



DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA VALORIZAÇÃO DE BIOMASSA DO AGRONEGÓCIO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ÂMBITO RURAL

DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020451-477>



Rafaela Franqueto¹
Joel Dias da Silva²

RESUMO

O uso de biomassa do setor do agronegócio para produção de biogás tem ganhado cada vez mais importância no mundo e no Brasil. O Brasil apresenta vantagens em relação aos demais países para a produção de produtos do setor do agronegócio, através da biodiversidade existente, clima e latitude favoráveis às produções, promovendo assim o desenvolvimento de cultivos, além de possuir disponibilidade de água doce para irrigação e de área para produção agrícola. O objetivo deste estudo é apresentar em forma de revisão os processos de digestão e codigestão anaeróbia de resíduos para a otimização da produção de biogás com uso de biomassa do agronegócio (resíduo agrícola e animal) no mundo e no Brasil. A pesquisa relata o avanço dos estudos, principalmente em laboratório, para identificar os parâmetros essenciais para a melhor otimização da produção de biogás de diferentes tipos de associação de resíduos.

Palavras-chave: Biogás. Digestão anaeróbia. Codigestão anaeróbia. Bioenergia.

¹ Doutoranda em Engenharia Ambiental, Mestra em Engenharia Sanitária e Ambiental, Engenheira Ambiental. Universidade Regional de Blumenau. rafaela.eng@meioambiente.eng.br

² Engenheiro Sanitarista Mestre e Doutor em Engenharia Ambiental, Professor Pesquisador, do curso de Engenharia de Produção e Design; Mestrado e Doutorado em Engenharia Ambiental do Programa de Pós-Graduação. Universidade Regional de Blumenau. dias_joel@hotmail.com

DETERMINATION OF BIOGAS GENERATION POTENTIAL FROM BIODIGESTION WASTE ANAEROBIC CULTURE BANANA INOCULATED WITH ANIMAL WASTE IN TEST BMP

ABSTRACT

The use of biomass from the agribusiness sector for biogas production has gained increasing importance in the world and in Brazil. Brazil has advantages over other countries to produce agribusiness products, through existing biodiversity, favorable climate and latitude, thus promoting the development of crops, as well as having fresh water available for irrigation and area. for agricultural production. The aim of this study is to present as a review the anaerobic digestion and waste digestion processes for the optimization of biogas production using agribusiness biomass (agricultural and animal waste) in the world and in Brazil. The research reports the progress of studies, mainly in the laboratory, to identify the essential parameters for the best optimization of biogas production of different types of waste association.

Key words: Biogas. Anaerobic digestion. Anaerobic codigestion. Bioenergy.



1 INTRODUÇÃO

O uso de fonte de energia renovável no Brasil, é norteada através da Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº. 482/2012 (ANEEL, 2012), alterada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 (ANEEL, 2015). As resoluções permeiam a produção de energia elétrica e sua injeção na rede de distribuição, permitindo a compensação do consumo da unidade pelo usuário e, conseqüentemente, a redução dos custos de produção, no caso de propriedades rurais.

O Brasil é um país de clima tropical (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018), portanto apresentando-se vantajoso para o processo de biodigestão; além de possuir sua economia baseada, fortemente, no setor no agronegócio (DUARTE NETO et al. 2010; FORSTER-CARNEIRO et al. 2013). Nesse sentido, é inevitável questionar o motivo pelo qual o Brasil não tem disseminada na sua fonte energética nacional, o Biogás, através de biomassas (ROSA et al. 2011). A biomassa, de acordo com FERNANDES et al. (2011) e EBNER et al. (2015) é qualquer matéria orgânica que

possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, podendo ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (lixo); como fonte potencial para produção de energia renovável (EBNER et al. 2015; NÁTHIA-NEVES et al. 2018).

O setor do agronegócio é responsável por uma grande quantidade de biomassa (BILOTTA; ROSS, 2016; ZHU; HILTUNEN, 2016) e diante desse cenário, o processo de digestão anaeróbia (AD) (mono-digestão) e codigestão anaeróbia (AcoD) vêm se destacando (DANG et al. 2016; AWE et al. 2017; MILANI; MONTORSI, 2018; LIU et al. 2019) como alternativa ao complemento de energia através do aproveitamento de biogás e redução de impacto ambiental, produzido pelo descarte incorreto dos resíduos do setor (GOMES; CAPPI, 2011; GE; XU; LI, 2016; POULSEN; ADELARD, 2016; HASSAN et al. 2017).

A digestão anaeróbia é um processo que valoriza o resíduo orgânico (BROWNE; ALLEN; MURPHY, 2014) requerendo condições de temperatura ótima (WEI et al. 2014; SUN et al. 2016), pH (SCHIEVANO et al. 2012; MAO et al. 2015; NESHAT et al. 2017), composição dos resíduos (WARTELL et al. 2012; XU et al. 2014; DIVYA; GOPINATH; MERLIN CHIRSTY, 2015), razão C/N (WANG et al. 2012; RODRIGUEZ-VERDE et al. 2014; SUKHESH; RAO, 2018), teor de umidade (MUSTAFA, 2014; YIN et al. 2014; SILVA; MORAIS JR; ROCHA, 2016) e diferentes populações de micro-organismos (BROWNE et al. 2014; KONRAD et al. 2014; SCANO et al. 2014) apresentando como principal produto, o biogás (DONOSO-BRAVO et al. 2011; BROWNE et al. 2014).

