



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

DANILO SOARES COELHO

**Produção de biogás a partir de processos de codigestão de resíduos
sólidos urbanos: uma revisão sistemática de literatura**

PALMAS

2021

DANILO SOARES COELHO

**Produção de biogás a partir de processos de codigestão de resíduos
sólidos urbanos: uma revisão sistemática de literatura**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
no Curso Superior de Engenharia
Civil do Instituto Federal do
Tocantins, Campus Palmas.

Orientadora: Prof^a. Dra. Cláudia da
Silva Aguiar Rezende

**PALMAS
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

C672p Coelho, Danilo Soares
 Produção de biogás a partir de processos de codigestão de resíduos
 sólidos urbanos: uma revisão sistemática de literatura / Danilo Soares
 Coelho. – Palmas, TO, 2021.
 52 p. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2021.

 Orientadora: Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
 Coorientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

 1. biogás. 2. codigestão. 3. resíduos sólidos urbanos. I. Rezende,
 Cláudia da Silva Aguiar. II. Pedroza, Marcelo Mendes. III. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

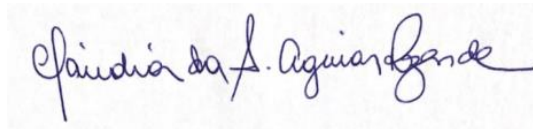
DANILO SOARES COELHO

**Produção de biogás a partir de processos de codigestão de resíduos
sólidos urbanos: uma revisão sistemática de literatura**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
curso de Engenharia Civil Instituto
Federal do Tocantins - Campus
Palmas, como exigência à obtenção
do grau em Engenharia Civil.

Aprovada em: 08/02/2021

BANCA AVALIADORA



Professora Doutora Cláudia da Silva Aguiar Rezende
Orientadora



Professor Doutor Marcelo Mendes Pedroza



Professora Mestre Elaine da Cunha Silva Paz

RESUMO

Desde a Segunda Revolução industrial nós, seres humanos, utilizamos os combustíveis fósseis para a produção de energia. Com o tempo a demanda por energia só aumentou e o mundo começou a ver os efeitos negativos daquilo que até tinha sido o combustível para o progresso. É possíveis citar vários pontos negativos da utilização dos combustíveis fósseis, como o aquecimento global, problemas respiratórios, degradação de monumentos históricos, ilhas de calor dentre outros. Dentre as fontes alternativas de energia é possível citar a hídrica, eólica, geotérmica e a biomassa. A biomassa gera energia mediante queima de matéria orgânica e essa queima resulta em gases poluentes, ainda assim ela é considerada uma energia limpa, pois parte do CO₂ produzido é absorvida no cultivo dos materiais nas etapas que antecedem a queima. Uma das formas de produção de energia através da biomassa é o biogás, o qual é obtido quando uma matéria orgânica é digerida de maneira anaeróbia, ou seja, em ambiente com ausência de oxigênio. Ele já é abundante em aterros sanitários, mas também é produzido em bolsões com fezes de animais, resíduos de estação de tratamento de esgoto, em biodigestores dentre outras formas. Em alguns lugares tem sido empregada a técnica de codigestão para a produção de biogás, a qual utiliza dois ou mais tipos de substratos em um ambiente anaeróbio para que o resultado seja, além do aumento da produção de biogás, a diluição de compostos tóxicos e um resíduo orgânico de melhor qualidade. Este trabalho realizou uma revisão sistemática de literatura para analisar o que tem sido estudado nos últimos anos sobre codigestão, avaliar quais as melhores técnicas e propor a utilização delas para o aumento da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos no Brasil, o qual possui em abundancia todos os substratos citados nos trabalhos encontrados durante a revisão. Dentre os 41 artigos selecionados, algumas técnicas como a utilização de algas ou águas residuais para a codigestão além de inúmeros tipos pré-tratamentos poderiam ser utilizadas mais amplamente no Brasil, seja nas estações de tratamento de água e esgoto ou nas indústrias de alimentos para tornar a contribuição do biogás na matriz energética brasileira ainda mais expressiva.

Palavras-chave: biogás. biomassa. codigestão. resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

Since the Second Industrial Revolution, we humans have used fossil fuels to produce energy. Over time, the demand for energy only increased and the world began to see the negative effects of what had even been the fuel for progress. It is possible to mention several negative points of the use of fossil fuels, such as global warming, respiratory problems, degradation of historical monuments, heat islands, among others. Among the alternative sources of energy it is possible to mention hydro, wind, geothermal and biomass. Biomass generates energy by burning organic matter and this burning results in polluting gases, yet it is considered a clean energy, since part of the CO₂ produced is absorbed in the cultivation of the materials in the steps that precede the burning. One of the forms of energy production through biomass is biogas, which is obtained when an organic matter is digested in an anaerobic way, that is, in an environment with no oxygen. It is already abundant in landfills, but it is also produced in pockets with animal feces, waste from sewage treatment plants, in biodigesters, among other forms. In some places, the co-management technique for the production of biogas has been used, which uses two or more types of substrates in an anaerobic environment so that the result is, in addition to the increase in biogas production, the dilution of toxic compounds and a better quality organic waste. This work carried out a systematic literature review to analyze what has been studied in recent years on codigestion, to evaluate which are the best techniques and to propose the use of them to increase the production of biogas from solid urban waste in Brazil, which has in abundance all the substrates cited in the works found during the review. Among the 41 selected articles, some techniques such as the use of algae or waste water for codigestion in addition to numerous pre-treatment types could be used more widely in Brazil, whether in water and sewage treatment plants or in the food industries to make the contribution of biogas in the Brazilian energy matrix even more expressive.

Keywords: biogas. biomass. co-digestion. solid urban waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Mundial	13
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira.	14
Figura 3 – Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte (%) – Ano 1980	16
Figura 4 – Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte (%) – Ano 2017	16
Figura 5 - Consumo Médio em uma residência (por equipamento)	17
Figura 6 – Evolução da Capacidade Instalada de Biogás – 0,4 GW.	18
Figura 7 – Etapas de Produção de Biogás,	20
Figura 8 – Cogeração de Energia	22
Figura 9 – Produção mundial de biogás em 2012 e projeções até 2022.	24
Figura 10 - Atividades e Rotas de Aproveitamento do Biogás.	25
Figura 11 – Componentes e aplicação final de um biodigestor anaeróbio.	27
Figura 12– Etapas da metodologia.	30
Figura 13 – materiais mais utilizados nos estudos	31
Figura 14 – Organização dos grupos por temas	32
Figura 15 – Ano das publicações do grupo A	32
Figura 16 - Ano das publicações do grupo B	33
Figura 15 – Organização dos tópicos tratados no grupo B	39
Figura 16 – Esquema geral do sistema proposto no estudo	39
Figura 17 – Esquemas do experimento desenvolvido por LAVRIČ <i>et al.</i> (2017)	40
Figura 18 – Organização dos temas abordados no grupo B	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Demanda mundial de energia por fonte de energia (Mtep) (Ano 1980 – 2020)	
16	
Tabela 2. Potenciais para a produção de biogás a partir de resíduos - Brasil	19
Tabela 3. Composição química e poder calorífico de diferentes gases	23
Tabela 4. Fontes de Cogeração de Biomassas (Biogás)	23
Tabela 5 – Misturas de substratos e sua respectiva produção de metano	34
Tabela 6 – Exemplos de pré-tratamento mecânico	37
Tabela 7 – Exemplos de pré-tratamento químico	37
Tabela 8 – Exemplos de pré-tratamento térmico	38
Tabela 9 – Exemplos de pré-tratamento biológico	38
Tabela 10 – consórcios e as algas dominantes	41
Tabela 11 – dados da produção de metano	42
Tabela 12 – Resultados obtidos com a fermentação ruminal	44
Tabela 13. Análise de pré-tratamento em relação ao tempo e produção de CH ₄	45

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2. JUSTIFICATIVA	11
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. Objetivos Gerais	11
1.3.2. Objetivos Específicos	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. Matriz Energética	12
2.2. Cenário de aplicação da biomassa	14
2.3. Potencial do Biogás a partir de biomassas residuais	17
2.4. Tecnologia de cogeração/codigestão aplicada ao biogás	21
2.5. Aproveitamento de Biogás a partir de Biodigestores	26
2.6. Aproveitamento de Biogás nas ETEs e Aterros Sanitários	27
2.7. Codigestão Anaeróbia	28
3. METODOLOGIA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6. REFERENCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Dentre os muitos problemas que envolvem o uso de combustíveis fósseis, é possível dar ênfase à poluição do ar e da água, problemas respiratórios e até mortes prematuras (FAJERSZTAJN, 2019). Estes e outros fatos têm feito com que há décadas, pesquisadores venham buscando formas de reduzir seu uso e propor a utilização de fontes alternativas de energia.

No Brasil e no mundo já é possível notar um avanço considerável da utilização de fontes alternativas de energia, apesar de o avanço ser tímido, visto que a relação dos seres humanos com combustíveis fósseis é muito forte desde a Segunda Revolução Industrial. Entretanto, muito tem-se falado sobre esgotamento de recursos naturais e uma nova crise de petróleo causada por uma baixa oferta. Estes e outros fatores econômicos, somados às questões ambientais como efeito estufa, são os impulsionadores do uso de fontes alternativas de energia, e o que tem feito muitos países diversificarem as suas matrizes energéticas.

Dentre as fontes de energias alternativas, existe a biomassa, que é um resíduo orgânico de origem animal ou vegetal, a qual após sua decomposição produz gases que prejudicam menos o meio ambiente, em comparação ao produzido pela queima de derivados de petróleo. A biomassa em 2017 era a terceira fonte de energia mais utilizada no Brasil (EPE, 2020), e tem crescido desde 1980. O produto da biomassa mais conhecido é o etanol, mas existem outros como o biodiesel e o biogás.

O biogás tem uma grande potencial de produção de energia devido sua composição ser principalmente de gás carbônico e metano. Ele é resultado da decomposição de matéria orgânica e serve, principalmente, para alimentar motores de combustão que transformam calor em energia. Muito têm-se estudado sobre técnicas de produção do biogás, como torná-lo mais puro, de modo que sua queima resulte em mais calor e consequentemente mais energia.

É comum em grandes propriedades de aves e suínos, bolsões para estocar fezes e produzir biogás a partir delas, com a ajuda ou não de outro substrato. Além disso, um grande reservatório de biogás são os aterros sanitários, os quais são ainda mais benéficos ao meio ambiente quando utilizam corretamente o biogás produzido ou pelo menos queimando, pois assim reduz a quantidade de metano que é produzida pela matéria orgânica em decomposição nas muitas camadas dos aterros.

Diante disso, o presente trabalho pretende estudar a produção de biogás a partir de processos de codigestão de resíduos sólidos urbanos, a partir da leitura dos artigos

mais recentes que abordam o tema, com o intuito de tomar conhecimento dos principais substratos que estão sendo usados, de quais formas e se os resultados obtidos tem sido satisfatório.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A utilização do biogás para produção de energia tem um potencial enorme, visto que a matéria prima para produzi-lo é barata e de fácil acesso. Entretanto é preciso saber quais as técnicas de produção que vêm sendo estudadas, quais funcionam melhor e o que está em aberto para ser estudado.

1.2. JUSTIFICATIVA

O presente estudo tem a intenção de realizar uma revisão sistemática de literatura para determinar a eficiência da codigestão de resíduos para a produção de biogás, visto que a produção do mesmo, em muitos casos, é resultado da mistura e decomposição de dois ou mais tipos de substrato. Faz-se isso para obter um aumento na carga orgânica de resíduos, possível diluição de compostos tóxicos potenciais, o equilíbrio de nutrientes pode ser melhorado, além do principal, que é o aumento na produção de biogás (SITORUS, 2013).

A matéria prima para a produção de biogás é abundante em todo o mundo, mesmo assim essa forma de produção de energia ainda tem uma utilização baixa mesmo com facilidade de produção e acesso. As técnicas de codigestão podem ser uma forma de impulsionar a utilização dessa fonte de energia tanto por questões econômicas, como também pelo apelo ambiental. Além do que já foi dito, ao fim do trabalho, será possível citar outras vantagens da codigestão, e de que forma ela pode ajudar a aumentar a produção de biogás no Brasil e no mundo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Gerais

Este trabalho realiza uma revisão sistemática de literatura a respeito da produção de biogás a partir de resíduos sólidos através da utilização da técnica de codigestão. A intenção é reunir o que tem sido estudado entre 2010 e 2021 sobre o tema, analisar os resultados e apresenta-los de maneira imparcial seguindo à risca o protocolo proposto na metodologia.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento dos estudos nos últimos 11 sobre produção de biogás e codigestão
- Apresentar de forma clara como a produção de biogás por codigestão é utilizada e quais os resultados onde ela foi usada
- Apresentar formas de utilização da técnica no Brasil
- Analisar a eficiência da codigestão para a produção de biogás com substratos abundantes no Brasil.

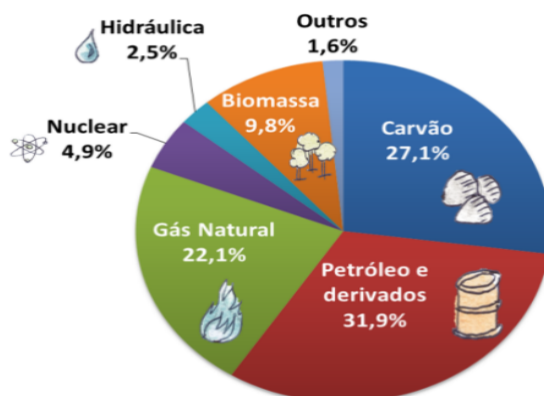
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Matriz Energética

A matriz energética mundial se dispõe, principalmente, por fontes não renováveis, em que se destaca carvão mineral, o gás natural e o petróleo (Figura 1). Finitas ou esgotáveis, a energia proveniente de combustíveis fósseis é formada em escala geológica, possui significativo rendimento energético e um mercado de geração e distribuição consolidado, estruturado, o que a torna atrativa pelo custo e pelas diversas relações de mercado, todavia apresentam impactos de grande magnitude desde a extração à sua aplicação (EPE, 2019).

Com a Revolução Industrial de 1875 o homem desenvolveu a máquina a vapor e multiplicou capacidades na indústria e no transporte. No século XX, o homem tecnológico aprimorou a máquina a vapor e desenvolveu motores de combustão interna movidos a gasolina e diesel, derivados do petróleo. Alguns experimentos também foram realizados com óleos vegetais, mas os derivados de petróleo eram bastante confiáveis, abundantes, baratos, fáceis de estocar e transportar. Vieram mais tarde os motores elétricos e a energia nuclear, mas o mundo nunca mais rompeu sua relação de dependência com o petróleo (GOLDEMBERG, 2007).

Figura 1 – Matriz Energética Mundial



Fonte: (IEA, 2018)

Segundo Fajersztajn (2019) a poluição do ar ambiente é responsável por cerca de 3 milhões de mortes prematuras anuais em todo o mundo, países desenvolvidos e em desenvolvimento. Assim como o aumento das emissões atmosféricas nas últimas décadas, são notáveis os impactos causados pela poluição atmosférica. Estão entre os dez fatores de risco que mais contribuem para a carga global de doenças, deterioração de patrimônio cultural e histórico, degradação nos ecossistemas, dentre outros, visto que a qualidade do ar é diretamente influenciada pela distribuição de emissões veiculares e industriais (CETESB, 2011).

