al., 2018).

Além disso, as plantas de DA com alto teor de ST oferecem maior flexibilidade no tipo de matéria-prima aceita, menor tempo de retenção, menor uso de água, gerenciamento operacional simples e oportunidade de comercialização do produto final (ANGELONIDI; SMITH, 2015).

Dessa forma, apesar de a digestão com alto teor de água ser a mais difundida, a via mais seca vem se consolidando como uma tecnologia com potencial para alcançar resultados ainda melhores (CHIUMENTI et al., 2018).

3.2.3 Temperatura (Meso X Termofílica)

A temperatura da DA é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho do processo, uma vez que afeta diretamente a velocidade do metabolismo das bactérias (RAJAMEENA; VELAYUTHAM, 2018; CAMPOS, 1999).

A influência da temperatura se dá pelo fato de os microrganismos não possuírem meios de controlar sua temperatura interna, isto é, a temperatura no interior de suas células é determinada pela temperatura do meio ambiente externo (CHERNICHARO, 1997).

As faixas de temperatura associadas aos processos biológicos, são: psicrófila (baixas temperaturas), mesofílica (temperaturas moderadas) e termofílica (altas temperaturas), sendo as duas últimas as mais comuns na DA.

Dentre os artigos levantados, 8% compararam a DA de resíduos orgânicos para as faixas mesofílicas e termofílicas. Os estudos sobre a classe psicrófila são incipientes, devido a sua ineficiência para processos microbiológicos.

Os resultados apontaram a faixa termofílica como a melhor opção (ALGAPANI et al., 2017; NGUYEN et al., 2017a; NGUYEN et al., 2016), tanto por sua capacidade de promover altas taxas metabólicas e, por consequência, elevada produção de biogás (ALGAPANI et al., 2017; LIU et al., 2017), como por sua capacidade de reduzir, significativamente, os sólidos voláteis (SV) do digerido (NGUYEN et al., 2017b; NGUYEN et al., 2016).

No entanto, autores apontam que processos com altas temperaturas obtiveram maior concentração de amônia e ácidos graxos voláteis, e que esse desequilíbrio pode afetar diretamente a comunidade microbológica presente no reator (GUO et al., 2014; BAYR et al., 2012). Além disso, DA mesofílica é vista como uma tecnologia que demanda menos gastos energéticos e, conseqüentemente, apresenta menores custos (YAN et al., 2015).

3.2.4 Pré-Tratamento

Os resíduos destinados ao processo de DA precisam passar, previamente, por um processo de triagem, de forma a garantir uma composição orgânica de qualidade para a metanização. Isso inclui retirar partes plásticas, pedras e qualquer outra partícula maior que possa atrapalhar o processo (KUMAR; GOUD; KALAMBHAD, 2016; BRASIL, 2015; MONNET, 2003).

Além da seleção acima, ainda são empregados métodos de pré-tratamento para acelerar o estágio inicial de hidrólise, que é a etapa tradicionalmente limitante nos processos anaeróbios que trabalham com alto teor de sólidos. Essa limitação é causada pela presença de frações lignocelulósicas e gordurosas em vários substratos orgânicos (MATSAKAS et al., 2017; KOMILIS et al., 2017; KUMAR; GOUD; KALAMBHAD, 2016).

No portfólio bibliográfico foram encontrados trabalhos que buscaram avaliar a influência de diferentes pré-tratamentos, do tipo térmico

(ARELLI et al., 2018), de extração de lipídeos (ALGAPANI et al., 2017), de pré-aeração (NI et al., 2017; XU et al., 2016), enzimático (UÇKUN KIRAN et al., 2015) e físico (CARLSSON et al., 2015).

Ilustrando a aplicação do pré-tratamento biológico, Uçkun Kiran et al. (2015) produziram *in situ* uma pasta fúngica rica em glicoamilase e investigaram sua aplicação para o pré-tratamento enzimático de resíduos alimentares para melhorar a hidrólise, produção de metano e redução de volume de resíduos. Os resultados mostraram que a mistura fúngica foi mais eficiente que as enzimas comerciais e que o rendimento de metano se tornou 2,3 vezes mais elevado do que sem pré-tratamento.

Ni et al. (2017) discutiram sobre o papel das diferentes durações de pré-aeração de curto prazo (4, 8 e 14 dias) na DA seca dos resíduos sólidos urbanos e concluíram que o referido pré-tratamento melhorou significativamente a degradação do material quando comparado com o material não tratado.