A codigestão refere-se à digestão simultânea de dois ou mais resíduos orgânicos (CHIU; CHIU; KUO, 2013; GOU et al. 2014; NGHIEM et al. 2017; CANDIA-GARCÍA; DELGADILLO-MIRQUEZ; HERNANDEZ, 2018; DIEGO-DÍAZ et al. 2018; XU et al. 2018) objetivando a produção de biogás (KATUWAL; BOHARA, 2009; QUADROS et al. 2010; ABOULENIEN et al. 2016). Em comparação com a digestão anaeróbia, a codigestão (AcoD) oferece várias vantagens (MATA-ALVAREZ et al. 2011), como: melhoria do balanço de nutrientes e relação C/N (XIE et al. 2011; RIYA et al. 2016; XIE et al. 2016), equilíbrio de umidade (MATA-ALVAREZ et al. 2014; KWIETNIEWSKA; TYS, 2014; YAO et al. 2014), redução o efeito inibitório devido a substâncias tóxicas através da diluição (JHA; SCHMIDT, 2017) e aumento da cinética de produção de metano (CHIU; CHIU; KUO, 2013; WICKHAM et al. 2016; NEGI et al.

2018).

Nesse sentido, a codigestão auxilia na tomada de decisão para implantação de projeto e operação de usinas em escala real através de ensaios na escala laboratorial e em célula-piloto (SCHIEVANO et al. 2012; CHIU; CHIU; KUO, 2013; GOU et al. 2014; WICKHAM et al. 2016; LI et al. 2017).

Diante do que foi exposto, este artigo objetiva um resumo sobre os processos de digestão e codigestão anaeróbia de resíduos para a otimização da produção de biogás. Além disso, é relatado estudos sobre os processos e posteriormente, após análise dos estudos, identificar lacunas e questões que ainda precisam ser resolvidas para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um levantamento bibliográfico onde foram abordados temas referentes ao histórico da digestão e codigestão anaeróbia e da produção do biogás; potencial de produção de biomassa no Brasil. O levantamento bibliográfico foi realizado principalmente na base de dados do Science Direct, sendo justificado a escolha por esta base de dados apresentar grandes quantidades de periódicos com fator de impacto e pela disponibilidade ao acesso dos artigos publicados. A combinação de palavras-chaves utilizadas para a pesquisa: *anaerobic digestion*; *anaerobic codigestion*; *biomass*.

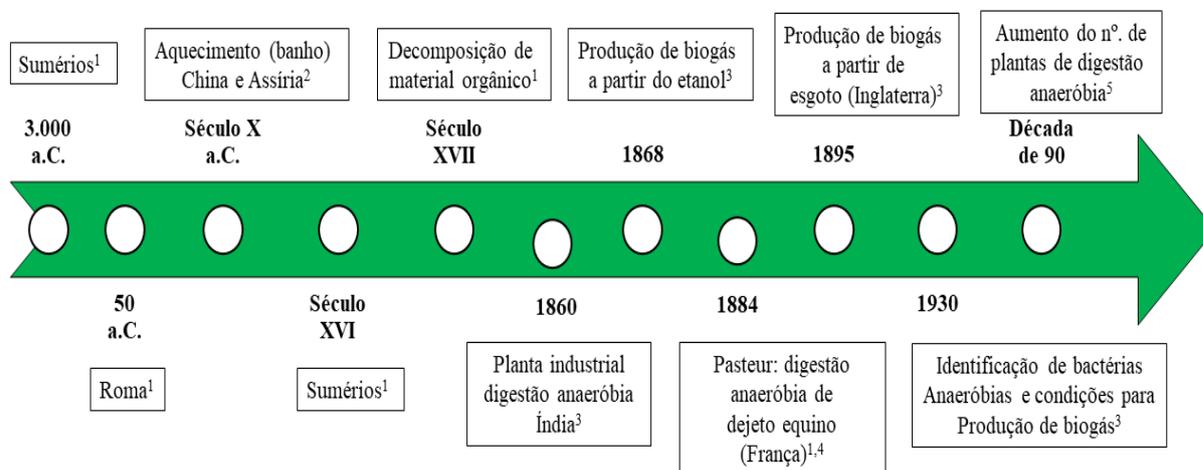
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Breve histórico: digestão anaeróbia

Dentre as tecnologias e processos existentes para produção de energia a partir de biomassa, a biodigestão anaeróbia obtida por processo biológico natural, facilita a transformação de materiais orgânicos em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), dentre outros produtos (CHERNICHARO, 2008; AMIGUN; BLOTTNITZ, 2010). A biodigestão anaeróbia também se apresenta como uma rota alternativa por produzir subprodutos que agregam valor (TURKENBURG, 2000; GLATZ; MIAO; RODDA,

2011). A Figura 1 apresenta uma linha do tempo, resumida, sobre o histórico da digestão anaeróbia.

Figura 1: Linha do tempo sobre o histórico da digestão anaeróbia de resíduos.



Fontes: DEUBLEIN; STEINHAUSER (2008)¹; HE (2010)²; VERMA, (2002)³; GU ET AL. (2016)⁴; UNIVERSITY OF ADELAIDE, (2010)⁵

A digestão anaeróbia (AD) é um processo descrito e utilizado desde os anos 3000 a.C., pelos sumérios, onde eles utilizam covas e sistema de tratamento de efluentes em condição anaeróbia. Esse mesmo fenômeno também foi reportado por Plínio (ano 50 a.C.) em Roma (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). Há evidências de que a digestão anaeróbia foi utilizada para produção de biogás na China e Assíria, no século X a.C. com objetivo para aquecimento no banho (HE, 2010).

Deublein; Steinhauser (2008) reporta que o aprofundamento nos estudos da AD se deu no século XVII, com o belga Jan Baptista Van Helmont ao relacionar a decomposição do material orgânico com a produção de gases inflamáveis, reafirmada posteriormente pelo italiano Count Alessandro Volta que estabeleceu que a quantidade de material orgânico decomposto estava relacionada à quantidade de gás inflamável produzido.

A produção de biogás em escala industrial iniciou com uma planta de digestão anaeróbia Índia, por volta do ano 1860. Béchamp, no ano de 1868, associou a produção de gás a partir de etanol com a população de alguns microorganismos (VERMA, 2002).