Com o crescimento populacional em ascensão a demanda por energia se comporta da mesma forma. Barreto (2018) afirma que é necessário aumentar a produtividade das energias renováveis para que futuramente não haja uma recessão econômica causada pelo aumento do preço do petróleo. Kais Saidi & Anis Omri (2020) fizeram um estudo sobre o impacto das energias renováveis na emissão de carbono, e afirmam que é necessário reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, caso contrário, em algum momento será inviável manter a economia devido o esgotamento de recursos naturais.

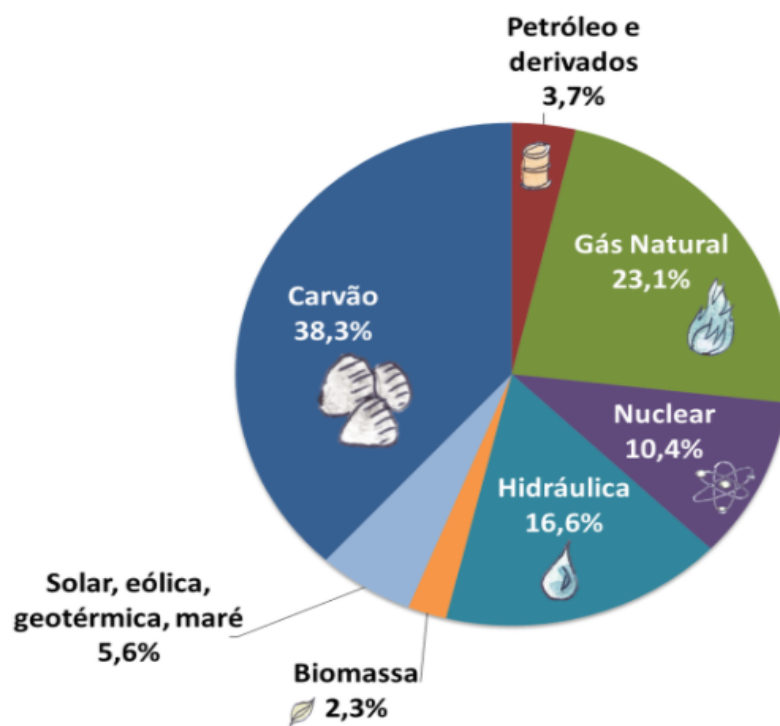
Por isso é importante ressaltar que a energia renovável pode garantir sustentabilidade às demandas antrópicas devido sua disponibilidade cíclica, emitem menos gases poluentes na atmosfera, diversificam a matriz energética e em muitos casos podem ter baixo custo de produção. Embora haja essa potencialidade mundial e nacional, apenas a partir de 1970, com a crise internacional do petróleo, houve mais investimentos em fontes de energia renovável (FONTES, 2019).

Conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), a matriz energética no Brasil terá cada vez mais participação relevante em relação à matriz energética global, devido ao país possuir uma situação de privilégio em relação a fontes de energia renovável. A Oferta Interna de Energia (OIE) renovável é de 43,9% no Brasil, enquanto a média mundial é de 14% e nos países desenvolvidos chega a 6% (BEN, 2017).

Segundo estudo do Plano Decenal de Energia (2019) a aplicação da fonte de energia renovável aumentará em relação a 2019, atingindo 48% em 2029, o que melhora os indicadores de intensidade de emissões poluentes do setor de energia por unidade de energia consumida e por unidade de PIB gerada, mantendo o destaque do Brasil na produção de energia com baixas emissões. Hoje soma-se um percentual 42,9% representados por lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis.

De forma atual, a matriz energética do país possui expressivo grau de renovabilidade, compondo 24,5%, dentre esse percentual o biogás proveniente da biomassa (Figura 2). O maior potencial de biogás encontra-se no setor agroindustrial, sobretudo o sucroenergético, mas é importante ressaltar que há montante considerável que pode ser obtido através dos resíduos animais e urbanos (PDE, 2019).

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira.



Fonte: (IEA, 2018).

Em relação ao mundo, a matriz energética do país mantém-se dentre as mais elevadas do mundo com relação às fontes de energias renováveis, devido suas condições edafoclimáticas além da disponibilidade territorial, proporcionando a produção e o uso energético da biomassa em larga escala, além de possuir um programa de biomassa estruturado e viável (ANEEL, 2016).

2.2. Cenário de aplicação da biomassa

A biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (ANNEL, 2016). Na produção de energia elétrica e energia térmica o que reduz o consumo dos combustíveis fósseis. Originada a partir de resíduos sólidos urbanos - animais, vegetais, industriais e florestais - abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. (PARK *et al.*, 2012). Após a decomposição da biomassa pelas condições naturais ou controladas libera gases com composição química similar à matéria-prima original. Para corroborar com o cenário de aproveitamento, a disposição final de resíduos sólidos urbanos em áreas inapropriadas, torna-se uma fonte de poluição e contaminação da área de influência direta do descarte, depreciando a qualidade ambiental dos recursos hídricos locais e contribuindo para a piora da qualidade ambiental local (WANG, LI, *et al.*, 2018).

A utilização da biomassa para fins energéticos ocorre há milhões de anos. A madeira até o século XVIII era a principal fonte de energia, já na década de 1970 a energia oriunda da biomassa começa a ter destaque dentre as fontes geradoras de energia no Brasil. Dentro do estímulo estão os programas do Governo Federal, por meio do Ministério das Minas e Energia (DA SILVA, 2016).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) - da Lei nº 13.576, promulgada em dezembro de 2017, faz parte integrante da política energética nacional e objetiva o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional, com foco na segurança do abastecimento de combustíveis e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, preservação ambiental e a agregação de valor à biomassa brasileira (BRASIL, 2017).

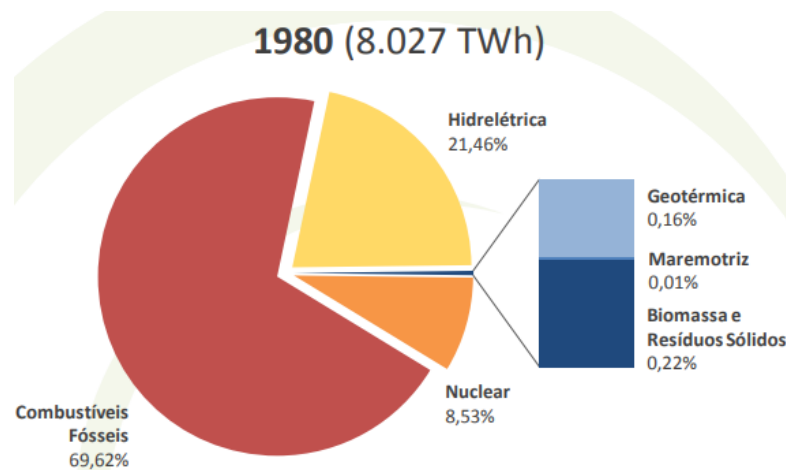
O uso da biomassa residual, gerada a partir das atividades da agricultura, reduz a necessidade de utilizar recursos naturais como fonte de energia. Diversas fontes renováveis de biomassa residual são provenientes da lenha, o carvão vegetal, os óleos vegetais, resíduos vegetais, sisal, biogás, resíduos de animais (DA SILVA, 2017).

Considerando que a presença do biogás ainda seja tímida dentro do todo o contexto, as projeções da produção de etanol e açúcar indicam elevada quantidade de resíduos deste setor que pode ser destinada à produção de biogás. Dessa forma, considerando que toda a vinhaça e torta de filtro resultantes serão destinadas para a biodigestão, o potencial de biogás alcança 7,1 bilhões de Nm³ em 2029, representando 3,9 bilhões de Nm³ de biometano (PDE, 2019). Ademais, estimativas apontam para cerca de 2,2 GW médios em 2029. Considerando apenas as usinas com capacidade de moagem acima de 3 milhões de toneladas e pertencentes ao quartil mais eficiente do setor sucroenergético, uma produção de cerca de 400 MW (Itaú BBA, 2017). O biogás, por conter um elevado teor de metano (CH₄), possui diversas aplicações de caráter

energético. Embora sua principal aplicação seja como combustível em um motor de combustão interna a gás, que movimenta um gerador de energia elétrica, ele pode ser direcionado também para outros fins.

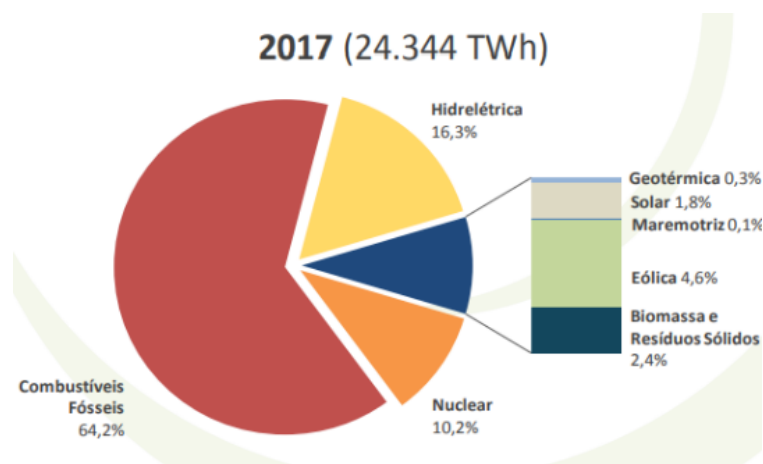
As Figura 3 e Figura 4 mostram o cenário de expansão de utilização da biomassa para fins de energia elétrica.

Figura 3 – Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte (%) – Ano 1980



Fonte: (EPE, 2020).

Figura 4 – Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte (%) – Ano 2017



Fonte: (EPE, 2020).

Diversas fontes de energia renováveis aumentaram consideravelmente desde 1980 e aumentarão de 82 milhões de Mtep, em 2008, para 196 milhões de Mtep, em 2020 (Tabela 1).

Tabela 1. Demanda mundial de energia por fonte de energia (Mtep) (Ano 1980 – 2020)

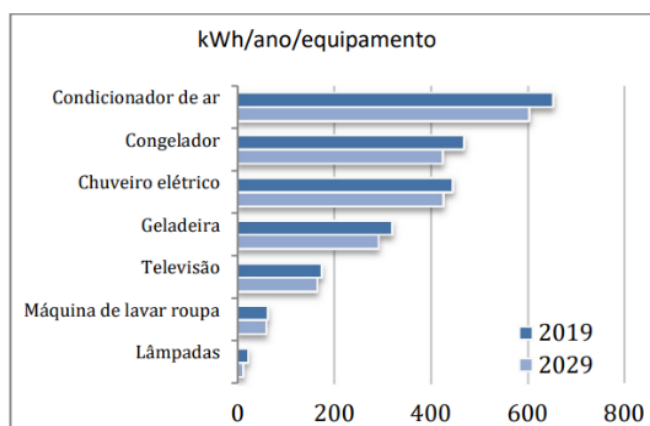
Fonte de energia	1980	2000	2008	2020
Carvão	1792	2292	3286	4124
Óleo combustível	3107	3655	4320	4654
Gás	1234	2085	2586	3046
Nuclear	186	676	723	920
Hidroelétrica	148	225	276	389
Biomassa (+resíduos e co-produtos)	749	1031	1194	1436
Outras renováveis	12	55	82	196
Total mundial	7228	10.018	12.467	14.765

*Mtep, milhões de toneladas de óleo equivalente de petróleo

Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018).

Ressalta-se que o setor da construção civil de edificações é o maior consumidor final de energia elétrica, responsável por 51% da eletricidade e 16% da energia total, que considera a eletricidade e os combustíveis. A eletricidade, o GLP, o gás natural e a lenha são as principais fontes de energia utilizadas nas residências brasileiras (Figura 5). Entretanto, a eletricidade é identificada como a fonte que apresenta a maior oportunidade de conservação de energia nas residências no horizonte do PDE 2029.

Figura 5 - Consumo Médio em uma residência (por equipamento)



Fonte: (PDE, 2019).

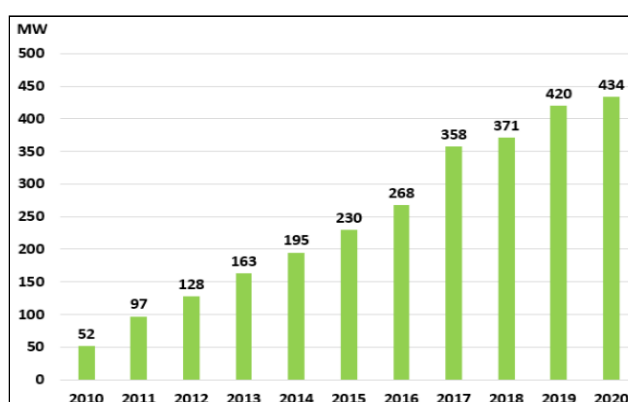
Todo este desenvolvimento deu-se por meio da implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME) pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003. O programa foi criado para

estruturar o país com relação a projetos que visam a utilização de fontes limpas e sustentáveis para a geração de energia.

2.3. Potencial do Biogás a partir de biomassas residuais

Galaverna e Pastre (2017) destacam que a energia das biomassas está se tornando um elemento de prestígio econômico e industrial, já pode ser considerada uma segurança na matriz energética mundial. Verificam-se assim avanços nos processos de consolidação da cadeia do biogás no cenário nacional (STEINMETZ, 2016). A Figura 6 apresenta a expansão da capacidade instalada do biogás no país.

Figura 6 – Evolução da Capacidade Instalada de Biogás – 0,4 GW.



Fonte: (CONGEN; CCEE; ANELL; 2020).

Atualmente existem políticas públicas no Brasil que fomentam a oferta de eletricidade produzida com biogás. Os projetos de geração de energia elétrica utilizando biogás recebem um desconto de 100% nas tarifas de utilização da rede de transmissão de energia elétrica (TUST) e/ou redes de distribuição (TUSD). As usinas de biogás de resíduos sólidos urbanos também têm direito a receber os benefícios de redução de impostos do Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) (QUADROS; TAVARES; *et al.*, 2015).

A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 590,5 TWh em 2014 (EPE, 2015). Isso significa que se todos os resíduos mostrados no Tabela 2 fossem aproveitados para gerar eletricidade através do biogás, a contribuição na oferta interna de energia elétrica seria de aproximadamente 70%.

Tabela 2. Potenciais para a produção de biogás a partir de resíduos - Brasil

Setor	Tipo de resíduo	Potencial de geração de biogás (m³/ano)	Potencial energético (GWh/ano)
Resíduos da pecuária	Aves	2.825.206.740,60	4.040,05
	Suínos	2.628.897.610,30	3.759,32
	Vacas ordenhadas	3.953.560.106,63	5.653,59
Resíduos agroindustriais	Açúcar e álcool (vinhoto)	3.170.179.374,00	4.533,40
	Cervejas	267.271.219.337,79	382.197,84
	Papele celulose (licor negro)	3.578.833.530	5.117,73
Resíduos urbanos	Resíduos sólidos urbanos	5.910.989.797,80	8.452,72
	Esgoto	357.126.518	510,69
TOTAL		289.696.013.015,12	414.265,34

Fonte: SENAI (2016).

