



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Roadmap Tecnológico: Biogás a partir de plástico

Autor: Giordano Mergen Flores

Orientadores: Caroline Borges Agustini e Mariliz Gutterres Soares

Porto Alegre, maio de 2021

Autor: Giordano Mergen Flores

Roadmap Tecnológico: Biogás a partir de plástico

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química*

Orientadores: Caroline Borges Agustini e Mariliz Gutterres Soares

Banca Examinadora:

Doutora, Luciane Ferreira Trierweiler, UFRGS

Mestre, Bruna dos Santos Boll, UFRGS

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Neste momento tão especial de finalização da graduação, gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Osvaldo e Suzana, e meu irmão Rômulo, por terem sido sempre minha fonte de apoio, de carinho e de amor para tudo, não só durante o período do curso. Agradeço à UFRGS por ter me ofertado um ensino público de qualidade, além de diversas outras vivências, que certamente me agregaram tanto no aspecto pessoal quanto no profissional. Tive a oportunidade de ser monitor acadêmico e de fundar, junto com meus colegas, a CATALISA, empresa júnior do curso, motivo de muito orgulho e gratidão.

Tão importante quanto as experiências dentro e fora das salas de aula foram os colegas que pude conhecer e conviver ao longo do curso, em especial os meus grandes amigos do “Ceva Sagu”, os quais tive o privilégio de ter por perto durante toda a caminhada. Certamente esta amizade é da UFRGS para a vida. Agradeço muito à minha orientadora Caroline Agustini por toda parceria e apoio durante a elaboração deste trabalho de conclusão, que certamente me fez ver oportunidades apaixonantes na área da Engenharia Química. Quero agradecer à minha namorada Letícia, por ter sido a calma e a serenidade que eu precisei em muitos momentos da graduação, sempre com muito amor e delicadeza comigo.

Não posso deixar de citar duas empresas importantes para a minha trajetória: Ambev e Fourge. Agradeço todo o período de estágio que vivi na Ambev porque pude me conhecer melhor, entender mais a prática da engenharia e conhecer pessoas especiais, que carregou comigo. Gostaria de agradecer à Fourge por ser uma empresa em que eu me sinto realizado e que me proporciona aprofundar conhecimentos complementares aos que tive durante a graduação.

Por fim, agradeço à Deus por me acompanhar desde sempre.

RESUMO

A produção de plásticos, principalmente os de origem fóssil, tem crescido sistematicamente devido ao aumento da demanda por parte da sociedade, visto que os plásticos estão presentes em diversas aplicações importantes. Contudo, a geração de resíduos, como consequência da transformação e utilização de plásticos, também acompanha esta tendência de aumento ao longo do tempo. Os resíduos plásticos representam um expressivo percentual do total de resíduos sólidos urbanos e a sua destinação após o fim da vida útil é uma problemática constante. A disposição incorreta destes resíduos ainda é uma realidade, sendo encontrados em lixões e em corpos d'água. Porém, mesmo a correta destinação apresenta oportunidades de desenvolvimento, principalmente quanto a técnicas de reaproveitamento e produção de energia a partir destes resíduos plásticos. Dentre as técnicas possíveis para tratamento e produção de energia, destaca-se a digestão anaeróbia (DA), processo em que a biodegradação do plástico ocorre em meio ausente em oxigênio através da atuação sinérgica de uma sequência de microrganismos que produz biogás à medida que reduz a carga orgânica do resíduo. Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar de forma sistêmica o nível de desenvolvimento mundial em relação à DA para plásticos. Para isto, utiliza-se uma análise em três níveis de um conjunto selecionado de artigos científicos e patentes relacionadas ao tema, resultando em um *roadmap*. Dentre os principais resultados obtidos, observa-se que o maior volume de metano, 0,55 L/g de sólidos voláteis (VS), é obtido quando do uso de uma blenda entre plásticos de origem fóssil e não-fóssil, após pré-tratamento físico, com um inóculo oriundo de tratamento de resíduos orgânicos, sem adição de nutrientes e em faixa de temperatura termofílica. Além disso, pode-se verificar que o maior valor de redução de massa, de 98%, é atingido com o uso de plástico não-fóssil, após pré-tratamento físico, com inóculo proveniente de tratamento de esgoto, sem adição de nutrientes e em faixa de temperatura mesofílica. A partir das análises realizadas, conclui-se que a DA de plásticos atinge a maior viabilidade considerando características de todos os indicadores mediante o uso de blenda entre plástico fóssil e não-fóssil, após pré-tratamento físico, com lodo oriundo de tratamento de resíduos orgânicos como inóculo, após adição de resíduos orgânicos como nutrientes e em faixa de temperatura termofílica.

Palavras-chave: *digestão anaeróbia, análise sistêmica, metano, resíduo plástico*

ABSTRACT

The production of plastics, especially those from fossil origin, has been growing systematically due to the increase in demand by society, since plastics are present in several important applications. However, the waste generation, as a consequence of the transformation and use of plastics, also follows this upward trend over time. Plastic waste represents a significant percentage of total urban solid waste and its disposal after the end of its useful life is a persistent problem. The incorrect disposal of these residues is still a reality, being found in dumps and bodies of water. However, even the correct destination presents opportunities for development, mainly in terms of techniques for reusing and producing energy from these plastic residues. Among the possible techniques for energy treatment and production, anaerobic digestion (AD) stands out. AD is a process in which the biodegradation of plastic occurs in a medium absent in oxygen through the synergistic action of a sequence of microorganisms producing biogas as it reduces the organic load of the residue. In this sense, this work aims to systematically assess the level of global development in relation to AD for plastics. For this, a three-level analysis of a selected set of scientific articles and patents related to the theme is used, resulting in a roadmap. Among the main results obtained, it is observed that the largest volume of methane, 0.55 L/g of volatile solids (VS), is obtained when using a blend between plastics of fossil and non-fossil origin, after physical pre-treatment, with an inoculum from the treatment of organic residues, without the addition of nutrients and in a thermophilic temperature range. In addition, it can be seen that the highest mass reduction value, 98%, is achieved with the use of non-fossil plastic, after physical pre-treatment, with inoculum from sewage treatment, without the addition of nutrients and in a mesophilic temperature range. From the analyzes carried out, it is concluded that the AD of plastics reaches the highest viability considering the characteristics of all indicators through the use of a blend between fossil and non-fossil plastic, after physical pre-treatment, with sludge from waste treatment organic as inoculum, after addition of organic residues as nutrients and in a thermophilic temperature range.

Keywords: *anaerobic digestion, systemic analysis, methane, plastic waste*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Crescimento histórico da produção de plástico	2
Figura 2: Processo de produção do plástico fóssil.....	3
Figura 3: Disposição dos resíduos por tipo de local	4
Figura 4: Fluxograma das etapas da digestão anaeróbia de plásticos	6
Figura 5: Quantidade de artigos estudados por ano	12
Figura 6: Quantidade de artigos estudados por tipo de autoria.....	12
Figura 7: Quantidade de artigos estudados por continente	12
Figura 8: Eficiência da digestão anaeróbia por origem do plástico	17
Figura 9: Volumes de metano e de biogás por origem do plástico.....	17
Figura 10: Eficiência da digestão anaeróbia por plástico estudado.....	18
Figura 11: Volumes de metano e de biogás por plástico estudado	19
Figura 12: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de pré-tratamento.....	20
Figura 13: Volumes de metano e de biogás por tipo de pré-tratamento	20
Figura 14: Eficiência da digestão anaeróbia por forma física.....	21
Figura 15: Volumes de metano e de biogás por forma física	22
Figura 16: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de co-substrato/inóculo	23
Figura 17: Volumes de metano e de biogás por tipo de co-substrato/inóculo	23
Figura 18: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de nutriente adicionado	24
Figura 19: Volumes de metano e de biogás por tipo de nutriente adicionado	25
Figura 20: Eficiência da digestão anaeróbia por razão de massa substrato/co-substrato	26
Figura 21: Volumes de metano e de biogás por razão de massa substrato/co-substrato	26
Figura 22: Eficiência da digestão anaeróbia por regime do experimento	28
Figura 23: Volumes de metano e de biogás por regime do experimento	28
Figura 24: Eficiência da digestão anaeróbia por volume do biorreator	29
Figura 25: Volumes de metano e de biogás por volume do biorreator	30
Figura 26: Eficiência da digestão anaeróbia por tempo do experimento	31
Figura 27: Volumes de metano e de biogás por tempo do experimento	31
Figura 28: Eficiência da digestão anaeróbia por faixa de temperatura	32
Figura 29: Volumes de metano e de biogás por faixa de temperatura	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia.....	6
Tabela 2: Conjunto de palavras-chave utilizadas	10
Tabela 3: Taxonomias definidas na análise meso	11
Tabela 4: Taxonomias da análise meso aprofundadas.....	13
Tabela 5: <i>Roadmap</i> tecnológico	14
Tabela 6: Condições do ponto ótimo da digestão anaeróbia de plásticos.....	35

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Plásticos fósseis na sociedade	2
2.2	Geração de resíduos e destinação	3
2.3	Fontes alternativas de energia a partir de resíduos plásticos	4
2.4	Biodegradação de resíduos plásticos para geração de biogás	5
2.5	Fatores que influenciam a digestão anaeróbia	7
3	Materiais e Métodos	10
4	Resultados	12
4.1	Resultados da análise macro	12
4.2	Resultados da análise meso	13
4.3	<i>Roadmap</i>	14
4.4	Resultados da análise micro	17
4.4.1	Origem do plástico	17
4.4.1.1	Plásticos estudados	18
4.4.2	Tipo de pré-tratamento	19
4.4.2.1	Forma física	21
4.4.3	Co-substrato/inóculo	22
4.4.3.1	Nutrientes	24
4.4.3.2	Razão de massa substrato/co-substrato	26
4.4.4	Condições experimentais	27
4.4.4.1	Regime do experimento	27
4.4.4.2	Volume do biorreator	29
4.4.4.3	Tempo do experimento	30
4.4.4.4	Faixa de temperatura	32
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	34
	REFERÊNCIAS	36

1 Introdução

Os plásticos podem ser classificados em fósseis e não-fósseis, de acordo com a sua origem. Os plásticos de origem fóssil são produzidos a partir do petróleo, em um processo que se inicia com a nafta oriunda do refino do petróleo, passando por etapas bem definidas de 1ª, 2ª e 3ª gerações, até resultar no produto final, que são os plásticos na forma adequada para comercialização. Os plásticos de origem não-fóssil, por sua vez, são produzidos a partir de matérias-primas renováveis. O petróleo atua também como fonte de geração de energia e ainda representa uma parcela significativa na matriz energética, em comparação às fontes de energia renováveis, como a eólica, a solar e a hidrelétrica.

A produção de plásticos tem crescido de forma constante e prevê-se que seguirá esta tendência nas próximas décadas. Por consequência, a geração de resíduos plásticos aumenta, o que traz à tona a problemática da destinação dos mesmos, que compõem grande parte do montante total de resíduos sólidos gerados. Tal problemática gira em torno principalmente dos plásticos de origem fóssil. O descarte incorreto desses resíduos pode ser evidenciado em lixões e em corpos d'água, o que traz impactos diretos ao meio-ambiente. Existem diversas legislações ao redor do mundo que versam, dentre outros aspectos, em relação à disposição final de resíduos sólidos. No Brasil, destaca-se a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), que define os aterros como locais de correta disposição. Contudo, variadas técnicas, como a reciclagem e a biodegradação, têm sido desenvolvidas com o objetivo de minimizar o acúmulo de resíduos plásticos em aterros e reaproveitá-los.

A geração de energia a partir de resíduos plásticos é viabilizada por variadas rotas tecnológicas, tal como a biodegradação, que ocorre de forma não-controlada em aterros. A biodegradação divide-se em diversas técnicas, que variam quanto às condições experimentais. Dentre as técnicas de biodegradação, pode-se citar a digestão anaeróbia (DA), através da qual a degradação do plástico é realizada em ambiente ausente de oxigênio. A DA procede-se por meio de quatro etapas principais (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) e é influenciada por fatores tais como o tipo de substrato e a temperatura.

Neste contexto, este trabalho objetiva a elaboração de um *roadmap* que traduza o estado-da-arte da técnica de DA de resíduos plásticos ao redor do mundo, mediante a análise de artigos científicos publicados e patentes relacionadas ao tema. Os objetivos específicos são:

- Analisar o contexto (país, ano e autoria) de publicação dos estudos de DA de plásticos;
- Verificar os plásticos que são estudados para DA e a relação com a eficiência e a produção de metano/biogás do processo;
- Verificar os pré-tratamentos realizados no processo e a relação com a eficiência e a produção de metano/biogás;
- Verificar os co-substratos/inóculos adicionados e a relação com a eficiência e a produção de metano/biogás;
- Verificar as condições experimentais utilizadas e a relação com a eficiência e a produção de metano/biogás;
- Verificar o ponto ótimo da DA de plásticos.

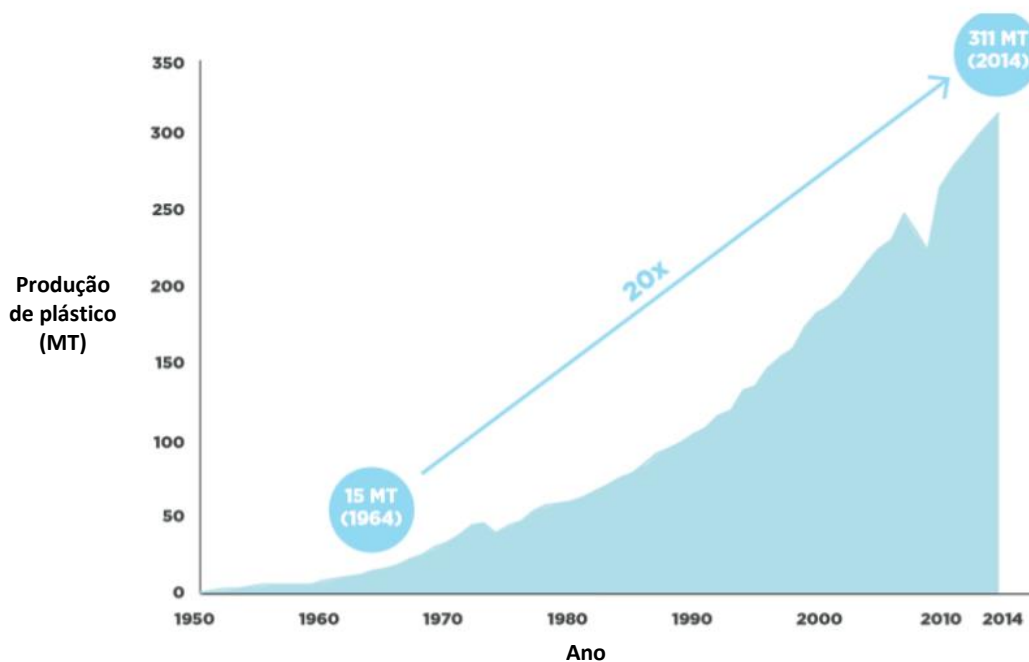
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Plásticos fósseis na sociedade

O petróleo e seus derivados são utilizados como fonte fóssil para geração de energia e representam uma parcela significativa da matriz energética mundial. As capacidades instaladas para produção de energia a partir de carvão, gás natural e petróleo correspondem a aproximadamente 56% da capacidade instalada total, com dados de 2019. Projeta-se, entretanto, o crescimento do uso de fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica, nas próximas décadas (ICAZA; BORGE-DIEZ; GALINDO, 2021).

O petróleo também é utilizado como matéria-prima no processo de produção de plástico, cujo crescimento tem sido acelerado na série histórica, conforme mostra a Figura 1. A produção passou de 15 milhões de toneladas, em 1964, para 311 milhões em 2014, e projeta-se a marca de 1124 milhões para 2050. Com isso, em 2050, a indústria do plástico se tornará responsável por 20% do consumo total de petróleo (DIAS, 2016).

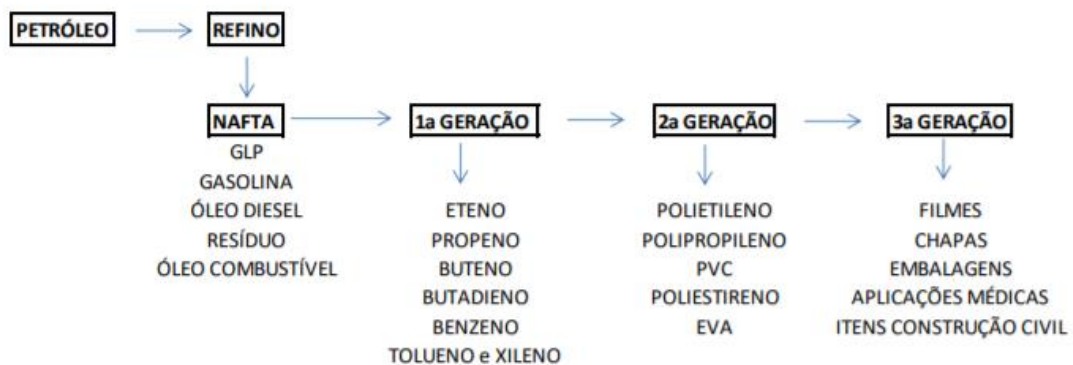
Figura 1: Crescimento histórico da produção de plástico



Fonte: DIAS, 2016

A produção do plástico fóssil tem início com a nafta, que é produto do refino do petróleo e é base para a fabricação de eteno, propeno, buteno, entre outros. A obtenção destes hidrocarbonetos básicos se dá na 1ª geração do processo produtivo, conforme a Figura 2. Na sequência, há a formação das cadeias poliméricas, a partir dos hidrocarbonetos básicos, na 2ª geração. Nesta etapa, obtém-se, por exemplo, as resinas de PP (polipropileno), de PE (polietileno) e de demais plásticos de uso comum. Na 3ª geração, ocorre a transformação das resinas nos diversos formatos demandados pela indústria para posterior comercialização (DIAS, 2016).