Incidentalmente; Louis Pasteur obteve 100 litros de metano a partir da digestão anaeróbia de dejetos equinos da cidade de Paris, no ano de 1884. Pasteur

afirmava que essa produção de metano obtida era suficiente, na época, para iluminar uma via de Paris, e assim, deu-se na Europa a aplicação de resíduos à produção de energia (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; GU et al. 2016).

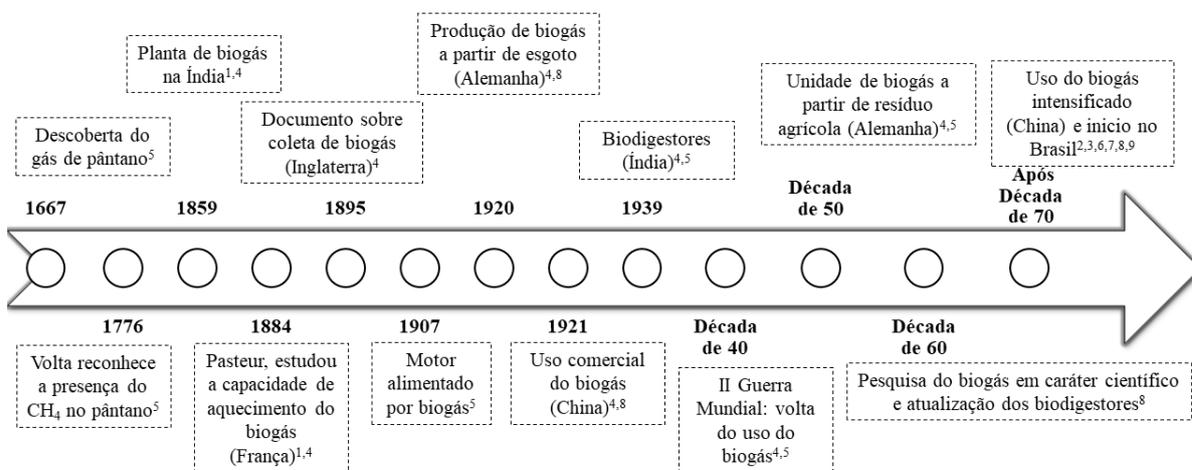
Já no ano de 1895, a Inglaterra iniciou a produção de biogás em estações de tratamento de esgoto, onde gás produzido era utilizado em luminárias públicas (VERMA, 2002). Em 1930, Buswell identificou as bactérias anaeróbias e as condições necessárias para a geração de metano (VERMA, 2002).

A partir da década de 90 ocorreu um aumento significativo no número de plantas de digestão anaeróbia. Na primeira metade da década de 90, parte destas plantas destinadas ao tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos municipais (UNIVERSITY OF ADELAIDE, 2010).

3.2 Breve histórico: produção de biogás e biodigestores

No meio ambiente, existem vários ambientes favoráveis ao desenvolvimento da digestão anaeróbica, seja por pântanos, estuários, mares e lagos, usinas de carvão e jazidas petrolíferas. Esses sistemas anaeróbios possuem concentrações baixas de oxigênio, facilitando a ocorrência da geração do biogás. A Figura 2, resume em linha do tempo, todo o histórico da produção de biogás no mundo.

Figura 2: Linha do tempo relativo à produção de biogás no mundo.



Fontes: BRAKEL (1970)¹; BARRERA (1993)²; SGANZERLA (1983)³; MOTTA (1986)⁴; DEUBLEIN; STEINHAUSER (2008)⁵; PALHARES (2007)⁶; BERGIER; ALMEIDA (2010)⁷; HE (2010)⁸; BLEY JUNIOR (2015)⁹

A literatura cita que o início da produção de biogás foi com a descoberta do gás de pântano, hoje biogás, no ano 1667, por Shirley; sendo que foi após um século, Alessandro Volta, em 1776, reconhece a presença de metano no gás dos pântanos (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). De acordo com Brakel, (1970) e Motta (1986) a primeira planta de biogás, em grande escala, foi iniciada a sua operação na Índia em 1859, em uma colônia de leprosos, em Bombaim, onde realizou-se a primeira experiência de utilização direta de biogás e em 1884, Louis Pasteur, considerou que essa fermentação de gás podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação. No ano de 1895, apresenta-se a primeira experiência europeia e primeiro documento relatando a coleta de biogás de um processo de digestão anaeróbia, com a utilização do biogás para iluminação de algumas ruas da cidade de Exter, em Inglaterra (MOTTA, 1986).

O primeiro motor a gás alimentado por biogás foi em 1907, em Bombaim. Desde essa época ocorreram muitas mudanças relacionadas ao biogás. Atualmente, na Europa, aumentou significativamente o número de plantas de biogás e a principal frente para esse aumento é a produção sustentável de energia a partir de fontes renováveis bem como o uso de políticas energéticas sustentáveis e o desenvolvimento de oportunidades de renda em áreas rurais (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

No ano de 1920, a primeira estação de tratamento de esgoto começou a produção de biogás em 1920 na Alemanha e o uso comercial de biogás foi atribuído a Luo, em 1921, na China. Luo, construiu um tanque de 8 m³ para produção de biogás, alimentado com resíduo orgânico doméstico, sendo mais tarde popularizado a tecnologia desenvolvida por uma empresa (MOTTA, 1986; HE, 2010).