A energia renovável é também de extrema importância para territórios ou países que não possuem disponibilidades de combustíveis convencionais ou fósseis por não ter acesso a um litoral, ademais outros fatores desvantajosos como a insegurança e a volatilidade dos preços do petróleo (DUVENAGE, et al., 2013). Assim as plantas de conversão de bioenergia incrementam a dinâmica da cadeia de suprimentos de abastecimento (HIVOS, 2010; RERA, 2013).

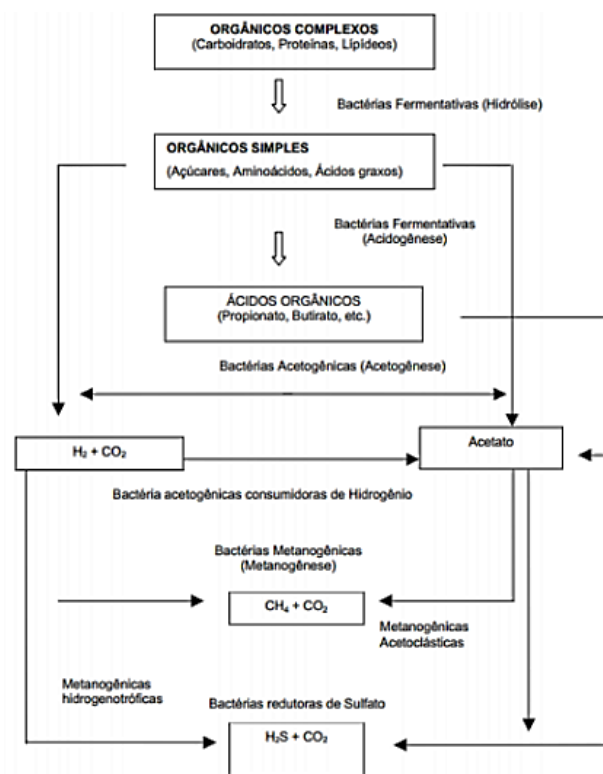
De acordo com Silva (2017) a aplicação de biomassas residuais em energia contribui para a transformação de passivos ambientais em ativos econômicos, promovendo a geração de um combustível gasoso sustentável. O uso da biomassa residual reduz a extração de recursos naturais e são fontes que podem ser garantidas pelo exercício de inúmeras atividades domésticas, comerciais, sanitárias, agrárias e industriais. Cita-se, portanto, a Lei nº 12.490/2011 que regulamenta e atribuiu à ANP (Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível) as atividades relacionadas com a indústria dos biocombustíveis.

O biogás tem sua formação onde existem materiais orgânicos em estado de degradação. Karlsson et al., (2014) destacam que o biogás se origina a partir do fracionamento dessa matéria, principalmente em condições anóxicas. Converter materiais orgânicos, através de bactérias, em metano, dióxido de carbono, em gases inertes e em compostos sulfurosos, com ausência de oxigênio, depende principalmente

da tecnologia empregada na digestão e do substrato. Observa-se que este processo ocorre naturalmente em plantações de arroz e aterros sanitários, por exemplo. O metano é o principal componente volumétrico do biogás (55%-70%), seguido pelo dióxido de carbono (30%-45%) (TOLMASQUIM, 2016).

Os microrganismos da digestão anaeróbia operam em simbiose, em grupos específicos que são responsáveis por promover cada uma das etapas do processo para a produção de biogás: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (GUERI; SOUZA; KUCZMAN, 2018) (Figura 7). Assim são capazes de tratar os resíduos orgânicos e aproveitar a energia residual pois recupera o biogás.

Figura 7 – Etapas de Produção de Biogás,



Fonte: (CHERNICHARO, 2007).

Na primeira está, a hidrólise, os materiais orgânicos – como carboidratos, aminoácidos, álcoois e ácidos graxos ditos de cadeia longa – sofrem a quebra dessa cadeia, convertendo-os em cadeias curtas, servindo para alimentação dos microrganismos. A segunda fase, a acidogênese, forma compostos com possibilidade de solubilidade, especialmente ácidos graxos voláteis. Nessa etapa, são produzidos os ácidos acéticos, butírico e láctico, dependendo dos microrganismos presentes e das condições do ecossistema. Na terceira fase, a acetogênica, além de antecipar o gás metano, as partículas que haviam sido quebradas na primeira fase são novamente

fracionadas e produzem ácido acético, hidrogênio e o dióxido de carbono (este hidrogênio é absorvida pelos microrganismos metanogênicos). Por fim, a última fase é a mais importante na produção do biogás onde ocorre a formação do metano (CH_4) e também o gás carbônico (CO_2). Na metanogênese ocorre a absorção de microrganismos metanogênicos, estes normalmente mais sensíveis a intervenções, tendo atenção especial quanto ao pH a presença de substâncias tóxicas (KARLSSON *et al.*, 2014).

Conforme FEAM (2015) a qualidade do biogás, para fins de aproveitamento energético, depende da concentração de metano. A presença de água, dióxido de carbono e outros gases diferentes do metano no biogás, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente. O gás sulfídrico (H_2S), formado espontaneamente durante a digestão anaeróbia a partir de compostos de enxofre presentes no substrato, é o principal composto indesejável, necessitando de ser removido em praticamente todos os usos energéticos.

Pesquisas como as de Salazar (2014), Silva (2017) e Suzuki *et al.* (2011) indicam que o processo de purificação do biogás (biometano) objetiva o aumento do poder calorífico do gás e de sua qualidade, por meio da remoção de componentes não combustíveis, o que resulta em um combustível gasoso com elevado teor de metano e características equivalentes às do gás natural.

O Biometano é um biocombustível gasoso obtido a partir do processamento do biogás. É produzido a partir de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris, resíduos agrícolas, esterco animal, esgoto doméstico e resíduos sólidos urbanos (aterros sanitários) (ANP, 2019).

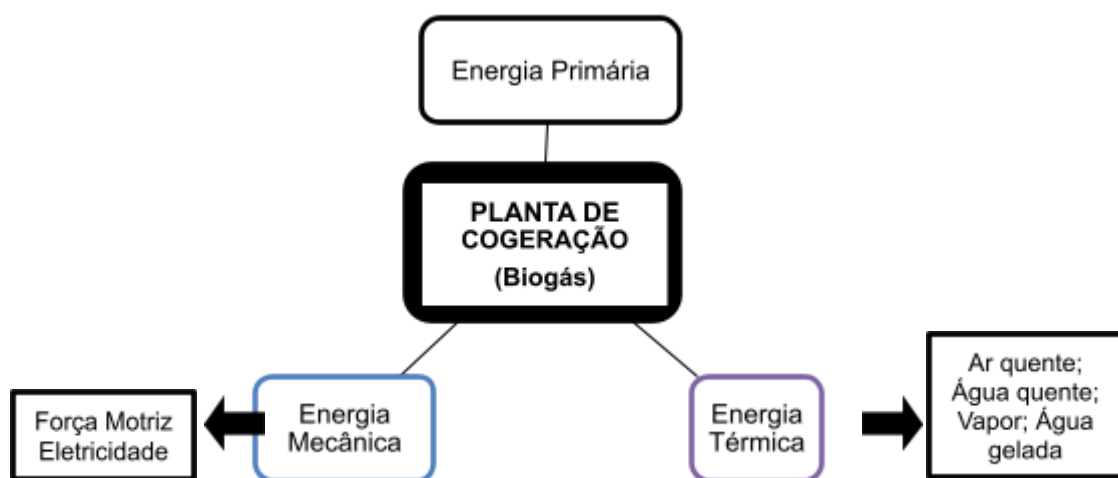
Nota-se que o Brasil possui uma geração de biomassa com capacidade de exploração energética, estando relacionado com o setor agroindustrial, setor silvicultural e na produtividade agrícola. É sabido que tais setores precisam de alta demanda de energia elétrica e até vapor em seus processos produtivos, e, conforme salienta Santos (2017), se introduzisse a estratégia da cogeração, empregando seus próprios resíduos gerados, haveria possibilidade de minimizar essa necessidade.

2.4. Tecnologia de cogeração/codigestão aplicada ao biogás

Diferentes tecnologias existentes para o aproveitamento energético do biogás do processo de decisão da solução mais adequada. Além do mais, o CH_4 existente no biogás é na faixa de 21 vezes mais prejudicial que o CO_2 , sendo esses os maiores concentradores de gases de efeito estufa, em consequência da disposição de resíduos orgânicos. Desse modo, existe a possibilidade de aproveitamento energético desse biogás, aliando contribuição ambiental com geração de energia elétrica renovável (CANEVER, 2017).

O termo cogeração, definida como a produção combinada de energia elétrica e de energia térmica, a partir de uma única fonte de combustível (Figura 8). Na cogeração de energia, são utilizados grupos geradores compostos por um motor à combustão acoplado a um gerador elétrico, também conhecido como *Combined Heat and Power* (CHP). Conforme dados da FEAM (2015), as principais tecnologias de cogeração são motores de combustão interna (ciclo Otto), bicomcombustíveis (ciclo diesel operando com biogás) e as microturbinas. A cogeração permite a utilização de vários combustíveis, dos quais se destacam o gás natural, gás propano, fuelóleo e a biomassa, dentre outros.

Figura 8 – Cogeração de Energia



Fonte: (AUTOR, 2020).

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), consolidou a microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica. Vale ressaltar que o método de microgeração distribuída consiste no local onde será gerada essa energia, sendo essa potência menor ou igual a 75 kW. Já na minigeração distribuída o que muda é o valor da potência instalada, que vai de 75 kW a 5 MW provenientes de fontes alternativas renováveis. Direitos como compensação, melhoria, reforço e outros foram alterados nos Módulos Um e Três dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST pela Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015).

As principais tecnologias de cogeração são motores de combustão interna (ciclo Otto), bicomcombustíveis (ciclo diesel operando com biogás) e as microturbinas. Delgado (2016) afirma que a cogeração permite melhorar as condições de operacionalidade em relação à sustentabilidade energética, sendo igualmente uma solução vantajosa do ponto de vista econômico.

Apresentado por Konrad *et al.*, (2016), alguns exemplos de onde é possível aproveitar esse biogás são a queima diretamente em aquecedores, fogões e caldeiras, a produção de energia elétrica e térmica por meio de motogeradores ou turbinas a vapor e, ainda, a possibilidade de utilização como combustível veicular após um tratamento de purificação e retirada de impurezas. Miyawaki (2014) e Silva (2017) apontam que, dentre os processos utilizados para a purificação do biogás, podem ser destacados purificação por membranas, purificação criogênica, lavagem por água, purificação biológica e por adsorção com modulação de pressão.

O biogás possui poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³, podendo ser consumido diretamente, ou tratado para separação e aproveitamento do biometano, cujo conteúdo energético é semelhante ao do gás natural (9.256 kcal/m³) (EPE, 2018).

A composição química e estabelece uma comparação entre o poder calorífico do biogás de aterros de resíduos sólidos urbanos, biogás, biometano e do gás natural. Como detalhado na Tabela 3, estas características configuram o biometano como potencial substituto do gás natural, de origem fóssil (VEIGA, 2016).

Tabela 3. Composição química e poder calorífico de diferentes gases

Propriedade	Biogás de aterro	Biogás ^(a)	Biometano ^(b)	Gás Natural
CH ₄ (% mol)	50-55	>55	95 – 97	85-92
CO ₂ (% mol)	37-41	34-38	1-3	0,2-1,5
N ₂ (% mol)	1-17	-	2-10	0,3
H ₂ S (mg/m ³) ^(c)	0 – 1.000	100 – 10.000	<5-23	0 - 5
Siloxanos (mg/m ³)	1-400	-	<0.03-28	-
Poder Calorífico (MJ/Nm ³)	16	23	35	39

Fonte: (VEIGA, 2016). (a) composição típica de biogás obtido de digestão anaeróbica; (b) parâmetros mínimos para que seja efetivamente considerado como substituto do gás natural de origem fóssil.

No setor agroindustrial, a cogeração a partir da biomassa da cana representa aproximadamente 62% de toda a cogeração existente no país, a cogeração com gás natural representa 17%, o licor negro 14% (Tabela 4). Cabe também ressaltar as plantas de licor negro, que apresentam a maior taxa de MW por planta, enquanto as plantas de cogeração a Gás Natural a menor (COGEN, 2020).

Tabela 4. Fontes de Cogeração de Biomassas (Biogás)

Fonte	MW Instalado	Usinas	% MW	Média de MW/ Usinas
Bagaço de Cana	11.604	381	62	30
Gás Natural	3.073	88	16,5	7
Licor Negro	2.682	68	14,4	39
Madeira	783	24	4,1	15
Biogás	387	53	2,1	16
Outros	159	18	0,9	9
Total	18.688	632		

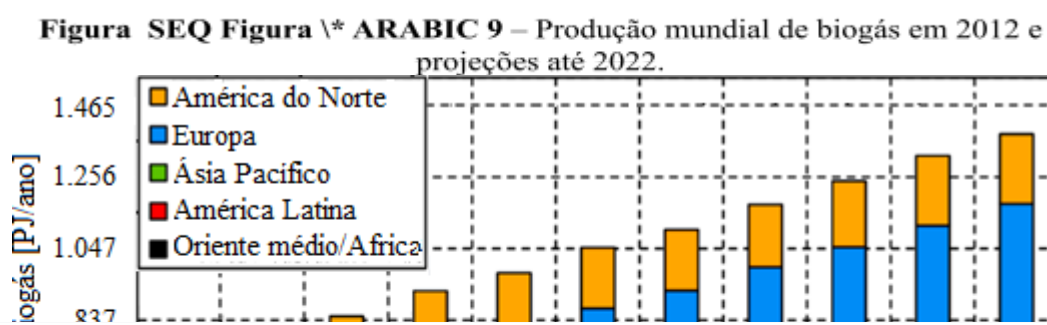
Fonte: (COGEN, 2020).

Até 2019, o setor de produção de biogás no Brasil contava com 524 plantas de usinas em operação produzindo 1,3 bilhão de m³, mas o potencial de produção é de 84,6 bilhões de Nm³/ano, sendo que o setor sucroenergético tem capacidade para gerar o correspondente a 41,4 bilhões Nm³/ano e o setor da agroindústria a 37,4 bilhões Nm³/ano. O biocombustível apresenta condições para ser associado à produção de energia elétrica com potencial de produção de 190 mil GWh/ano, equivalente a 20% do consumo nacional, ou para ser adotado como substituto para 45 bilhões de litros de diesel, cerca de 35% do consumo brasileiro (UNICA, 2020).

A Raízen inaugurou em 2020 a maior usina de biogás com produção a partir de derivados da cana-de-açúcar do mundo: a Usina Bomfim, localizada em Guariba (SP). A planta irá produzir biogás por meio de vinhaça e torta de filtro, dois subprodutos da cana. A usina tem capacidade para produzir 138 mil MWh por ano, o suficiente para abastecer uma cidade com, aproximadamente, 250 mil habitantes (UNICA, 2020).

Um incentivo regulatório importante para o desenvolvimento da produção de energia a partir dos RSU e do biogás de aterro foi a Chamada nº 14 da ANEEL, publicada em 2012. Esta chamada, intitulada “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de 65 Energia Elétrica a partir do Biogás oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira” faz parte dos programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da ANEEL, envolvendo um investimento inicial de R\$ 476 milhões e previsão da instalação de 33,7 MW (ANEEL, 2013).