Figura 2: Processo de produção do plástico fóssil



Fonte: DIAS, 2016

2.2 Geração de resíduos e destinação

A geração crescente de plásticos produz uma quantidade igualmente crescente de resíduos. Isto acarreta complexidade na destinação correta destes resíduos plásticos, que, por não serem prontamente biodegradáveis, no caso dos de origem fóssil, possuem longo tempo de decomposição.

Após o fim da vida útil, o resíduo plástico pode ter diversos destinos, corretos ou não, como, por exemplo, aterros, corpos d'água e usinas de reciclagem. Esta problemática atinge todos os países, porém em graus diferentes, já que os níveis de desenvolvimento e implementação de políticas ambientais não são os mesmos. O Brasil gerou, em 2017, 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos e, deste montante, cerca de 95,1% foram coletados, porém sem ter-se certeza da destinação final. A geração diária de resíduos da América Latina e Caribe representa aproximadamente 10% da geração mundial diária, sendo que, deste montante, os plásticos correspondem a cerca de 12% (GOMES, 2020).

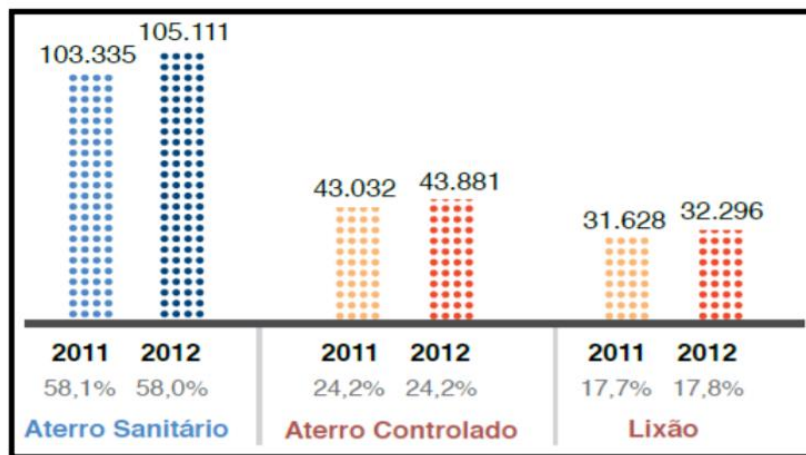
Os resíduos plásticos que têm como destino final os corpos d'água são parte importante da problemática da disposição incorreta de resíduos. Tal destino está diretamente relacionado à disposição urbana incorreta, já que os resíduos plásticos chegam a córregos, rios e estuários através da drenagem pluvial dos centros urbanos. Os plásticos representam aproximadamente 90% dos resíduos coletados em praias e têm impacto direto no ambiente marinho, como impedimento da oxigenação entre água e sedimento, ingestão pelos seres vivos e aumento na concentração de contaminantes orgânicos e inorgânicos (GONÇALVES, 2020). Dentre o conjunto de resíduos plásticos que chegam aos corpos d'água, destacam-se os denominados microplásticos, que são pequenos fragmentos com dimensões de até 5 mm aplicados em produtos de uso comum tais como cremes faciais e pastas de dente. Por terem tamanho reduzido, os microplásticos são comumente encontrados em praias e demais corpos d'água, além de serem facilmente ingeridos pela vida marinha, o que traz danos ambientais (LI et al., 2020).

Dentre os locais de destinação final dos resíduos, os aterros sanitários recebem 59,5% de todos os resíduos sólidos urbanos produzidos no Brasil, enquanto 23% vão para aterros controlados e 17,5% destinam-se para lixões. Apenas os lixões são irregulares perante as políticas ambientais no Brasil, pois não possuem medidas de proteção ao solo, enquanto tanto

os aterros sanitários quanto os controlados são projetados de forma a confinar os resíduos com o mínimo de impacto ambiental (LOHMANN, 2020).

Toda a disposição e o tratamento dado aos resíduos são regidas por leis que fazem parte do conjunto de políticas ambientais de cada país. No Brasil, pode-se citar a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), vigente desde 2010, cujo objetivo é fomentar a gestão integrada dos resíduos sólidos nos âmbitos federal, estadual e municipal. Esta integração contempla a coleta, o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos (CARDOSO FILHO, 2014). Na prática, contudo, verifica-se que os avanços não têm sido significativos, o que indica o não cumprimento do previsto pela PNRS, conforme os dados mostrados na Figura 3. Na comparação entre 2011 e 2012, até dois anos após a promulgação da PNRS, percebeu-se quase nenhuma evolução nos indicadores de disposição de resíduos sólidos por tipo de local. De acordo com dados mais recentes da ABRELPE, em 2015, 82,6% dos resíduos sólidos urbanos foram destinados a aterros, sanitários e controlados, com o restante indo para lixões, mesmo após seis anos de vigência da PNRS (MONTEIRO, 2017).

Figura 3: Disposição dos resíduos por tipo de local



Fonte: CARDOSO FILHO, 2014

Apesar de a disposição em locais específicos, tais como aterros, ser o destino da maior parte dos resíduos sólidos gerados no Brasil, diversas técnicas de reaproveitamento têm sido estudadas e desenvolvidas, motivadas pela preocupação em reduzir o acúmulo de resíduos e, se possível, torná-los úteis principalmente sob o ponto de vista econômico e energético. Dentre estas técnicas, pode-se citar a reciclagem, o reprocessamento, a incineração e a biodegradação. A reciclagem permite recuperar materiais que não são facilmente degradados e que podem ser reprocessados na condição de matéria-prima, como os resíduos plásticos. Outra técnica existente é a incineração, que consiste na queima dos resíduos transformando-os em cinzas e emitindo gases na atmosfera (ROLIM, 2000). Entretanto, mesmo após a queima há um residual de 10 a 20% do volume inicial que não é incinerado e que, portanto, é destinado para aterros (AGUSTINI, 2014). A biodegradação é outro processo possível de tratamento e baseia-se na degradação do resíduo por microrganismos (HAUBERT, 2015).

2.3 Fontes alternativas de energia a partir de resíduos plásticos

Os resíduos plásticos podem ser classificados de acordo com a sua origem em fósseis e não-fósseis. A origem influencia no rendimento das técnicas para obtenção de energia a partir

destes resíduos. Os plásticos de origem fóssil são todos aqueles derivados do petróleo, como, por exemplo, o polietileno de baixa densidade (PEBD), a policaprolactona (PCL), o polibutileno succinato (PBS) e o polipropileno (PP). As aplicações, devido ao alto uso de plásticos fósseis, são muitas, tais como produção de filmes termoencolhíveis com PEBD (BECKER, 2002), biomateriais de aplicações médicas com PCL (MENEZES, 2017), espumas e materiais para indústria automobilística com PBS (MARTINS, 2016) e embalagens de alimentos com PP (PETRY, 2011). Já os plásticos não-fósseis, também chamados de biopolímeros, são produzidos a partir de matérias-primas renováveis. Dentre os biopolímeros destacam-se os à base de amido, os polilactos, como o políácido láctico (PLA), e os polihidroxicanoatos, como o polihidroxitirato (PHB) (DIAS, 2016). O PLA é utilizado em diversas aplicações biomédicas e farmacêuticas (JAHNO, 2005), enquanto o PHB pode ser utilizado na fabricação de embalagens de alimentos (FONSECA, 2014). A problemática principal gira em torno dos plásticos de origem fóssil, por isso a importância na sua mitigação e no seu tratamento.

Dentre as técnicas possíveis de obtenção de energia a partir de resíduos plásticos, destacam-se a pirólise, a gaseificação, a liquefação e a biodegradação. A pirólise consiste no craqueamento dos resíduos plásticos em atmosfera inerte, produzindo os monômeros de origem, que podem ser reutilizados nos processos de polimerização ou como combustíveis (WASSERMANN, 2006). A gaseificação é uma técnica na qual há conversão de um sólido ou líquido carbonoso em gás combustível através da oxidação parcial, sendo que o agente de gaseificação pode ser ar atmosférico, oxigênio puro, vapor d'água ou ar em conjunto com vapor (WENZEL, 2013). A liquefação consiste na transformação do resíduo sólido em produtos líquidos, que podem ser usados como combustíveis (SANTOS, 2014). Por fim, a biodegradação é um processo no qual o plástico é utilizado como nutriente para um determinado conjunto de microrganismos, ocorrendo, portanto, a degradação do resíduo e a formação de gás carbônico e metano, principalmente. Em aterros, a biodegradação ocorre naturalmente de forma não-controlada e, por isso, há liberação dos gases para a atmosfera. Contudo, sob condições controladas, a biodegradação apresenta vantagens econômicas e energéticas, devido à produção do metano, que pode ser utilizado como gás combustível (HAUBERT, 2015). Existem diversas técnicas diferentes de biodegradação, que variam entre si quanto às condições experimentais utilizadas (DIAS, 2016).

2.4 Biodegradação de resíduos plásticos para geração de biogás

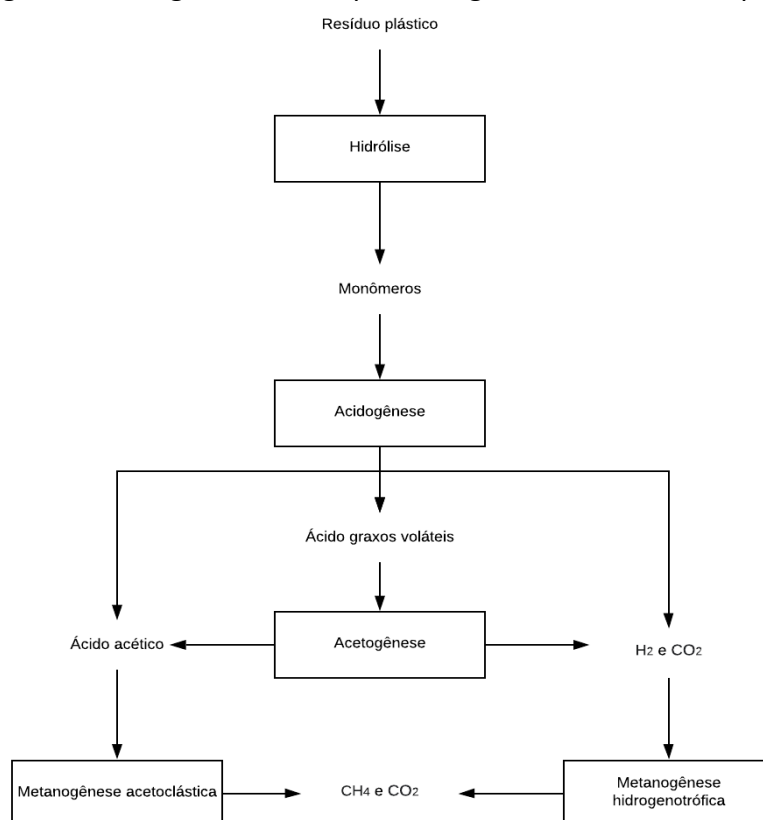
Dentre os processos de biodegradação de plásticos, destaca-se a digestão anaeróbia (DA), que ocorre na ausência de oxigênio e em uma ampla faixa de temperatura. Além do biogás produzido, composto principalmente por metano e gás carbônico, o digestato residual deste processo é rico em nitrogênio, o que viabiliza o seu reaproveitamento agroindustrial, dentre outras aplicações (AGUSTINI, 2014). Na comparação entre a DA e demais tratamentos biológicos, verifica-se que a DA demanda menos energia, além de produzir pouco lodo excedente (HAUBERT, 2015). As principais vantagens e desvantagens deste processo estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia

Vantagens	Desvantagens
Baixo requerimento energético	Baixa robustez para variações de temperatura
Baixa produção de lodo excedente, que pode ser reaproveitado	Dificuldade em degradar macromoléculas poliméricas
Baixo requisito de nutrientes	Baixa taxa de reação
Viabilidade de operação com alto fluxo de carga orgânica	Alto custo inicial dos digestores
Redução da carga orgânica do resíduo	Elevado tempo de degradação
Produção de biogás	

Fonte: AGUSTINI, 2014; HAUBERT, 2015

A DA ocorre em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Estas etapas são inter-relacionadas e ocorrem de forma sinérgica, conforme a Figura 4, devido aos produtos da ação microbiana em uma etapa servirem como substratos para a etapa posterior.

Figura 4: Fluxograma das etapas da digestão anaeróbia de plásticos

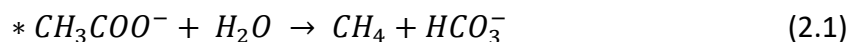
Fonte: elaboração própria

Na etapa de hidrólise, as macromoléculas poliméricas são reduzidas aos seus monômeros primários pela atuação de enzimas extracelulares secretadas pelas bactérias hidrolíticas. Verifica-se, experimentalmente, que a hidrólise geralmente é a etapa limitante da DA de resíduos de difícil degradação, determinando, portanto, a eficiência da degradação nestes casos (PATINVOH et al., 2017). Os monômeros gerados da hidrólise são decompostos na etapa

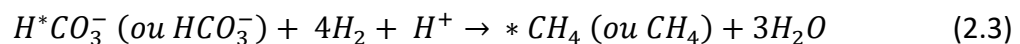
de acidogênese em ácidos graxos voláteis e produtos secundários, como ácido acético, hidrogênio e gás carbônico (AGUSTINI, 2018). A acidogênese é a etapa mais rápida da DA (PATINVOH et al., 2017).

Os ácidos graxos voláteis oriundos da acidogênese são degradados por bactérias acetogênicas, na etapa de acetogênese, produzindo ácido acético, hidrogênio e gás carbônico. As bactérias acetogênicas podem ser inibidas caso a produção de hidrogênio seja excessiva (PATINVOH et al., 2017). Além disso, as bactérias anaeróbicas facultativas, ao longo das reações da etapa de acetogênese, consomem o oxigênio residual, proporcionando condições adequadas para a etapa posterior de metanogênese (AGUSTINI, 2014).

Na etapa de metanogênese, são produzidos metano e gás carbônico a partir dos compostos resultantes da acetogênese. O íon acetato é o metabólito intermediário principal durante a metanogênese e sua decomposição é limitante desta etapa. A metanogênese se divide em acetoclástica e hidrogenotrófica, conforme o tipo de arqueia envolvido na decomposição do acetato. Na acetoclástica, os microrganismos convertem os grupos metila e carboxila provenientes do acetato em metano e gás carbônico, respectivamente, conforme a equação 2.1 (AGUSTINI, 2018).



Na rota hidrogenotrófica, o acetato é oxidado a gás carbônico e este é então reduzido a metano. O gás hidrogênio atua como doador de elétrons e o gás carbônico como receptor final de elétrons, conforme as equações 2.2 e 2.3 (AGUSTINI, 2018).



A metanogênese é uma etapa sensível da DA, pois a taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos é relativamente baixa e eles são anaeróbios estritos. Para que haja eficiência adequada em todo o processo de DA, faz-se necessário um balanço entre as taxas das etapas de hidrólise e acidogênese e as taxas das etapas de acetogênese e metanogênese. Caso contrário, ocorre acúmulo de ácidos orgânicos e redução no rendimento da produção de biogás (AGUSTINI, 2018).

2.5 Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

Diversos fatores influenciam a eficiência da digestão anaeróbia (DA), tais como o tipo de substrato utilizado, o tipo de inóculo, a razão de massa substrato/inóculo, o tipo de pré-tratamento e a temperatura. Em relação ao tipo de substrato utilizado, a sua biodisponibilidade e complexidade influenciam diretamente na degradação. No caso dos resíduos plásticos como substrato, estes aspectos são relevantes, uma vez que as cadeias poliméricas são altamente complexas, possuem elevado peso molecular e o carbono não está prontamente disponível na forma bruta dos resíduos plásticos, como embalagens e sacolas. Além disso, tipos diferentes de substratos favorecem grupos específicos de microrganismos, o que reforça a necessidade de se conhecer a composição do substrato utilizado com a maior exatidão possível (KHALID et al., 2011).

O inóculo é o componente do processo de DA que contém os microrganismos responsáveis pela degradação. Ele pode ser, por exemplo, resíduo de processos industriais. BANDINI et al., 2020 utilizaram lodo oriundo de tratamento de resíduos orgânicos como inóculo, ao passo que GÓMEZ; MICHEL, 2013 usaram lodo proveniente de tratamento de esgoto. A caracterização do meio reacional contendo o substrato e o inóculo quanto à toxicidade e à proporção de macronutrientes é importante devido a estes fatores terem influência direta sobre a DA. Resíduos com concentrações-traço de compostos tóxicos, como fenóis, álcoois e amônia, podem ser inibidores do desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação (AGUSTINI, 2018). Em relação à proporção de macronutrientes, verifica-se experimentalmente que a proporção 600:15:5:3 é suficiente para a etapa de metanogênese (KHALID et al., 2011). Contudo, para algumas composições de substratos e inóculos, torna-se necessária a adição complementar de nutrientes para que a proporção ideal dos elementos seja atingida e, por consequência, a eficiência da DA seja aumentada (AGUSTINI, 2018). O suprimento nutricional pode ser feito através da adição de outros resíduos ou de soluções conhecidas contendo sais nutrientes. GÓMEZ; MICHEL, 2013 acrescentaram resíduos orgânicos ao meio para atingir uma proporção adequada de nutrientes. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 adicionaram macronutrientes, dentre eles magnésio e cálcio, em conjunto com micronutrientes, como manganês, alumínio e ferro.

Outro fator importante é a razão carbono-nitrogênio (C/N), cuja faixa ótima para a DA é 20-30. Resíduos contendo excesso de carbono e/ou nitrogênio podem resultar em baixa eficiência da DA e na produção de biogás com alta concentração de gás carbônico, o que é indesejado. Além disso, razões C/N inadequadas podem gerar acúmulo de ácidos graxos voláteis e de nitrogênio amoniacal, que em excesso tornam-se inibidores da degradação (AGUSTINI, 2018). O ajuste correto da razão C/N implica no ajuste da proporção entre substrato e inóculo, por serem estes as fontes principais de carbono e nitrogênio para o processo de DA.