De acordo com o resultado do experimento de Arelli et al. (2018), fatores como o pré-tratamento com altas temperaturas dos substratos colaboraram, de forma significativa, para o aumento da geração de biogás e do teor de metano e para a redução do tempo de detenção hidráulica, além de outros fatores que também colaboraram, como a codigestão com dejetos bovinos e a manutenção do pH.

Entendendo que a DA de restos de alimentos apresenta instabilidade devido à presença de lipídios e ao acúmulo de ácidos graxos voláteis, Algapaniet al. (2017) optaram por otimizar o processo por meio da remoção de lipídios e pela adição de lodo de esgoto como substrato. Os resultados mostraram que a extração de lipídios aumentou a produção de metano de 400 para 418 mL/g SV.

Nesse contexto, entre os diferentes métodos de pré-tratamento abordados nos artigos foram unânimes os resultados positivos quando comparados com aqueles resíduos não tratados previamente.

3.2.5 Relação Substrato/ Inóculo

Para a inoculação de um reator é interessante o uso de uma biomassa anaeróbia já adaptada ao substrato e com elevada atividade metanogênica, pois tais condições otimizam o processo e garantem a estabilidade ambiental e a produtividade de biogás no digestor (FERREIRA, 2015).

Algumas alternativas de resíduos para o uso como inóculos, são: lodo mesofílico proveniente das estações de tratamento de esgotos, materiais de origem animal e outros que tenham abundância e diversidade de microrganismos anaeróbios e metanogênicos (SILVA, 2014).

Para o balanceamento da relação substrato/inóculo, foi predominante o discurso de que o aumento do substrato para as razões de inóculo propicia um acúmulo inicial de ácido e menor rendimento de metano. Conforme descrito por Capson-Tojo et al. (2017a), essa relação alta torna o processo de degradação da matéria orgânica limitado, resultando em um grande volume de material não degradado.

Como prevenção a esses cenários de acidificação, ajustes da relação substrato/inóculo entre 0,5 e 2,3 gSV / gSV apontam bons resultados (NEVES; ALVES, 2004).

No estudo de Matheri et al. (2017), quando comparada as relações de 3:1 e 1:1 (gSV / gSV) os experimentos mostraram que a relação 1: 1 apresentou rendimentos ótimos de biogás e metano.

Barcelos (2009) conclui que para saber a quantidade de inóculo a ser adicionada, é necessário o estudo da atividade metanogênica do inóculo e das cargas orgânicas do substrato.

3.2.6 Tempo de Detenção Hidráulica

Consiste no período necessário para que o material orgânico seja completamente degradado. Esse tempo irá variar conforme parâmetros ope-

racionais do processo, principalmente com relação a temperatura adotada e ao tipo de resíduo utilizado (MONNET, 2003).

Sabe-se que a condição mesofílica é mais lenta do que a termofílica e, assim, um tempo de retenção mais longo no digestor é necessário para maximizar o rendimento do biogás.

Assim que definida a temperatura de trabalho, os parâmetros de detenção hidráulica (TDH) deverá ser ajustado conforme taxa de carregamento orgânico (COV) proposta.

Isso porque o TDH e a COV estão intimamente ligados e possuem uma relação inversamente proporcional. Assim sendo, um longo TDH provoca o crescimento dos consumidores de hidrogênio. No outro sentido, um curto TDH pode reduzir a eficiência de absorção do substrato e a eficiência geral dos fermentadores.

Enquanto a alta COV fornece altos volumes de biogás, o aumento adicional de COV leva à instabilidade e sobrecarga orgânica do sistema, o que envolve um acúmulo de ácidos graxos voláteis (ELSAMADONY; TAWFIK, 2015). No estudo de Nguyen et al. (2017b), analisou-se um sistema semi-contínuo de DA de resíduos alimenta-

res da Coreia, em uma operação de longo prazo, variando até 100 dias. Os resultados indicaram que a redução simultânea de SV e a produção de gás melhoraram à medida que o tempo de detenção hidráulica (TDH) diminuiu ou quando aumentou a carga orgânica volumétrica (COV). Os melhores resultados foram para o reator com COV de $8,62 \pm 0,34$ kg SV/m³.dia e um período de operação de 25 dias.