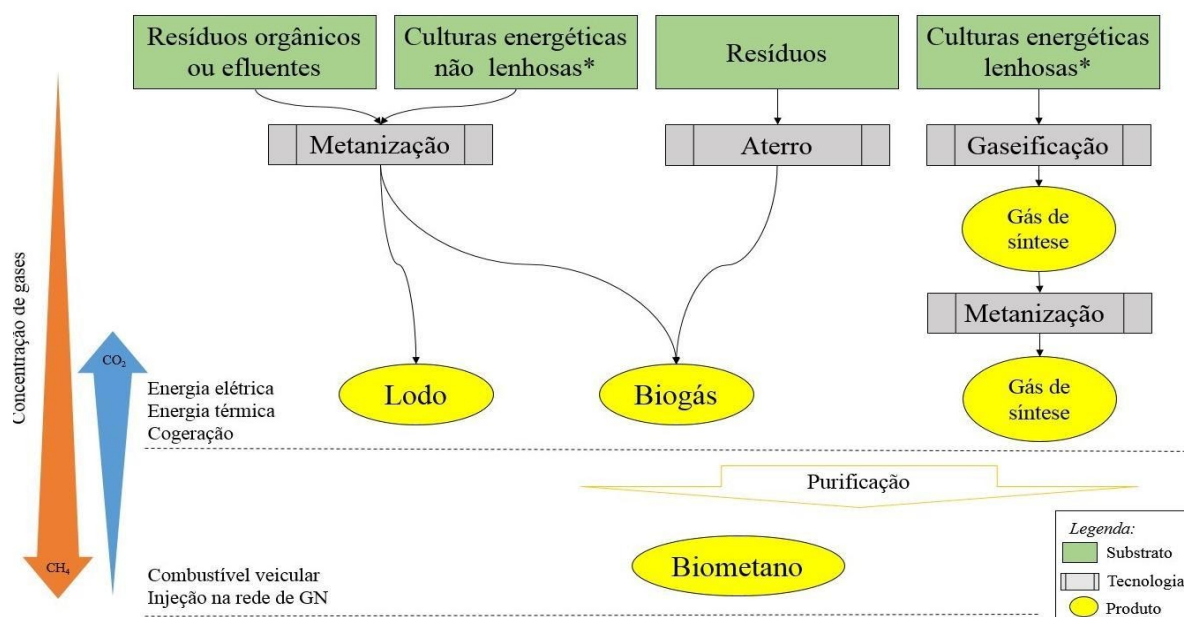
A União Europeia, por sua vez, segundo Pike Research (2012, apud RABONI; URBINI (2014), foi responsável por 60% do biogás produzido no mundo e apresenta uma forte tendência de aumento da produção de biogás nos próximos anos (Figura 9).



O aumento do uso de fontes renováveis de energia na região, e por consequência o aumento na produção de biogás, está atrelado à existência de regulações e metas determinadas pela União Europeia tanto em relação à gestão de resíduos, quanto em relação às mudanças climáticas. A relevância da Europa na produção de biometano também é destacada por REN21 (2015). O país que apresenta o maior número de plantas de purificação de biometano em operação atualmente é a Alemanha. Já o Reino Unido, segundo país em termos de utilização de biogás, cujo substrato de destaque é o gás de aterro, apresenta maior produção de energia elétrica, enquanto a Suécia, segundo país em número de plantas de purificação de biogás, é comumente mencionada como caso de sucesso no uso de biometano como combustível veicular (EUROSERVER, 2014; FERREIRA; MARQUES; MALICO, 2012).

A Figura 10 mostra tecnologias para geração de biogás, tais como captação e tratamento de gás de aterro; biodigestão de resíduos agrícolas, culturas energéticas, lodo de esgoto, dentre outros (VEIGA, 2016). Para o aproveitamento do biogás e suas aplicações na cogeração destacam-se a produção de calor de processo, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), queima em caldeiras, aquecimento de granjas, iluminação a gás, tratamento de chorume, dentre outros, utilizando o metano proveniente da biodegradação, em que pode se aprimorar para a utilização do biometano.

Figura 10 - Atividades e Rotas de Aproveitamento do Biogás.



Fonte: (VEIGA, 2016 apud BORDELANNE, 2011).

Nos testes realizados por Guerini Filho (2017) em um ônibus movido a biometano resultou em significativa baixa emissão de poluentes e ruídos atmosféricos

pelo motor em relação aos níveis permitidos na legislação CONAMA nº 418/2009, demonstrando evidências na possibilidade de substituição total ou parcial dos combustíveis fósseis pelo biometano, contudo se distinguem em relação ao biogás nos diversos processos, como concentração de metano e presença de contaminantes.

A purificação (*upgrading*) do biogás envolve a sua transferência para um sistema de purificação, conforme Monteiro (2011), cuja ação resulta no isolamento do metano dos demais constituintes, a partir da remoção do dióxido de carbono, aumentando o poder calorífico desse biocombustível. Esta última é a que será utilizada no trabalho em questão.

Produzido a partir da purificação do biogás, o biometano deve seguir algumas especificações normativas: uma delas é manter a porcentagem de metano de no mínimo 90% para obter o deferimento para utilização e comercialização. Essa resolução recém-citada ainda engloba autorização de liberação das unidades de compressão e instalações diretamente no produtor para inspeções rotineiras (ANP, 2015). Com alterações de outras publicações anteriores, a resolução nº 8, de 30 de janeiro de 2015, divulgada pela diretoria da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, contém aprovação para utilização do biometano proveniente de resíduos orgânicos agrossilvopastoris, resíduos sólidos urbanos e esgotamento sanitário para veículos, instalações residenciais e comerciais (ANP, 2015).

2.5. Aproveitamento de Biogás a partir de Biodigestores

O setor sucroenergético, no ano de 2019, gerou 36.972 GWh de bioeletricidade. O potencial de produção de eletricidade a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar é estimado em 20,2 GW médios até 2023, o que equivale a mais de **quatro Usinas de Belo Monte** em produção de energia (ÚNICA, 2020). Estima-se para o biogás oriundo da biodigestão da vinhaça e da torta de filtro seu potencial de produção seja de 7,1 bilhões de Nm³ em 2029 (PDE, 2019).

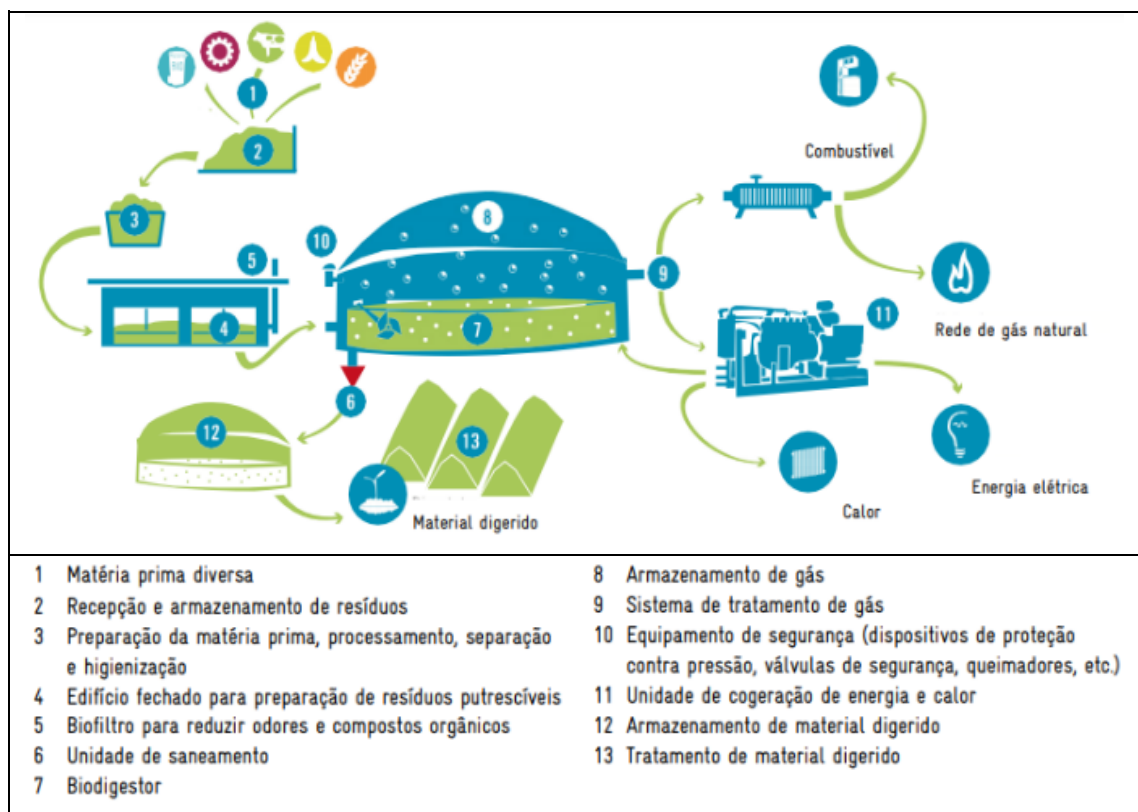
Pará, Acre, Tocantins, Amapá e Roraima foram os estados que contribuíram para o aumento do efetivo de animais na região Norte (IBGE, 2012). Teston (2010) obteve a produção de 1,4m³ de biogás (CH₄)/dia, em seu estudo sobre a produção de energia a partir do esterco bovino no qual a produção teórica seria de 2 m³ processando uma massa de esterco de 60 a 70 kg dia.

Já Costa (2012), em um estudo sobre a produção de biogás utilizando cama de frango diluída em água e biofertilizante de dejetos suínos, obteve a produção biogás de 1,389 m³ por (m³) kg-1 de cama de primeiro lote, e observou que a fração sólida demorou ser digerida, visto que em cama de primeiro lote há maior concentração de matéria orgânica digerível. Quando comparado com outros combustíveis, o conteúdo energético de em metro cúbico (1 m³) equivale energeticamente a: 0,40 kg de GLP (gás liquefeito de petróleo) utilizado nas residências; 0,61 a 0,70 litros de gasolina; 0,55

litros de óleo diesel; e 0,80 litros de álcool. (LAZZARI, 2013). Para tratamento destes resíduos avícolas a biodigestão anaeróbia se apresenta como uma alternativa sustentável, uma vez que além de obter energia elétrica a baixo custo, recicla o material residual da sua granja e auxilia na redução dos impactos ambientais gerados no processo (SAGULA, 2012).

A Figura 11 demonstra o processo de produção do biogás através da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e estrumes. O biogás gerado pode ser utilizado, por exemplo, para cogeração de energia e potência (CHP).

Figura 11 – Componentes e aplicação final de um biodigestor anaeróbico.



Fonte: (FACHVERBAND BIOGAS, 2016).

2.6. Aproveitamento de Biogás nas ETEs e Aterros Sanitários

A Lei 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece os princípios de valorização dos resíduos por meio do correto tratamento dos materiais dispostos; e aproveitamento do subproduto destes resíduos para produção de energia (PNUD, 2010).

Segundo Abrelpe (2018/2019) foram gerados no Brasil 79 milhões de toneladas de resíduos, ou seja, 380 Kg/ano por pessoa, e, 59,5% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários, o restante, ainda é enviada para lixões ou outras áreas inadequadas. O Brasil tem potencial para produzir mais de 280 megawatts de energia a partir do biogás capturado em unidades de destinação de

resíduos sólidos, o que daria para abastecer cerca de 1,5 milhão de pessoas (ABRELPE, 2018/2019).

Independente do uso final do biogás produzido no aterro sanitário deve-se projetar um sistema de coleta, tratamento e queima do biogás: poços de coleta, sistema de condução, tratamento (inclusive para desumidificar o gás), compressor e flare com queima controlada para a garantia de maior eficiência de queima do metano., o que corrobora ademais com a redução deste gás e outras frações poluentes na atmosfera (MMA, 2020).

Para estimar a composição e o quantitativo do biogás a ser produzido no aterro, pode ser utilizado o modelo matemático do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Waste Model, que consistente com o método usado para realizar os inventários e as comunicações nacionais de emissões de GEE.

O Brasil utiliza sistemas anaeróbios nas companhias de saneamento para o tratamento de esgotos. O tipo de reator mais empregado nesse tratamento é o de fluxo ascendente e manto de lodo, denominado UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Este tipo de reator não requer um investimento elevado para a sua construção e seu custo de operação é baixo. O biogás produzido pode ser utilizado como insumo energético dentro da própria estação de tratamento de esgoto (ETE), para gerar eletricidade e reduzir os gastos com o seu consumo (SILVA, T. *et al.*, 2015). Lodo e espuma, principais produtos decorrentes do tratamento de esgotos, são resíduos que normalmente são dispostos em aterros, contudo possuem potencial energético e podem ser aplicados em setores da construção civil e biocombustíveis.

Koga *et al.*, (2015) afirmam que uma ETE de médio porte, composta por reatores anaeróbios e flotação por ar dissolvido, consegue gerar até 80% da energia elétrica consumida pela ETE, suprir toda a demanda de energia térmica necessária para a secagem do lodo e, ainda, gerar um excedente de energia térmica.

A Resolução ANP Nº 685/2017 estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional (ANP, 2017).

2.7. Codigestão Anaeróbia

Os biodigestores anaeróbios, onde o processo é controlado, podem ser classificados de acordo com a concentração de sólidos totais com que operam. Reatores de via úmida, seca e extrasseca operam com as faixas de 3% à 15 %, 15 % à 35 % e 25 % à 50 % de sólidos totais respectivamente (PROBIOGÁS, 2015).

A digestão anaeróbica pode ser aplicada para o tratamento e/ou recuperação de energia, materiais e insumos. Contudo, é importante observar que as características neste processo podem resultar em inibição de amônia e ácidos graxos voláteis o que afetar a estabilidade desta digestão (LUO *et al.*, 2020; SHAMURAD *et al.*, 2020). Evidentemente depende do tipo de material ou substância a ser trabalhado e das

condições de processo aplicáveis. Os parâmetros para controle ou de monitoramento de biodigestores podem ser considerados volume e composição de biogás, sólidos suspensos totais (fixos e voláteis), pH, temperatura e alcalinidade.

A digestão anaeróbia é um dos métodos mais rentáveis para tratamento de resíduos sólidos orgânicos e recuperação de bioenergia. (LI, 2016). O tratamento anaeróbio de dois ou mais substratos simultaneamente (codigestão) apresenta vantagens sobre a digestão de resíduos individuais (monodigestão) (ÁLVAREZ *et al.*, 2014) como diluição de componentes tóxicos ou mesmo a adição de nutrientes ao meio. Entretanto, para uma codigestão eficiente, é imprescindível determinar as melhores condições de mistura, de modo a maximizar a produção de metano e evitar a inibição do processo (ÁLVAREZ *et al.*, 2010). Segundo Wang *et al.* (2012), a codigestão de vários resíduos pode proporcionar o incremento de nutrientes, a diversidade bacteriana e umidade necessárias ao meio, melhorando o processo de digestão.

Resíduos orgânicos são a principal fonte de biomassa recuperável em energia. Eles estão em regeneração contínua, qualquer que seja sua origem (resíduos agrícolas, resíduos domésticos fermentáveis, lodo de esgoto estações de tratamento, resíduos da indústria alimentar, etc.). Vários estudos têm mostrado que os resíduos do setor urbano (em particular os de resíduos domésticos e águas residuais) demonstram um grande potencial energético. Substratos comumente utilizados em biodigestores anaeróbios são lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE), resíduos da indústria de carne e peixe, dejetos animais, resíduos agrícolas, fração orgânica de resíduos domésticos, etc. (ESPOSITO *et al.*, 2012).

3. METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma revisão sistemática de literatura, o qual pode ser classificado, conforme proposto por Silva e Menezes (2001), a partir de sua natureza, da forma de abordagem do problema, dos objetivos e também dos procedimentos técnicos. Deste modo, pode-se classificá-lo como uma pesquisa de natureza aplicada, abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios e do ponto de vista dos procedimentos técnicos trata-se de uma pesquisa bibliográfica.

A revisão sistemática, segundo Kitchenham (2007), utiliza uma metodologia bem definida para identificar, analisar e interpretar cada uma das evidências disponíveis sobre uma determinada questão de pesquisa. A essa pergunta dá-se o nome de pergunta norteadora, pois é ela quem determina de forma clara o que buscar. Os métodos de procura, coleta e seleção das informações são organizados e replicáveis, buscando a comprovação ou refutação através de evidências científicas existentes de forma imparcial (Moreira, 2016).

Para a revisão, o protocolo proposto por Sampaio e Mancini (2008) foi o escolhido para a realização da revisão sistemática de literatura, por apresentar a ideia de forma clara e exemplificada. Segundo Cronin, Ryan e Coughlan (2008) existem dois tipos de revisão de literatura: (a) revisão tradicional ou narrativa da literatura; e (b) revisão sistemática da literatura. O primeiro tem como objeto principal dar subsídios ao pesquisador sobre aspectos globais de determinado entendimento de uma nova pesquisa, sem um critério mais rigoroso. O segundo, em contraste, permite uma abordagem com critérios definidos, delimitando os prazos em que a literatura foi selecionada, bem como os métodos utilizados para avaliar e sistematizar os resultados.

Segundo CRONIN et. al., (2008), para que o método tenha confiabilidade e validade, é preciso ter um protocolo bem definidos, como está ilustrado na Figura 12, com os seguintes tópicos:

- (i) Determinação da pergunta norteadora;
- (ii) Definição dos critérios de inclusão ou exclusão;
- (iii) Acessar a literatura escolhida;
- (iv) Avaliar a qualidade da literatura incluída na revisão;
- (v) Analisar, sintetizar e divulgar os resultados.

Figura 12– Etapas da metodologia.



Fonte: (AUTOR, 2021).

Dessa forma, são apresentadas as etapas do protocolo utilizado em detalhes:

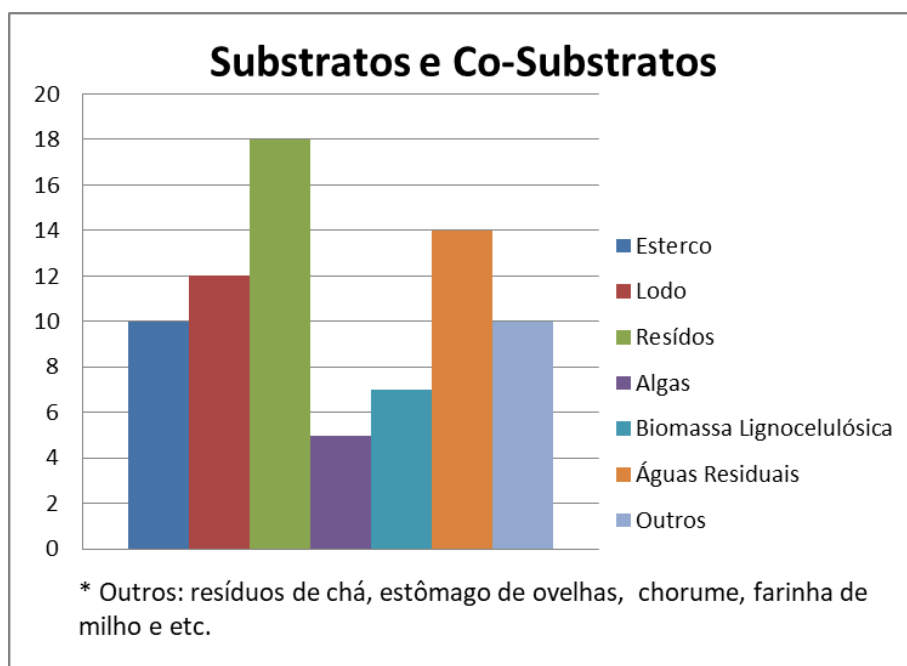
- Determinação da pergunta norteadora: Quais os estudos abordam a produção de biogás de resíduos sólidos utilizando processo de codigestão?
- Definição dos critérios de inclusão ou exclusão: Os critérios foram palavras-chave, bases de dados científicos, período de publicação e tipos de artigos. A procura era por estudos relevantes publicados em inglês a partir de 2008, para tal foram utilizados os seguintes termos: “biogas”, “solid urban waste”, “cogeneration”, “anaerobic co-digestion” como palavras-chave em pesquisas no Science Direct.
- Acessar a literatura escolhida: a base escolhida foi o Science Direct, e os resultados gerais utilizando as combinações das palavras-chave foram 52 artigos, sendo artigos de pesquisa (38) e artigos de revisão (14) publicados em anais de eventos.

- Avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão: Os artigos encontrados na base de dados foram analisados com base no título, resumo e na conclusão de cada publicação com vistas à verificação se o tema está de acordo com o proposto neste trabalho e como critério de inclusão na amostra. Nesta etapa apenas 41 artigos foram selecionados, pois os demais não abordavam a codigestão e produção de biogás.
- Analisar, sintetizar e divulgar os resultados: Esta etapa demonstra a análise para cada artigo selecionado considerando o resumo, a introdução, a metodologia e a conclusão dos trabalhos selecionados nas bases de dados. Para organizar a análise, os trabalhos foram divididos em 3 grupos, sendo o primeiro (Grupo A) o que aborda a codigestão e produção de biogás de maneira mais clara e com utilização de substratos que se repetiam com frequência, como é o caso do lodo, esterco de animais e lodo. O segundo grupo (Grupo B) era composto por artigos que analisavam a utilização de algas para a produção de biogás e codigestão. Por fim, o terceiro grupo (Grupo C), continham os estudos que exigiram atenção e tempo para a compreensão, visto que surgiram termos novos, como fermentação ruminal e biomassa lignocelulósica além de um estudo que analisa os efeitos do campo magnético para produção de biogás.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os artigos apresentaram temas diversificados tanto em técnicas quanto em tipos de substratos. Alguns materiais se repetiram com mais frequência (Figura 13), enquanto alguns dos artigos estudavam apenas técnicas de pré-tratamento e não avaliavam a produção de biogás. Para facilitar a análise dos trabalhos, eles foram agrupados em temas, sendo que os mais tradicionais ficaram agrupados devido à facilidade de entendimento, enquanto que os mais complexos foram divididos em dois grupos.

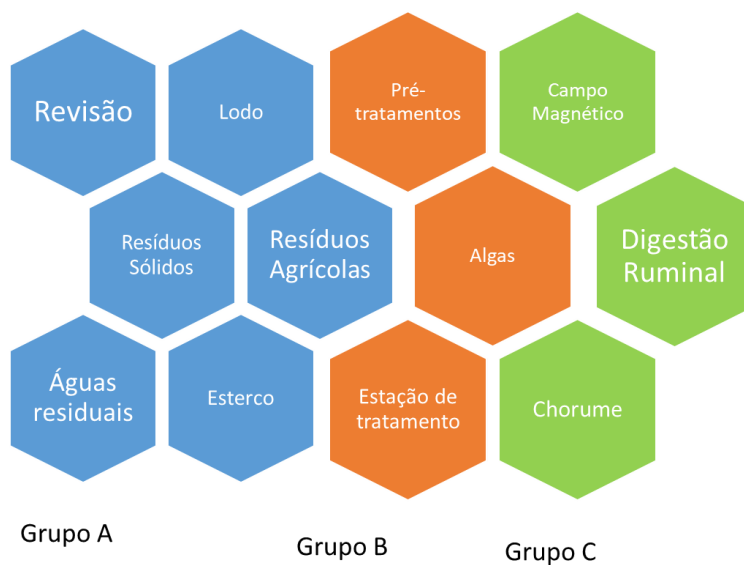
Figura 13 – materiais mais utilizados nos estudos



Fonte: (AUTOR, 2021).

Dessa forma, os trabalhos que abordaram a codigestão, pré-tratamento dos substratos ou realizaram revisões a respeito do tema ficaram no grupo A, pois os trabalhos eram mais parecidos, com diferença do substrato ou pré-tratamento de modo que facilitou o entendimento. Os trabalhos que abordavam as algas, ainda que não tratasse necessariamente de codigestão formam o grupo B. Por fim, os trabalhos que utilizaram tecnologias mais complexas, como campo magnético, são os que compõem o grupo C. Dito isso, é possível ilustrar a organização dos grupos com a Figura 14, a qual separa os grupos e os temas que compõem cada um.

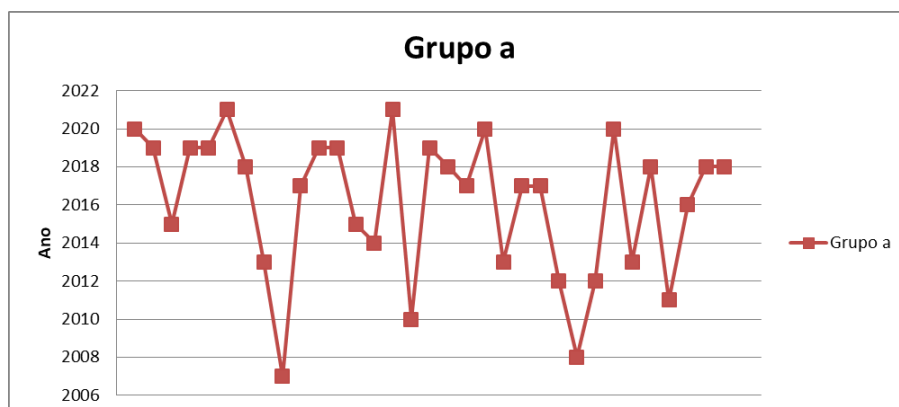
Figura 14 – Organização dos grupos por temas



Fonte: (AUTOR, 2021).

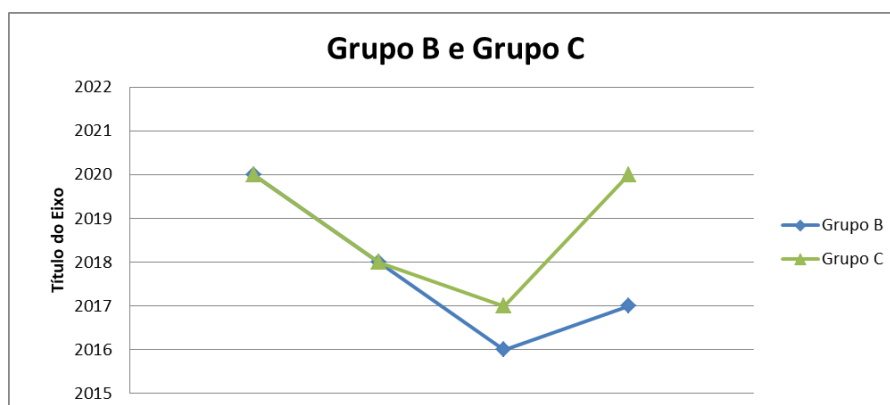
Não foi necessário retirar do trabalho artigos mais antigos, pois de maneira geral, em todos os grupos, os trabalhos não são antigos e apenas dois deles foram publicados em 2008 ou antes, como é possível notar nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Ano das publicações do grupo A



Fonte: (AUTOR, 2020).

Figura 16 - Ano das publicações do grupo B



Fonte: (AUTOR, 2020).

4.1. Grupo A

Os artigos deste grupo abordam, de maneira geral, todas as etapas do codigestão anaeróbia. Além de estudar as etapas da co-digestão, vários tipos de materiais são testados como substratos e co-substratos bem como tratamentos para torná-los mais eficientes. Os principais materiais estudados são o lodo, resíduos sólidos, fezes de animais e águas residuais.

Um dos estudos analisou uma indústria de laticínios, a qual opera uma instalação de co-digestão de lodo de esgoto, resíduos de alimentos e resíduos de laticínios na proporção de 35:47:18 em uma base de sólidos voláteis. Co-digerindo nesta alta proporção permitiu benefícios significativos: aumento de $300 \pm 50\%$ em produção de metano. Analisando a planta-amplio impacto da co-digestão de alta proporção indicou desvantagens incluindo acúmulo de sólidos de 5 m^3 / mês no digestor e 65% aumento na carga de nitrogênio da adição de co-substrato. Segundo SEMBERA *et al.* (2019), co-digerir resíduos de laticínios é particularmente benéfico devido à sua alta biodegradabilidade, alto potencial específico de metano e facilidade de manuseio devido à sua forma líquida.

Pesquisadores em Taiwan, Cheng *et al.* (2012) afirmam que os resíduos provenientes de atividades alimentares representam cerca de 1/3 da população, e o alto teor de substâncias orgânicas tornam-no um substrato promissor para a biohidrogenação.

Uma das características dos dejetos de suínos são a baixa relação C / N, devido ao alto teor de nitrogênio. Isso resultará na produção de amônia que compromete os microrganismos responsáveis pela produção do biogás, como acontece com a cama de frango que apresenta altos níveis de amônia, o que inibe o crescimento de bactérias metanogênicas (PEDROZA *et al.*, 2021). Um dos estudos, a fim de evitar mais produção de amônia, utilizou estrume de suíno e água combinado com esterco de vaca e restos de comida na proporção de 1: 1: 4 e 1: 1,5: 4, respectivamente, a uma temperatura

de 35°C. Segundo MYDEEN *et al.* (2016), a combinação de resíduos de suínos, resíduos de alimentos e água é a mais eficiente para produzir biogás.

A co-digestão anaeróbica de resíduos de lodos com resíduos de frutas, vegetais e alimentos é uma tecnologia promissora na China, oferecendo muitas vantagens, incluindo um balanço de relação C/N, inibição de amônia e alta produção de biogás, otimizando o desempenho da digestão anaeróbia e recuperação de biogás (LIU *et al.*, 2016). Além disso, outros materiais têm sido estudados mundo a fora para melhorar os resultados da codigestão. MAGHANAKI *et al.* (2013) realizou um levantamento de algumas misturas utilizadas na codigestão e qual o rendimento delas para produção de metano (Tabela 5).

Tabela 5 – Misturas de substratos e sua respectiva produção de metano

SUBSTRATO	CO-SUBSTRATO	TAXA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS (l/ dia)	RENDIMENTO DE METANO (l/kg de sólidos voláteis)
Excrementos de gado	Resíduos de moinho de azeite	1,10	179
Esterco de gado	Resíduos agrícolas e culturas energéticas	2,70	620
Resíduos de frutas e vegetais	Águas residuais de matadouro	2,53	611
Resíduos sólidos municipais	Cinzas volantes	6,50	222
Resíduos sólidos municipais	Resíduos de gordura, óleo e graxa de estações de tratamento de esgoto	13,6	350
Esterco de porco	Resíduos de peixes e biodiesel	16,4	620
Resíduos de batata	Resíduos de beterraba sacarina	1,63	680
Lama primária	Resíduos de frutas e vegetais	4,40	600
Lodo de esgoto	Resíduos sólidos municipais	3,00	532
Resíduos de matadouro	Resíduos sólidos municipais	8,60	500

. VS: Sólidos Voláteis.

