

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES EM PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS COMO PERSPECTIVA DE FONTE DE ENERGIA E REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL

Marcio Ronald Sella
sellamr@hotmail.com

Arthur Ribeiro Torrecilhas

Arthurribeirotorrecilhas@gmail.com

MELINA APARECIDA PLASTINA CARDOSO

melina_cardoso@msn.com

Marcia Lopes de Moraes Sella

sella_mlm@hotmail.com

RAFAEL MISAEL VEDOVATTE

rmvedovatte@outlook.com



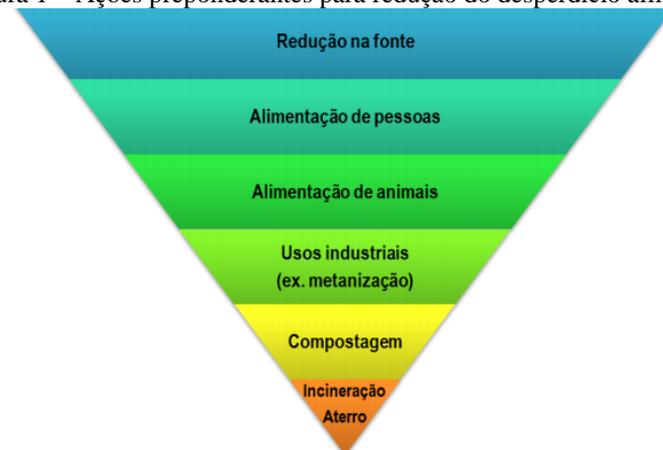
As questões relacionadas às perdas e ao desperdício de alimentos nos países em desenvolvimento são atualmente consideradas um importante fator ameaçador para sistemas de desenvolvimento sustentável e de gestão de resíduos. Resíduos alimentares onipresentes em todos os cantos do mundo servem como uma excelente fonte de valor acrescentado produtos devido ao elevado conteúdo orgânico. A utilização de resíduos orgânicos para a produção de biocombustíveis é considerada uma abordagem plausível para alcançar melhor segurança energética, controle de poluição, economia de processo, produção sustentável e melhorias sociais. Esta revisão sintetiza o conhecimento disponível na utilização de tecnologias para conversão de resíduos alimentares presentes nos resíduos sólidos urbanos (RSU) em energia envolvendo tecnologias biológicas (por exemplo, a digestão anaeróbia) e discute as vantagens, bem como os principais desafios associados a produção do biogás através dos resíduos alimentares. Por fim fornece direcionamento para futuras pesquisas envolvendo a utilização mais efetiva do desperdício de alimentos para geração de energia renovável.

Palavras-chave: Biogás. Desperdício de alimentos. Resíduos sólidos urbanos. Transferência de tecnologia

1. Introdução

A crescente preocupação com o meio ambiente, verificada ao longo dos últimos anos, tem servido de base para que sociedades e organizações questionem os modelos de exploração dos recursos naturais, abordando não somente a intensidade como são explorados, como também as consequências ambientais decorrentes de sua utilização (CORTEZ, 2011). Aliado a exploração dos recursos naturais escassos e seus impactos ambientais, existe também a preocupação de cunho social e econômico que se refere as perdas e ao desperdício de alimentos. Os alimentos orgânicos possuem muito líquido e quando amontoados nos lixões esses líquidos escorrem, carregam outros efluentes e dão origem ao chorume. O chorume gerado absorve metais pesados, se torna altamente tóxico e polui o solo ou qualquer tipo de trecho de água que estiver no seu caminho (CHIABI, 2017). Com isso é relevante a adoção de práticas que visem o adequado gerenciamento desses resíduos (FAO, 2014) conforme sinalizado na figura 1.

Figura 1 – Ações preponderantes para redução do desperdício alimentar



Fonte: Adaptado de FMI/GMA/NRA (2014)

O aproveitamento integral dos alimentos, reutilização para alimentação animal, são algumas alternativas de reaproveitamento, desde que atenda as restrições da legislação de nutrição animal e de saúde pública vigentes (BRASIL, 2009). Com isso o manejo de resíduos tem recebido maior atenção e diversas alternativas são procuradas na tentativa de tratar os resíduos e aproveitar o potencial fertilizante ou de geração de energia a partir destes, sendo que o fator energia é o que mais se destaca, uma vez que interfere diretamente nos gastos finais de produção.

Essa constatação motivou pesquisas fundamentais sobre tecnologias que ajudam a recuperar alguns combustíveis valiosos do lixo alimentar para reduzir a carga ambiental de seu descarte,

evitar o esgotamento dos recursos naturais, minimizar os riscos para a saúde humana e manter um equilíbrio geral no ecossistema.

Com a utilização de biodigestores, os resíduos alimentares tornam-se fonte de geração de energia, visto que a partir da biodigestão anaeróbia da matéria orgânica, obtém sua conversão em gás metano, com alto poder energético agregando valor ao resíduo e diminuindo os custos com o tratamento (VIDAL, 2014).

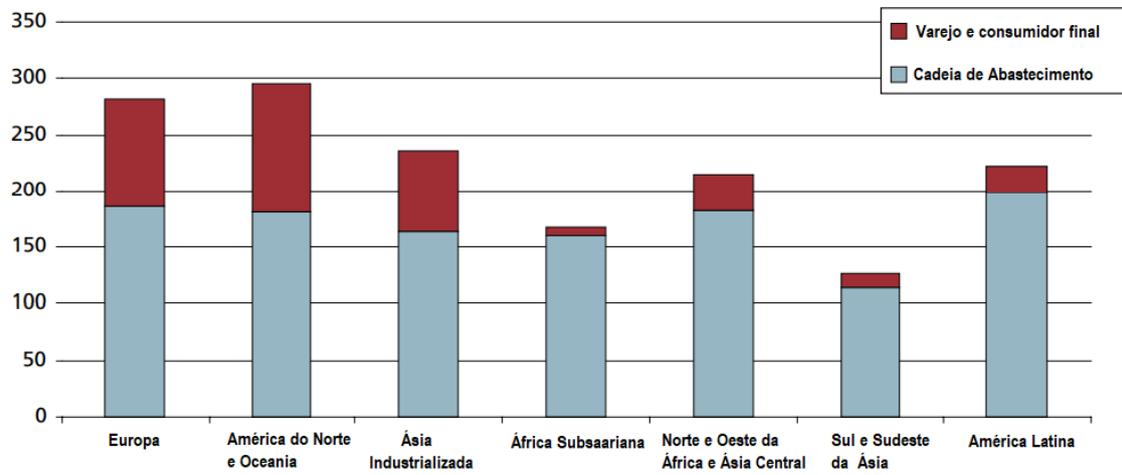
Embora tenha havido uma quantidade considerável de pesquisas focadas na conversão dos resíduos alimentares em energia renovável, faltam revisões abrangentes da literatura. McKendry (2002) revisou várias tecnologias de conversão de biomassa em energia, mas não houve ênfase específica no uso de resíduos alimentares como matérias-primas. Sendo assim, esta revisão fornecerá insights sobre o método biológico para conversão da biomassa originada de resíduos sólidos urbanos (RSU), mais precisamente os resíduos alimentares em biogás através da digestão anaeróbia.