O pré-tratamento dado ao substrato influencia na eficiência da degradação, pois aumenta a velocidade da reação de hidrólise, etapa limitante da DA para resíduos de difícil biodegradação, como os plásticos. Como consequência, aumenta-se a velocidade da DA, a taxa de produção de biogás e a redução da carga orgânica do resíduo. O tratamento prévio aumenta a biodisponibilidade do resíduo plástico pela alteração física e/ou química do mesmo, facilitando a atuação dos microrganismos na conversão das cadeias poliméricas em seus monômeros na etapa de hidrólise. Os principais tipos de pré-tratamento dividem-se em mecânicos, térmicos, químicos e biológicos. Os mecânicos valem-se do uso de técnicas como ultrassom e moagem, com o objetivo de alterar as propriedades físicas dos resíduos, como, por exemplo, o tamanho das partículas, e assim torná-las mais facilmente acessíveis aos microrganismos devido ao aumento da superfície de contato (PATINVOH et al., 2017). O pré-tratamento térmico promove a solubilização parcial de compostos presentes no substrato, aumentando a eficiência da DA. Contudo, este tipo de pré-tratamento demanda uma quantidade elevada de energia para ser realizado. No pré-tratamento químico, utilizam-se soluções de compostos, como ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, com o objetivo de solubilizar o substrato e aumentar a sua biodisponibilidade. Por fim, o pré-tratamento biológico apresenta vantagens em relação aos demais tipos porque requer pouca energia e não gera compostos tóxicos. Porém, este tratamento não é de fácil operação, o que compromete a sua viabilidade. Os diferentes tipos de pré-tratamento podem ser utilizados

também de forma combinada, com o objetivo de agregar as diferentes vantagens individuais de cada um (AGUSTINI, 2018).

A temperatura influencia o processo de DA, pois altera a taxa de crescimento e metabolismo dos microrganismos. Além disso, a temperatura tem relação com a pressão parcial do gás hidrogênio produzido ao longo da DA e, portanto, influencia também na cinética do processo. A DA ocorre, geralmente, em faixas de temperatura mesofílicas (em torno de 35°C) e termofílicas (em torno de 55°C). Além das temperaturas distintas, estas faixas diferem quanto às comunidades de microrganismos que nelas atuam, específicas para cada caso. A variação de temperatura mesofílica para termofílica ou vice-versa pode resultar em redução na produção de biogás, o que ressalta a importância da manutenção da temperatura constante ao longo do processo. É sabido que baixas temperaturas diminuem o crescimento microbiano, as taxas de utilização do substrato e a produção de biogás. Temperaturas menores que 20°C podem resultar na exaustão da energia celular, no vazamento de substâncias intracelulares ou na completa lise da célula microbiana. A DA geralmente procede-se na faixa de temperatura mesofílica, por ser essa uma faixa mais estável e que requer menor gasto de energia, em comparação com a faixa termofílica (KHALID et al., 2011). Por outro lado, a faixa termofílica, em relação a mesofílica, apresenta vantagens como maior solubilidade dos compostos orgânicos, maiores taxas nas reações, menor viscosidade dos efluentes e maior inativação de microrganismos patogênicos. Entretanto, o uso de temperaturas mais altas pode aumentar a concentração de amônia livre no sistema, inibindo a ação dos microrganismos. Além disso, temperaturas altas demandam mais energia operacional, o que pode não ser vantajoso caso o maior rendimento em produção de biogás, comparado à faixa mesofílica, não compense este custo maior de fornecimento de energia (AGUSTINI, 2018).

3 Materiais e Métodos

Para a elaboração do *roadmap* tecnológico, foram consultadas fontes de artigos científicos e de patentes relacionadas ao tema de produção de biogás a partir de plástico via digestão anaeróbia (DA). A busca por artigos científicos juntamente com patentes permitiu a obtenção de um panorama mais assertivo e completo em relação ao estágio de desenvolvimento do assunto tratado. A fonte de busca dos artigos científicos foi a base Scopus e a das patentes foi a base Espacenet. Para ambas as bases de dados, foram utilizadas palavras-chave combinadas com o objetivo de garantir a efetividade das buscas.

Na busca dos artigos científicos na base Scopus, foram testados 46 grupos diferentes de palavras-chave. As 3 palavras/expressões “anaerobic digestion”, “biogas” e “plastic waste” foram fixadas de modo a integrarem quase todos os grupos. Somente um dos 46 grupos não conteve as 3 palavras/expressões fixadas, pois testou-se “plastic” e não “plastic waste”. Os grupos de palavras-chave foram formados através de análise combinatória com todas as combinações possíveis e foram compostos por no máximo 4 palavras/expressões. Todas as palavras-chave utilizadas estão listadas na Tabela 2. As palavras-chave foram testadas nos campos “título do artigo”, “resumo” e “nomes”.

Tabela 2: Conjunto de palavras-chave utilizadas

Palavras-chave utilizadas			
anaerobic digestion	Polyester	biogas	Polyurethanes
plastic	Polyvinyl chloride	plastic waste	Polyepoxide
polypropylene	Polymethyl methacrylate	polyethylene	Polytetrafluoroethylene
polystyrene	Polylactic acid	pretreatment	thermal pretreatment
mechanical pretreatment	chemical pretreatment	granulometry	milling pretreatment
methane	anaerobic co-digestion	Polyamides	sludge
Polycarbonate	Biomethane		

Cada grupo de palavras-chave retornou um grupo de artigos científicos, que foram analisados individualmente para a construção do *roadmap* acerca do tema em questão. Diversos artigos repetiram-se em mais de um grupo e isto foi levado em consideração na análise geral. Ao todo, foram analisados 131 artigos científicos diferentes. Para a elaboração do *roadmap* buscou-se, dentre os 131 artigos científicos, somente aqueles em que os autores realizaram experimentos de DA com resíduos de plástico, para que os dados pudessem ser avaliados e comparados. Desta forma, foram identificados 9 artigos científicos adequados para a construção efetiva do *roadmap* tecnológico.

Em relação às buscas por patentes relacionadas ao tema de produção de biogás a partir de plástico, foram utilizados os mesmos grupos de palavras-chave quando da busca dos artigos científicos, o que resultou em 12 patentes diferentes. As patentes foram, então, analisadas individualmente, e verificou-se que nenhuma delas tinha relação com o tema de DA de plásticos.

A partir da análise prévia dos artigos científicos selecionados, foi possível o entendimento sobre o tema e os elementos que o envolvem, como matérias-primas, tecnologias empregadas e parâmetros experimentais importantes. Com esse entendimento, tornou-se possível a definição das taxonomias nas quais as informações oriundas dos artigos foram inicialmente organizadas. As taxonomias foram divididas em três níveis diferentes de análise, de acordo com a proposta de MOREIRA, 2016: nível macro, meso e micro.

No nível macro, realizou-se uma análise ampla dos artigos científicos, que foram avaliados quanto ao ano de publicação, à autoria e ao continente dos países de origem dos autores. No nível meso, as características de maior relevância acerca do tema em estudo foram detalhadas após a análise de todos os artigos. Verificou-se que a maior parte das características era comum entre os artigos. As taxonomias definidas estão contidas na Tabela 3.

Tabela 3: Taxonomias definidas na análise meso

Taxonomias definidas	
Plástico estudado	Razão de massa substrato/co-substrato
Tipo de pré-tratamento	Tempo do experimento
Tipo de co-substrato/inóculo	Eficiência do tratamento
Tipo de nutriente adicionado	Volume de biogás
Volume do biorreator	Volume de metano
Regime do experimento	Concentração de metano
Faixa de temperatura	

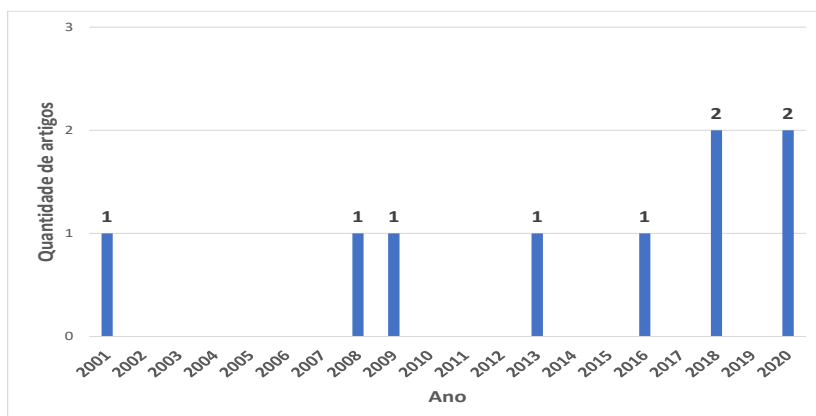
Por fim, no nível micro, os artigos foram avaliados de forma mais aprofundada quanto às taxonomias definidas na análise meso. Também realizou-se comparações quantitativas entre os artigos científicos com o objetivo de identificar similaridades e diferenças em relação aos experimentos de DA de resíduos plásticos.

4 Resultados

4.1 Resultados da análise macro

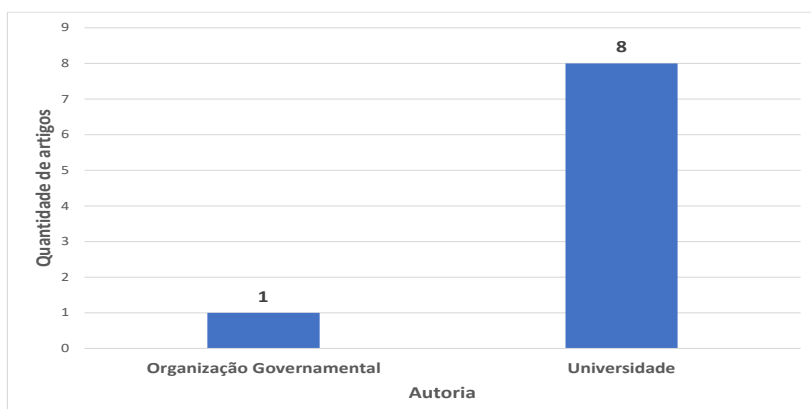
Os artigos estudados foram analisados quanto ao ano de publicação, ao tipo de autoria da pesquisa e ao continente dos autores, conforme mostram as Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

Figura 5: Quantidade de artigos estudados por ano



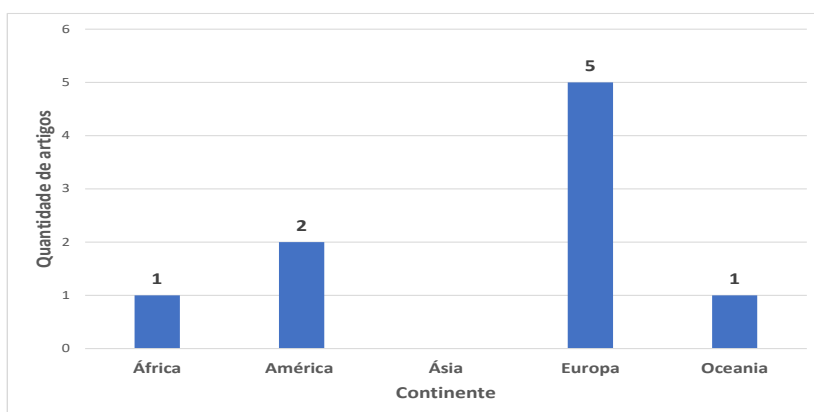
Fonte: elaboração própria

Figura 6: Quantidade de artigos estudados por tipo de autoria



Fonte: elaboração própria

Figura 7: Quantidade de artigos estudados por continente



Fonte: elaboração própria

A Figura 5 mostra que os trabalhos experimentais na área de biogás a partir de resíduos plásticos são recentes, com a frequência de publicações sobre o tema aumentando a partir de 2016. Contudo, nota-se que esta frequência é irregular e a quantidade dos trabalhos é escassa, o que evidencia a necessidade de mais trabalhos na área.

A Figura 6 mostra que a maior parte dos artigos analisados são de autoria de Universidades, uma vez que apenas um foi produzido por uma organização governamental. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato de que Universidades, além de terem maior atuação em pesquisa científica de modo geral, são instituições públicas ou com mantenedoras sem fins lucrativos e, por isso, tendem a tornar públicos os dados obtidos nas pesquisas.

Quanto à distribuição por continente, a Figura 7 ilustra a predominância da Europa na produção científica relacionada ao tema em questão. Tal fato pode ser explicado por conta do maior desenvolvimento europeu em relação à gestão de resíduos sólidos, já que os países desse continente têm mais políticas ambientais consolidadas e há pouco espaço físico disponível para instalação de aterros. América do Sul, Ásia e América Central não têm representatividade no gráfico e são regiões com países heterogêneos quanto ao manejo de resíduos plásticos. Os dois maiores países dessas regiões, Brasil e China, não têm produção científica no tema de biogás a partir de resíduos plásticos, o que pode ser explicado, no caso brasileiro, pela recência e pouca aderência da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Apesar da China ter uma produção científica consistente, correspondendo a cerca de 14% da produção mundial (PRADO; OLIVEIRA, 2016), pode-se observar que o tema ainda não é amplamente pesquisado no país.

4.2 Resultados da análise meso

As taxonomias previamente definidas na análise meso foram aprofundadas, a partir da leitura detalhada dos artigos selecionados. Como resultado, as taxonomias foram, então, detalhadas em subgrupos e divididas em duas categorias principais: variáveis de entrada e variáveis de saída, conforme a Tabela 4. Cabe ressaltar que os parâmetros de eficiência do tratamento foram definidos de formas diferentes por cada autor.

Tabela 4: Taxonomias da análise meso aprofundadas

Variáveis de entrada	Variáveis de saída
Plástico estudado	Eficiência do tratamento
- Origem do plástico	- Redução de DQO
- Tipo de pré-tratamento	- Redução de carbono total
- Forma física	- Redução de massa
- Tipo de co-substrato/inóculo	- Redução de sólidos voláteis
- Tipo de nutriente adicionado	- Redução de biodegradabilidade
- Volume do biorreator	Volume de biogás
- Regime do experimento	Volume de metano
- Faixa de temperatura	Concentração de metano
- Razão de massa substrato/co-substrato	
- Tempo do experimento	

4.3 Roadmap

A Tabela 5 apresenta a *roadmap* construído a partir das análises dos artigos científicos. Neste *roadmap* estão apresentados os dados individuais das taxonomias definidas na análise meso, para cada artigo avaliado. Nos casos em que os autores não disponibilizaram os dados, estes fatos foram informados nos devidos campos.