Fonte: (MAGHANAKI *et al.*, 2013).

No processo da digestão, os compostos orgânicos de polissacarídeos, proteínas e lipídeos semelhantes aos resíduos orgânicos podem ser convertidos em biogás (50-70% de metano e 25-50% de CO₂) em condições anaeróbias para serem utilizados na geração de eletricidade ou calor.

A codigestão anaeróbia de esterco de porco em usinas de biogás em escala real oferece várias vantagens, como produção de energia renovável (metano), redução da poluição e odores e reciclagem de nutrientes de volta ao solo (VERSTRAETE E VANDEVIVERE, 1999).

Resíduos do coco, que possuem origem lignocelulósica, podem ser utilizado como co-substrato na co-digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos. Seu uso é eficiente na produção de biogás quando comparado à digestão sem o uso de co-substratos. Palha de trigo (WS) e palha de milho (CS) são os dois maiores resíduos lignocelulósicos agrícolas, com entre 1202 e 1661 milhões de toneladas produzidas em 2014 (MA *et al.*, 2018). Diferente abordagens têm sido aplicadas para converter os

resíduos lignocelulósicos a produtos energéticos, incluindo digestão anaeróbica, fermentação, combustão, pirólise e gaseificação (Hosseini Koupaie et al., 2019).

O soro de leite é o resíduo valioso mais importante resultante do queijo, pode representar pelo menos 85% do volume do leite convertido em queijo, e assim, pode ser convertido em bioetanol por fermentação alcoólica ou em biogás por digestão anaeróbica (YASSAA et al. 2017; FAO, 1995)

Percebe-se que a produção de energia e gerenciamento de resíduos com resíduos de comida e águas marrons ou águas negras (fezes sem urina) é significativa pois os resultados laboratoriais das pesquisas de Wang *et al.* (2012) indicaram que a co-digestão anaeróbia (água marrom com resíduos de comida) mostrou maior rendimento de metano em relação a estes resíduos utilizados com substratos únicos ou separados.

A fim de encontrar uma solução sustentável para o tratamento deste efluente, métodos adicionais foram testados ANGELIDAKI *et al.* (2009) encontraram em suas pesquisas conteúdo de nitrogênio e fosforo de esterco de porco com 67%, 23% e 62%, respectivamente, o que reduziu o teor de matéria orgânica. Aplicando a Digestão anaeróbica com a centrifugação do decantador resultou na redução de matéria orgânica total, assim como capacidade de produção de biogás.

Li et al., (2015) afirma que a digestão anaeróbica com a ocorrência na temperatura de 55-60 ° C, podendo ser chamada de monofásica, é considerada um sistema eficiente em relação a digestão mesolítica, que ocorre na metade da temperatura desta, pois atinge melhor a inativação de patógenos e produz biogás de forma mais significativa.

Pode-se observar que reatores de tanque agitado contínuo (CSTRs) são frequentemente aplicados em práticas de engenharia devido ao alto teor de sólidos em materiais orgânicos (BRAGUGLIA *et al.*, 2018). Ma *et al.*, (2018) pesquisou um trabalho sobre resíduos orgânicos, mais especificamente de restos de comida e verificou baixa taxa de presença orgânica sendo 1–6,3 g VS / L / d (material volátil) e consequentemente baixa taxa de conversão bioenergética, entre 40 a 70% por meio da digestão mesofílica, durante 20 dias, neste tipo de reator. Pesquisas estão sendo realizadas para que a haja aumento da taxa de digestão pois até o momento obteve-se a 15 g COD / L / d para este tipo de resíduo.

Muitos pesquisadores têm empregado o teste BMP (biochemical methane potencial), ou similar, de modo a avaliar o potencial de geração de biogás (bem como das melhores condições de biodigestão) a partir de uma fração de resíduo em pequena escala (ALVES, 2016).

No Brasil, a disposição de lodo de esgoto doméstico na agricultura segue a Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução CONAMA nº 375/06). Uma alternativa bastante interessante para destinação do lodo de esgoto digerido e/ou no caso do lodo de esgoto co-digerido com outros resíduos, seria o uso agrícola, pois promove a reciclagem de nutrientes, sendo benéfico ao cultivo de plantas e às características físico-químicas e biológicas do solo.

Essa é uma alternativa mundialmente consolidada, que no Brasil, apesar de ser um país agroindustrial, é pouco explorada (PILNÁCEK *et al.*, 2019).

Lodos, resíduos sólidos ou semi-sólidos ou efluente de ETE e ETA, podem misturados em ser resíduo alimentares e glicerol bruto são capazes de aumentar a produtividade do metano utilizando biorreatores. Esta composição pode otimizar a funcionalidade dos biodigestores, conforme manejo adequado para manter a eficiência, conforme recomendado na literatura (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

As tecnologias que empregam reatores de via úmida não foram consideradas na prospecção tecnológica, visto que sua utilização para tratamento da fração sólida de resíduos sólidos urbanos rapidamente evoluiu para os outros sistemas. Portanto, as tecnologias de biodigestão anaeróbia prospectadas podem ser divididas em dois grandes grupos segundo a concentração de sólidos toais na operação: via seca e via extra-seca. Cabe ressaltar que muitas das unidades com uma digestão conjunta com resíduos agropecuários.

Assumindo que todos os constituintes orgânicos em resíduos brutos podem ser completamente convertidos em CH_4 e CO_2 , a produção teórica de metano teórico pode ser estimada (SOSNOWSKI *et al.*, 2003).). Sobotka *et al.*, (1983) já realizou a estimativa de forma experimental e teórica e assim, possível estimar a eficiência biológica ou biodegradabilidade anaeróbia. Assim, o pré-tratamento sempre seria empregado em co-AD quando substratos lignocelulósicos estão envolvidos. Pré-tratamento, como pré-tratamento físico, pré-tratamento químico, pré-tratamento biológico, e pré-tratamento combinado, é outra estratégia para produção de biogás melhoria (Yu *et al.*, 2019).

Para corroborar a codigestão estável de uma mistura de esterco de aves, esterco de porco e resíduos vegetais (40/40/20 w / w) foi alcançado em um biodigestor de duas fases com produção de biogás (65% CH_4 , conteúdo de energia 6,5 kWhm).

XING *et al.* (2020) revelou a mudança significativa na características microbiológicas do lodo anaeróbio durante uma aclimação de 19 meses da digestão de resíduos alimentares e com adição de esterco de vaca. Com o aumento das atividades enzimáticas e a estabilização da estrutura da comunidade microbiana, Bacteroidetes e Proteobacteria foram enriquecidos durante a aclimatização. Estas funções das bactérias tradicionais podem ter desempenhado o papel mais importante para manter o ambiente microbiológico favorável na codigestão anaeróbia de resíduos alimentares e alta taxa de produção de CH_4 pudessem ser alcançadas. Ainda segundo XING *et al.* (2020) aclimação de lodo anaeróbico com adição de esterco de vaca pode ser um promissor método para aprimoramento do processo de digestão anaeróbia. PANIGRAHI *et al.* (2019) diz que o co-substrato ideal para fração orgânica de resíduos sólidos municipais é o lodo de estação de tratamento de esgoto devido aos micro e macronutrientes, alta alcalinidade, teor de umidade e a baixa razão entre carbono e nitrogênio.

JAIN *et al.* (2015) realizou uma revisão de literatura para identificar e listar os tratamentos mais interessantes pra quem busca mais eficiência na produção de biogás.

Para organizá-los, ele os classificou em 4 tipos, mecânico, químico, térmico e biológico, assim como pode-se notar nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6 – Exemplos de pré-tratamento mecânico

RESÍDUO		PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO
1	Fração orgânica municipal lixo sólido	Raios de partículas maiores resultam em degradação da demanda química de oxigênio (COD) mais baixa, o que resulta em menor taxa de produção de metano
2	Desperdício de comida	O tamanho da partícula é inversamente proporcional à taxa máxima de utilização do substrato dos micróbios anaeróbios
3	Polpa e papel	O pré-tratamento de sonicação gerado por uma sonda vibratória interrompe mecanicamente a estrutura celular e a matriz do floco
4	Resíduos de lodo ativado	Ondas sonoras de alta frequência também causam a formação de radicais como $\text{OH}^\bullet$, $\text{HO}^\bullet$, H_2O_2 , H_2 , H_2O , que resulta na oxidação de substâncias sólidas
5	Resíduos sólidos municipais	O tambor rotativo é considerado uma tecnologia eficaz para separação e pré-tratamento OFMSW antes do AD, o que poderia aumentar a produção de biogás em 18-36%
6	Fração orgânica municipal lixo sólido	Davidson et al. encontraram pequenas variações nos rendimentos de metano por g VS (grama de sólidos voláteis) e no conteúdo de metano no biogás após pré-tratamento
7	Fração orgânica municipal lixo sólido	Nenhum aprimoramento significativo é encontrado com métodos de pré-tratamento mecânico
8	Fração orgânica municipal lixo sólido	O triturador com método de separação magnética rendeu um metano superior (5,6-13,8% em comparação com os outros métodos) Produção
9	Desperdício de comida	O método de pré-tratamento da prensa de rosca também resulta em uma perda de materiais e nutrientes biodegradáveis, mesmo que aumenta a produção de biogás em geral
10	Desperdício de comida	A redução de tamanho por meio de um moinho de contas resultou em uma solubilização de COD 40% maior, o que levou a um biogás 28% maior rendimento da produção
11	Desperdício orgânico	Como os metanógenos são sensíveis a intermediários ácidos, a redução excessiva do tamanho pode resultar em uma diminuição da DA desempenho do processo
12	Resíduos sólidos municipais	O pré-tratamento de eletroporação de OFMSW resultou em uma produção de biogás 20-40% maior
13	Lodo	A liquefação resultou em produção de biogás 15-26% maior
14	Fração orgânica municipal lixo sólido	A sonicação resultou em produção de biogás cumulativa 16% maior em comparação com substratos não tratados
15	Resíduos sólidos orgânicos	A redução do tamanho de até 0,35 mm resultou em um aumento de 20%, e nenhuma diferença significativa foi observada com o tamanho adicional redução
16	Lodo de esgoto	Alcançou uma redução de VS com 25% de aumento com o método HPH
17	Resíduos de lodo ativado	Estudou sonicação de lodo ativado de resíduos (WAS) e obteve apenas um aumento insignificante na destruição de ambos os VS e produção de metano mesofílico

Fonte: (JAIN *et al.*, 2015).

Tabela 7 – Exemplos de pré-tratamento químico

RESÍDUO		PRÉ-TRATAMENTO QUÍMICO
1	Lodo	o pré-tratamento alcalino é o método químico preferido
2	resíduos de colheita, frutas, resíduos vegetais	O pré-tratamento químico não é adequado para substratos facilmente biodegradáveis contendo grandes quantidades de carboidratos
3	Biomassa lignocelulósica	O pré-tratamento químico pode ter um claro efeito positivo em substratos ricos em lignina
4	Biomassa lignocelulósica	No pré-tratamento alcalino, a área de superfície específica é aumentada e os substratos são facilmente acessíveis para micróbios anaeróbicos
5	Palha de arroz	O pré-tratamento com ácido é mais desejável para substratos lignocelulósicos
6	Biomassa lignocelulósica, fração orgânica de Resíduos sólidos municipais	Durante o pré-tratamento com ácido, a hidrólise da hemicelulose ocorre em monossacarídeos de perspectiva, enquanto a lignina condensa e precipita
7	Biomassa lignocelulósica	O pré-tratamento de ácido é um processo caro devido ao alto custo dos ácidos e ao custo adicional para neutralizar as condições ácidas antes do processo de AD
8	Água residual	O sódio é mais tóxico para bactérias que utilizam ácido propiônico em comparação com outras bactérias degradadoras de AGV
9	Lodo	O nível inibitório do íon potássio começa em 400 mg / L, embora micróbios anaeróbicos sejam capazes de tolerar até 8 g / L de potássio
10	Desperdício orgânico	O íon potássio é mais tóxico para anaeróbios termofílicos em comparação com mesofílicos ou psicofílicos anaeróbicos
11	Lodo	As concentrações ideais de íons de cálcio e magnésio foram relatadas como sendo 200 mg / L e 720 mg / L, respectivamente
12	Resíduos de cozinha	Quantidades excessivas de íons de cálcio podem causar precipitação de carbonatos e fosfatos, o que resulta na escala dos reatores, tubos e biomassa
13	Lodo	altas concentrações (> 100 mM) do íon magnésio podem causar desagregação de metanógenos
14	Desperdício de comida	Fe foi o metal mais eficaz para estabilização do processo AD
15	Desperdício de comida	Obteve um rendimento de produção de metano 45-65% maior de FW com suplementação de metais traço [121]
16	Desperdício orgânico	Atingiu 100% da produção potencial com pré-tratamento alcalino (0,3 g NaOH / g TS)

Fonte: (JAIN *et al.*, 2015).

Tabela 8 – Exemplos de pré-tratamento térmico

RESÍDUO		PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO
1	Fração orgânica do sólido municipal resíduos, resíduos agrícolas	Leva à remoção do patógeno, melhora o desempenho de desidratação e reduz a viscosidade do digerido, com aprimoramento subsequente do manuseio do digestado
2	Lodo, resíduo de cozinha	Desintegração das membranas celulares, resultando assim na solubilização de compostos orgânicos
3	Resíduos de lodo ativado	Comparou os diferentes métodos de pré-tratamento térmico e não encontrou nenhuma diferença significativa entre o vapor e aquecimento elétrico, enquanto o aquecimento por microondas solubilizou mais biopolímeros
4	Lodo anaeróbico, resíduo de cozinha	Maior taxa de solubilização com pré-tratamento de microondas pode ser causada pela polarização de macro moléculas
5	Resíduos sólidos orgânicos	O pré-tratamento térmico em altas temperaturas (> 170 1C) pode levar à criação de ligações químicas e resultar na aglomeração das partículas
6	Lodo	O pré-tratamento térmico em temperaturas abaixo de 100 1C não resultou na degradação de moléculas complexas, mas simplesmente induz a defloculação de macromoléculas
7	Lodo	O pré-tratamento térmico resultou na solubilização de proteínas e aumentou a remoção de partículas carboidratos
8	Lodo	O pré-tratamento térmico do lodo mesmo em temperatura mais baixa (70 1C) tem um efeito decisivo na remoção do patógeno
9	Lodo	Aumento insignificante da produção de biogás do lodo pré-tratado a 70 1C por 60 min
10	Lodo	A produção de biogás foi melhorada 20 vezes ao aplicar um pré-tratamento de 60 min a 90 1C
11	Desperdício orgânico	Alcançou um aumento máximo de produção de biogás 78% maior com um teor de metano de 60% por pré-tratamento a 70 1C
12	Lodo	Produção de biogás 30% maior com um teor de metano de 69% por pré-tratamento a 70 1C
13	Lodo	Obteve um aumento de volume de biogás de 50% com pré-tratamento a 70 1C antes do AD termofílico
14	Resíduos de frutas e vegetais	Obteve uma redução de 7,9-11,7% na produção de biometano, respectivamente, devido à formação de melanoidinas a 175 1C
15	resíduos de cozinha	Obteve um aumento de 24% na produção de biometano com FW pré-tratado a 120 1C

Fonte: (JAIN *et al.*, 2015).