2. Perdas e desperdício de alimentos

Segundo relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura - FAO (2013), cerca de um terço dos alimentos produzidos para consumo humano, aproximadamente 1,3 bilhão de toneladas, são desperdiçados anualmente. Estima-se que a emissão de gases de efeito estufa (GEE) seja equivalente a 3,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂).

A redução dos índices de perdas e desperdício de alimentos ainda é uma questão essencial em todo o mundo. Ainda segundo a FAO, o primeiro termo se refere à redução da disponibilidade de alimentos para consumo humano ao longo da cadeia de abastecimento alimentar, em especial nas fases de produção, pós-colheita e processamento. O órgão sinaliza que a perda prevalece nos países em desenvolvimento. Já o desperdício ocorre no final da cadeia alimentar (varejo e consumo), e estaria mais associado às nações desenvolvidas conforme figura 2.

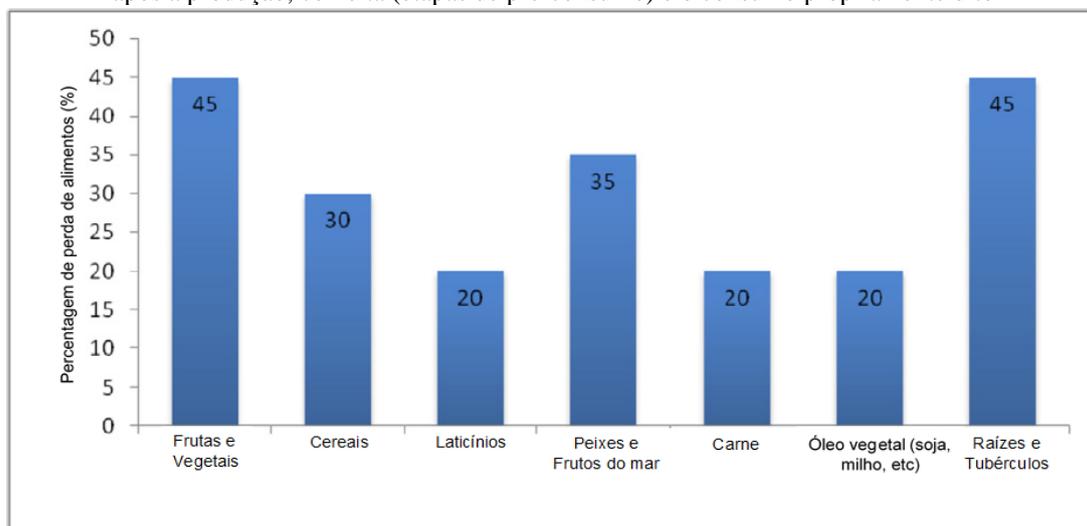
Figura 2 – Perdas e desperdício de alimentos per capita nos estágios de consumo e pré consumo em diferentes regiões (Kg/ano)



Fonte: FAO (2011)

Dentre os alimentos que acumulam os maiores percentuais de perdas e desperdícios e que geram volumes significativos de resíduos alimentares, destacam-se as frutas, os vegetais, as raízes e tubérculos com 45% de perdas e desperdício de acordo com a figura 3 a seguir.

Figura 3 - Percentagem por categoria de alimentos perdidos e desperdiçados após a produção, colheita (etapas de pré-consumo) e o consumo propriamente dito



Fonte: FAO (2011)

As perdas e o desperdício de alimentos resultam em resíduos alimentares que contêm baixos níveis de sólidos suspensos e baixas concentrações de materiais dissolvidos, que causam não apenas desconforto visual pela produção de diferentes gases de moldagem e odores desagradáveis, mas também causam impactos ambientais adversos devido à lixiviação em aterros sanitários. Estes resíduos levam a um desperdício de recursos usados na produção e

distribuição de alimentos, incluindo terra, água, energia, fertilizantes, pesticidas, trabalho e capital.

O desperdício de alimentos representa uma fração significativa dos resíduos sólidos urbanos (RSU). O gerenciamento adequado e a reciclagem de grandes volumes de resíduos alimentares são necessários para reduzir seus encargos ambientais e minimizar os riscos para a saúde humana

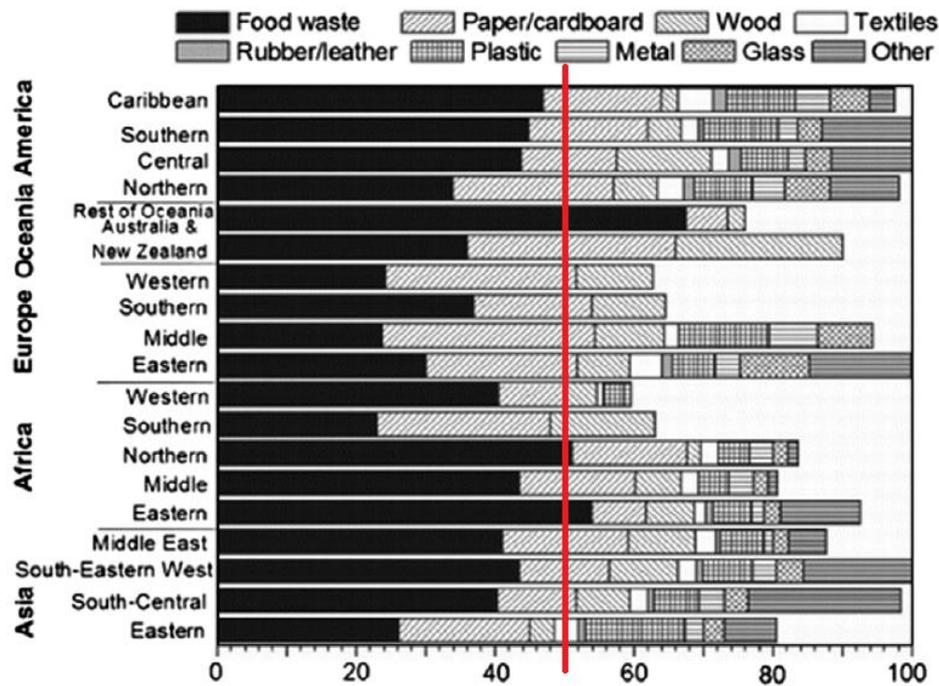
3. Resíduos Sólidos Urbanos - RSU

O avanço da urbanização somado à crescente demanda por bens de consumo são fatores que tem favorecido o progressivo aumento da geração de RSU. Os RSU são considerados como um dos maiores problemas globais entre os diferentes tipos de resíduos (ICLEI, 2018).