O uso de biodigestores foi difundido através de diferentes estudos, e em 1939 foi criado em Kampur, na Índia, o Institute Gobár Gás (Instituto de Gás de Esterco), que objetivava tratar os dejetos animais, obter biogás e aproveitar o biofertilizante. Na década de 40, devido a carências energéticas significativas, provocadas pela II Guerra Mundial, o biogás voltou a ser utilizado, quer na cozinha e no aquecimento das casas, quer para alimentação de motores de combustão interna. Na década de 50 e 60, iniciou na Alemanha, a primeira unidade de biogás a partir de resíduos agrícolas. O estudo pioneiro permitiu a construção de quase meio milhão de biodigestores na Índia

e a utilização do biogás no país, como fonte de energia, motivou a China a adotar tal tecnologia a partir de 1958, em 1972, já possuíam aproximadamente 7,2 milhões de biodigestores em atividade (MOTTA, 1986; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

Ressalta-se que partir da década de 60, a digestão anaeróbia passou a ser pesquisada com caráter mais científico, evoluindo assim no que se refere à compreensão dos fundamentos do processo e de projetos de biodigestores. Na década de 1970, principalmente na China, onde o governo promoveu o “uso de biogás em todas as famílias rurais” e facilitou a instalação de mais de sete milhões de digestores (HE, 2010). No restante do mundo, a propagação da tecnologia de produção de biogás também ganhou força na década de 70, devido à alta do preço do petróleo que motivaram pesquisas sobre energias com fontes alternativas (HE, 2010), com ênfase nas áreas rurais.

3.3 Tecnologias para produção de biogás: estado da arte sobre os processos de digestão e codigestão anaeróbia

Digestão anaeróbia (AD) é um tratamento biológico anaeróbio (Mata-Alvarez et al. 2011; Awe et al. 2017) no qual ocorre a estabilização da matéria orgânica com produção de biogás (essencialmente metano e dióxido de carbono) (KATUWAL; BOHARA, 2009; LEITE et al. 2009; QUADROS et al. 2010). A AD é considerada uma reação complexa (TIETZ et al. 2013; GHASIMI et al. 2015) por envolver um grande número de microorganismos (SCANO et al. 2014; NÁTHIA-NEVES et al. 2018). São os microorganismos o cerne dos digestores e a eficiência da AD depende, principalmente, do ativo da comunidade microbiana (JANG et al. 2013; PENG et al. 2013; SCANO et al. 2014).

O processo de conversão biológica anaeróbia da fração orgânica dos resíduos ocorre, segundo Lastella et al. (2002) e Tchobanoglous; Theisen; Vigil (1993) e Risberg et al. (2013), em três etapas principais: hidrólise, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise (I), carboidratos, proteínas e gorduras são convertidos a ácido acético, ácidos graxos de cadeia longa e dióxido de carbono (LASTELLA et al. 2002). A etapa da hidrólise tem um papel fundamental na digestão anaeróbia, convertendo compostos complexos em mais simples, os quais são passíveis de degradação pelas bactérias presente na etapa de acidogênese (II) (KARLSSON et al.

2014). Na etapa acetogênese (III), há a conversão dos produtos resultantes da hidrólise a ácidos (ácido acético) (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993), o qual desempenha um papel essencial na digestão anaeróbia, por ser um precursor do metano (LASTELLA et al. 2002). Na última etapa, a metanogênese (IV), ocorre a conversão de hidrogênio e o ácido acético em metano e dióxido de carbono mediada por bactérias metanogênicas (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

Lianhua et al. (2010) estudaram a digestão da palha de arroz para produção de biogás em duas condições: mesofílicas e termofílicas. Os autores concluíram que o processo em condição mesofílica (35 °C) resultou em maior produção de metano quando comparado à condição termofílica (55 °C). Os autores ainda reportam que a baixa produção de metano verificada em condições termofílicas (55 °C) é devido ao acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) acarretando o aumento de acidez, inibindo os microorganismos metanogênicos.

Yan et al. (2015), na China, investigou a digestão anaeróbia da palha de arroz, a diferentes temperaturas. Os autores reportaram que o rendimento máximo de metano foi a 35 °C (na faixa de temperatura de 30-45°C). Liu et al. (2017), realizou digestão anaeróbia de palha de milho, na China, testando diferentes temperaturas (35 °C, 38 °C, 41 °C e 44 °C). Os autores reportam o rendimento máximo de metano a 44 °C (na faixa de temperatura de 35-44°C).

Zealand; Roskilly; Graham (2017), verificaram a produção de biogás a partir da palha do arroz, através de ensaios realizados em cinco reatores de 2,5 L. O estudo mostrou que a alimentação menos frequente dos reatores melhora os rendimentos de metano.

A codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos tem como objetivo melhorar o desempenho da digestão anaeróbia (ABOUELENIEN et al. 2016), otimizando a produção de biogás e reduzindo o teor de sólidos (CHIU; CHIU; KUO, 2013; GOU et al. 2014; SCANO et al. 2014). As vantagens da codigestão quando comparado a digestão anaeróbia refere-se principalmente a otimização da estequiometria para obter uma relação ótima de inóculo/substrato (XIE et al. 2011; RIYA et al. 2016; XIE et al. 2016), influenciando positivamente no processo de digestão (WICKHAM et al. 2016; NEGI et al. 2018).

Vários pesquisadores têm obtido bons resultados utilizando a codigestão para tratar e valorizar diferentes tipos de resíduos orgânicos (GALBIATTI et al. 2010; XIE

et al. 2011; ORRICO et al. 2015; XIE et al. 2016; WICKHAM et al. 2016; CANDIA-GARCÍA; DELGADILLO-MIRQUEZ; HERNANDEZ, 2018; SUKHESH; RAO, 2018). Nesse sentido, a proporção dos resíduos que serão utilizados é um fator primordial (YAO et al. 2014) para melhor aproveitamento e estabilidade do processo anaeróbio (MATA-ALVAREZ et al. 2014). A Tabela 1 apresenta um resumo de dados de estudos sobre codigestão anaeróbia, indicando a gama de possibilidades de utilização, através da associação de resíduos.

Tabela 1: Resumo dos estudos reportados na literatura sobre codigestão anaeróbia de resíduos do agronegócio em função das características estudadas.