Tabela 9 – Exemplos de pré-tratamento biológico

RESÍDUO		PRÉ-TRATAMENTO BIOLÓGICO
1	Fração orgânica municipal lixo sólido	Separar fisicamente os acidógenos dos metanógenos pode resultar em uma maior produção de metano
2	Resíduos sólidos de batata	A otimização do primeiro estágio de hidrólise poderia estimular os micróbios acidogênicos a produzir enzimas mais específicas, portanto resultando em degradação mais prolongada de substratos
3	Água marrom, desperdício de comida	Compostagem ou microaeração antes da AD pode ser um método eficaz para obter uma hidrólise superior
4	Fração orgânica municipal lixo sólido	O pré-tratamento por compostagem resultou em uma taxa de crescimento microbiano específico mais alta do que o pré-tratamento termoquímico
5	Resíduos de polpa de sisal	Observou uma perda de produção potencial de metano com um pré-tratamento aeróbio mais longo
6	Água residual	O pré-tratamento fúngico obteve uma eficiência de remoção de DQO de 53,3%
7	Decorticação da folha de sisal resíduos	A incubação aeróbia por 4 dias resultou em um aumento de biogás cumulativo de 30-40% com um metano superior (50-66%) conteúdo

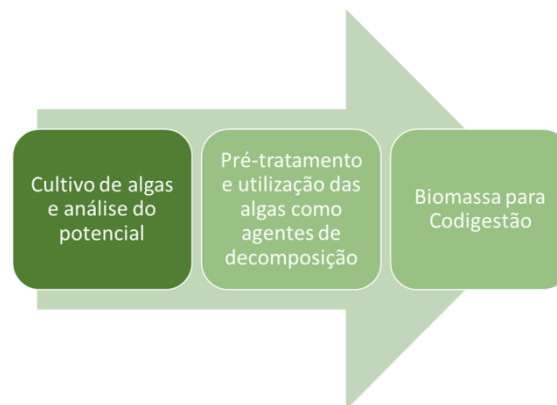
Fonte: (JAIN *et al.*, 2015).

4.2. Grupo B

Este grupo é composto por quatro artigos e todos tratam da utilização de algas para a produção de biogás. Os artigos foram produzidos entre os anos de 2016 e 2020. As algas são utilizadas como substrato para na codigestão ou também podem servir

como digestores em reatores. Além disso, alguns trabalhos tratam do pré-tratamento ou cultivo de algas, para que a biomassa seja abundante, e também da utilização delas em sistemas que integram tratamento de águas residuais e produção de biogás. Os temas abordados estão expressos na Figura 15.

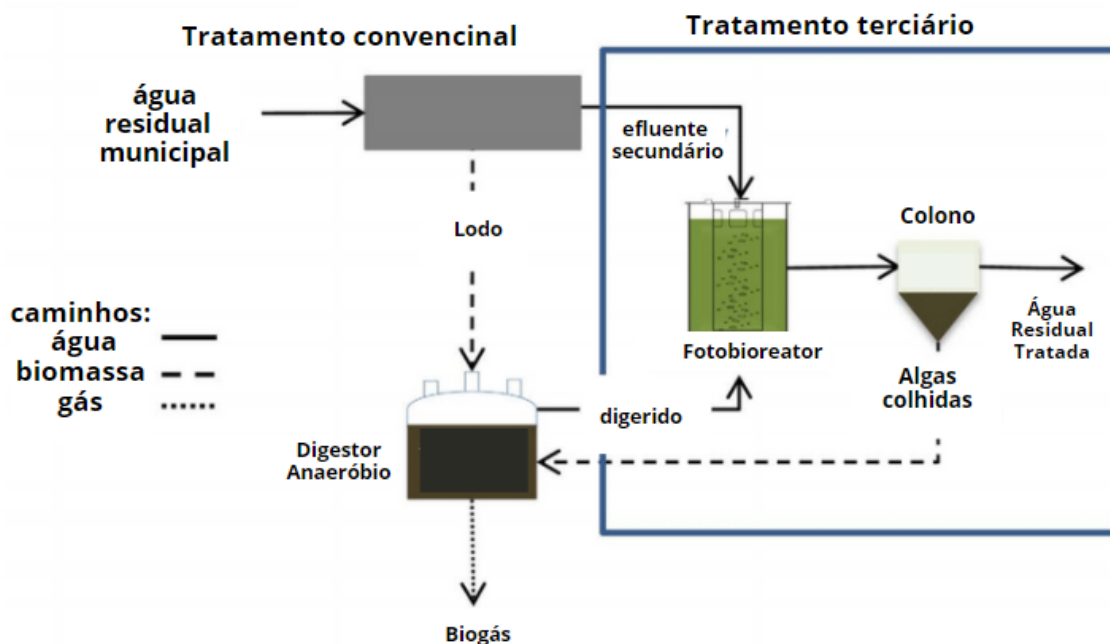
Figura 15 – Organização dos tópicos tratados no grupo B



Fonte: (AUTOR, 2020).

Uma das técnicas utilizadas nesses trabalhos é a utilização o digerido de microalgas e o efluente secundário foram usados para o cultivo de microalgas em um tratamento de esgoto terciário e, em seguida, a biomassa foi co-digerida para geração de biogás (Figura 16). O fotobiorreator fechado foi operado como um tratamento de esgoto terciário para remover nutrientes (N e P) do efluente secundário (esgoto tratado). Além disso, tratou o digerido da codigestão, que por sua vez aumentou a concentração de nutrientes para o crescimento das microalgas.

Figura 16 – Esquema geral do sistema proposto no estudo



Fonte: (ARIAS *et al.*, 2018).

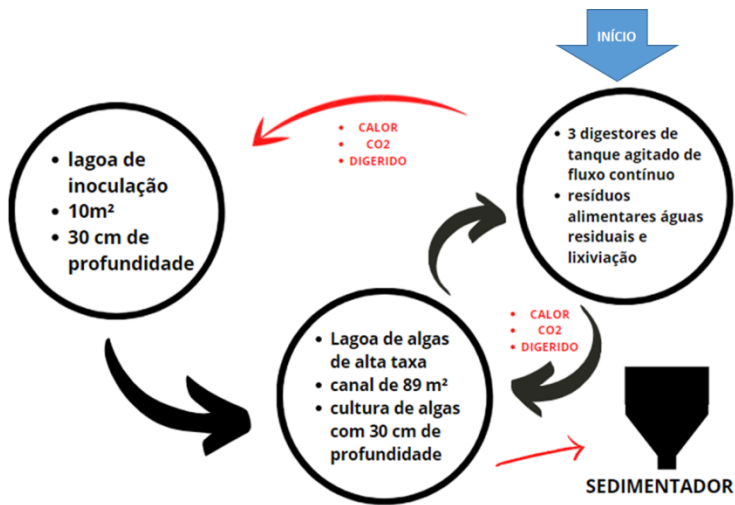
Segundo ARIAS *et al* (2018), integrar o tratamento terciário de microalgas em sistemas de lodo ativado é uma solução promissora e viável para recuperar energia e nutrientes dos resíduos, melhorando a sustentabilidade das estações de tratamento de águas residuais.

Dois dos estudos não avaliam os efeitos da codigestão na produção de biogás, mas também possuem relevância por explorarem as dificuldades na utilização de algas e meios de tornar esse uso mais viável, como formas de reproduzi-las e pré-tratamentos. Em um deles, a fração líquida produzida na digestão anaeróbia de resíduos biodegradáveis pode ser tratada no local com microalgas, que podem ser recicladas de volta como substrato para a planta de biogás.

LAVRIČ *et al.* (2017), realizou um experimento onde um tanque piloto de algas de alta taxa foi estabelecido com conexões a uma planta de biogás em escala real que permitiu o uso de calor residual e CO₂ de um gerador combinado de calor e energia (Figura 17). A mistura de microalgas produzida no sobrenadante do digerido anaeróbio termofílico foi testada como um substrato para a produção de biogás no digestão anaeróbia termofílica (isto é, não tratado, bioaumentado com bactérias anaeróbicas *Clostridium thermocellum*, e pré-tratado termicamente, respectivamente). O potencial de metano da mistura de microalgas não tratada era baixo ($157,5 \pm 18,7$ mL CH₄ / g VS). Porém, após um pré-tratamento térmico da microalga, a produção de metano aumentou em 62%, enquanto na bioaumentação com *C. thermocellum* em condições termofílicas aumentou em 12%. O resultado de nosso teste piloto sugere que as

microalgas produzidas no digerido de biogás termofílico representam uma alternativa potencial de matéria-prima para a digestão anaeróbia. Ao mesmo tempo, as microalgas reduzem o nitrogênio digerido e permitem uma demanda química de oxigênio suficiente para que o escoamento atenda à qualidade exigida pelo sistema de esgoto (amônia-nitrogênio máx. 200 mg / L, nitrito máx. 10 mg / L).

Figura 17 – Esquemas do experimento desenvolvido por LAVRIČ *et al.* (2017)



Fonte: (AUTOR, 2020).

Como foi dito, um dos trabalhos analisaria formas de cultivar algas. Este analisou o desenvolvimento de algas em águas residuais de estações de tratamento e em águas de matadouros. Foram elaborados nove consórcios de algas, os quais foram divididos em duas categorias com base na fonte de meio de isolamento, consórcios de águas residuais de baixa resistência (C1) que incluem PA1, PA2, PA3, PA4 e PA5 e consórcios de águas residuais de alta resistência (C2) compostos por PA6, PA7, PA8 e PA9, como consta na Tabela 10.

Tabela 10 – consórcios e as algas dominantes

Consórcios de algas	(Gênero dominado)	Fonte
PA1	Scendesmus , Chroococcus	ETE
PA2	Chroococcus , Merismopedia , Chlorella	ETE
PA3	Chroococcus , Chlorella	ETE
PA4	Chroococcus , Phormidium	ETE
PA5	Chlorella , Chroococcus	ETE

PA6	Chlorella , Phormidium	SH
PA7	Chroococcus , Chlorella	SH
PA8	Chroococcus , Dictyosphaerium	SH
PA9	Chlorella , Dictyosphaerium	SH

ETE: estação de tratamento de esgoto ; SH: matadouro.

Fonte: (CHOUDHARY, 2016).

A estimativa do potencial teórico de metano ($0,79 \text{ m}^3 \text{ kg VS}^{-1}$) sugeriram que o PA6 tem melhores perspectivas de geração de biogás. Portanto, este consórcio específico poderia ser utilizado para reduzir os níveis de poluição da água e gerar matéria-prima para a produção de biocombustíveis e biogás. Considerando a alta produtividade de biomassa do consórcio PA6 de melhor desempenho, foram analisadas as opções possíveis para seu potencial energético. A maior proporção da biomassa colhida foi de proteínas (54%), seguidas por lipídios (32%) e carboidratos (10%). A biomassa de algas relatada no estudo é uma cultura mista que consiste em Chlorella e Phormidium espécies, a combinação de algas verdes e cianobactérias.

Dois desafios principais foram identificados na digestão anaeróbia de algas. São eles a resistência da parede celular das algas à digestão anaeróbia e a baixa atividade da microflora anaeróbia devido às baixas razões Carbono / Nitrogênio. A fim de melhorar sua biodegradabilidade, diferentes tipos de tentativas de pré-tratamento, como pré-tratamento térmico ou por codigestão com resíduos / substratos ricos em carbono, mostraram excelente desempenho em estudos em escala de laboratório e encontraram grande potencial para melhorar a viabilidade de processos de biometanação à base de algas.

Apenas um dos quatro trabalhos realmente trata da utilização de algas como substrato ou co-substrato. Foi investigado como a co-digestão de resíduos orgânicos juntamente com o pré-tratamento alcalino pode impactar a produção de metano e o valor agrônomico dos digeridos produzidos. Para isso, lodo sozinho e misturado com bagaço de azeitona ou resíduos de macroalgas foram submetidos à digestão anaeróbia com e sem pré-tratamento, além da utilização dos resíduos da digestão como biofertilizantes para o crescimento de tomate. O reator utilizado foi o de tanque agitado contínuo com um volume de trabalho de 2,5 l. Ele foi usado para a digestão anaeróbia semicontínua de misturas tratadas e pré-tratadas com álcalis de resíduos de macroalgas, bagaço de azeitona e lodo ativado e os resultados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – dados da produção de metano

Reatores		Metano (Nml / g Vsin)
mono-digestão	R1S	109 ± 5
	R2S	152 ± 14
	R1	191 ± 10
	R2	215 ± 24
co-digestão anaeróbica	R3	220 ± 16
	R4	188 ± 19
	R5	194 ± 28
	R6	281 ± 25

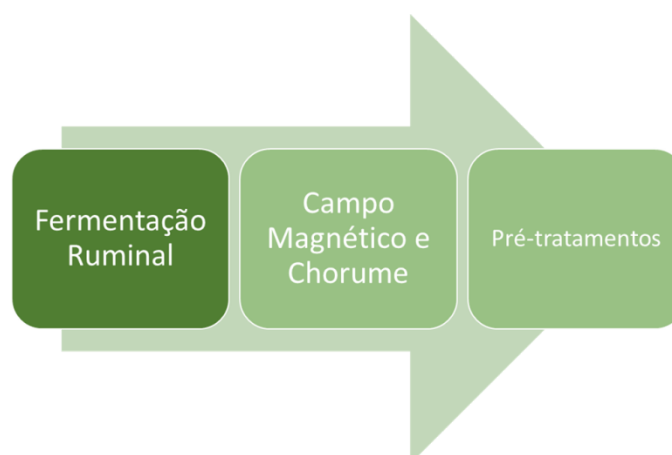
R1S (lodo não tratado), R2S (lodo pré-tratado), R1 (lodo + bagaço de azeitona), R2 (lodo pré-tratado e bagaço de azeitona), R3 (mistura pré-tratada de lamas e bagaço de azeitona), R4 (lamas + resíduos de macroalgas), R5 (lamas pré-tratadas e resíduos de macroalgas), R6 (mistura pré-tratada de lamas e resíduos de macroalgas).

Fonte: (ELALAMI, 2020).

4.3. Grupo C

No grupo C estão as técnicas que tornam a codigestão ainda mais complexa, pois eles analisam técnicas de pré-tratamento, utilização de enzimas provenientes de ruminantes, o chorume como substrato e utilização de campo magnético pra induzir a produção de metano, além da proposta de alguns pré-tratamentos para biomassas lignocelulósicas, como consta da Figura 18.

Figura 18 – Organização dos temas abordados no grupo B



Fonte: (AUTOR, 2020).

Um dos artigos deste grupo analisa a degradação ruminal de trigo e palha de milho foi aumentada pelo co-substrato com resíduos alimentares. Os resíduos

alimentares aumentaram a alcalinidade e melhoraram o rendimento de ácidos graxos voláteis na fermentação ruminal. Amostras de fluido ruminal foram retiradas do recém-adquirido estômagos de ovelhas maduras de um matadouro local em Xi'an, China, e levado ao laboratório em frasco lacrado. Yan *et al.* (2014) descobriram que microrganismos ruminais provenientes de estomago de vaca podem aumentar a hidrólise resíduos alimentares e produzir ácidos graxos voláteis com alto rendimento de metano na metanogênese subsequente.