Sipra et al. (2018) sinalizam o volume anual de aproximadamente 1,9 bilhão de toneladas de RSU produzidos em todo o mundo, resultando em uma produção de 218 Kg/pessoa/ano. De acordo com a classificação da ABNT, os RSU são basicamente constituídos por resíduos domiciliares, limpeza pública e de estabelecimentos comerciais. Bidone e Povinelli (1999), complementam que nas residências ocorre o descarte de restos de frutas, legumes, alimentos em geral, plásticos, metais diversos, vidros, papéis e embalagens em geral. Na capinação, varrição das vias públicas, praças e jardins há restos de poda de galhos, folhas, papéis diversos, restos de cigarros e animais mortos; nos estabelecimentos comerciais ocorre também o descarte de embalagens em geral, restos de refeições, papéis e vidros; nas feiras livres ocorre a produção de resíduos hortifrutigranjeiros.

A composição dos RSU varia significativamente de país para país e de município para município (figura 4). Tal variação depende principalmente do estilo de vida, situação econômica, regulamentos de gerenciamento de resíduos e estrutura industrial. A quantidade e a composição dos resíduos sólidos urbanos são fundamentais para a determinação do manejo e manejo adequado desses resíduos.

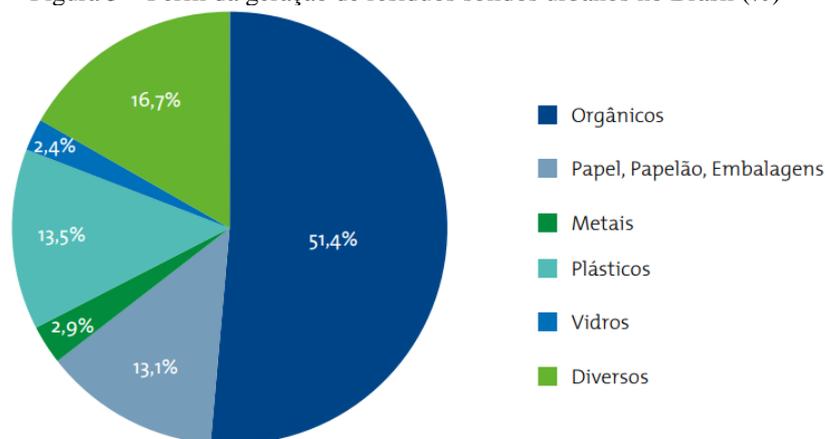
Figura 4 - A porcentagem de diferentes tipos de resíduos nos RSU em diferentes regiões e países



Composição de resíduos em RSU em diferentes regiões e países (% de resíduos úmidos)
 Fonte: IPCC, 2006

No Brasil, foram gerados cerca de 78,4 milhões de toneladas de RSU em 2017 (ABRELPE, 2018) e o perfil da composição dos RSU é apresentado na figura 5 (IPEA, 2012).

Figura 5 – Perfil da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil (%)



Fonte: IPEA (2012)

Nos RSU, destaca-se a parcela dos resíduos sólidos orgânicos – RSO, que representa cerca de 40 a 54%, em massa, destes resíduos (IBGE, 2010; REZENDE et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2016). Os RSO são constituídos, principalmente, por restos de alimentos (SIQUEIRA et al., 2016).

As alternativas geralmente adotadas para o gerenciamento dos resíduos domiciliares no Brasil incluem em maior proporção a disposição final. As tecnologias que preveem o aproveitamento energético dos resíduos ainda possuem pouca expressividade, como pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 – Destinação final dos resíduos sólidos domiciliares e públicos no Brasil em 2015

Tipo de unidade de processamento	%
Aterro Sanitário	66,3%
Aterro Controlado	16,5%
Lixão	11,4%
Unidades de triagem	3,9%
Unidades de compostagem	0,5%

Fonte: Adaptado de EDWIGES (2017)

Estimativas recentes do IPEA (2017), apontam para uma geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil em torno de 160 mil toneladas diárias - 30% a 40% desse montante são considerados passíveis de reaproveitamento e reciclagem. O reaproveitamento dos RSU é considerado atrativo, a destacar a produção de biogás, passível de aproveitamento energético. A experiência tem demonstrado que a metanização do resíduo alimentar é uma rota viável para o tratamento e a valorização desse resíduo (ZHANG et al, 2014; FMI/GMA/NRA, 2014).