Referência Local	Resíduos	Condição (°C)	Objetivos	Resultados encontrados
Xie et al. (2011) Irlanda	Silagem de capim com dejetos suíno	Mesofílica	Proporções baseadas em ST (1: 0, 3: 1, 1: 1, 1: 3 e 0: 1)	Maior produção de CH ₄ na proporção 1:1 em um intervalo de tempo menor do que as demais
Zhang et al. (2015) China	Resíduo de milho com dejetos bovino e suíno	Mesofílica	Teste de produção em diferentes valores de pH inicial (6, 6.5, 7, 7.5 e 8)	Maior produção de CH ₄ em pH inicial era 7.5
Valero et al. (2016) Espanha	Casca de cacau com dejetos bovino	Mesofílica	Variação de acúmulo de pressão no headspace do reator	Pressões no headspace entre 600 a 1000 mbar não afeta a produção de CH ₄
Aboudi, Álvares-Gallego, García (2017) Espanha	Resíduo de beterraba com dejetos bovino	Mesofílica	Proporções baseadas em ST (8% e 5%)	Maior produção de CH ₄ na proporção de 8%, sendo 1.5 vezes maior que os obtidos com 5%
Candia-García, Delgadillo-Mirquez, Hernandez (2018)	Palha de arroz com dejetos bovino	Mesofílica	Proporções baseadas em ST inóculo/substrato (0.8, 0.5, 0.3)	Maior produção de biogás foi da proporção de 0.8, com teor de CH ₄ acima de 70%

Colômbia				
Li et al. (2018) China	Resíduo de milho, de tomate e dejetos bovinos	Mesofílica	Tempos de retenção hidráulica: 15, 30 e 45 dias	Tempos de detenção de 15 e 30 dias apresentaram maiores produções de CH ₄
Zhao et al. (2018) China	Palha de aveia com dejetos bovinos		Comparar a AD da palha de aveia com AcoD (palha e dejetos)	Adição de dejetos abaixo de 2/3 do total de ST, aumentou a produção de CH ₄ e reduziu o tempo de início da digestão
Wang et al. (2018) China	Resíduo de pepino, palha de milho e dejetos suínos	Mesofílica	Proporções baseadas em ST	Produção de CH ₄ diminuiu com o aumento da concentração de pepino

Fonte: Autores (2019)

É ressaltado na Tabela 1, que os dejetos de animais mais utilizados são os de suínos e bovinos. Dejetos suínos apresentam uma grande capacidade de produção de biogás; entretanto, uma das dificuldades principais na utilização do dejetos de suínos é que seu processo de fermentação é mais lento que os dos demais (PEREIRA, 2011). De acordo com Alves; Souza; Inoue, (2012), a codigestão de resíduos com dejetos de bovino proporciona maiores produções de biogás quando comparado com o dejetos de suíno. Ainda, segundo Galbiatti et al. (2010) a produção acumulada de biogás ao utilizar dejetos bovinos foi muito superior quando comparado com a dejetos de suíno.

Verifica-se ainda na Tabela 1, que a maior parte dos estudos voltados para produção de biogás através da co-digestão de resíduos de animais e agrícolas são mais frequentes nos países asiáticos. Entretanto, observa-se estudos, principalmente na Europa, com resíduos não convencionais para a produção de biogás, como por exemplo, resíduos de beterraba e cacau.

No Brasil, o maior enfoque da produção de biogás concentra-se nos aterros sanitários, visto que é impulsionado através da promulgação da Política Nacional de

Resíduos Sólidos (PNRS), incentivando projetos de biogás que tivessem uma destinação correta para os resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2010).

O uso de sistemas de codigestão para produção de biogás vem ganhando destaque com a introdução de novas tecnologias para produção de alimentos e os sistemas de confinamentos de animais (IPEA, 2012). No interior do Paraná, a GeoEnergética produz, de maneira flexível, 7 MW de energia a partir de resíduos do setor sucroenergético. O CIBiogás tem demonstrado os benefícios sociais, ambientais e econômicos da utilização de resíduos da pecuária a partir de diversos modelos de negócio, tais como a Granja Haacke e o Condomínio Ajuricaba (BLEY JR. 2015). Nesse sentido, o aproveitamento destes resíduos depende de instalação de conjuntos biodigestores. Países como China e Índia dominam a tecnologia de biodigestores, sendo que os chineses objetivam a obtenção de fertilizante para produção dos alimentos e os indianos, buscam suprir a deficiência energética no país (BOND; TEMPLETON, 2011).

3.4 Biomassa do agronegócio no Brasil



O conceito de agronegócio (agribusiness) consagrou-se com o livro *A concept of agribusiness*, de Davis & Golderg (1957). De acordo com os autores, o agronegócio refere-se ao conjunto das operações que envolvem a produção e distribuição de insumos na produção rural, armazenamento, processamento e distribuição dos produtos e subprodutos agropecuários.

Fontes de biomassas são consideradas sustentáveis (BAEYENS et al. 2015; HEIJMAN, 2016), já que exclui o tradicional uso da biomassa (NÁTHIA-NEVES et al. 2018), como por exemplo, a madeira não reflorestada (FERNANDES et al. 2011). Além disso, ela também pode ser enquadrada no modelo de desenvolvimento sustentável (PIROTA et al. 2015), pois além de gerar eletricidade e calor (Penteado et al. 2018), ela estimula o desenvolvimento na região, visto empregos, impulsionando a economia e as atividades locais e ainda é capaz de reduzir os custos relacionados à distribuição da energia produzida (PALUDO, 2014; EBNER et al. 2015).

A produção de biogás apresenta variação em função do conteúdo orgânico biodegradável presente nos resíduos (XU et al. 2014; DIVYA; GOPINATH; MERLIN CHIRSTY, 2015). O manejo e tratamento adequado dos resíduos devem ser

considerados parte do processo produtivo. No modelo europeu, os produtores transportam dejetos animais até um biodigestor. Depois de tratados no biodigestor, voltam para as propriedades na forma de digestato (fertilizante orgânico), para ser aplicado aos solos, resultando em uma logística duplamente negativa (BLEY Jr. 2015). Segundo Kunz; Oliveira (2006), no Brasil, o sistema de criação intensivo, facilita essa coleta e destinação dos dejetos para a produção do biogás, quando comparado ao sistema extensivo.