Tabela 5: Roadmap tecnológico

Documento	Ano	Autoria	País	Plástico estudado	Tipo de pré-tratamento	Tipo de co-substrato/inóculo	Tipo de nutriente adicionado	Volume do biorreator	Regime do experimento	Faixa de temperatura	Razão de massa substrato/co-substrato	Tempo do experimento	Eficiência do tratamento	Volume de biogás	Volume de metano	Concentração de metano
(ABOU-ZEID; MÜLLER; DECKWER)	2001	Gesellschaft für Biotechnologische Forschung	Alemanha	Poli(β-hidroxibutirato) (PHB)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - concentrado	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	23% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(β-hidroxibutirato-co-β-hidroxivalerato) (PHBV)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - concentrado	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	23% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(ε-caprolactona) (PCL)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - concentrado	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	8% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(β-hidroxibutirato) (PHB)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - diluído	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	15% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(β-hidroxibutirato-co-β-hidroxivalerato) (PHBV)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - diluído	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	14% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(ε-caprolactona) (PCL)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras (1cm x 9cm)	Lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos - diluído	Sem adição	Não informado	Batelada	37°C	Não informado	70 dias	3% de redução de massa	Não informado	Não informado	Não informado
(MOHEE et al.)	2008	University of Mauritius	Ilhas Maurício	Novamont Mater-Bi® (MB)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos gerados por uma cervejaria	Sem adição	1 L	Batelada	Não informado	Não informado	32 dias	35% de redução de sólidos voláteis	Não informado	0,245 L/g	Não informado
				Environmental Product Inc.* (EPI)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos gerados por uma cervejaria	Sem adição	1 L	Batelada	Não informado	Não informado	32 dias	7% de redução de sólidos voláteis	Não informado	0,0076 L/g	Não informado
(RUSSO et al.)	2009	The University of Queensland	Austrália	Blenda de amido termoplástico com álcool polivinílico (90:10 em massa)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (0,5cm x 0,5cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com uma mistura de esgoto doméstico primário e resíduos de alimentos	Adição de resazurina em um meio redutor contendo nutrientes e vitaminas específicos para culturas anaeróbias mistas	0,2 L	Batelada	38°C ± 0,5°C	1:40	Aproximadamente 4 dias (95 horas)	57% de redução de DQO solúvel	0,132 L/g	0,022 L/g	16,67%
				Blenda de amido termoplástico com álcool polivinílico (75:25 em massa)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (0,5cm x 0,5cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com uma mistura de esgoto doméstico primário e resíduos de alimentos	Adição de resazurina em um meio redutor contendo nutrientes e vitaminas específicos para culturas anaeróbias mistas	0,2 L	Batelada	38°C ± 0,5°C	1:40	Aproximadamente 4 dias (95 horas)	42% de redução de DQO solúvel	0,115 L/g	0,022 L/g	19,13%
				Blenda de amido termoplástico com álcool polivinílico (50:50 em massa)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (0,5cm x 0,5cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com uma mistura de esgoto doméstico primário e resíduos de alimentos	Adição de resazurina em um meio redutor contendo nutrientes e vitaminas específicos para culturas anaeróbias mistas	0,2 L	Batelada	38°C ± 0,5°C	1:40	Aproximadamente 4 dias (95 horas)	27% de redução de DQO solúvel	0,058 L/g	0,014 L/g	24,14%
				Blenda de amido termoplástico com álcool polivinílico (0:100 em massa)	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (0,5cm x 0,5cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com uma mistura de esgoto doméstico primário e resíduos de alimentos	Adição de resazurina em um meio redutor contendo nutrientes e vitaminas específicos para culturas anaeróbias mistas	0,2 L	Batelada	38°C ± 0,5°C	1:40	Aproximadamente 4 dias (95 horas)	12% de redução de DQO solúvel	0,004 L/g	0,002 L/g	50%
(GÓMEZ; MICHEL)	2013	The Ohio State University	Estados Unidos	Blenda de polipropileno (PP) com 2% de aditivo	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo metanogenicamente ativo oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de esgoto	Adição de resíduos orgânicos domésticos para nutrientes suplementares e de fosfato de amônio para ajustar a razão entre carbono e nitrogênio para uma razão 20:1	2 L	Batelada	37°C ± 1°C	1:37,5	50 dias	3,1 ± 3,7% de redução de carbono	Não informado	Não informado	54,1% ± 6,1%
				Blenda de polietileno tereftalato com 1% de aditivo	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo metanogenicamente ativo oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de esgoto	Adição de resíduos orgânicos domésticos para nutrientes suplementares e de fosfato de amônio para ajustar a razão entre carbono e nitrogênio para uma razão 20:1	2 L	Batelada	37°C ± 1°C	1:37,5	50 dias	2,2 ± 1,6% de redução de carbono	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de polipropileno (PP) com amido de milho	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo metanogenicamente ativo oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de esgoto	Adição de resíduos orgânicos domésticos para nutrientes suplementares e de fosfato de amônio para ajustar a razão entre carbono e nitrogênio para uma razão 20:1	2 L	Batelada	37°C ± 1°C	1:37,5	50 dias	26,4 ± 3,5% de redução de carbono	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de co-poliéster aromático alifático com polímero derivado de amido de milho	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo metanogenicamente ativo oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de esgoto	Adição de resíduos orgânicos domésticos para nutrientes suplementares e de fosfato de amônio para ajustar a razão entre carbono e nitrogênio para uma razão 20:1	2 L	Batelada	37°C ± 1°C	1:37,5	50 dias	20,2 ± 4,4% de redução de carbono	Não informado	Não informado	Não informado
(ŠMEJKALOVÁ et al.)	2016	University of Chemistry and Technology	República Tcheca	Poli(ε-caprolactona) - PCL (massa molar de 58,1 kg/mol)	Pré-tratamentos térmico e físico - filme cortado em tiras (1cm x 1cm)	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	60% de redução de biodegradabilidade	0,785 L/g	Não informado	Não informado
				Poli(ε-caprolactona) - PCL (massa molar de 38,0 kg/mol)	Pré-tratamento térmico e físico-químico para formação de pó	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	54% de redução de biodegradabilidade	0,775 L/g	Não informado	Não informado
				Poli(ε-caprolactona) - PCL (massa molar de 13,0 kg/mol)	Pré-tratamento térmico e físico-químico para formação de pó	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	57% de redução de biodegradabilidade	0,810 L/g	Não informado	Não informado
				Poliácido láctico - PLA (massa molar de 44,5 kg/mol)	Pré-tratamentos térmico e físico - filme cortado em tiras (1cm x 1cm)	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	74% de redução de biodegradabilidade	0,80 L/g	Não informado	Não informado
				Poliácido láctico - PLA (massa molar de 3,4 kg/mol)	Pré-tratamento térmico e físico - formação de pó por desidratação	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	56% de redução de biodegradabilidade	0,55 L/g	Não informado	Não informado
				Poliácido láctico - PLA (massa molar de 0,35 kg/mol)	Pré-tratamento não informado para formação de gel	Lodo termofílico proveniente de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	0,12L	Batelada	55°C ± 1°C	Não informado	150 dias	84% de redução de biodegradabilidade	0,775 L/g	Não informado	Não informado
(ZHANG; HEAVEN; BANKS)	2018	University of Southampton	Inglaterra	Polipropileno - PP	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	-3,4% de redução de massa	Não informado	0,4 L/g	Não informado
				Polietileno de baixa densidade - PEBD	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	-0,7% de redução de massa	Não informado	0,41 L/g	Não informado
				Polímero metalizado à base de celulose - CBM	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	78,2% de redução de massa	Não informado	0,39 L/g	Não informado
				Polímero termosselável à base de celulose - CBHS	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	65,9% de redução de massa	Não informado	0,42 L/g	Não informado
				Polímero termosselável de alta barreira à base de celulose - CBHB	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	57,4% de redução de massa	Não informado	0,4 L/g	Não informado
				Polímero não termosselável à base de celulose - CBNHS	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	93,4% de redução de massa	Não informado	0,43 L/g	Não informado
				Diacetato de celulose - CDF	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	59,0% de redução de massa	Não informado	0,4 L/g	Não informado
				Blenda 1 à base de amido	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	7,9% de redução de massa	Não informado	0,4 L/g	Não informado
				Blenda 2 à base de amido	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	2,1% de redução de massa	Não informado	0,38 L/g	Não informado
				Poliácido láctico - PLA	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	57,5% de redução de massa	Não informado	0,39 L/g	Não informado

				Blenda de poliláctico - PLA	Não teve pré-tratamento, pois usou os pellets conforme recebeu	Lodo proveniente de um digestor alimentado com uma mistura de resíduos alimentícios e embalagem de cartão (80:20%)	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios	4 L	Batelada alimentada	37°C	Não informado	147 dias	3,1% de redução de massa	Não informado	0,4 L/g	Não informado
				Polipropileno - PP	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	2,0% de redução de massa	0,033 L/g	0,025 L/g	76,10%
				Poliétileno de baixa densidade - PEBD	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	1,5% de redução de massa	0,023 L/g	0,018 L/g	76,70%
				Polímero metalizado à base de celulose - CBM	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	88,9% de redução de massa	0,78 L/g	0,374 L/g	47,70%
				Polímero termosselável à base de celulose - CBHS	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	98,3% de redução de massa	0,88 L/g	0,433 L/g	49,40%
				Polímero termosselável de alta barreira à base de celulose - CBHB	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	98,0% de redução de massa	0,82 L/g	0,404 L/g	49,40%
				Polímero não termosselável à base de celulose - CBNHS	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	96,4% de redução de massa	0,85 L/g	0,41 L/g	48,30%
				Diacetato de celulose - CDF	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	10,3% de redução de massa	0,10 L/g	0,05 L/g	49,90%
				Blenda 1 à base de amido	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	18,0% de redução de massa	0,20 L/g	0,113 L/g	55,90%
				Blenda 2 à base de amido	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	10,6% de redução de massa	0,12 L/g	0,069 L/g	57,10%
				Poliácido láctico - PLA	Pré-tratamento físico - filme cortado em tiras quadradas (1,0cm x 1,0cm)	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	20,2% de redução de massa	0,19 L/g	0,097 L/g	50,10%
				Blenda de poliláctico - PLA	Não teve pré-tratamento, pois usou os pellets conforme recebeu	Lodo mesofílico oriundo de um digestor de uma planta de tratamento de efluentes líquidos municipais	Sem adição	1,5 L	Batelada	37°C	1:4	65 dias	3,0% de redução de massa	0,031 L/g	0,017 L/g	54,50%
(NARANJIC et al.)	2018	University College Dublin	Irlanda	Poliácido láctico - PLA	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	80 dias	88% de redução de biodegradabilidade	0,80 L/g	0,40 L/g	50,0%
				Poli(β-hidroxibutirato) - PHB	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	127 dias	92% de redução de biodegradabilidade	0,84 L/g	0,45 L/g	53,6%
				Poli(hidroxiocanoato) - PHO	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	Não informado	5% de redução de biodegradabilidade	0,05 L/g	0,03 L/g	60,0%
				Poli(butileno succinato) - PBS	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	Não informado	12% de redução de biodegradabilidade	0,10 L/g	0,06 L/g	60,0%
				Amido termoplástico - TPS	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	127 dias	80% de redução de biodegradabilidade	0,50 L/g	0,21 L/g	42,0%
				Poli(ε-caprolactona) - PCL	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	127 dias	95% de redução de biodegradabilidade	1,0 L/g	0,45 L/g	45,0%
				Blenda de PLA com PCL (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	121 dias	90% de redução de biodegradabilidade	0,81 L/g	0,42 L/g	51,9%
				Blenda de PLA com PBS (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	121 dias	85% de redução de biodegradabilidade	0,65 L/g	0,33 L/g	50,8%
				Blenda de PLA com PHB (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	80 dias	100% de redução de biodegradabilidade	0,80 L/g	0,40 L/g	50,0%
				Blenda de PLA com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	66 dias	90% de redução de biodegradabilidade	0,70 L/g	0,35 L/g	50,0%
				Blenda de PHB com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	66 dias	89% de redução de biodegradabilidade	0,75 L/g	0,40 L/g	53,3%
				Blenda de PHB com PCL (60/40)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	80 dias	100% de redução de biodegradabilidade	0,90 L/g	0,55 L/g	61,1%
				Blenda de PHB com PBS (50/50)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	121 dias	78% de redução de biodegradabilidade	0,60 L/g	0,35 L/g	58,3%
				Blenda de PCL com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	66 dias	82% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PCL com TPS (70/30)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de um digestor alimentado com a fração orgânica de resíduos domésticos	Sem adição	Não informado	Batelada	52°C ± 2°C	1:66,7	80 dias	70% de redução de biodegradabilidade	1,0 L/g	0,5L/g	50,0%
				Poliácido láctico - PLA	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C ± 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado

				Poli(β -hidroxibutirato) - PHB	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	115% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(hidroxiocetanoato) - PHO	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	7% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli-(butileno succinato) - PBS	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Amido termoplástico - TPS	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Poli(ϵ -caprolactona) - PCL	Pré-tratamento físico - corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	3% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PLA com PCL (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PLA com PBS (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PLA com PHB (80/20)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	0% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PLA com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	2,5% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PHB com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	90% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PHB com PCL (60/40)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	39% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PHB com PBS (50/50)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	15% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PCL com PHO (85/15)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	5% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
				Blenda de PCL com TPS (70/30)	Pré-tratamento físico - derretimento dos polímeros puros seguido de moldagem por pressão e corte em tiras retangulares (20 x 20 x 0,2cm)	Lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes líquidos	Sem adição	Não informado	Batelada	35°C \pm 2°C	1:3600	56 dias	38% de redução de biodegradabilidade	Não informado	Não informado	Não informado
(SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA)	2020	University of Prince Edward Island	Canadá	Cápsula de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (1 x 1cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	18,3% de redução de biodegradabilidade	0,283 L/g	0,113 L/g	40%
				Cápsula de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (2 x 2cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	17,1% de redução de biodegradabilidade	0,264 L/g	0,112 L/g	42,5%
				Cápsula de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (3 x 3cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	16,3% de redução de biodegradabilidade	0,252 L/g	0,1 L/g	40%
				Embalagem de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (1 x 1cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	Menor que 3% de redução de biodegradabilidade	0,0125 L/g	Não informado	Não informado
				Embalagem de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (2 x 2cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	Menor que 3% de redução de biodegradabilidade	0,025 L/g	Não informado	Não informado
				Embalagem de café feita de PLA - Poliláctico	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (3 x 3cm)	Lodo termofílico proveniente de uma empresa de gestão de resíduos	Adição de macronutrientes (dihidrogenofosfato de potássio, fosfato de amônio, cloreto de magnésio e cloreto de cálcio) e de micronutrientes (cloreto de manganês, cloreto ferroso, cloreto de zinco, cloreto de cobalto, heptamolibdato de amônio, cloreto de alumínio, cloreto cuproso e ácido bórico)	0,5L	Batelada	55°C	1:9,8	35 dias	Menor que 3% de redução de biodegradabilidade	0,025 L/g	Não informado	Não informado
(BANDINI et al.)	2020	Università Cattolica del Sacro Cuore	Itália	Filme bioplástico a base de amido	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (2 x 2cm)	Lodo termofílico oriundo de um digestor anaeróbico de resíduos orgânicos municipais	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios composta por alfaca e abobrinha	0,25 L	Batelada	55°C \pm 2°C	1:99,9	23 dias	85,79% \pm 0,038% de redução de massa	Não informado	Não informado	45%
				Poliláctico - PLA	Pré-tratamento físico - corte em tiras quadradas (2 x 2cm)	Lodo termofílico oriundo de um digestor anaeróbico de resíduos orgânicos municipais	Adição de uma mistura de resíduos alimentícios composta por alfaca e abobrinha	0,25 L	Batelada	55°C \pm 2°C	1:63,5	23 dias	-1,69% \pm 0,033% de redução de massa	Não informado	Não informado	44%

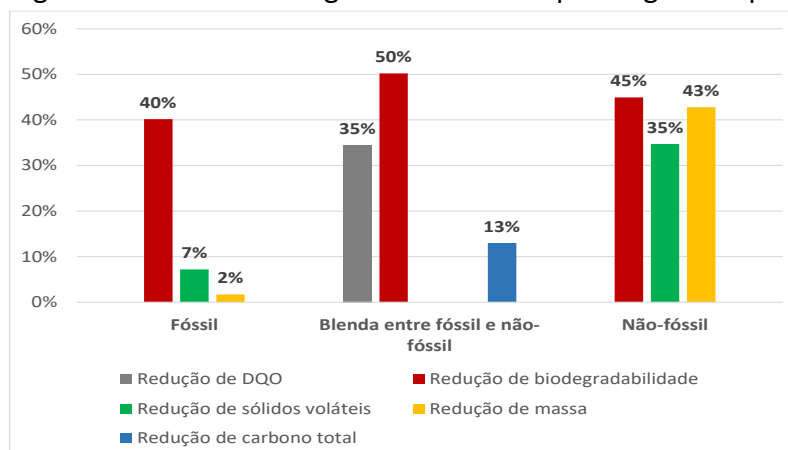
4.4 Resultados da análise micro

Na análise micro, os artigos foram analisados de forma individualizada quanto às taxonomias definidas previamente na análise meso. A variável de concentração de metano foi calculada pela razão entre o volume de metano e o volume de biogás. Os ensaios de digestão anaeróbia (DA) diferiram entre si no conjunto de pesquisas analisadas. Além disso, alguns dados importantes para uma melhor análise comparativa não foram apresentados nos gráficos porque não foram fornecidos nos artigos estudados. Todos os resultados apresentados nos gráficos foram calculados por média aritmética dos dados fornecidos pelos autores.

4.4.1 Origem do plástico

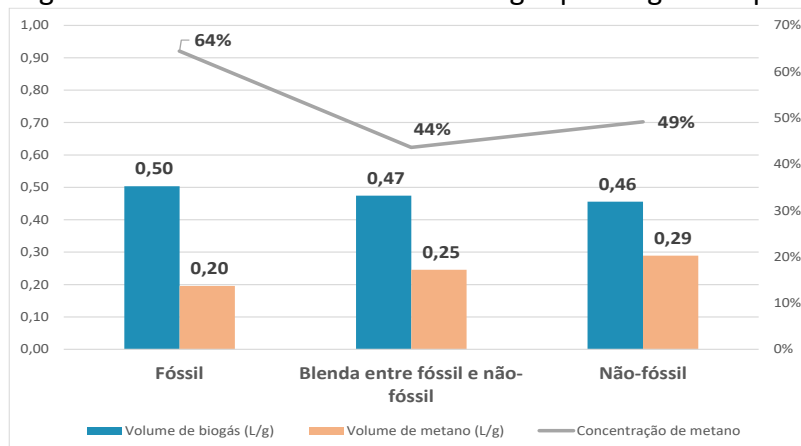
Os plásticos estudados nos artigos foram classificados em (i) fóssil, (ii) não-fóssil e (iii) blenda entre fóssil e não-fóssil. As Figuras 8 e 9 exibem os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente. Cabe ressaltar a possibilidade de alguns plásticos, comumente de origem fóssil e neste trabalho classificados como tal, terem sido feitos a partir de fontes renováveis, o que os tornaria de origem não-fóssil, como o polipropileno (PP). Contudo, tal informação não foi disponibilizada pelos autores.

Figura 8: Eficiência da digestão anaeróbia por origem do plástico



Fonte: elaboração própria

Figura 9: Volumes de metano e de biogás por origem do plástico



Fonte: elaboração própria

Quanto à eficiência do tratamento, pode-se perceber que a presença de um plástico não-fóssil teve influência positiva. ŠMEJKALOVÁ et al., 2016 utilizaram o PLA e o PCL como plásticos de estudo não-fóssil e fóssil, respectivamente e, em média, a redução de biodegradabilidade foi de 71% para o não-fóssil e de 54% para o fóssil.

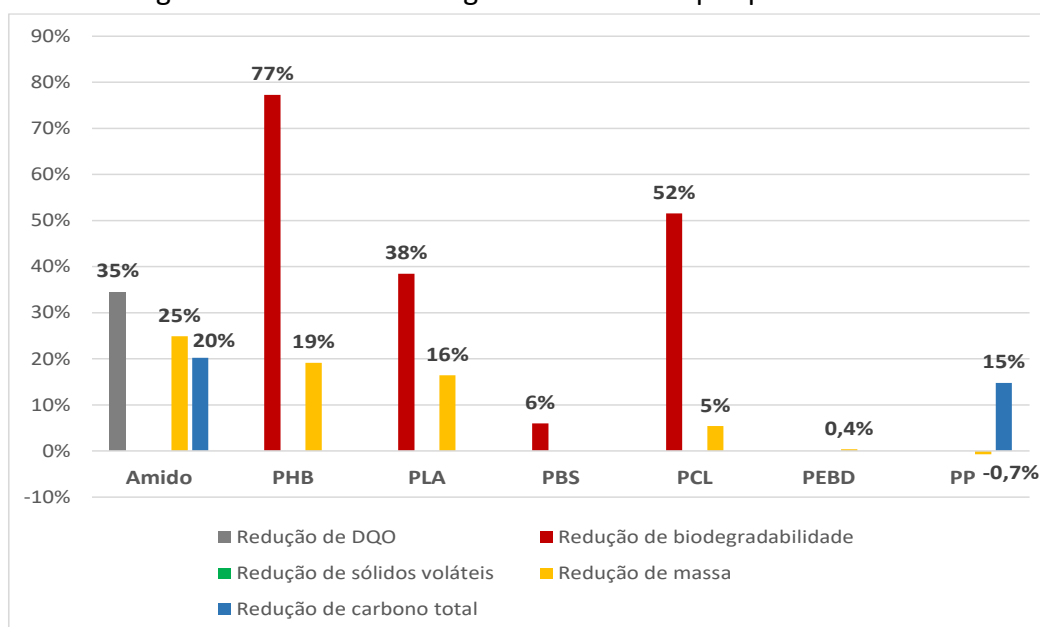
A blenda entre fóssil e não-fóssil apresentou eficiência no tratamento em ordem de grandeza similar ao não-fóssil. NARANCIC et al., 2018 obtiveram uma redução de 50% na blenda e de 54% na DA dos plásticos não-fósseis.