4. Produção de Bioenergia a partir da fração orgânica dos RSU

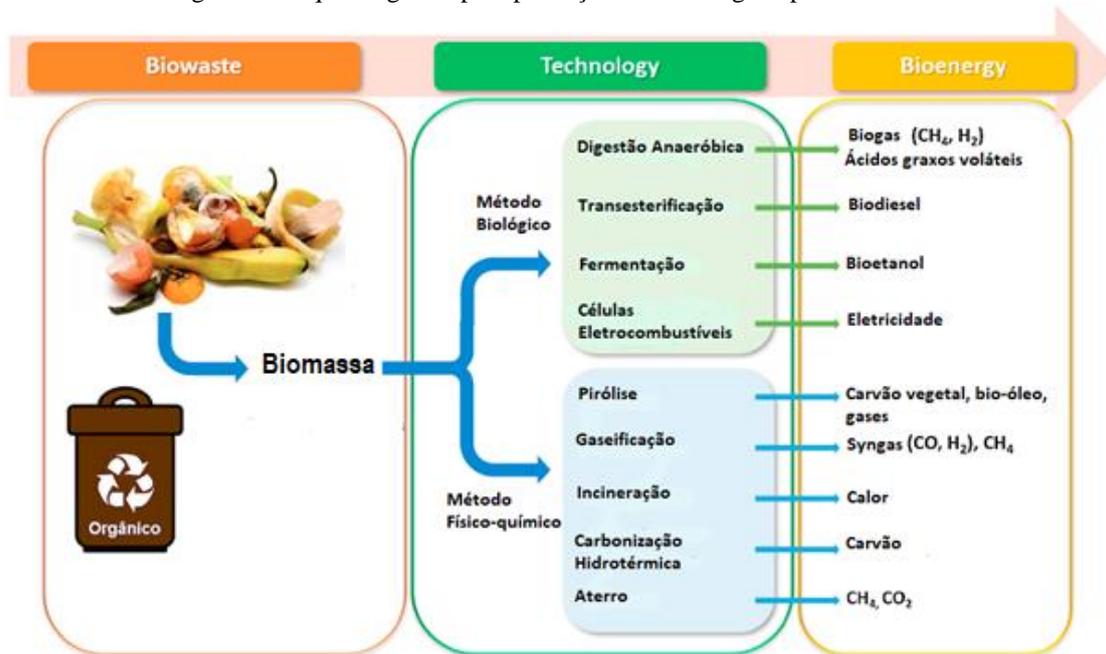
O setor de tratamento e disposição de resíduos é o segundo maior responsável pela emissão de gás metano no Brasil, precedido apenas pelas atividades agropecuárias. Estima-se ainda que a decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) seja responsável por 62,3% das emissões de CH₄ no país (OC/SEEG, 2014). Esses resíduos compostos por celulose, hemicelulose, amido, proteínas e lipídios podem atuar como matérias-primas baratas para a produção biotecnológica de energia, sem competir com a demanda cada vez maior por alimentos.

Vários métodos biológicos (digestão anaeróbia, esterificação, fermentação e células eletrocombustível) e métodos físico-químicos (pirólise, gaseificação, incineração e aterros sanitários) são praticados para transformar os resíduos em energia (BATHIA et al., 2017; SHEN et al., 2018) conforme indicado na figura 6.

Tratar estes resíduos biológicos com várias tecnologias para produção de bioenergia (BtB) é uma abordagem viável para gerar energia (WANG et al., 2018; QURESHI et al. 2017; BATHIA

et al. 2017). Outro aspecto é o valor do mercado global da tecnologia BtB que é de aproximadamente US \$ 25,32 bilhões e deverá aumentar em US \$ 40 bilhões até 2023.

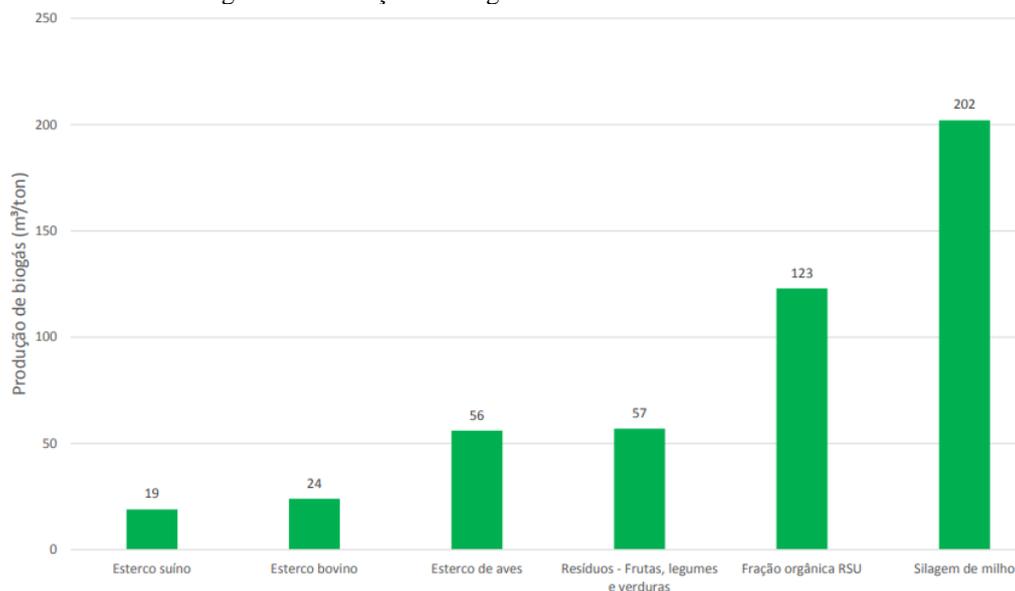
Figura 6 - Esquema global para produção de bioenergia a partir dos RSU.



Fonte: Adaptado de Bhatia et al. (2018)

Kumar et al. (2010) afirmam que a composição dos resíduos fornecerá informações valiosas sobre a utilidade do material para a produção de biogás. Com isso na figura 7 a seguir é sinalizado que a fração orgânica de RSU ocupa a 2ª. posição na produção de biogás, seguido dos resíduos de frutas, legumes e verduras.

Figura 7 - Produção de biogás de acordo com o substrato



Fonte: Adaptado de Bellaver (2010)

5. Metodologia

Este estudo baseou-se de uma revisão sistemática da literatura efetuada por meio de uma pesquisa quantitativa sem metanálise. O propósito deste levantamento foi detectar pesquisas direcionadas às tecnologias existentes para conversão de resíduos alimentares presentes nos resíduos sólidos urbanos (RSU) em biogas.

5.1 Execução da revisão sistemática

O trabalho limitou-se a pesquisa via portal de periódicos (CAPES/MEC), excluindo qualquer meio físico de conteúdo. Determinou-se que as bases de dados utilizadas para a pesquisa seriam: **Scopus**, **ScienceDirect** e **IEEE Xplore**, devido a relevância de suas publicações em âmbito internacional.