3.5 Potencial energético de resíduos de biomassa no Brasil: políticas públicas

O Brasil apresentou participação de energias renovável em sua matriz energética de 41.2%, segundo o Boletim Energético Nacional (BEN, 2016) e a porcentagem é devido a energia hidráulica (11.3%) e da biomassa de cana-de-açúcar (16.9%), o qual é utilizada para produção de energia. Portanto, a biomassa tem destaque no Brasil e é advinda na maior quantidade pelo setor do agronegócio (DUARTE NETO et al. 2010), apresentando diversas oportunidades de estudos e aplicações não só para o setor energético como também para os demais setores.

Destaca-se nos estudos no Brasil, para o setor energético a produção de etanol de segunda geração e/ou energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar (CARPIO; SOUZA, 2017) e resíduos da bananicultura (SOUZA et al. 2017).

Os estudos relacionados a produção de biogás a partir de co-digestão de resíduos, em sua grande maioria é realizada em laboratório (HANSEN et al. 2004; ANGELIDAKI et al. 2009; VALERO et al. 2016; LI et al. 2018; WANG et al. 2018). Portanto, existe uma lacuna na literatura no que tange a estudos que identifique a melhor condição de operação dos biodigestores, otimizando a maior produção de biogás. Apesar do uso de biodigestores ser considerado um processo simples (BLEY JR. 2009), diferentes técnicas são utilizadas para melhorar o processo da biodigestão anaeróbia e, dentre elas está a separação de frações (GALBIATTI et al. 2010; YE et al. 2013; WICKHAM et al. 2016), permitindo a busca de eficiência no processo da biodigestão e aumento da qualidade do biogás (transformando-o em biometano) e fertilizante gerados (KUNZ; MIELE; STEINMETZ, 2009; WANG et al. 2013).

O Brasil apresenta vantagens em relação aos demais países para a produção de produtos do setor do agronegócio (DUARTE NETO et al. 2010), pois, de acordo com Ministério do Meio Ambiente (2018), o país possui uma grande biodiversidade, com referência à clima e latitude, promovendo o desenvolvimento de espécies com características próprias de cada região, devido a algumas características como: qualidade do solo, disponibilidade de água doce para irrigação, disponibilidade de área para produção agrícola (FORSTER-CARNEIRO et al. 2013).

A quase totalidade da produção de biogás no Brasil gera energia elétrica ou térmica, correspondendo a 63.00% e 36.00%, respectivamente (EPE, 2017). As principais fontes de biogás no país para escala comercial são os resíduos sólidos urbanos – RSU - (fração orgânica), águas residuárias (FORESTI; ZAIATI; VALLERO, 2006), resíduos da produção de açúcar e etanol de cana e os dejetos dos suínos (MILANEZ et al. 2018). Em menor escala, são utilizados resíduos provenientes da produção de alimentos (amido de mandioca e suco de laranja), descarte de restaurantes, resíduos de grama, dejetos bovinos e de aves, efluente sanitário.

O Brasil ganha destaque na América do Sul, pois uma das maiores usinas de energia a partir de biogás do mundo, no estado de São Paulo (Usina Termelétrica UTE Aterro Bandeirantes). O Aterro Gramacho, na Baixada Fluminense, no ano de 2013, tornou-se o único fornecedor de biogás do mundo exclusivo para uma refinaria de petróleo. Ainda em 2013, 22 aterros sanitários já utilizavam o biogás para abastecer residências, de 1.67 milhões de brasileiros, e no Parque Tecnológico Itaipu, é instalado o Centro Internacional de Energias Renováveis (BLEY JR, 2015).

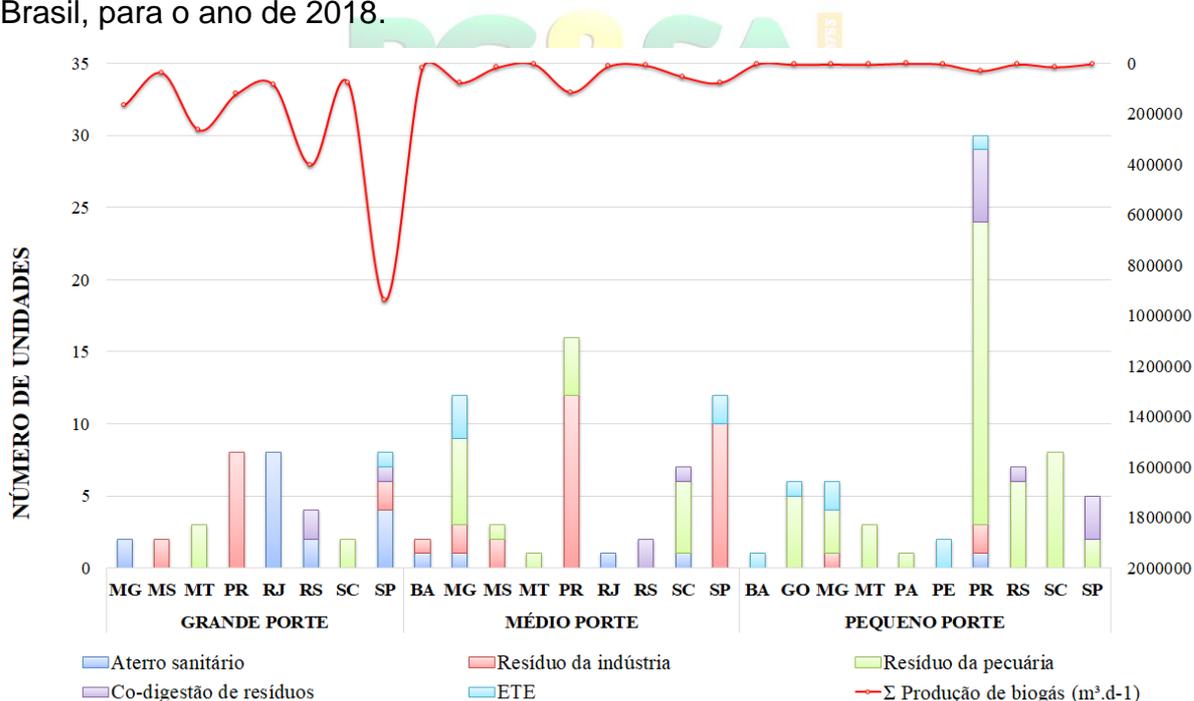
O Brasil possui um potencial de produzir cerca de 78 milhões de metros cúbicos diários de biogás e biometano, segundo o FGV (2017). O Brasil aumentou a sua capacidade de produção de biogás, passando de 20 MW em 2007 para 119 MW em 2016, aproveitando principalmente RSU. Nesse sentido, como há diversas opções de substratos para a produção de biogás no país, é de se esperar que, com o aprimoramento das tecnologias específicas, o crescimento seja ainda mais relevante (MILANEZ et al. 2018).