Em relação às produções de metano e de biogás, é possível observar que os resíduos de origem fóssil, em comparação aos de origem não-fóssil, resultaram em menor volume de biogás e maior concentração de metano. Esses resultados são esperados para substratos fósseis, pois, no processo de DA deles, a hidrólise é a etapa limitante e não a metanogênese (PATINVOH et al., 2017). ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram, em média, 0,028 L/g de biogás, 0,022 L/g de metano e 76,40% de concentração de metano para os substratos de origem fóssil, ante 0,44 L/g de biogás, 0,22 L/g de metano e 51,37% de concentração de metano nos ensaios com plásticos de origem não-fóssil.

4.4.1.1 Plásticos estudados

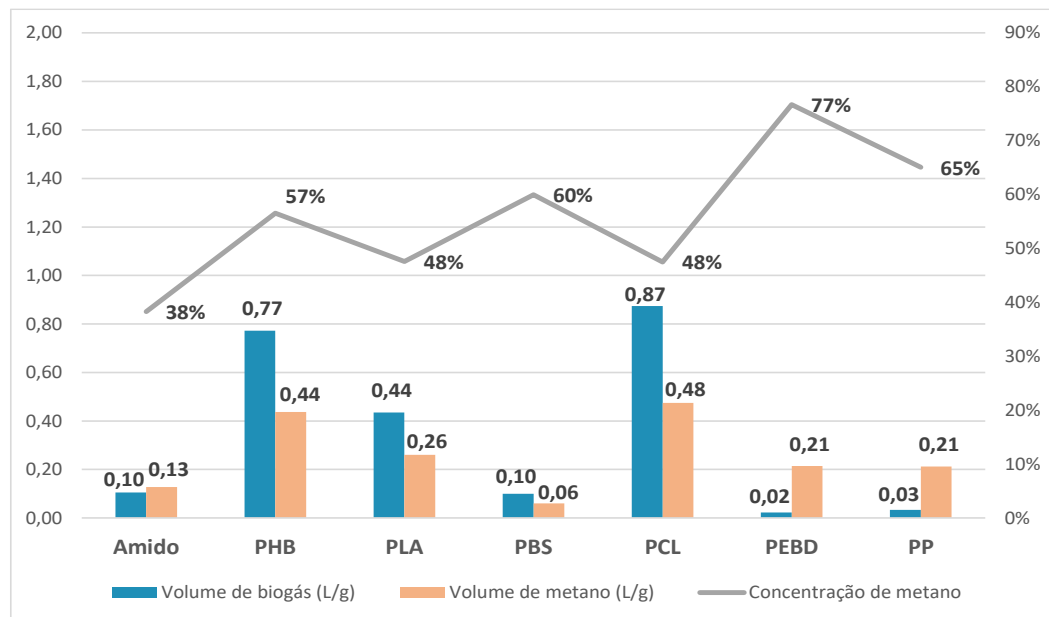
Dentre todos os plásticos estudados nos artigos, foram destacados sete deles, entre fósseis e não-fósseis. São eles: amido, PHB e PLA como não-fósseis, e PBS, PCL, PEBD e PP como fósseis, conforme as Figuras 10 e 11, referentes à eficiência do tratamento e à produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 10: Eficiência da digestão anaeróbia por plástico estudado



Fonte: elaboração própria

Figura 11: Volumes de metano e de biogás por plástico estudado



Fonte: elaboração própria

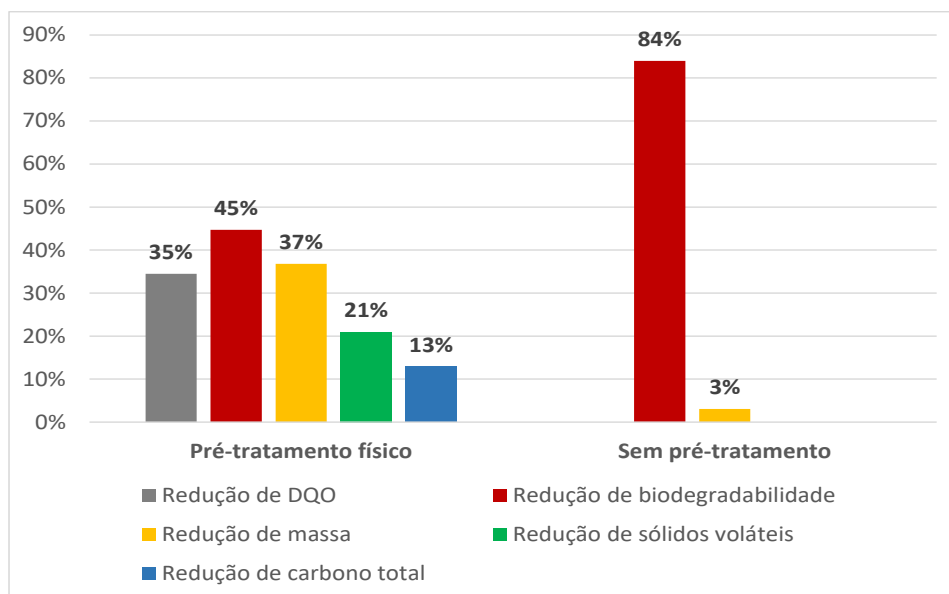
Os dados experimentais relativos à eficiência do tratamento mostram que os plásticos não-fósseis degradaram mais do que os fósseis. Especificamente a policaprolactona (PCL) apresentou uma redução de biodegradabilidade que não seguiu a tendência dos demais plásticos fósseis. A PCL, apesar de ser obtida a partir de derivados de petróleo, é biodegradável, o que poderia explicar tal variação percebida. Além disso, a PCL foi testada em diferentes condições experimentais. ŠMEJKALOVÁ et al., 2016 obtiveram 57% de redução de biodegradabilidade, enquanto NARANCIC et al., 2018 obtiveram 49%. Contudo, os autores utilizaram tempos de experimento e faixas de temperatura diferentes.

Quanto às produções de biogás e de metano, é possível observar que os plásticos fósseis resultaram em menor volume de biogás e maior concentração de metano, quando comparados aos plásticos não-fósseis. Esses resultados já são esperados devido ao fato de que a etapa de hidrólise é a limitante e não a metanogênese, ao longo do processo de DA. Dentre os plásticos fósseis, observa-se que os resultados para PP, PEBD e PBS foram similares, destoando-se somente os valores quando do uso do PCL. Em relação aos plásticos não-fósseis, percebe-se variações entre o amido, o PHB e o PLA, o que pode ser explicado pelas condições experimentais utilizadas pelos autores, diferentes para um destes plásticos.

4.4.2 Tipo de pré-tratamento

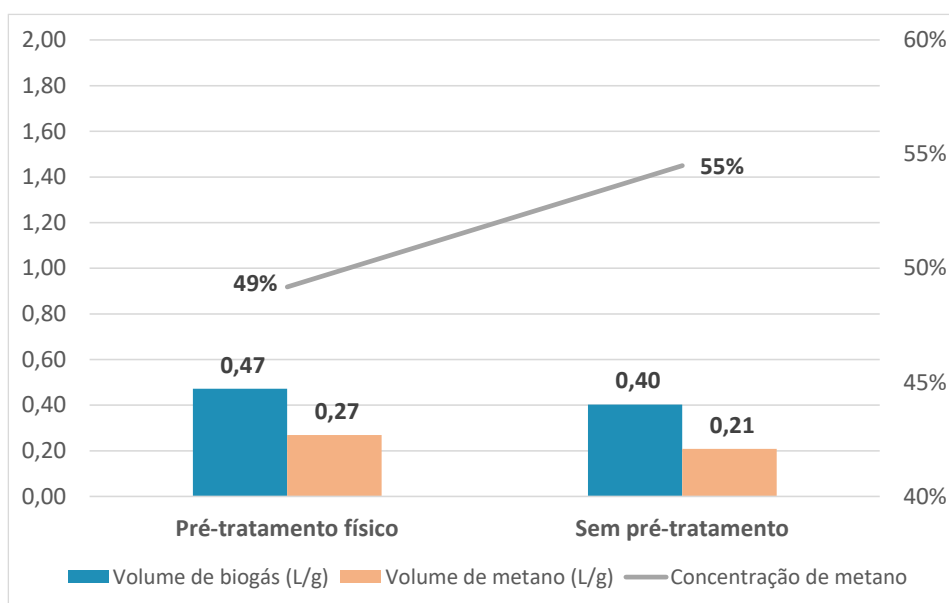
O tipo de pré-tratamento destinado aos substratos foi avaliado dentre todos os artigos e classificado em (i) pré-tratamento físico e (ii) sem pré-tratamento. O pré-tratamento físico compreende corte, moagem, peneiramento e demais operações que alteram a forma física da amostra. Dentre os estudos analisados, nenhum outro tipo de pré-tratamento foi aplicado. As Figuras 12 e 13 exibem os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 12: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de pré-tratamento



Fonte: elaboração própria

Figura 13: Volumes de metano e de biogás por tipo de pré-tratamento



Fonte: elaboração própria

Em relação à eficiência do processo de DA, os dados experimentais mostram que a realização de pré-tratamento melhorou o resultado de redução de massa, em comparação com o cenário sem pré-tratamento, o que é esperado, já que modificando-se a forma física da amostra é possível obter um substrato mais biodisponível para os microrganismos (AGUSTINI, 2018). ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 testaram a ausência e a presença de pré-tratamento e obtiveram, em média de redução de massa, 43% após realização de pré-tratamento físico e 3% sem pré-tratamento. Para o mesmo plástico, o PLA (ácido polilático), a redução de massa foi de 39% com pré-tratamento físico e de 3% sem pré-tratamento. A partir da Figura 12, é possível observar que a redução da biodegradabilidade aumentou sem o pré-tratamento, o que não é esperado, visto que a redução de massa diminuiu sem pré-tratamento. Uma possível explicação reside no fato de que a redução de biodegradabilidade de 84% no grupo

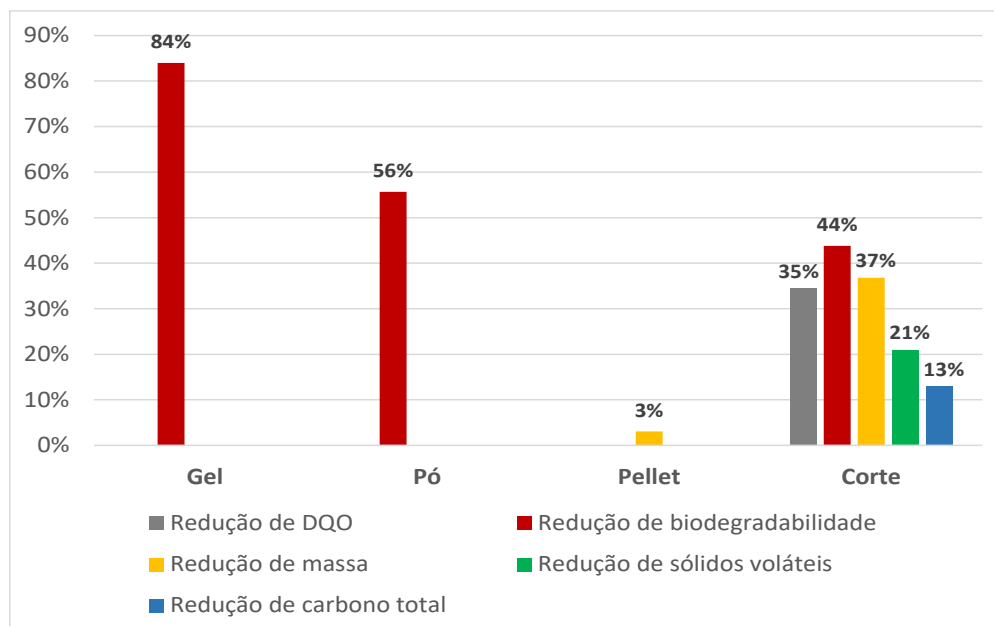
sem pré-tratamento é devida ao resultado do teste de ŠMEJKALOVÁ et al., 2016 em que utilizou-se PLA na forma gel. Esse ponto díspar é único e representa 2% do conjunto de dados de biodegradabilidade fornecidos pelos autores e analisados, não influenciando de forma significativa os resultados, conforme se verifica no gráfico de produção de biogás/metano.

A partir da análise dos resultados das produções de biogás e de metano, pode-se perceber que o volume de biogás do grupo com pré-tratamento foi maior do que o volume para o grupo sem tratamento prévio, enquanto na concentração de metano observa-se o oposto. Isto mostra que o pré-tratamento melhorou a eficiência da etapa de hidrólise da DA e a metanogênese foi a etapa limitante. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018, quando testaram a não realização de pré-tratamento, obtiveram 0,03 L/g de biogás, 0,017 L/g de metano e 54,5% de concentração de metano. Já SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020, ao realizarem os experimentos com pré-tratamento físico, chegaram a resultados de 0,14 L/g de biogás, 0,11 L/g de metano e 41% de concentração de metano.

4.4.2.1 Forma física

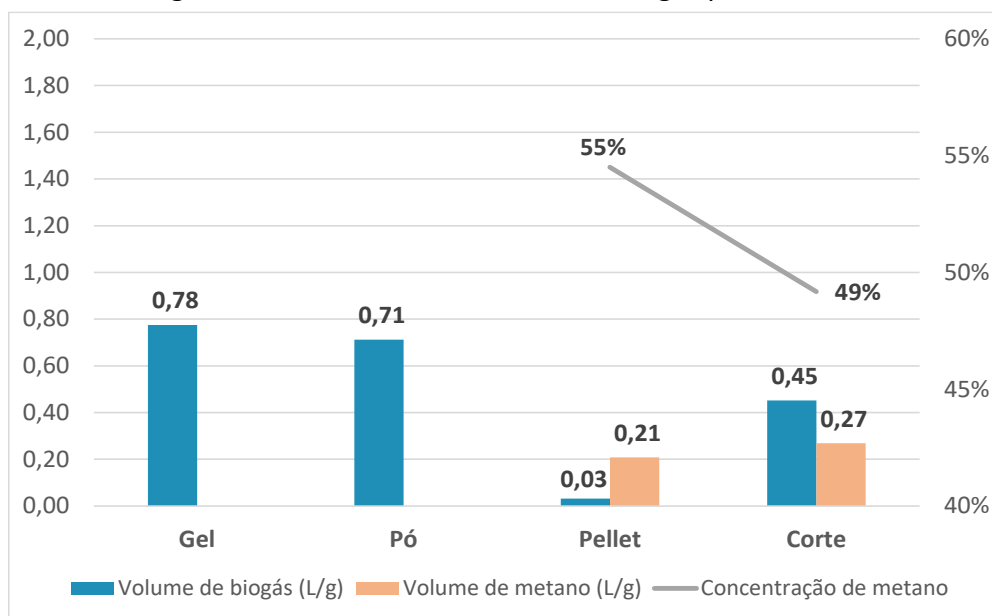
As diferentes formas físicas das amostras foram analisadas também de forma individualizada, quanto à eficiência do tratamento e à produção de biogás, conforme as Figuras 14 e 15.

Figura 14: Eficiência da digestão anaeróbia por forma física



Fonte: elaboração própria

Figura 15: Volumes de metano e de biogás por forma física



Fonte: Elaboração própria

A partir da análise dos dados relativos à eficiência do tratamento, pode-se observar que as amostras em formas gel e pó apresentaram resultados melhores que as demais formas. Isto pode ser justificado porque nessas conformações a amostra torna-se mais biodisponível para ser digerida, devido ao seu tamanho reduzido. Os testes com as formas gel e pó, contudo, representaram aproximadamente 9% do conjunto de dados de biodegradabilidade fornecidos pelos autores e analisados. ABOU-ZEID; MÜLLER; DECKWER, 2001 realizaram os experimentos de DA com as amostras já no formato desejado após terem sido submetidas a uma etapa manual de corte, resultando em 14% de redução de massa, em média. Já ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 utilizaram amostras na forma de *pellet* e atingiram uma média de 3% de redução de massa.

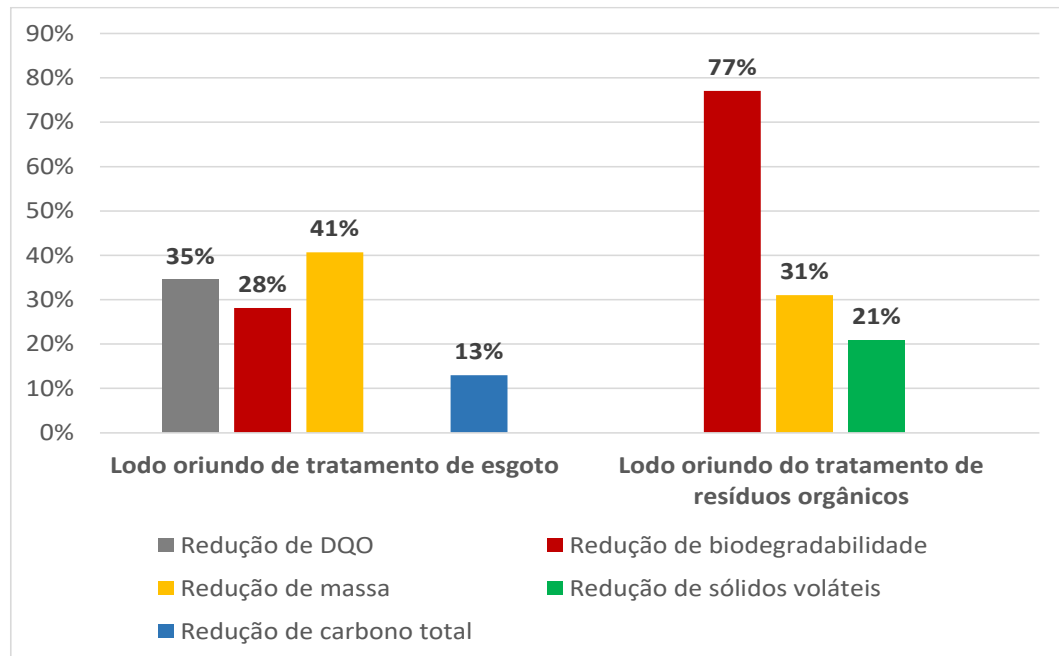
Quanto às produções de biogás e de metano, percebe-se que a forma em *pellet* produziu um volume menor de biogás, em comparação com o corte, e teve uma concentração de metano maior. A etapa de hidrólise pode ter sido facilitada em relação à etapa de metanogênese, no caso do corte, o que explicaria os resultados obtidos. Os experimentos com a forma em *pellet* representam aproximadamente 4% do conjunto de dados de volume de metano fornecidos pelos autores. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram 0,031 L/g de biogás e 54,5% de concentração de metano, a partir do uso da forma em *pellet*. RUSSO et al., 2009, com experimentos na forma corte, atingiram os valores de 0,077 L/g de biogás e de 27,5% de concentração de metano. Ao comparar ambos os artigos citados, nota-se que a produção de metano não seguiu a tendência observada na Figura 15. Isto pode ter ocorrido porque as condições experimentais entre os artigos não foram as mesmas, como, por exemplo, a razão de massa entre o substrato e o inóculo e o tipo de inóculo utilizado.