De acordo com Komilis et al. (2017), a tendência do TDH para os processos contínuos é de 10 a 30 dias e para os processos em batelada, de 20 a 40 dias.

3.2.7 Número de Estágios

Apesar de o número de estágios não ter sido abordada como objetivo central de nenhum dos artigos do portfólio bibliográfico, serão destacados pontos pertinentes levantados sobre o tema e sua importância para o processo de DA de resíduos.

No caso dos reatores de estágio único, todas as etapas da DA (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem simultaneamente em um único reator (Fig. 8) (BRASIL, 2015).

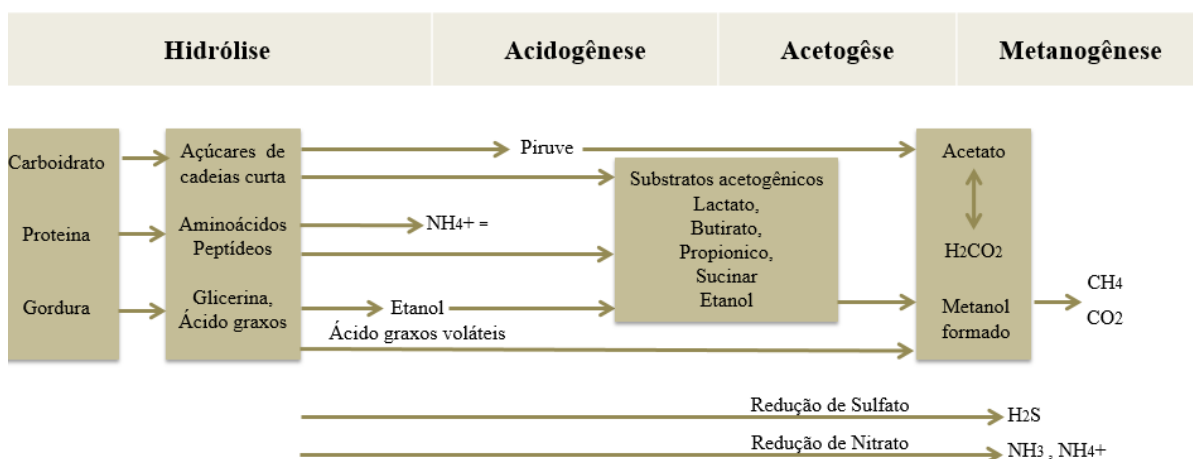


Figura 8 - Esquema com as etapas da digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado de Deublein; Steinhäuser (2011).

Porém as bactérias acidogênicas e as archeas metanogênica, envolvidas nesse processo, possuem diferentes taxas de crescimento e requerem condições divergentes do meio, principalmente em relação a faixas de pH (ZHENGJUN et al., 2016).

Nesse sentido, reatores de dois ou múltiplos estágios objetivam sequenciar as reações bioquímicas que não compartilham necessariamente as mesmas condições ambientais ideais (VÖGELI et al., 2014).

A implementação de dois estágios em série, sendo um para acidogênicos e outro para os metanogênicos, tende a aumentar a eficiência da digestão (WANG et al., 2018). Porém os sistemas de multiestágios acarretam em maior complexidade de concepção, operação, manutenção e monitoramento. Resultam ainda em maiores custos de investimentos e requerem maior área para a instalação da unidade (MONNET, 2003; BRASIL, 2015).

Destaca-se que, caso a opção seja a DA em apenas um estágio, os parâmetros deverão atender aos requisitos da cultura metanogênica, pois estes possuem maior sensibilidade aos fatores ambientais e grande dificuldade para sobreviver em condições adversas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011).

4 CONCLUSÃO

Após as análises e discussões dos dados do portfólio bibliográfico, constituído de 49 publicações, as conclusões finais foram:

- No que se refere à abrangência do tema, dados como o grande número de países (20) e de revistas (22) estudando e publicando sobre o assunto mostraram a aplicabilidade da tecnologia para diferentes realidades e o quanto suas perspectivas avançam rumo à modernização e à globalização.
- Notou-se que o número de estudos de codigestão foram ascendentes nos últimos anos enquanto

os estudos de monodigestão foram decrescentes. Essa inversão pode ser explicada pela capacidade da codigestão de melhorar a composição do substrato e pelo aumento na geração e na qualidade do biogás quando comparado com a monodigestão.