As palavras-chaves definidas foram utilizadas no idioma inglês, sendo elas: *technology transfer*, *food waste*, *biogas* e *municipal waste*. A técnica de busca booleana foi aplicada, combinando-se as palavras-chave nas referidas bases de dados, resultando nas seguintes expressões:

- “biogas” AND “transfer technology”
- “biogas” AND “food waste”
- “biogas” AND “municipal waste”

Como critérios de inclusão foram definidos:

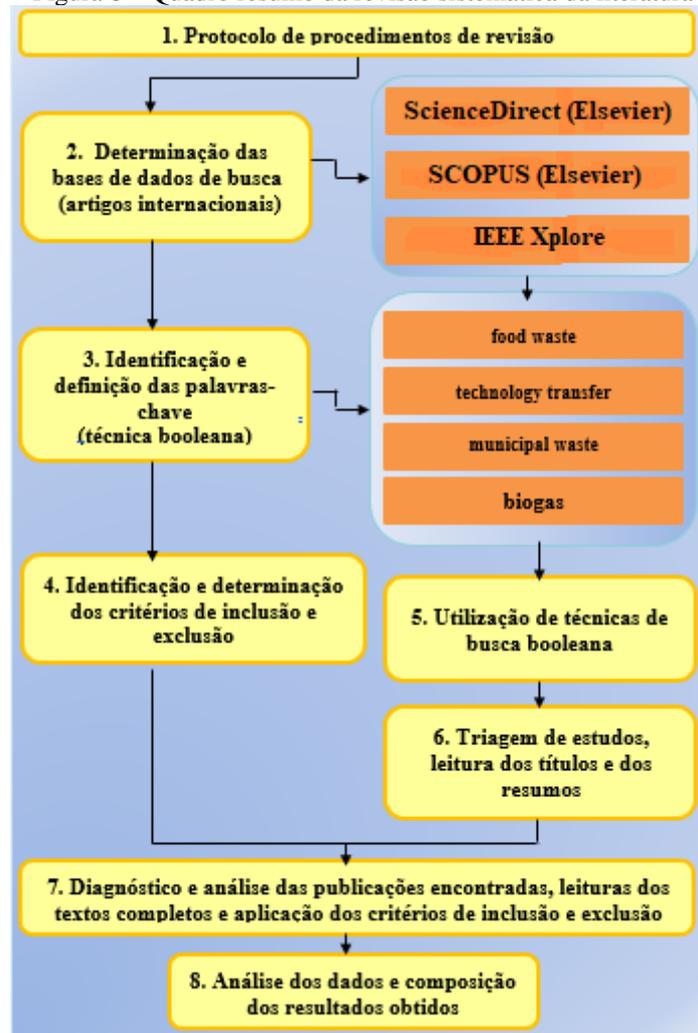
- a) Publicações a partir de 2014;
- b) Artigos na íntegra publicados em *journals* e revistas;
- c) Artigos no idioma em inglês;
- d) Estudos direcionados especificamente a produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos resultante dos resíduos alimentares.

Como critérios de exclusão foram definidos:

- a) Artigos duplicados;
- b) Artigos não disponíveis para acesso gratuito “open access”;
- c) Artigos não publicados no idioma em inglês;
- d) Artigos com publicação anterior a 2014.

A figura 8 ilustra resumidamente o procedimento de revisão sistemática e a tabela 2 o resultado dos artigos encontrados por base de dados.

Figura 8 – Quadro resumo da revisão sistemática da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Resultado da busca nas bases de dados

Expressões de busca	Science Direct	SCOPUS	IEEE Xplore
“biogas” AND “technology transfer”	30	4	0
“biogas” AND “food waste”	264	115	1
“biogas” AND “municipal waste”	154	31	0
Total	448	150	1

Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 2 acima indica que foram encontrados 599 artigos na sua totalidade, sendo 150 na base *Scopus*, 448 na base *ScienceDirect* e apenas 1 artigo na base *IEEE Xplore*. Destes foram selecionados 31 artigos para a leitura em sua íntegra. Após a leitura dos textos completos, houve a eliminação de 11 artigos devido a não correspondência com os critérios de inclusão.

Desta forma foram selecionados 20 artigos como sendo relevantes para realização deste estudo conforme indicado no quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – 20 artigos selecionados no estudo

Artigo	Autor(es)	Publicação	Ano
<i>An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes</i>	A. Nayak, Brij Bhushan	<i>Journal of Environmental Management</i>	2019
<i>Conversion of food and kitchen waste to value-added products</i>	Raveendran Sindhu, Edgard Gnansounou, Sharrel Rebello, Parameswaran Binod, Sunita Varjani, Indu Shekhar Thakur, Ramkumar B. Nair, Ashok Pandey	<i>Journal of Environmental Management</i>	2019
<i>Valorisation of the selectively collected organic fractions of municipal solid waste in anaerobic digestion</i>	Katarzyna Bernat, Agnieszka Cydzik-Kwiatkowska, Magdalena Zielińska, Irena Wojnowska-Baryła, Justyna Wersocka	<i>Biochemical Engineering Journal</i>	2019
<i>Biowaste-to-bioenergy using biological methods – A mini-review</i>	Shashi Kant Bhatia, Hwang-Soo Joo, Yung-Hun Yang	<i>Energy Conversion and Management</i>	2018
<i>Co-Digestion of Napier Grass with Food Waste and Napier Silage with Food Waste for Methane Production</i>	Suriyan Boonpiyo, Sureewan Sittijunda, Alissara Reungsang	<i>Energies</i>	2018
<i>Innovative developments in biofuels production from organics waste materials: A review</i>	Jiju Lizy Stephen, Balasubramanian Periyasamy	<i>Fuel</i>	2018
<i>Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts</i>	Ayesha Tariq Sipra, Ningbo Gao, Haris Sarwar	<i>Fuel Processing Technology</i>	2018

Artigo	Autor(es)	Publicação	Ano
<i>Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization</i>	Hussein I. Abdel-Shafy, Mona S.M. Mansour	<i>Egyptian Journal of Petroleum</i>	2018
<i>Sustainable development of Romanian cities through biogas production from municipal wastes and application in co-combustion processes</i>	Cioabla, A.E., Popescu, F., Trif-Tordai, G., Dumitrel, A.-G., Oprisa-Stanescu, P.-D., Lelés, D.	<i>Journal Thermal Science</i> <i>Serbian Society of Heat Transfer Engineers</i>	2018
<i>Anaerobic digesto of food waste – challenges and opportunities</i>	Fuqing Xu, Yangyang Li, Xumeng Ge, Liangcheng Yang, Yebo Li	<i>Bioresource Technology</i>	2017
<i>A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste</i>	Spyridon Achinas, Vasileios Achinas, Gerrit Jan Willem Euverink	<i>Engineering</i>	2017
<i>Anaerobic digestion of solid agroindustrial waste in semi-continuous mode: Evaluation of mono-digestion and co-digestion systems</i>	Frantseska-Maria Peleara, Evangelos Gidaracos	<i>Waste Management</i>	2017
<i>Biomass resources and potential of anaerobic digestion in Indian scenario</i>	Paul Thomas, Nirmala Soren, Nelson Pynadathu Rumjith, Jake George James, M.P. Saravanakumar	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2017
<i>Renewable energy exploitation in the small island. developing state of Mauritius: Current practice and future potential</i>	Zumar M.A. Bundhoo	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2017
<i>Wastes and biomass materials as sustainable renewable energy resources for Jordan</i>	Zayed Al-Hamamre, Motasem Saidan, Muhanned Hararah, Khaled Rawajfeh, Hussam E. Alkhasawneh, Mohammad Al-Shannag	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2017
<i>Liquid biofuels from food waste: Current trends, prospect and limitation</i>	Sanjib Kumar Karmee	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2016
<i>An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective</i>	Ngoc Bao Dung Thi, Gopalakrishnan Kumar, Chiu-Yue Lin	<i>Journal of Environmental Management</i>	2015
<i>Barriers and opportunities of biogas dissemination in Sub-Saharan Africa and lessons learned from Rwanda, Tanzania, China, India, and Nepal</i>	Gloria V. Rupf, Parisa A. Bahri, Karne de Boer, Mark P. McHenry	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	2015