4.4.3 Co-substrato/inóculo

O tipo de co-substrato/inóculo utilizado pelos autores nos experimentos foi classificado em (i) lodo oriundo de tratamento de esgoto e (ii) lodo oriundo do tratamento de resíduos

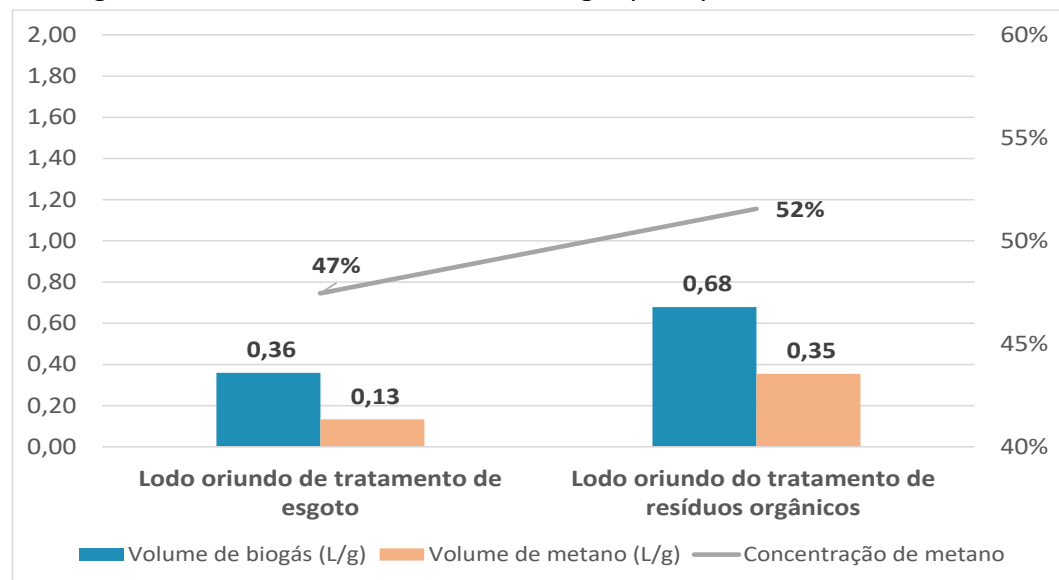
orgânicos. As Figuras 16 e 17 mostram os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 16: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de co-substrato/inóculo



Fonte: elaboração própria

Figura 17: Volumes de metano e de biogás por tipo de co-substrato/inóculo



Fonte: elaboração própria

Quanto à eficiência do tratamento do plástico, é possível perceber que o uso de lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos como inóculo do processo de DA promoveu melhores resultados em comparação com o lodo oriundo de tratamento de esgoto. NARANCIC et al., 2018, quando utilizaram lodo de tratamento de resíduos orgânicos, alcançaram, em média, redução de biodegradabilidade de 77%. Os mesmos autores obtiveram uma redução de biodegradabilidade média de 21% quando do uso de lodo oriundo de tratamento de esgoto. Um fator que pode ter influenciado positivamente a eficiência da degradação no caso

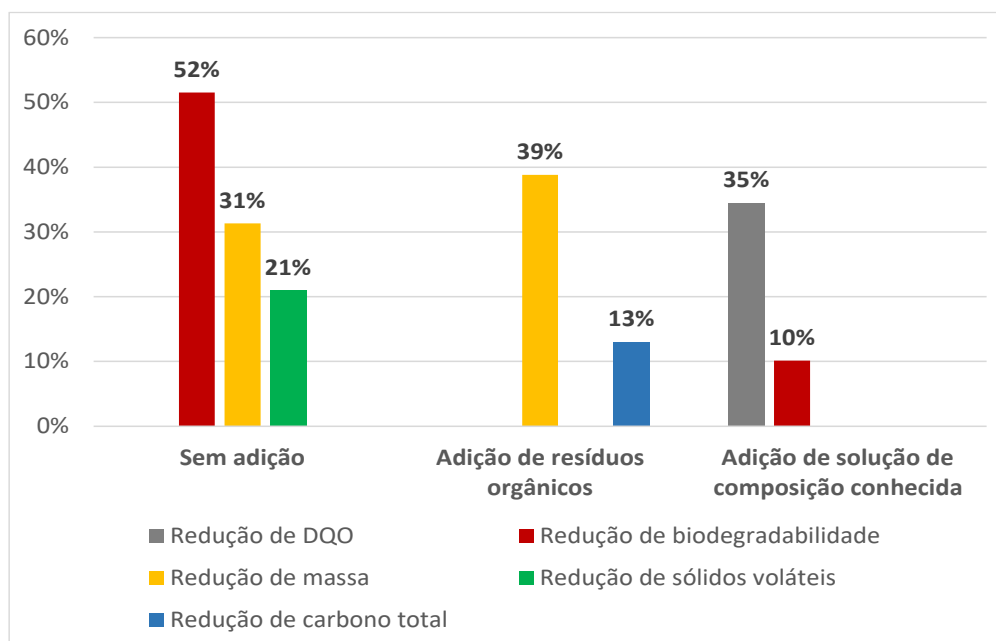
do lodo de resíduos orgânicos é a possibilidade de complemento nutricional do meio devido à diversidade de composição deste tipo de lodo. Com uma proporção adequada de nutrientes, sabe-se que a eficiência da DA é aumentada.

Em relação às produções de biogás e de metano, observa-se que o volume de biogás foi maior para o lodo oriundo do tratamento de resíduos orgânicos em comparação com o lodo oriundo de tratamento de esgoto. Isto ocorre porque os resíduos orgânicos têm carga orgânica maior e mais biodisponível, elevando, portanto, a formação de biogás. NARANCIC et al., 2018, ao usarem lodo proveniente do tratamento de resíduos orgânicos, registraram uma produção de 0,68 L/g de metano. Já RUSSO et al., 2009 alcançaram uma produção de 0,077 L/g de biogás ao utilizarem lodo oriundo de tratamento de esgoto. Quanto à concentração de metano, observa-se que não houve tendência que evidenciasse o aumento da velocidade de qualquer das etapas da DA, pois a concentração média de metano aumentou com o aumento da produção de metano/biogás. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 obtiveram 41% de concentração média de metano, com o uso de lodo oriundo de tratamento de esgoto. Já NARANCIC et al., 2018 alcançaram, em média, 53% de concentração de metano mediante utilização de lodo de resíduos orgânicos.

4.4.3.1 Nutrientes

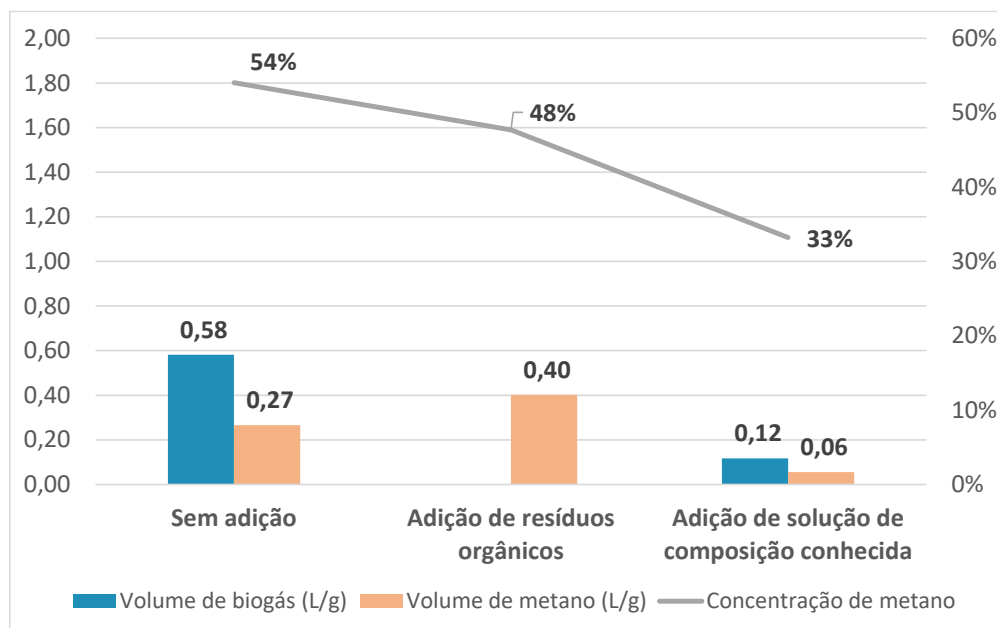
Os artigos foram avaliados também quanto à adição de nutrientes ao meio reacional, classificando-se em (i) adição de resíduos orgânicos, (ii) adição de solução de composição conhecida e (iii) sem adição. As Figuras 18 e 19 mostram os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 18: Eficiência da digestão anaeróbia por tipo de nutriente adicionado



Fonte: elaboração própria

Figura 19: Volumes de metano e de biogás por tipo de nutriente adicionado



Fonte: elaboração própria

A Figura 18 demonstra que a eficiência do tratamento foi maior sem adição de nutrientes em comparação com a adição de solução de composição conhecida, a partir da análise da redução de biodegradabilidade. Isto ocorre devido à dificuldade de se reproduzir o meio nutricional de DA de forma analítica, ou seja, a partir da adição de compostos químicos específicos. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 adicionaram macronutrientes, como cloreto de magnésio e cloreto de cálcio, em conjunto com micronutrientes, como cloreto ferroso e cloreto de zinco, obtendo 10% de redução média de biodegradabilidade. ŠMEJKALOVÁ et al., 2016 não adicionaram nutrientes e alcançaram 64% de redução média de biodegradabilidade. RUSSO et al., 2009 agregaram ao meio microbiano uma mistura contendo nutrientes e vitaminas específicos para culturas anaeróbias e obtiveram 35% de redução média de DQO, outro indicador relacionado à eficiência do processo.

Na comparação entre a adição de resíduos orgânicos e os casos em que não houve adição de nutrientes, percebe-se, pela análise da redução de massa, que a eficiência da DA foi maior com a adição de resíduos orgânicos. Isto pode ser justificado pelo fato de que os microrganismos contidos no lodo estão mais adaptados ao resíduo orgânico, o que facilita a degradação do substrato. BANDINI et al., 2020 obtiveram, com a adição de resíduos orgânicos, uma média de redução massa de 42%, enquanto ABOU-ZEID; MÜLLER; DECKWER, 2001 alcançaram 14% de redução média de massa sem adição de nutrientes.

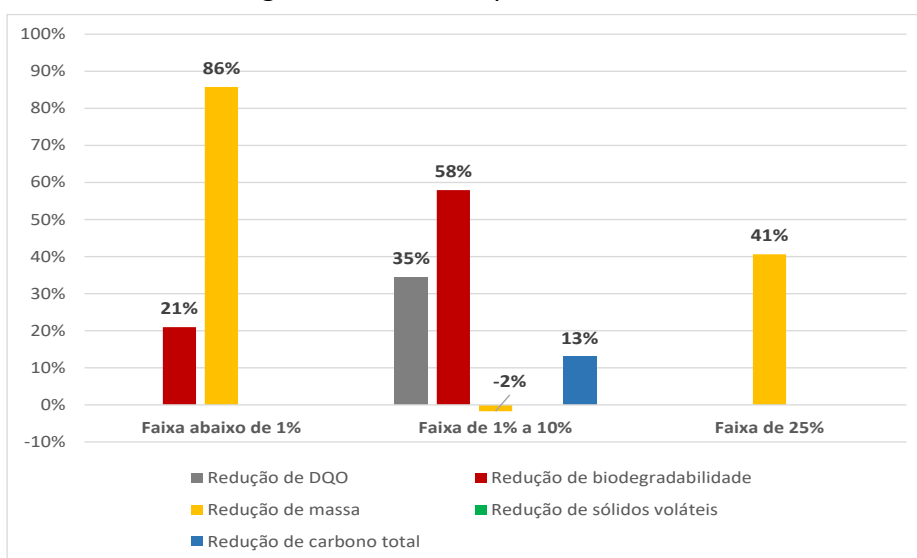
Quanto às produções de biogás e de metano, pode-se observar que o volume metano foi maior quando da adição de resíduos orgânicos em relação ao grupo sem adição de nutrientes. Contudo, a concentração de metano foi maior para o grupo sem adição de nutrientes, sob a mesma comparação. Tal constatação pode ser explicada pelo fato de que a adição de resíduos orgânicos, com os quais os microrganismos já estão adaptados, torna a etapa de metanogênese como a limitante do processo de DA, e não a hidrólise. A adição de solução de composição conhecida produziu um volume de metano inferior aos demais grupos de análise, além da baixa concentração de metano. Isto pode ser explicado pela dificuldade de se reproduzir o meio nutricional ambiental de forma analítica. ZHANG; HEAVEN; BANKS,

2018 obtiveram, sem adição de nutrientes, 0,18 L/g de metano e 55,92% de concentração de metano, alcançando 0,40 L/g de metano após adição de resíduos orgânicos. Também acrescentando resíduos orgânicos, GÓMEZ; MICHEL, 2013 obtiveram 54,10% de concentração de metano.

4.4.3.2 Razão de massa substrato/co-substrato

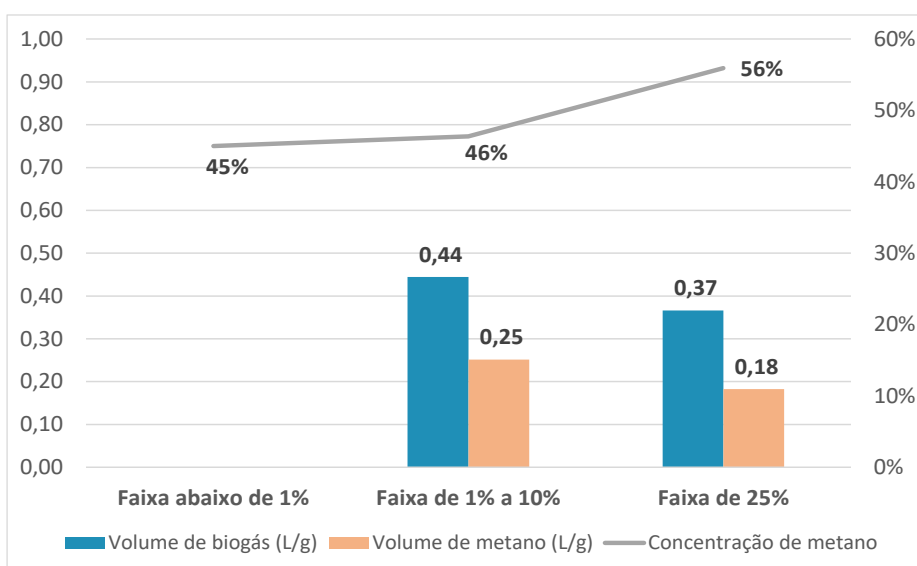
A razão de massa entre o substrato e o co-substrato foi avaliada dentre todas as publicações estudadas e dividida nos seguintes grupos: (i) abaixo de 1%, (ii) de 1% a 10% e (iii) de 25%. As Figuras 20 e 21 mostram os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 10: Eficiência da digestão anaeróbia por razão de massa substrato/co-substrato



Fonte: elaboração própria

Figura 21: Volumes de metano e de biogás por razão de massa substrato/co-substrato



Fonte: elaboração própria

A partir da análise da eficiência do tratamento, pode-se perceber, em termos de redução de massa, que a faixa abaixo de 1% apresentou os melhores resultados, seguida da faixa de 25% e da faixa de 1% a 10%. Tanto a redução de massa para o grupo de razão abaixo de 1% quanto para o grupo de 1% a 10% foram realizadas por BANDINI et al., 2020, porém foi somente em um experimento para cada faixa, o que representa aproximadamente 7% do conjunto total de dados disponíveis sobre redução de massa. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram uma redução de massa média de 41% ao utilizarem a razão de massa de 25% entre o substrato e co-substrato. Dentre o conjunto de dados fornecidos por ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018, é possível perceber que são valores que têm uma discrepância relevante entre si, o que pode ser justificado por outras variáveis do experimento, como a origem do plástico utilizado, por exemplo.

A redução de biodegradabilidade foi maior para a faixa de 1% a 10%, em comparação com a faixa de 1%. Tal diferença pode ser explicada pelo fato de que na faixa de 1% o meio reacional é composto em quase sua totalidade pelo lodo. NARANCIC et al., 2018 alcançaram uma redução de biodegradabilidade média de 21%, com razão de massa abaixo de 1%. Contudo, o conjunto de dados contém valores que variam de 0% a 115% de redução de biodegradabilidade, o que pode ser explicado por outros parâmetros experimentais utilizados pelos autores. A média de 58% de redução da biodegradabilidade para a faixa de 1% a 10% foi composta por dois artigos, com resultados distintos entre si. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 obtiveram redução média de 10% na biodegradabilidade, enquanto NARANCIC et al., 2018 alcançaram uma média de 77%. Entretanto, os plásticos usados em ambos os artigos foram diferentes, além de ter havido diferença na adição de nutrientes e no tempo total do processo.