Segundo a ABiogás (2015), o potencial desperdiçado de biogás no Brasil é enorme, sendo que no ano 2015, um levantamento constatou-se que são desperdiçados, em média: 50 milhões de m³.dia-1 de biometano no setor sucroenergético, 15 milhões de m³.dia-1 no setor de alimentos e 6 milhões de m³.dia-

1 no setor de saneamento, resultando em 71 milhões de m³.dia-1 de biometano desperdiçados, ao longo do território nacional. Ainda, o potencial do volume desperdiçado, equivale ao consumo de 44% do diesel ou 73% do gás natural consumido no país todo. Nesse sentido, a inserção do biometano na matriz energética brasileira, permitirá aos agentes de governo e planejamento energético (EPE) flexibilidade na elaboração de planos e políticas para o aproveitamento dos recursos fósseis e renováveis, beneficiando toda a sociedade brasileira pela otimização da exploração e uso dos recursos naturais disponíveis em nosso país.

A base de dados levantada pela BIOGASMAP (2018) mostra informações das unidades de produção de biogás no Brasil (Figura 3). O BiogasMap é uma ferramenta online que faz parte do Cadastro Nacional do Biogás que está sendo desenvolvido pela CIBiogás, que possibilita a visualização das unidades de produção e do uso energético de biogás no país em um mapa dinâmico, público e online.

Figura 3: Número de unidades de produção de biogás e o potencial de produção no Brasil, para o ano de 2018.



Fonte: BIOGASMAP (2018)

Por meio dos dados disponíveis no BiogasMap, foram contabilizadas 69 instalações de pequeno porte, 56 de médio e 31 de grande porte em situação de

construção, operação e reforma. A maior parte das plantas destina-se à produção de energia elétrica, seguida pela energia térmica.

Verifica-se, ainda na Figura 3, que em usinas de grande porte o estado São Paulo está em primeiro lugar no que tange a capacidade de produção de biogás, visto que em número de usinas, encontra-se empatado com os estados do Paraná e Rio de Janeiro, com 8 unidades produtoras. A maior produção para o São Paulo, pode ser atribuída pela diversificação da matéria-prima utilizada, o que difere de Paraná (resíduo industrial) e Rio de Janeiro (aterro sanitário); corroborando para a diversificação da matriz energética, com distintas fontes de substratos. Em relação as unidades de médio e pequeno porte, o estado do Paraná é o que possuiu o maior número de unidades, 16 para médio porte e 30 para pequeno. Em relação a capacidade de produção de biogás também o estado está em primeiro lugar, atribuído a maior quantidade de unidades de produção.

Dessa problemática, confirma-se a necessidade de desenvolver processos que visem a valorização de resíduos do agronegócio e devido ao grande potencial apresentado pelo biogás de diferentes origens, é possível perceber a existência de um amplo espaço para expansão, especialmente no tocante ao biogás agroindustrial, e que políticas públicas podem ser criadas de modo a alavancar o avanço do setor. Nesse sentido, desenvolver métodos que possam caracterizar os diferentes tipos de resíduos agrícolas e dejetos de animais através de misturas ótimas configura-se como um dos principais desafios para a produção de biogás com finalidade de energia, já que o Brasil é altamente dependente de duas fontes: hidrelétrica e gás natural.

A produção de biogás a partir de resíduos possibilita um retorno positivo para o setor de saneamento ambiental, além de reduzir os custos com energia e contribuir para a redução do efeito estufa e do aquecimento global; devido ao fato de que os gases que seriam emitidos na atmosfera com a decomposição desse material passam a ser adotados na geração de energia. Outras vantagens são a diminuição de odores e propagação de insetos devido a destinação inadequada dos dejetos além de eliminar substâncias patogênicas, que podem acarretar poluição das águas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da problemática dos resíduos produzidos, surge a necessidade de desenvolvimento de processos que visem a valorização de resíduos do agronegócio e devido ao grande potencial apresentado pelo biogás de diferentes origens, é possível perceber a existência de um amplo espaço para expansão, especialmente no tocante ao biogás agroindustrial, e que políticas públicas podem ser criadas de modo a alavancar o avanço do setor.

O biogás, é uma forma de energia promissora no Brasil, e embora esteja se iniciando em escala industrial no país, terá um importante papel nos próximos anos. Dentre as principais fontes para produção de biogás estão os resíduos do setor do agronegócio (agricultura e pecuária), urbanos (resíduos sólidos urbanos, esgoto, resíduos de poda e varrição) e industriais (efluentes).