Este experimento foi realizado em lote foi conduzido para avaliar o efeito de mono e co-substratos nas características de degradação da fermentação ruminal in vitro e nas alterações de microrganismos ruminais. O experimento foi dividido em grupos de controle (*blank*), mono e co-substrato. O grupo de controle continha apenas amostras frescas de fluido ruminal de ovelha preservadas sem qualquer substrato adicionado. Os grupos de monossustrato consistiram em amostras que foram fermentadas com fluido ruminal de ovelha e aditivo palha detrito, palha de milho e resíduos alimentares. Palha de milho e palha de trigo foram os resíduos sólidos originais, com apenas um pré-tratamento de moinho.

Sobre a codigestão, o estudo concluiu que a capacidade de degradação de celulose, hemicelulose e lignina de resíduos lignocelulósicos agrícolas (palha de milho e trigo) foram melhorados por adição dos resíduos alimentares como co-substrato durante a prolongada fermentação ruminal in vitro, como consta na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados obtidos com a fermentação ruminal

	Testes	Metano
<i>Blank</i>	Estômago de ovelha	156
	Palha de trigo	262
monodigestão	Resíduos Alimentares	359
	Palha de milho	243
codigestão	Palha de trigo + Resíduos alimentare	378
	Palha de milho + Resísudos Alimentares	401

Fonte: (XING, 2020).

Outro estudo analisou a influencia de um campo magnético na produção de gás total e metano. Nele ficou demonstrado que a produção de gás cumulativa total para o tratamento com campo magnético (22.106 mL) foi significativamente maior do que para o tratamento sem campo magnético (18501 mL) no nível de $p < 0,05$, um aumento de 19,5%. Nos primeiros quatro dias as amostras tiveram uma produção de gás semelhante, mas entre o quarto e décimo quarto dia as amostras com campo magnético se destacaram.

Este estudo mostrou que o campo magnético com força de 11,4 mT ($\pm 2\%$) aumentou os volumes de gás total e metano produzidos em 19,5% e 20,0% em comparação com a amostra de controle. O campo magnético de 11,4 mT ($\pm 2\%$) aumentou o crescimento celular e as porcentagens populacionais de metanógenos, responsável pelo aumento da produção de biogás (ZHAO, 2020).

Além desses, outros estudos analisaram ainda influencia de alguns pré-tratamentos para melhorar a produção de biogás em biomassas lignocelulósicas e a utilização do chorume como substrato para codigestão em um digestor anaeróbio de parafuso mesofílico. O estudo que analisa possibilidades de pré-tratamento não aborda a codigestão, entretanto, devido à vasta utilização das biomassas lignocelulósicas, ele não foi descartado, além disso ele aborda algumas desvantagens como maior tempo de residência que é necessário para completar o processo de digestão anaeróbia devido à hemicelulose e à matriz reticulada de lignina, o que justifica a utilização de pré-tratamentos, os quais variam o tipo e eficiência dependendo do substrato, como é possível reparar na Tabela 13.

Tabela 13. Análise de pré-tratamento em relação ao tempo e produção de CH₄

Matéria-Prima	Pré- tratamento	Tempo (d)	CH ₄ (mL / g VS)
Palha de trigo	Nenhum	40	226
	Explosão de vapor	40	273
	Água quente	60	386
	Água à base de amônia	25	199,7
Palha de milho	Nenhum	28	215
	Alcalino (NaOH)	40	372,4
Bagaço de cana	Nenhum	35	281
	Água quente	23	100,6
Casca de arroz	Nenhum	36	44
	Água à base de amônia	45	55,7
Palha de arroz	Nenhum	36	436
	Alcalino (NaOH)	47	292
	Oxidação (H ₂ O ₂)	30	327,5
Restos de frutas	Nenhum	45	202
	Líquidos iônicos	50	408
	Ácido	30	285
	Alcalino (NaOH)	30	404

Fonte: (SOLARTE-TORO, 2018).

Quanto ao último artigo, ele utilizou 50% de resíduos de alimentos e 50% de chorume em um digestor de parafuso mesofílico. Neste estudo, a taxa de carga orgânica adequada foi 5% TS para a co-digestão de resíduos alimentares e lixiviado (VONGVICHIANKUL, 2017).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de biogás a partir de biomassa e outros substratos tem enorme potencial em todas as partes do mundo, todos em todo lugar onde há seres humanos há produção de lixo orgânico. Apesar da dificuldade de utilização de alguns, como as biomassas lignocelulósicas, existem muitos estudos propondo estratégias de pré-tratamento e possíveis co-substratos para aproveitar desse material que é abundante.

Além disso, as algas e o lodo nas estações de tratamento também tem um grande estão sendo explorados para tornar o processo de tratamento de água e esgoto ainda mais limpo, de modo que até os resíduos do processo são aproveitados ou para o cultivo de algas ou para servir de substrato para a codigestão.

Os estudos analisados nesse trabalho são recentes e os temas abordados por eles ainda podem ser explorados. Alguns deles ainda precisam ser estudados em escala real, visto que foram realizados em laboratório, ainda assim, é possível ver o potencial de produção de biogás a partir de diversos setores, desde fábricas de azeite, frigoríficos, estações de tratamento e outros.

No cenário brasileiro, estudos já apontam para o potencial e viabilidade do emprego da biodigestão anaeróbia como uma das etapas do tratamento de resíduos sólidos orgânicos, com foco para a possibilidade de recuperação de energia.

Algumas das técnicas de codigestão e coprodução de biogás a partir de resíduos sólidos apresentadas na neste trabalho já são utilizadas no Brasil, como é feito com a cama de frango e fezes de suínos, mas o potencial é ainda maior, visto que não é unanime a utilização dessas técnicas em todas as granjas e criações de porco, como as algas e lodo das estações de tratamento também não são amplamente utilizados para produção de metano. Como foi possível constatar na análise dos trabalhos, todos os substratos e co-substratos em estudo são abundantes no país, o que garante que existe muito potencial a ser estudado e explorado.

6. REFERENCIAS

ANNEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Biomassa, 2016**. Brasília, Brasil. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf), 2016>. Acesso em: 09 ago. de 2019.

ANNEL. Agencia Nacional de Energia Elétrica. BEN. **Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese ano base 2016**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em: 03 out. 2020.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.html>. Acesso em 02 out. 2020.

BRASIL. Energias Renováveis no Brasil. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA)**, Brasília, Brasil. Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/Energias_Renovaveis.html>. Acesso em: 09 out. 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 - ano base 2019**. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2020_sp.pdf>. Acesso em: 09 out. 2020.

DA SILVA, J. W. F., CARNEIRO, R. A. F., OLIVEIRA, S. M., & LOPES, J. M. Biomassa Residual Agrícola para Produção de Briquetes na Microrregião de Dourados-MS. **Cadernos de Agroecologia**, v. 11, n. 2, 2017.

DA SILVA, R. L.; DA SILVA, A. M. P. Bioenergia da Biomassa Residual: Potencial Energético da Combustão da Casca de Arroz em Dourados-MS e Região. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 1, 2016.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo. Documento de Apoio ao PNE 2050, Estudos de Longo Prazo**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: ago. 2019

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2019 (ano-base 2018)**. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-ben>

ICLEI. Governos Locais pela Sustentabilidade - Brasil. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

IEA. International Energy Agency. **World Energy Investment 2019**, 2019. Disponível em <<https://webstore.iea.org/world-energy-investment2019>>

ITAÚ BBA. (2017). Perspectivas – Diagnóstico Financeiro do Setor Sucroenergético. Comunicação Pessoal.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, **Oil Market Report: World Oil Demand**. Disponível em: <<https://www.iea.org/oilmarketreport/omrpublic/#search=%22%22world%20oil%20supply%20and%20demand%22%22>> . Acesso em: 08 jun. 2018.

SAIDI, Kais; OMRI, Anis. The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. **Environmental Research**, p. 109567, 2020.

PARK, Y.; YOO, M. L.; LEE, H. W; PARK, S. H.; JUNG, S.; PARK, S.; KIM, S., Effects of operation conditions on pyrolysis characteristics of agricultural residues, **Renewable Energy**, 125-130, 2012.

PDE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE%202029.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. (2016). **Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. Rio de Janeiro: EPE.

WANG, Y. et al. Site selection for municipal solid waste landfill considering environmental health risks. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, p. 40 - 46, november 2018.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3. ed. rev. e atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

MOREIRA, P. L.; SOUZA JÚNIOR, J. I, M.; SILVA, V. M. **Um breve guia para revisões sistemáticas aplicado a Ciência da Computação**. Palmas /TO. EDUF, 2016.

REZENDE, C. S. A. **O ICMS Ecológico como instrumento de conservação da biodiversidade na Amazônia Legal: O Caso do Tocantins**. Tese de Doutorado. Programa de Biodiversidade e Biotecnologia da Rede Bionorte, Universidade Federal do Tocantins, UFT. 145 Págs. Palmas/TO, 2018.

SAMPAIO, R F; MANCINI, M C. ESTUDOS DE REVISÃO SISTEMÁTICA: UM GUIA PARA SÍNTESE CRITERIOSA DA EVIDÊNCIA CIENTÍFICA. **Revista brasileira de fisioterapia**, São Carlos, v. 11, p. 83-89, 13 fev. 2007.

Kitchenham, B. and Charters, S.: Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Technical Report EBSE 2007-001, **Keele University and Durham University Joint Report** (2007).

CRONIN, P.; RYAN, F.; COUGHLAN, M. Undertaking a literature review: a step-by-step approach. **British Journal of Nursing**, v. 17, n.1, 38-43, 2008.

SITORUS, Berlian et al. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit-vegetable wastes. **Energy Procedia**, v. 32, p. 176-182, 2013.

SILVA, Wanderson Gomes da. Produção de Biogás e Biofertilizante a partir da Digestão Anaeróbia de Cama de Frango. 2019.

KUSHIDA, Luana Pael da Costa et al. Co-digestão anaeróbia de dejetos de suínos com adição de batata doce e mandioca em diferentes relações C/N. 2017.

ELALAMI, Doha et al. Effect of coupling alkaline pretreatment and sewage sludge co-digestion on methane production and fertilizer potential of digestate. **Science of the Total Environment**, v. 743, p. 140670, 2020.

ARIAS, Dulce Maria et al. Integrating microalgae tertiary treatment into activated sludge systems for energy and nutrients recovery from wastewater. **Bioresource technology**, v. 247, p. 513-519, 2018.

CHOUDHARY, Poonam; PRAJAPATI, Sanjeev Kumar; MALIK, Anushree. Screening native microalgal consortia for biomass production and nutrient removal from rural wastewaters for bioenergy applications. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 221-230, 2016.

LAVRIČ, Lea et al. Thermal pretreatment and bioaugmentation improve methane yield of microalgal mix produced in thermophilic anaerobic digestate. *Anaerobe*, v. 46, p. 162-169, 2017.

SOLARTE-TORO, Juan Camilo; CHACÓN-PÉREZ, Yessica; CARDONA-ALZATE, Carlos Ariel. Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 33, p. 52-62, 2018.

VONGVICHIANKUL, Chotinath; DEEBAO, Jirawan; KHONGNAKORN, Watsa. Relationship between pH, oxidation reduction potential (ORP) and biogas production in mesophilic screw anaerobic digester. **Energy Procedia**, v. 138, p. 877-882, 2017.

ZHAO, Bo et al. Static magnetic field enhanced methane production via stimulating the growth and composition of microbial community. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122664, 2020.

WANG, Xiaojiao et al. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource technology**, v. 120, p. 78-83, 2012.

ANGELIDAKI, Irini et al. Definindo o potencial de biometano (BMP) de resíduos orgânicos sólidos e culturas energéticas: uma proposta de protocolo para ensaios em lote. **Ciência e tecnologia da água**, v. 59, n. 5, pág. 927-934, 2009.

XING, Bao-Shan et al. Acclimatization of anaerobic sludge with cow manure and realization of high-rate food waste digestion for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 315, p. 123830, 2020.

ESPOSITO, Katherine et al. Síndrome metabólica e risco de câncer: uma revisão sistemática e meta-análise. **Cuidados com a diabetes**, v. 35, n. 11, pág. 2402-2411, 2012.

PROBIOGAS, Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

SHAMURAD, Burhan et al. Stable biogas production from single-stage anaerobic digestion of food waste. **Applied Energy**, v. 263, p. 114609, 2020.

CHENG, S., WANG, Y.; KUOA, W.; CHAOB Y.. Bioaugmentation strategies to improve cellulolytic and hydrogen producing characteristics in CSTR intermittent fed with vegetable kitchen waste and napiergrass. **Energy Procedia**. p.82-91, 2012.

LIU, C. et al. Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste. **Bioresource Technology**, v. 219, p.252- 260, nov. 2016.

VERSTRAETE, W., VANDEVIVERE, P.. New and broader applications of anaerobic digestion. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.** p.151–173, 1999.

MA, C., LIU, J., YE, M., ZOU, L., QIAN, G., LI, Y., Towards utmost bioenergy conversion efficiency of food waste: Pretreatment, co-digestion, and reactor type. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. p.700–709, 2018.

HOSSEINI KOUPIAE E.; DAHADHA, S..BAZYAR LAKEH A. A.; .AZIZI A. ELBESHBISH, E. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced

biomethane production-A review. **Journal of Environmental Management**. Volume 233, p.774-784, 2019.

YASSAA, N.; AKBI, A.; AZIZA, M.; SABER, M. An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em: <doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.072>. Acesso:18 jan. 2021.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine**. Collection FAO: Alimentation et nutrition n°28. ISBN 92-5-20534-6. Chapitre 7: Lactosérum, 1995. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F0h.htm>. Acesso:18 jan. 2021

BRAGUGLIA, C.M., GALLIPOLI, A., GIANICO, A., PAGLIACCIA, P. Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. **Bioresour. Technol.** p.37–56, 2018.

ALVES, I. R. F. S. **Avaliação da codigestão na produção de biogás**. (Tese de Doutorado). 153p. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 30 ago. 2006. Disponível em: < www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2021.

PILNÁČEK, V., INNEMANOVÁ, P., ŠERES, M., MICHALIKOVÁ, K., STRANSKÁ, WÍMMEROVÁ, L., & CAJTHAML, T. Micropollutant biodegradation and the hygienization potential of biodrying as a pretreatment method prior to the application of sewage sludge in agriculture. **Ecological Engineering**, 2019.

JORDÃO, E. P; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 1087 p.

SOBOTKA, M., VOTRUBA, J., HAVLIK, I., MINKEVICH, L. G.. The mass–energy balances of anaerobic methane production. **Folia Microbiol.** 28:p.195-204, 1983.

SOSNOWSKI, P., WIECZOR, E.K. A., LEDAKOWICZ, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. **Adv Environ Res.** 7:p.609-16, 2003.

YU, Q., LIU, R.H., LI, K., MA, R.J.. A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** p.51–58, 2019.

PANIGRAHI, Sagarika; DUBEY, Brajesh K. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable Energy**, v. 143, p. 779-797, 2019.

XING, Bao-Shan et al. Cosubstrate strategy for enhancing lignocellulose degradation during rumen fermentation in vitro: Characteristics and microorganism composition. **Chemosphere**, v. 250, p. 126104, 2020.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. Methane and Electricity Production from Poultry Litter Digestion in the Amazon Region of Brazil: A Large-Scale Study. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-14, 2021.