Artigo	Autor(es)	Publicação	Ano
<i>Food waste generation and industrial uses: A review</i>	Francesca Girotto, Luca Alibardi, Raffaello Cossu	<i>Waste Management</i>	2015
<i>Food-waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions</i>	Thi Phuong Thuy Pham, Rajni Kaushik, Ganesh K. Parshetti, Russell Mahmood, Rajasekhar Balasubramanian	<i>Waste Management</i>	2014

Fonte: Elaborado pelo autor

6. Discussão

Resíduos alimentares constituídos principalmente de materiais orgânicos, são uma boa opção para a digestão anaeróbia (AD) na geração de energia alternativa (tabela 3).

Tabela 3 - Produção de biogás a partir de diferentes bio-resíduos provenientes de várias fontes.

Substrato	Comentários	Biogás (l/d)	Metano (l/kg)	Referências
Co-digestão Anaeróbica				
Resíduo de frutas e vegetais	O efluente de matadouro provou ser o melhor co-substrato em comparação com resíduos de peixe e lamas activadas por resíduos	2,5	-	Bouallagui et al. (2009).
Resíduos Sólidos Municipais (RSU)	Resíduos de gordura, óleo e graxa de uma estação de tratamento de esgoto foram avaliados para melhorar a produção de biogás e metano	13,6	350	Martin-Gonzalez et al. (2010)
Resíduos sólidos de batata	Co-digestão com beterraba aumenta a produção de metano em 31-62%	1,63	680	Parawira et al. (2004)
Resíduos de alimentos (desperdício)	A co-digestão com palha na proporção de 5: 1 (resíduo de alimentos: palha) aumentou a produção de biogás em 150%	72	392	Yong et al. (2015)
Resíduos de alimentos (desperdício)	O desperdício de alimentos é deficiente em vários íons metálicos; a co-digestão com lixiviado fresco de uma instalação municipal de incineração de resíduos sólidos pode fornecer esses nutrientes e melhorar a produção de biogás a partir do lixiviado	6,6	506	Zhang et al. (2015)
Resíduos de cozinha	Co-digestão com resíduos de frutas e vegetais numa proporção de 8: 5 (desperdício de cozinha: legumes / resíduos de frutas)	3,24	725	Wang et al. (2014)
Resíduos Sólidos Municipais (RSU)	Partes pré-tratadas de 20 mm de resíduos sólidos urbanos co-digeridos com a fração líquida da carbonização hidrotérmica do lodo de esgoto resultam em aumento de 2,4 vezes na produção de metano	-	453	De la Rubia et al. (2018)
Resíduos de alimentos (desperdício)	A co-digestão com esterco bovino aumenta a capacidade e permite uma alta carga orgânica sem controle de pH	13	388	Zhang et al. (2013)

Fonte: Bhatia et al. (2018)

É sinalizado que que 1 m³ de biogás da AD é equivalente a 21 MJ de energia, e pode gerar 2,04 kWh de eletricidade considerando os 35% de eficiência de geração (MURPHY et al., 2004). No entanto, o maior problema é a longa duração da reação microbiana, que geralmente está na faixa de 20 a 40 dias (Tempo de Retenção Hidráulica - HRT) conforme pode ser verificado na tabela 4.

Tabela 4 - Dados operacionais e de desempenho da digestão anaeróbia (AD) de resíduos alimentares.

Substrate	Co-substrate	Bioreactor type	Temp. (°C)	OLR (kg VS m ⁻³ day ⁻¹)	HRT (days)	CH ₄ yield (m ³ kg ⁻¹ VS)	Biogas yield (m ³ kg ⁻¹ VS)	%CH ₄	Energy content (MJ/m ³)	References
FVW	NA	Tubular reactor (18 L)	35	6% TS	20	NR	0.707	57	21.3	Bouallagui et al. (2003)
FVW	NA	2-phase system (18 L)	35/55	7.5 kg COD	20	NR	0.705/0.997	64/61	23.9/22.6	Bouallagui et al. (2005)
Food waste	NA	Batch system	50	6.8/10.5	10/28	0.348/0.435	NR	73	27.2	Zhang et al. (2007)
Food waste	NA	Batch system	35	NR	20-60	NR	0.49	NR	NA	Forster-Carneiro et al. (2008a)
FVW	NA/ Abattoir waste	ASBR (2 L)	55	1.24/2.56	20	NR	0.48/0.73	60/62	22.4/23.1	Bouallagui et al. (2009)
FVW	SW, manure	Semi cont. (2 L)	35	1.3	30	0.32	1.36	56	20.9	Alvarez and Lidén, (2008)
Food waste	NA	3-stage semi cont.	50	NR	12.4	NR	NR	67.4	25.1	Kim et al. (2006b)
Food waste	NA	Batch (1.1 L)	55	NR	90	0.18	NR	NR	NA	Forster-Carneiro et al. (2008b)

Resíduos de frutas e vegetais **FVW**, resíduo de matadouro **SW**, reator de tanque contínuo com agitação **CSTR**, reator de batelada sequencial anaeróbio **ASBR**, Semi cont. semi-contínuo, Temp. temperatura, taxa de carregamento orgânico de **OLR**, sólidos voláteis de **VS**, tempo de retenção hidráulica de **HRT**, demanda de oxigênio químico de **COD**, **NR** não relatado, **NA** não aplicável, conteúdo de energia de metano 37,3 MJ / m³.