- Estudos revelam que digestão com menores teores de ST é a via mais empregada, porém a digestão seca vem alcançando resultados de eficiência muito semelhantes. Assim, a via com alto teor de sólidos vem conquistando significativo destaque nesses últimos anos.
- Apesar do maior consumo de energia sob condições termofílicas, essa faixa de temperatura apresentou os melhores resultados (quantidade de biogás e teor de metano) quando comparada com a faixa mesofílica. Dentre as vantagens da digestão termofílica, destacam-se a eficiência na redução sólidos voláteis e o consequente aumento da geração de biogás.
- Dentre os estudos que buscaram avaliar o desempenho do pré-tratamento, seja ele biológico ou físico, os resultados revelaram sempre aspectos positivos e promissores quando aplicados aos sistemas de DA.
- Nos reatores anaeróbios, as condições mais equilibradas foram atingidas com a diminuição do substrato para as razões de inóculo. Porém cabe avaliar as circunstâncias e as características dos resíduos envolvidos em cada processo.
- O TDH variou entre 10 e 40 dias, a depender da temperatura e da carga orgânica volumétrica aplicada.
- Para os cenários onde os sistemas de DA são compostos por dois estágios, diferentes condições podem ser ajustadas conforme a necessidade dos grupos de microrganismos envolvidos. No entanto, vale ponderar outros aspectos, como sua maior complexidade, a demanda por mão de obra mais especializada e custos mais elevados.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

AFONSO, M. H. F. et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47–62, 2012. <https://doi.org/10.5773/rgsa.v5i2.424>.

ALGAPANI, D. E. et al. Improving methane production and anaerobic digestion stability of food waste by extracting lipids and mixing it with sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 244, p. 996–1005, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.087>.

ANGELONIDI, E.; SMITH, S. R. A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. **Water and Environment Journal**, v. 29, n. 4, p. 549–557, 2015. <https://doi.org/10.1111/wej.12130>.

ANGERIZ-CAMPOY, R.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; ROMERO-GARCÍA, L. I. Thermophilic anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with food waste (FW): Enhancement of bio-hydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 194, p. 291–296, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.011>.

ARELLI, V. et al. Dry anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure: Impact of total solids, substrate ratio and thermal pre treatment on methane yield and quality of biomanure. **Bioresource Technology**, v. 253, n. January, p. 273–280, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.050>.

ARNÒ, P.; FIORE, S.; VERDA, V. Assessment of anaerobic co-digestion in areas with heterogeneous waste production densities. **Energy**, v. 122, p. 221–236, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.066>.

BARCELOS, B. R. DE. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. p. 89, 2009.

BAYR, S. et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 28–36, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.104>.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Ministério do Meio Ambiente (MMA), p. 106, 2012.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. O estado da arte da tecnologia de metanização seca / Probiogás – Brasília, DF: **Ministério das Cidades**, 2015.

CAI, J. et al. Effects and optimization of the use of biochar in anaerobic digestion of food wastes. **Waste Management and Research**, v. 34, n. 5, p. 409–416, 2016. <https://doi.org/10.1177/0734242X16634196>.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de Esgoto Sanitário por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CAPSON-TOJO, G. et al. Kinetic study of dry anaerobic co-digestion of food waste and cardboard for methane production. **Waste Management**, v. 69, p. 470–479, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.002>.

CAPSON-TOJO, G. et al. Dry anaerobic digestion of food waste and cardboard at different substrate loads, solid contents and co-digestion proportions. **Bioresource Technology**, v. 233, p. 166–175, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.126>.

CARLSSON, M. et al. Impact of physical pre-treatment of source-sorted organic fraction of municipal solid waste on greenhouse-gas emissions and the economy in a Swedish anaerobic digestion system. **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 117–125, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.010>.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: 1997.

CHIUMENTI, A.; DA BORSO, F.; LIMINA, S. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation. **Waste Management**, v. 71, p. 704–710, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.046>.

CHOI, Y. S. et al. Development of combined plant of biogas and bio solid-refuse-fuel from swine manure slurry. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 1, p. 369–374, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0594-4>.

COLAZO, A.-B. et al. Environmental impact of rejected materials generated in organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion plants: Comparison of wet and dry process layout. **Waste Management**, v. 43, p. 84–97, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.028>.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. 2nd edition. Germany: Wiley VCH, 2011.