Quanto às produções de biogás e de metano, pode-se perceber que o volume de biogás produzido com a faixa de 1% a 10% foi maior do que com a faixa de 25%, enquanto para a concentração de metano o comportamento foi inverso. Isto mostra que na faixa de 1% a 10% a metanogênese foi a etapa limitante da DA, conforme esperado, enquanto na faixa de 25% foi a etapa de hidrólise. Na razão de massa de 25%, pelo fato de o meio conter uma quantidade significativa de plástico, que é menos biodisponível do que o lodo, a etapa mais lenta e, portanto, a limitante, torna-se a hidrólise. NARANCIC et al., 2018 alcançaram 0,68 L/g de biogás, 0,35 L/g de metano e 53% de concentração de metano, com razão de massa entre 1% e 10%. Já ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram 0,37 L/g de biogás, 0,18 L/g de metano e 55,9% de concentração de metano.

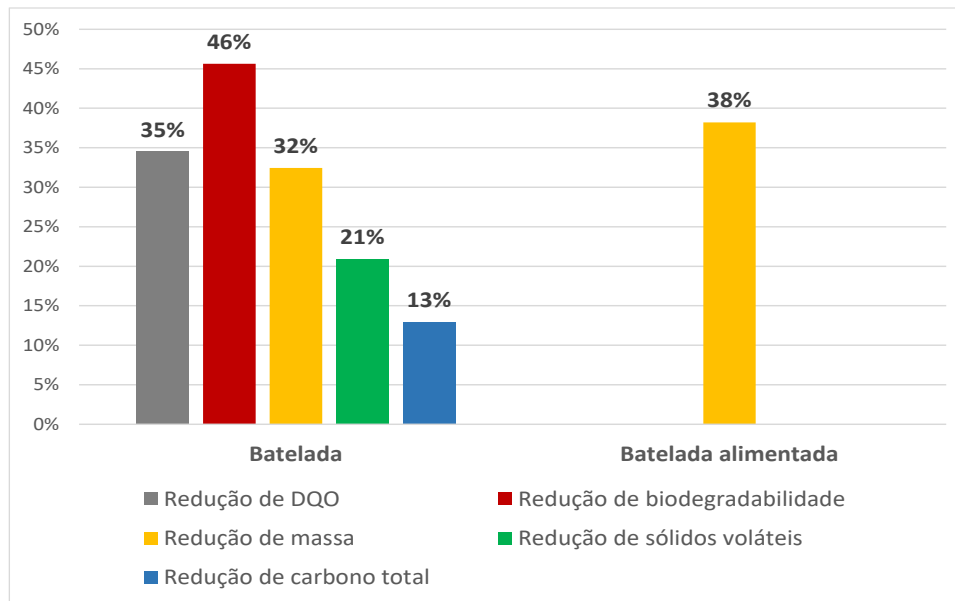
4.4.4 Condições experimentais

As condições dos experimentos descritos nos artigos foram avaliadas em relação à influência na produção de metano e na eficiência da DA. São discutidos quatro parâmetros operacionais: o regime do experimento, o volume do biorreator, o tempo do experimento e a faixa de temperatura.

4.4.4.1 Regime do experimento

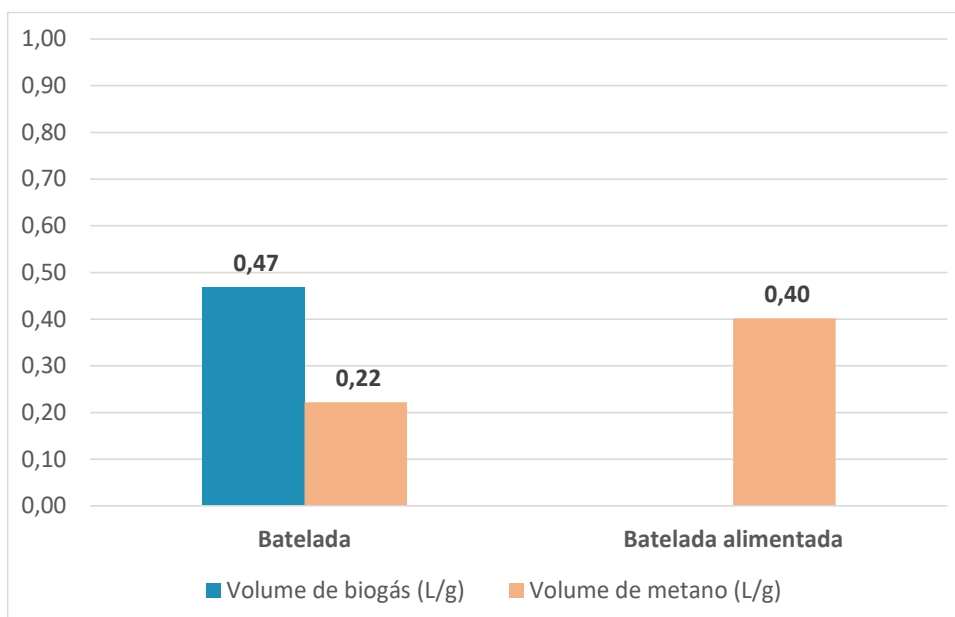
O regime do experimento foi estudado dentre todos os artigos e classificado em (i) batelada e (ii) batelada alimentada. As Figuras 22 e 23 exibem os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 22: Eficiência da digestão anaeróbia por regime do experimento



Fonte: elaboração própria

Figura 23: Volumes de metano e de biogás por regime do experimento



Fonte: elaboração própria

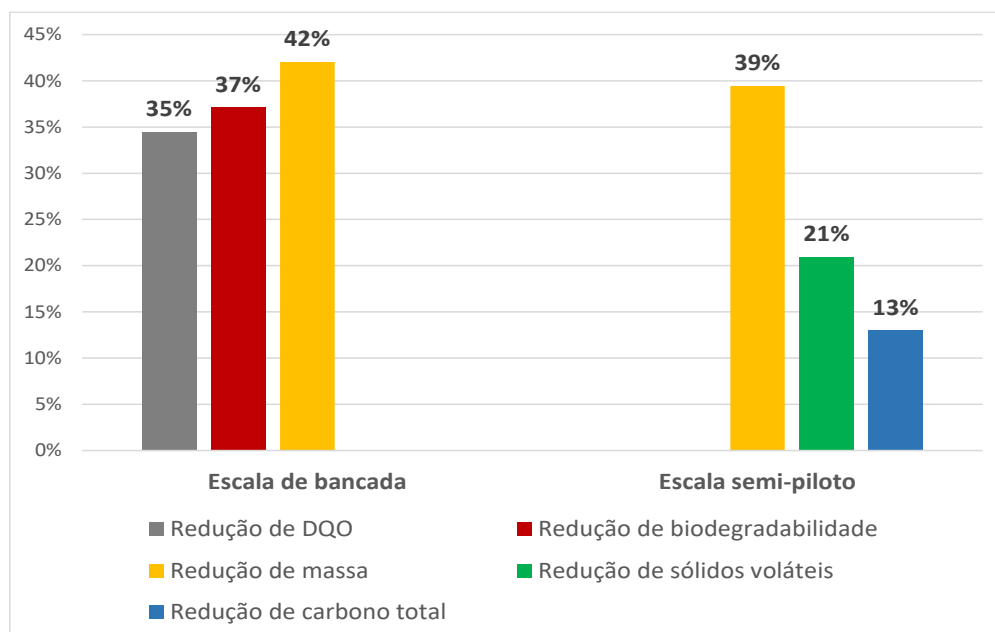
Quanto à eficiência do tratamento, observa-se que, em termos de redução de massa, o regime de batelada alimentada foi mais eficiente. Somente o artigo de ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 reportou tal condição experimental. No trabalho destes autores, procedeu-se à remoção diária de digestato seguida da adição do substrato. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 também testaram os experimentos com o regime em batelada e obtiveram uma redução de massa de 41%. Também com testes sob o regime batelada, ABOU-ZEID; MÜLLER; DECKWER, 2001 atingiram redução de massa de 14%. A variação entre ambos os resultados dos artigos pode ser explicada por outras condições experimentais que foram diferentes, tais como o tipo de inóculo adicionado.

As produções de biogás e de metano seguiram o mesmo comportamento da eficiência do tratamento, com o regime de batelada alimentada apresentando melhores resultados do que o regime de batelada convencional. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram 0,40 L/g e 0,18 L/g de metano, com os regimes batelada alimentada e batelada, respectivamente. Já RUSSO et al., 2009 alcançaram um volume de 0,015 L/g de metano com o regime batelada. Em relação à concentração de metano no biogás gerado, não foram fornecidos dados para o regime de batelada alimentada, impossibilitando a comparação com o regime batelada. De modo geral, o fato de a maior parte dos experimentos descritos nos artigos terem sido sob o regime batelada demonstra que os estudos de DA de plásticos ainda estão em fase inicial. Há oportunidade para o desenvolvimento de novas técnicas com regimes que se assemelhem àqueles em uso pelas indústrias.

4.4.4.2 Volume do biorreator

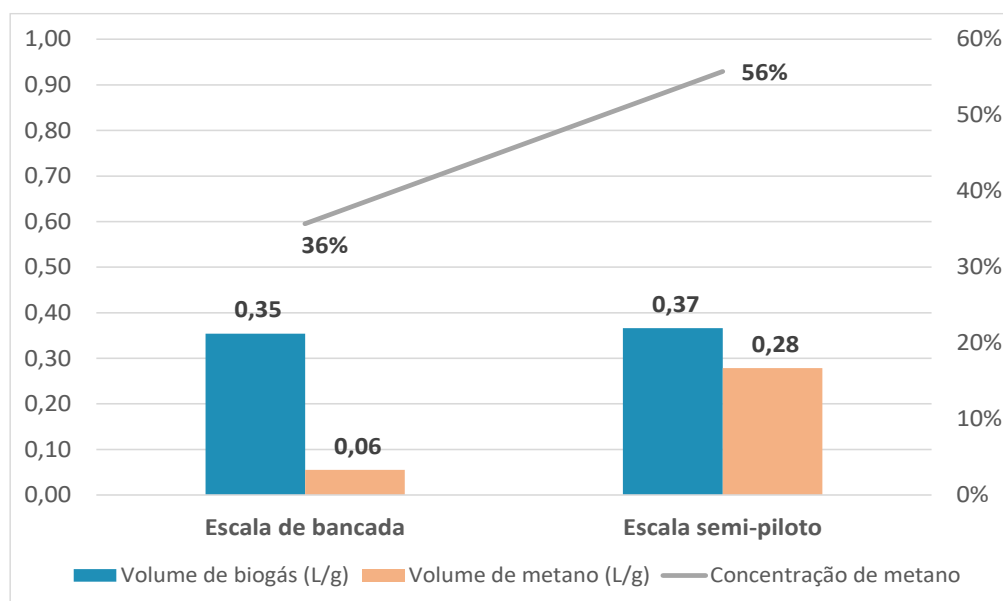
O volume do biorreator foi avaliado dentre todos os artigos e classificado em (i) escala de bancada (faixa de 120 mL até 500 mL) e (ii) escala semi-piloto (faixa de 1000 mL até 4000 mL), com o objetivo de investigar a influência da escala do experimento no processo de DA. As Figuras 24 e 25 exibem os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 24: Eficiência da digestão anaeróbia por volume do biorreator



Fonte: elaboração própria

Figura 25: Volumes de metano e de biogás por volume do biorreator



Fonte: elaboração própria

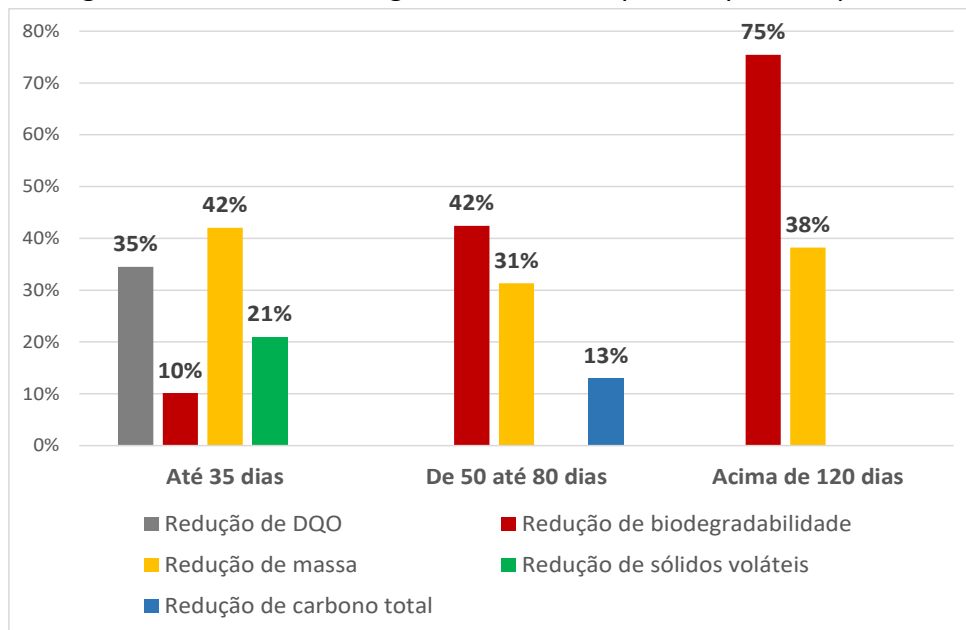
A partir da Figura 24, pode-se observar que a eficiência do tratamento, em termos de redução de massa, foi ligeiramente maior para a escala de bancada em relação à escala semi-piloto. BANDINI et al., 2020 obtiveram redução de massa de 42% utilizando somente escala de bancada. Já ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram redução de massa de 39% com uso somente de escala semi-piloto. É esperado que a escala semi-piloto resulte em uma DA melhor estabelecida, pois tem-se uma concentração de sólidos maior em comparação à escala de bancada. Contudo, observa-se o oposto nos resultados da eficiência do tratamento, o que pode ser justificado pela influência que outros parâmetros exerceram sobre o processo de degradação, como, por exemplo, o tempo do experimento e a faixa de temperatura, que foram diferentes para os artigos citados anteriormente.

Quanto às produções de biogás e de metano, o volume de biogás, o volume de metano e a concentração de metano foram maiores para a escala semi-piloto em comparação com a escala de bancada. Como se viu, tal resultado é esperado porque a DA é melhor estabelecida na escala semi-piloto, devido à maior concentração de sólidos. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 atingiram 0,14 L/g de biogás, 0,11 L/g de metano e 41% de concentração de metano, com experimentos em escala de bancada. ZHANG; HEAVEN; BANKS, 2018 obtiveram, com escala semi-piloto, 0,37 L/g de biogás, 0,29 L/g de metano e 55,92% de concentração de metano.

4.4.4.3 Tempo do experimento

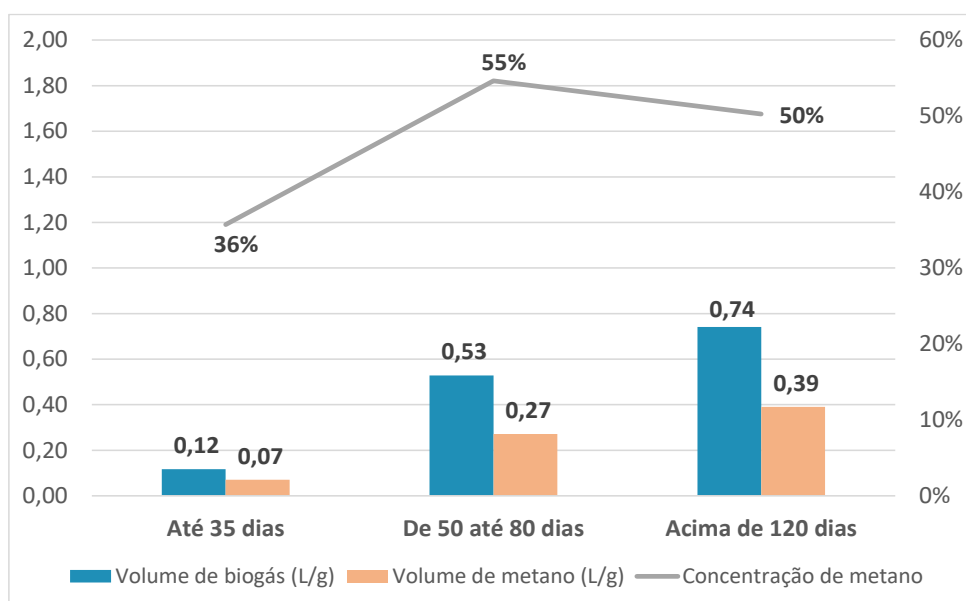
O tempo total do experimento de DA de cada um dos artigos foi agrupado e classificado em faixas de (i) até 35 dias, (ii) 50 até 80 dias e (iii) acima de 120 dias. As Figuras 26 e 27 ilustram os resultados da eficiência do tratamento e da produção de biogás/metano, respectivamente.