Fonte: Zhang et al., 2007

Além disso, a alta concentração de amônia livre (NH₃) resultante da degradação de componentes protéicos ricos em nitrogênio pode ser tóxica à atividade específica de bactérias metanogênicas, causando sérios efeitos ao processo DA (Chen et al., 2008; Fountoulakis et al., 2008).

Ainda em relação a tabela 4 acima, observa-se que a co-digestão anaeróbia de lodo de esgoto e de compostos orgânicos altamente ricos, como resíduos alimentares, poderia aumentar o rendimento de CH₄ no biogás (Gómez et al., 2006; Kabouris et al., 2009). Diversos estudos mostraram que a co-digestão do resíduo alimentar e do lixo municipal ajuda a melhorar o rendimento do biogás em até 40–50% em comparação com a digestão do resíduo alimentar sozinho (Tabela 4).

Bouallagui et al. (2009) usaram águas residuais de abatedouros como um co-substrato em AD de resíduos de frutas e vegetais (FVW). Eles observaram uma remoção de Sólidos Voláteis entre 73% e 86% e um rendimento de biogás de cerca de 0,3 - 0,73 m³ kg⁻¹ VS adicionado a taxas de carregamento orgânico (OLRs) até 2,56 kg VS m³ dia⁻¹ no reator anaeróbio em batelada sequencial. Além disso, é relatado que a adição de águas residuais de matadouro à matéria-prima aumentou o rendimento do biogás até 51,5%.

Em outro estudo, Alvarez e Lidén (2008) examinaram um tratamento anaeróbico mesofílico semi-contínuo em um experimento usando combinações de resíduos de matadouro sólido, FVW e esterco em um processo de co-digestão. A co-digestão anaeróbia resultou em rendimento de CH₄ de 0,3 m³ Kg⁻¹VS adicionado, com % CH₄ entre 54% e 56% em OLRs em intervalo 0,3 - 1,3 kg VS m³ dia⁻¹. Eles concluíram que a co-digestão de vários tipos de resíduos, como esterco, resíduos sólidos de matadouro e FVW em um processo anaeróbico mesófilo, facilita a possibilidade de tratar os resíduos, que não podem ser tratados com sucesso separadamente.

7. Considerações finais

Resíduos alimentares que compõem a fração orgânica dos RSU, são uma boa opção para geração de energia alternativa através da DA. No entanto, altas concentrações de sal no lixo alimentar inibem a AD devido à presença de cátions como sódio, potássio, cálcio e magnésio (Chen et al., 2008). Para resolver este problema, a co-digestão de resíduos alimentares com baixo conteúdo de nitrogênio e resíduos lipídicos é preferencialmente usada para diminuir a concentração de nitrogênio, reduzindo assim os problemas associados ao acúmulo de compostos voláteis intermediários e altas concentrações de NH₃ (Castillo et al., 2006).

Esta revisão discute as vantagens, bem como os principais desafios associados a essas tecnologias. À luz dos recentes avanços tecnológicos e do impulso para usar o desperdício de alimentos como matéria-prima para reduzir a carga ambiental de seu descarte e atender às preocupações sobre recursos futuros, esta revisão identifica os principais conhecimentos em tecnologias de conversão de resíduos de alimentos em energia.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. ABRELPE. 2018. **Brasil produz mais lixo, mas não avança em coleta seletiva**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/brasil-produz-mais-lixo-mas-nao-avanca-em-coleta-seletiva/>>. Acesso em 9 mai. 2019.

ALVAREZ, Rene; LIDÉN, Gunnar, 2008. **Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste**. Renew. Energy 33 (4), p. 726–734.

BELLAVER, Cláudio. **Alternativa Sustentável para os Resíduos: Compostagem Acelerada**. Revista Graxaria Brasileira, São Paulo, v. JulAgo, p. 48, 01 set. 2010.

BHATIA, Shashi; JOO, Hwang-Soo; YANG, Yung-Hun. **Biowaste-to-bioenergy using biological methods** – A mini-review. *Energy Conversion and Management* 177 (2018) p. 640-660. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.090>.

BIDONE, Francisco Ricardo Andrade; POVINELLI, Jurandy. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999. 120p.

BOUALLAGUI, Hassib; RACHDI, Boutheina; GANNOUN, Hana; HAMDI, Moktar, 2003. **Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester**. *Bioresour. Technol.* 86, p. 85–89.

BOUALLAGUI, Hassib; RACHDI, Boutheina; GANNOUN, Hana; HAMDI, Moktar, 2005. **Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes**. *Process Biochem.* 40 (3–4), p. 989–995.

BOUALLAGUI, Hassib; RACHDI, Boutheina; GANNOUN, Hana; HAMDI, Moktar, 2009. **Mesófilo and thermophilic anaerobic co-digestion of abattoir wastewater and fruit and vegetable waste in anaerobic sequencing batch reactors**. *Biodegradation* 20 (3), p. 401–409.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília-DF. 2010.

_____. **Ministério do Meio Ambiente**. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. Institui Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Brasília-DF. 2009.

CASTILLO, M.E.F., CRISTANCHO, D.E., ARELLANO, A.V., 2006. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. *Waste Manage.* 26 (5), p. 546–556.

CHEN, Ye, CHENG, Jay J., CREAMER, Kurt S., 2008. **Inhibition of anaerobic digestion process: a review**. *Bioresour. Technol.* 99 (10), p. 4044–4064.

CHIABI, Lucas. **Principais problemas do lixo orgânico ir para o aterro**. *Ciclo Orgânico*, 2017. Disponível em: <http://blog.cicloorganico.com.br/sustentabilidade/principais-problemas-do-lixo-organico-ir-para-o-aterro/>. Acesso em: 06 maio de 2019.

CORTEZ, Cristiane Lima. **Estudo potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: Estudo de caso** – AES Eletropaulo. São Paulo: USP, 2011. 246p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2011.

DE LA RUBIA M. Angelis; VILLAMIL John A.; RODRIGUEZ Juan J.; BORJA Rafael; MOHEDANO Angel F. **Mesophilic anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with the liquid fraction**

from hydrothermal carbonization of sewage sludge. Waste Manage 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.046>.

EDWIGES, Thiago. **Biodigestão anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento**. Cascavel: UNIOESTE, 2017. 81p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2017.

FAO - Food and Agriculture Organization. **How to Feed the World in 2050**. Food and Agriculture Organization. 2009.

FAO - Food And Agriculture Organization. **Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention**. Organization of the United Nations. Italia, Roma. 2011.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Food wastage footprint: Impacts on natural resources**. Organization of the United Nations. p.63. Italia, Roma. 2013.