ELSAMADONY, M.; TAWFIK, A. Dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal waste with paperboard mill sludge and gelatin solid waste for enhancement of hydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 191, p. 157–165, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.017>.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. p. 124, 2015.

GUO, X. et al. A comparison of microbial characteristics between the thermophilic and mesophilic anaerobic digesters exposed to elevated food waste loadings. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 420–428, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.012>.

- JABEEN, M. et al. High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 102, p. 149–153, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.023>.
- KOMILIS, D. et al. A state of the art literature review on anaerobic digestion of food waste: influential operating parameters on methane yield. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 16, n. 2, p. 347–360, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9428-z>.
- KUMAR, V.; GOUD, V. V.; KALAMBHAD, A. An alternative for the daily household fuel needs for cooking through biogas with a special reference to tripura. **International Journal of Management and Applied Science**, v. 2, 2016.
- LIU, C. et al. Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste under mesophilic and thermophilic conditions. **Energy and Fuels**, v. 31, n. 3, p. 2976–2984, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00018>.
- MATHERI, A. N. et al. Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 756–764, dez. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>.
- MATHERI, A. N. et al. Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2328–2334, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.041>.
- MATSAKAS, L. et al. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 26, p. 69–83, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004>.
- MEYER-KOHLSTOCK, D. et al. Biochar as additive in biogas-production from bio-waste. **Energies**, v. 9, n. 4, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9040247>.
- MONNET, F. **A Introduction to anaerobic digestion of organic waste**. Glasgow: 2003.
- NEVES, R. OLIVEIRA AND M. M. ALVES. Influence of inoculum activity on the biomethanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. **Process Biochemistry**, v. 39, n. 12, p. 2019–2024, 29 out. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.10.002>.
- NGUYEN, D. D. et al. Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste: Performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy balance. **Energy Conversion and Management**, v. 128, p. 203–210, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.030>.
- NGUYEN, D. D. et al. Dry semi-continuous anaerobic digestion of food waste in the mesophilic and thermophilic modes: New aspects of sustainable management and energy recovery in South Korea. **Energy Conversion and Management**, v. 135, p. 445–452, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.030>.
- NGUYEN, D. D. et al. A new approach for concurrently improving performance of South Korean food waste valorization and renewable energy recovery via dry anaerobic digestion under mesophilic and thermophilic conditions. **Waste Management**, v. 66, p. 161–168, ago. 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.049>.
- NI, Z.; LIU, J.; ZHANG, M. Short-term pre-aeration applied to the dry anaerobic digestion of MSW, with a focus on the spectroscopic characteristics of dissolved organic matter. **Chemical Engineering Journal**, v. 313, p. 1222–1232, abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.020>.
- RAJAGOPAL, R.; BELLAVANCE, D.; RAHAMAN, M. S. Psychrophilic anaerobic digestion of semi-dry mixed municipal food waste: For North American context. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 105, p. 101–108, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.014>.
- RAJAMEENA, S.; VELAYUTHAM, D. T. A critical review on biochemical process of anaerobic digestion. **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 4, n. 2349–784X, 2018.
- SILVA, M. C. P. **Avaliação de lodo anaeróbio e dejetos bovinos como potenciais inóculos para partida de digestores anaeróbios de resíduos alimentares**. p. 98, 2014.
- STAHEL, W. R. Circular economy. **Nature**. V. 531, p. 435–438, 2016.
- TIWARY, A. E. Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorisation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 883–901, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.052>.
- UÇKUN KIRAN, E.; TRZCINSKI, A. P.; LIU, Y. Enhancing the hydrolysis and methane production potential of mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. **Bioresour. Technol.**, v. 183, p. 47–52, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.033>.
- VÖGELI, Y. et al. **Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies**. Switzerland, 2014.
- WANG, P. et al. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. **Bioresour. Technol.**, v. 248, p. 29–36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.152>.
- XU, Q. et al. Comparison of biogas recovery from MSW using different aerobic-anaerobic operation modes. **Waste Management**, v. 56, p. 190–195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.005>.
- YANG, T. et al. Performance of dry anaerobic technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China. **Energy**, v. 93, p. 2497–2502, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.014>.
- ZHENGJUN, G. et al. Two-phase anaerobic co-digestion of dairy manure with swine manure. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 9, n. 2, p. 146–152, 2016.