Figura 26: Eficiência da digestão anaeróbia por tempo do experimento



Fonte: elaboração própria

Figura 27: Volumes de metano e de biogás por tempo do experimento



Fonte: elaboração própria

Em termos de redução de biodegradabilidade, a eficiência aumentou com o tempo do processo de degradação. Em cada faixa de tempo avaliada, foram estudados plásticos de origem fóssil, não-fóssil e blendas entre ambas as origens. SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 conduziram experimentos na faixa de até 35 dias. Neste estudo, os autores interromperam o experimento antes da estabilização, o que afeta diretamente o resultado final de apenas 10% de redução de biodegradabilidade. NARANCIC et al., 2018 obtiveram todos os dados de biodegradabilidade relativos à faixa de 50 a 80 dias, que resultaram em 42% de redução deste parâmetro. Estes autores utilizaram, dentro do mesmo experimento, tempos diferentes para os diversos substratos em estudo, o que influencia na análise de

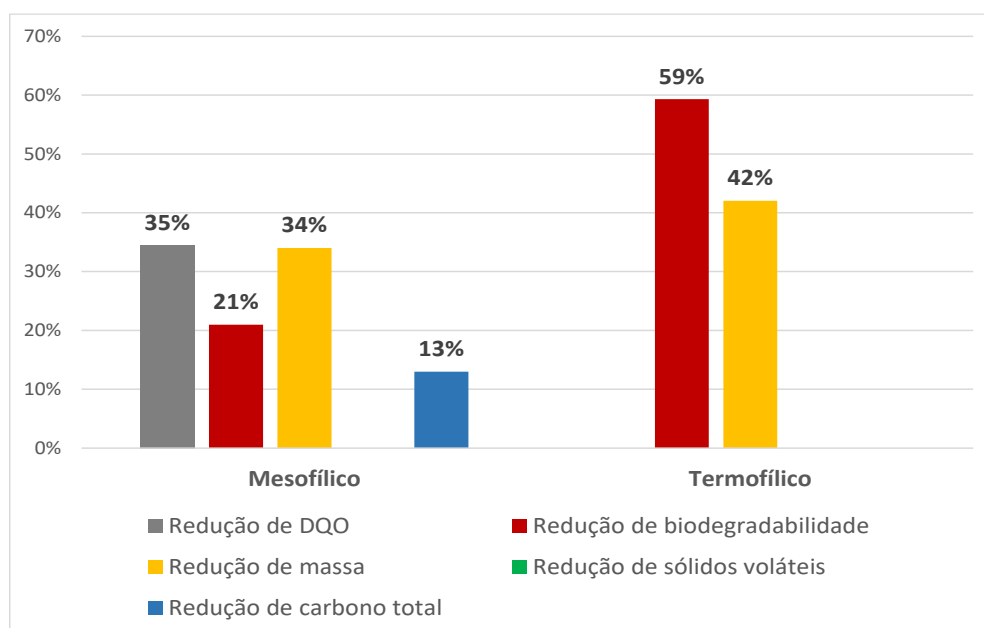
biodegradabilidade. Por outro lado, ŠMEJKALOVÁ et al., 2016 atingiram 64% de redução de biodegradabilidade com mais de 120 dias de DA.

Quanto às produções de biogás e de metano, é possível perceber que tanto o volume de biogás quanto o de metano aumentaram conforme aumentou o tempo da DA. Entretanto, a concentração de metano seguiu a tendência oposta. Tal comportamento permite supor que, a partir de 120 dias de experimento, a metanogênese é a etapa limitante da DA, enquanto para a faixa de 50 até 80 dias, a etapa limitante é a hidrólise. Contudo, este não é o comportamento esperado, pois resíduos mais recalcitrantes, que demoram mais tempo para completar a DA, tendem a ter a etapa de hidrólise como limitante (PATINVOH et al., 2017). O conjunto de resultados final pode ter sido influenciado pelos outros parâmetros experimentais utilizados nos experimentos. NARANCIC et al., 2018 e ŠMEJKALOVÁ et al., 2016, com tempo total de experimento acima de 120 dias, obtiveram 0,73 e 0,75 L/g de biogás, respectivamente, porém utilizaram faixas de temperatura, inóculo e plásticos diferentes.

4.4.4.4 Faixa de temperatura

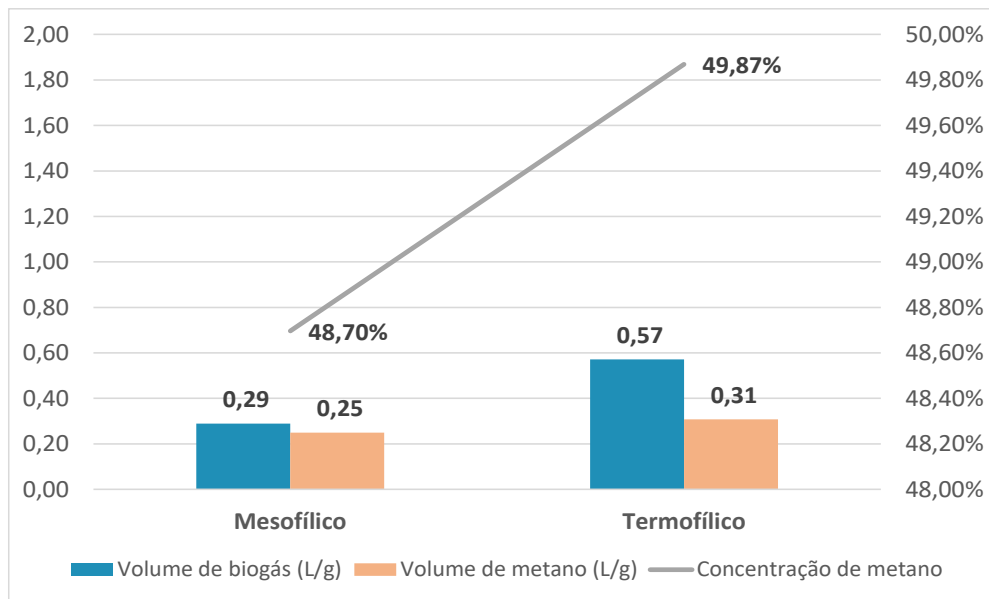
Os dados relativos à temperatura dos experimentos descritos pelos autores foram compilados e divididos nos grupos (i) mesofílico (faixa de 35°C) e (ii) termofílico (faixa de 55°C), com base nas faixas de atividade microbiana. As Figuras 28 e 29 mostram os resultados da eficiência do tratamento e da produção de metano, respectivamente.

Figura 28: Eficiência da digestão anaeróbia por faixa de temperatura



Fonte: elaboração própria

Figura 29: Volumes de metano e de biogás por faixa de temperatura



Fonte: elaboração própria

A partir da Figura 28, pode-se observar que a degradação foi mais eficiente na faixa de temperatura termofílica em relação à mesofílica, o que é esperado, já que temperaturas maiores promovem taxas de reação mais altas e maior inativação de microrganismos patogênicos (AGUSTINI, 2018). NARANCIC et al., 2018 obtiveram 21% de redução de biodegradabilidade utilizando faixa de temperatura mesofílica. ŠMEJKALOVÁ et al., 2016, por sua vez, alcançaram 64% de redução de biodegradabilidade com a faixa termofílica. A eficiência de tratamento maior para o grupo termofílico mostra que os substratos utilizados não continham nenhum composto tóxico produzido em maior quantidade em altas faixas de temperatura, como a amônia. Caso houvesse, a eficiência do tratamento poderia ter sido menor.

Quanto às produções de biogás e de metano, o volume de biogás, o volume de metano e a concentração de metano foram maiores para a faixa de temperatura termofílica em comparação com a mesofílica. RUSSO et al., 2009, com o uso de faixa mesofílica, atingiram 0,078 L/g de biogás, 0,015 L/g de metano e 27,49% de concentração de metano. Já SHRESTHA; VAN-EERTEN JANSEN; ACHARYA, 2020 obtiveram 0,14 L/g de biogás, 0,11 L/g de metano e 41% de concentração de metano, ao realizarem os ensaios com faixa de temperatura termofílica.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, a análise das publicações científicas relacionadas à digestão anaeróbia (DA) de plásticos possibilitou a construção do *roadmap* sobre o tema. Isto permitiu com que fosse feita a avaliação qualitativa e quantitativa do estado-da-arte da DA para plásticos, obtendo-se, assim, conclusões e proposições para trabalhos futuros.

A partir da análise macro do contexto das publicações estudadas, pode-se concluir que a frequência de publicações sobre o assunto tem apresentado tendência de aumento nos últimos anos, apesar de a quantidade anual ainda ser pequena. Os trabalhos sobre DA de plásticos são majoritariamente de autoria de universidades. Além disso, a Europa é o continente com o maior número de artigos científicos publicados relativos ao tema, correspondendo a 55% do montante total.

Os plásticos estudados pelos autores puderam ser classificados em três origens principais: fóssil, não-fóssil e blenda entre fóssil e não-fóssil. Foi possível concluir que as blendas entre fóssil e não-fóssil e os plásticos não-fósseis apresentaram eficiência da degradação maior em comparação com os plásticos fósseis. O volume de biogás gerado foi similar para as três origens, enquanto o volume de metano produzido foi maior no caso dos plásticos não-fósseis.

O único pré-tratamento realizado no plástico nos estudos encontrados foi do tipo físico. Como em muitos artigos foi estudado o processo sem nenhum pré-tratamento, foi possível realizar a comparação. Pode-se concluir que o pré-tratamento físico acarretou uma maior eficiência da DA, maior produção de biogás e maior geração de metano, em relação aos casos em que não foi realizado um tratamento prévio no plástico.

Os inóculos utilizados pelos autores estudados foram lodo oriundo de tratamento de esgoto e lodo proveniente de tratamento de resíduos orgânicos. Concluiu-se que a eficiência da DA, assim como a produção de biogás e de metano, foram maiores quando do uso de lodo de resíduos orgânicos em comparação ao lodo de tratamento de esgoto. Quanto à adição de nutrientes, os estudos foram agrupados em três casos: adição de resíduos orgânicos, adição de solução conhecida e sem adição de nutrientes. Tanto a eficiência da DA quanto a produção de metano apresentaram resultados melhores para a adição de resíduos orgânicos. Em relação à razão de massa substrato/co-substrato, os autores testaram razões abaixo de 1%, entre 1% e 10% e de 25%. As razões abaixo de 1% e entre 1% e 10% resultaram em digestões mais eficientes comparado à razão de 25%. As produções de biogás e de metano foram maiores para a faixa de razões entre 1% e 10%.

As condições experimentais avaliadas foram o regime do experimento, o volume do biorreator, o tempo do experimento e a faixa de temperatura utilizada. Quanto ao regime do experimento, os trabalhos avaliados foram realizados em regime batelada e batelada alimentada e concluiu-se que a eficiência da DA e a produção de metano foram maiores no caso da batelada alimentada. Em relação aos volumes dos biorreatores utilizados, estes foram classificados quanto a sua escala em: escala de bancada e escala semi-piloto. Pode-se concluir que a eficiência da DA foi maior para a escala de bancada, porém a produção de metano foi maior no caso da escala semi-piloto. A geração de biogás foi semelhante para ambas as escalas. Quanto ao tempo dos experimentos, os trabalhos avaliados realizaram a DA em três faixas de tempo diferentes: até 35 dias, de 50 a 80 dias e acima de 120 dias. Pode-se concluir que a eficiência da DA, assim como a produção de biogás e de metano, foram maiores quando

o tempo da DA foi acima de 120 dias. Em termos de temperatura, os artigos realizaram os experimentos nas faixas mesofílica e termofílica. Concluiu-se que a faixa termofílica correspondeu a uma maior eficiência do processo, além de maiores volumes de biogás e de metano. A partir de todos os parâmetros avaliados e levando-se em consideração a importância de se degradar plásticos de origem fóssil devido a toda problemática que os envolve, a Tabela 6 exhibe o ponto ótimo da DA, ou seja, o conjunto de parâmetros responsáveis pela máxima eficiência e produção de biogás/metano.

Tabela 6: Condições do ponto ótimo da digestão anaeróbia de plásticos

Parâmetro	Condição
Origem do plástico	Blenda entre plástico fóssil e não-fóssil
Tipo de pré-tratamento	Físico
Tipo de inóculo/co-substrato	Lodo oriundo de tratamento de resíduos orgânicos
Nutrientes	Adição de resíduos orgânicos
Razão de massa substrato/co-substrato	Entre 1% e 10%
Regime do experimento	Batelada alimentada
Volume do biorreator	Escala de bancada
Tempo do experimento	Acima de 120 dias
Faixa de temperatura	Termofílica

Com base em todas as análises feitas nos níveis macro, meso e micro para a elaboração do *roadmap* deste trabalho, verificou-se que existem oportunidades de melhoria para trabalhos futuros referentes à técnica de DA de plásticos. Não foram encontradas patentes relacionadas ao assunto, sendo esta uma lacuna ainda a ser desenvolvida. Por outro lado, é importante que mais países desenvolvam publicações em relação ao tema, para que assim haja disseminação da tecnologia. Além disso, notou-se a ausência de países relevantes na comunidade científica, como a China, o que exemplifica o potencial de desenvolvimento da DA para plásticos. Percebe-se, também, em relação ao tipo de pré-tratamento, a necessidade de se testar outros tipos, que não os físicos, pois somente estes foram realizados pelos autores. Em relação ao regime do experimento e ao volume do biorreator, observa-se que ambos os parâmetros precisam ser desenvolvidos, visto que ainda estão em uma escala laboratorial, o que dificulta a aplicação por parte da indústria. Por fim, é importante ressaltar a necessidade de avanço nos estudos de DA utilizando-se somente plásticos fósseis como substrato, com o objetivo de aumentar a eficiência da DA e a produção de biogás/metano para estes casos.

Além do já exposto, sugere-se, como trabalho futuro, a realização de análise multivariável entre os diversos parâmetros avaliados no processo de DA, com o objetivo de se obter conclusões mais assertivas acerca da influência tanto na eficiência de degradação quanto na produção de biogás e de metano. Na construção do *roadmap*, também se observou que os autores mediram a eficiência da DA através de indicadores diferentes entre si, o que impossibilitou a realização de algumas discussões. Por isso, sugere-se a padronização na medição experimental dos indicadores de eficiência da DA, de modo a proporcionar melhores análises comparativas.

REFERÊNCIAS

- ABOU-ZEID, D. M.; MÜLLER, R. J.; DECKWER, W. D. Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions. **Journal of Biotechnology**, v. 86, n. 2, p. 113–126, 2001.
- AGUSTINI, C. B. **Isolamento microbiano na biodegradação de resíduos de curtumes**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- AGUSTINI, C. B. **Co-digestão anaeróbia de resíduos sólidos de curtumes**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- BANDINI, F. et al. Fate of biodegradable polymers under industrial conditions for anaerobic digestion and aerobic composting of food waste. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 9, p. 2539–2550, 2020.
- BECKER, M. R. **Preparação e avaliação das propriedades de misturas de polietileno de baixa densidade com polietileno linear de baixa densidade**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BRASIL. **Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 22 mai. 2021.
- CARDOSO FILHO, G. T. **Avaliação da gestão de resíduos sólidos urbanos na cidade de Parintins/AM: desafios e oportunidades à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.
- DIAS, J. DE C. **Rotas de destinação dos resíduos plásticos e seus aspectos ambientais: uma análise da potencialidade da biodegradação**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- FONSECA, C. C. **Produção e utilização do biopolímero poli(hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.
- GOMES, G. D. S. **Avaliação do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e proposição de melhorias, Laguna, Santa Catarina, Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Osório, 2020.
- GÓMEZ, E. F.; MICHEL, F. C. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 12, p. 2583–2591, 2013.
- GONÇALVES, A. S. **Caracterização e distribuição espaço-temporal dos macrorresíduos sólidos encontrados na praia de Cidreira, RS, Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso -

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Osório, 2020.

HAUBERT, G. **Redução da massa de resíduos sólidos de curtumes ao longo da biodegradação**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ICAZA, D.; BORGE-DIEZ, D.; GALINDO, S. P. Proposal of 100% renewable energy production for the City of Cuenca- Ecuador by 2050. **Renewable Energy**, v. 170, p. 1324–1341, 2021.

JAHNO, V. D. **Síntese e caracterização do poli (L-ácido láctico) para uso como biomaterial**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1737–1744, 2011.

LI, B. et al. Microplastics in fishes and their living environments surrounding a plastic production area. **Science of the Total Environment**, v. 727, 2020.

LOHMANN, G. **Análise de fluxo de carbono, nitrogênio e fósforo e avaliação de impactos ambientais em aterro sanitário e na compostagem de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MARTINS, A. L. V. C. V. **Avaliação da biodegradação do poli(succinato de butileno) em solo de compostagem**. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MENEZES, F. C. **Eletrofiação de nanofibras poliméricas para uso em engenharia tecidual**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MOHEE, R. et al. Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. **Waste Management**, v. 28, n. 9, p. 1624–1629, 2008.

MONTEIRO, M. J. **Sistema logístico reverso para destinação final adequada de resíduos sólidos urbanos, sob a visão do pensamento sistêmico**. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, 2017.

MOREIRA, V. A. **Elaboração de um roadmap tecnológico: estudo de caso de elastômeros manufaturados a partir de matérias-primas renováveis**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NARANCIC, T. et al. Biodegradable plastic blends create new possibilities for end-of-life management of plastics but they are not a panacea for plastic pollution. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 18, p. 10441–10452, 2018.

PATINVOH, R. J. et al. Innovative pretreatment strategies for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 13–24, 2017.

PETRY, A. **Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PRADO, M. A. R. DO; OLIVEIRA, E. F. T. DE. **O protagonismo chinês na produção científica global e sua relação estratégica com os BRICS**. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação, 17. , 2016, Bahia. Disponível em: <http://www.ufpb.br/evento/index.php/enancib2016/enancib2016/paper/viewFile/4109/2540>. Acesso em: 24 mai. 2021.

ROLIM, A. M. **A reciclagem de resíduos plásticos pós-consumo em oito empresas do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RUSSO, M. A. L. et al. The anaerobic degradability of thermoplastic starch: polyvinyl alcohol blends: potential biodegradable food packaging materials. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 5, p. 1705–1710, 2009.

SANTOS, C. E. DOS. **Potencial de desenvolvimento de biocombustível produzido a partir de bio-óleo da pirólise de papel moeda descartado**. Dissertação de Mestrado - Universidade do Vale do Rio do Sinos, São Leopoldo, 2014.

SHRESTHA, A.; VAN-EERTEN JANSEN, M. C. A. A.; ACHARYA, B. Biodegradation of bioplastic using anaerobic digestion at retention time as per industrial biogas plant and international norms. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

ŠMEJKALOVÁ, P. et al. Anaerobic digestion of aliphatic polyesters. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 10, p. 2386–2393, 2016.

WASSERMANN, A. I. **Processamento e características mecânicas de resíduos plásticos misturados**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WENZEL, B. M. **Tratamento térmico de resíduos da indústria calçadista: estudo da gaseificação, tratamento dos gases e aproveitamento das cinzas**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ZHANG, W.; HEAVEN, S.; BANKS, C. J. Degradation of some EN13432 compliant plastics in simulated mesophilic anaerobic digestion of food waste. **Polymer Degradation and Stability**, v. 147, p. 76–88, 2018.