FMI - Food Marketing Institute; GMA - Grocery Manufacturers Association; NRA - National Restaurant Association. **The Food Waste Reduction Alliance: Best Practices & Emerging solutions**. v.1, 26p. Washington, DC, EUA. 2014

FOUNTOULAKIS, M.S.; DRAKOPOULOU, S.; TERZAKIS, S.; GEORGAKI, E.; MANIOS, T., 2008. **Potential for methane production from typical Mediterranean agro-industrial by-products**. Biomass Bioenergy 32 (2), p.155–161.

FOSTER-CARNEIRO, Tania, Perez, M., Romero, L.I., 2008b. **Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste**. Bioresour. Technol. 99 (15), p. 6763–6770.

GÓMEZ, X.; CUETOS, M.J.; CARA, J.; MORÁN, A., GARCIA, A.I., 2006. **Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes**. Renew. Energy 31 (12), p. 2017–2024.

KABOURIS, J.C.; TEZEL, U.; PAVLOSTATHIS, S.G.; ENGELMANN, M.; DULANEY, J.; GILLETTE, R.A.; TODD, A.C., 2009. **Methane recovery from the anaerobic codigestion of municipal sludge and FOG**. Bioresour. Technol. 100 (15), p. 3701–3705.

KIM, J.K.; OH, B.R.; CHUN, Y.N.; KIM, S.W., 2006b. **Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste**. J. Biosci. Bioeng. 102 (4), p. 328–332.

KUMAR. S. J.; SUBBAIAH K. V.; RAO. P. V. V., 2010. **“Waste to Energy: A Case Study of Eluru City, Andhra Pradesh International.”** Journal of Environmental Sciences 1 (2): p. 26-28.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. Brasília: IBGE, 2010. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

ICLEI - GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. **Emissões do setor de resíduos 2018**: Documento de Análise - Período 1990 - 2016, 2018. 75p. Fonte: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/06/Relatorios-SEEG-2018-Residuos-FINAL-v2.pdf>, acesso em: 30/10/2018.

Institute for Health Metrics and Evaluation – IHME. 2104. **Nearly one-third of the world’s population is obese or overweight, new data show**. Disponível em: <<http://www.healthdata.org/news-release/nearly-one-third-world%E2%80%99s-population-obese-or-overweight-new-data-show>>. Acesso em 11 mai. 2019.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Waste Generation, Composition and Management Data (Chapter 2).

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Brasília: IPEA, 2012. 82 p. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/imagens/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2019.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem**. Brasília: IPEA, 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296:apenas-13-dos-residuos-urbanos-no-pais-va-para-reciclagem&catid=1:dirur&directory=1>. Acesso em 14 mai. 2019.

MARTIN-GONZALEZ L.; COLTURATO L.F.; FONT X.; VICENTE T. **Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield**. Waste Manage 2010;30:1854–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.029>.

MCKENDRY, Peter, 2002. **Energy production from biomass (Part 2): conversion technologies**. Bioresour. Technol. 83, p. 47–54.

OC - Observatório do Clima; SEEG - **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012). Observatório do Clima, 21p, São Paulo. 2014.

PARAWIRA W.; MURTO M.; ZVAYA R.; MATTIASSON B. **Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves**. Renew Energy 2004; 29:1811–23. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.005>.

PHAM, Thi Phuong Thuy; KAUSHIK, Rajni; PARSHETTI, Ganesh K., MAHMOOD, Russel; BALASUBRAMANIAN, Rajasekhar. **Food-waste-to-energy conversion technologies**: Current status and future directions. Waste Management (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>

QURESHI A.S.; KHUSHK I., NAQVI S.R.; SIMIAR A.A.; ALI C.H.; NAQVI M. et al. **Fruit waste to energy through open fermentation**. Energy Procedia 2017;142:904–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.145>.

REZENDE, Jozrael Henriques; CARBONI, Marina; MURGEL, Maurício Arruda de Toledo; CAPPES, Ana Luíza de Almeida Prado; TEIXEIRA, Heverton Leandro; SIMÕES, Gislaíne Teresinha Capra; RUSSI, Reinaldo Rogério; LOURENÇO, Bruna Letícia Romero; OLIVEIRA, Cristina de Almeida. **Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP)**. Eng. Sanit. Ambient., Mar 2013, vol.18, no.1, p.1-8. ISSN 1413-4152.

SIPRA, Ayesha Tariq; GAO, Ningbo; SARWAR, Haris. **Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts**. Fuel Processing Technology (2018), <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.012>

SIQUEIRA, Hygor Evangelista; DINIZ e SOUZA, Amilton; BARRETO, Antônio Carlos; ABDLA, Vera Lúcia. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Nova Ponte MG**. Revista Dae, [s.l.], v. 64, n. 202, p.39-52, 2016. Editora Cubo Multimídia. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2015.010>.

SHEN, J; ZHAO C.; LIU, Y.; ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C. **Biogas production from anaerobic co-digestion of durian shell with chicken, dairy, and pig manures**. Energy Convers Manage 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.099>.

VIDAL, Thaís Cristina Morais. **Geração de biogás a partir de resíduos das agroindústrias de banana e palmito pupunha**. Cascavel: UNIOESTE, 2014. 61p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Wastes – Non-Hazardous Waste – Municipal Solid Waste, 1200 Pennsylvania Ave., N. W. Washington, DC 20460, U.S.A. (2013).

WANG S.; JENA U.; DAS K.C. **Biomethane production potential of slaughterhouse waste in the United States**. Energy Convers Manage 2018; 173:143–57. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.059>.

WANG L.; SHEN F.; YUAN H.; ZOU D.; LIU Y.; ZHU B. et al. **Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste**: lab-scale and pilot-scale studies. Waste Manage 2014; 34:2627–33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.005>.

YONG Z.; DONG Y.; ZHANG X.; TAN T. **Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production**. René Energy 2015; 78:527–30. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.033>.

ZHANG, Cunsheng; SU, Haijia; BAEYENS, Jan; TAN Tianwei. **Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38; 383–392. 2014.

ZHAN C.; XIAO G.; PENG L.; SU H.; TAN T. **The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure.** *Bioresour Technol* 2013; 129:170–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.138>.

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBL, P., 2007. **Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion.** *Bioresour. Technol.* 98 (4), p. 929–935.

ZHANG, W.; ZHANG, L.; LI, A. **Anaerobic co-digestion of food waste with MSW incineration plant fresh leachate: process performance and synergistic effects.** *Chem Eng J* 2015; 259:795–805. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.039>.