A produção de energia renovável a partir do biogás é uma alternativa para a diversificação da matriz energética brasileira, que é muito dependente de usinas hidrelétricas e por meio de uma gestão bem conduzida, a produção de biogás a partir de resíduos possibilita um retorno positivo para o setor de saneamento ambiental, além de reduzir os custos com energia e contribuir para a redução do efeito estufa e do aquecimento global; devido ao fato de que os gases que seriam emitidos na atmosfera com a decomposição desse material passam a ser adotados na geração de energia. Outras vantagens são a diminuição de odores e propagação de insetos devido a destinação inadequada dos dejetos além de eliminar substâncias patogênicas, que podem acarretar poluição das águas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS – Associação Brasileira de Biogás e de Biometano. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano – PNBB**. São Paulo, Vol. 1, novembro, 2015.

ABOUDI, K.; ÁLVARES-GALLEGO, C.J.; ROMERO GARCÍA, L.I. Science of the Total Environment Influence of total solids concentration on the anaerobic co-digestion of sugar beet by-products and livestock manures, **Science of the Total Environment**, v. 586, p.438–445, 2017.

ABOUELENIEN, F.; NAMBA, Y.; NISHIO, N.; NAKASHIMADA, Y. Dry Co-Digestion of Poultry Manure with Agriculture Wastes, **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 178, p.932–946, 2016.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). **Resolução Normativa nº. 482**, de 17 de abril de 2012, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). **Resolução Normativa nº. 687**, de 14 de abril de 2015, 2015. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedo/ren2012482.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2019.

ALVES, E.E.N.; SOUZA, C.F.; INOUE, K.R.A. Produção de biogás e biofertilizante a partir da biodigestão da torta de mamona com adição dejetos de animais, **Engenharia na Agricultura**, v. 127, p.493–500, 2012.

AMIGUN, B.; VON BLOTTNITZ, H. Capacity-cost and location-cost analyses for biogas plants in Africa. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p.63–73, 2010.

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J.L.; GUWY, A.J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J.B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. **Water Science and Technology**, v. 59, p. 927–934, 2009.

AWE, O.W.; ZHAO, Y.; NZIHO, A.; MINH, D.P.; LYCZKO, N. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, p. 267–283, 2017.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEM). **Relatório Final 2016 ano base 2015**, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2019.

BAEYENS, J.; KANG, Q.; APPELS, L.; DEWIL, R.; LV, Y.; TAN, T. Challenges and opportunities in improving the production of bio-ethanol. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 47, p. 60–88, 2015.

BARRERA, P. **Biodigestores: Energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993.

BERGIER, I.; ALMEIDA, J.A.R.de. Agrosuínocultura: Solução Sustentável Brasileira. **Revista CFMV**, Brasília, n. 50, p.19-22, 2010.

BIASI, C.A.F.; MARIANI, L.F.; PICINATTO, A.G.; ZANK, J.C.C. **Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil**. 1º.ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 202p, 2018.

BIOGASMAP. Desenvolvido pelo CIBiogásER - Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás; CIH - Centro Internacional de Hidroinformática; PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, 2015. Disponível em: <<http://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 16 mar. 2019.

BILOTTA, P.; ROSS, Z.L Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 21, p. 275–282, 2016.

BLEY JR., C. **Biogás: a energia invisível**. 2º ed. – São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, p. 347–354, 2011.

BRASIL. **Lei nº. 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. 2010. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm > Acesso em: 21 fev. 2019.

BRAKEL, V.J. The Ignis Fatuus of Biogas. 1970.

BROWNE, J.D.; ALLEN, E.; MURPHY, J.D. Assessing the variability in biomethane production from the organic fraction of municipal solid waste in batch and continuous operation. **Applied Energy**, v. 128, p. 307–314, 2014.

CANDIA-GARCÍA, C.; DELGADILLO-MIRQUEZ, L.; HERNANDEZ, M. Biodegradation of rice straw under anaerobic digestion. **Environmental Technology and Innovation**, v. 10, p. 215–222, 2018.

CARPIO, L.G.T.; SOUZA, F.S. de. Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions. **Renewable Energy**, v. 111, p. 771–780, 2017.

CHERNICHARO, C.A.L **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMF, v.5, 2ª ed. 588p. 2008.

CHIU, S.F.; CHIU, J.Y.; KUO, W.C. Biological stoichiometric analysis of nutrition and ammonia toxicity in thermophilic anaerobic co-digestion of organic substrates under different organic loading rates. **Renewable Energy**, v. 57, p. 323–329, 2013.

DANG, Y.; HOLMES, D.E.; ZHAO, Z.; WOODARD, T.L.; ZHANG, Y.; SUN, D.; WANG, L-Y.; NEVIN, K.P.; LOVELY, D.R. Enhancing anaerobic digestion of complex organic waste with carbon-based conductive materials. **Bioresource Technology**, v. 220, p. 516–522, 2016.

- DAVIS, J.A.; GOLDBERG, R. **A concept of Agribusiness**. Boston: Harvard University. 1957.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources. Weinheim Wiley-VCH, 443p, 2008,
- DIEGO-DÍAZ, B.DE.; FERNANDÉZ-RODRÍGUEZ, J.; VITAS, A.I.; PEÑAS, F.J. Biomethanization of solid wastes from the alcoholic beverage industry: Malt and sloe. Kinetic and microbiological analysis, **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 650–656, 2018.
- DIVYA, D.; GOPINATH, L.R.; MERLIN CHRISTY, P. A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 690–699, 2015.
- DONOSO-BRAVO, A.; MAILIER, J.; MARTIN, C.; RODRÍGUEZ, J.; ACEVES-LARA, C.A.; WOUWER, A. V. Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review, **Water Research**, v. 45, p. 5347–5364, 2011.
- DUARTE NETO, E.D.; ALVARENGA, L.H.; COSTA, L.DE.M.; NASCIMENTO, P.H. Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua, **Revista eletrônica E-xacta**, v. 3, 2010.
- EBNER, J.H.; LABATUT, R.A.; RANKIN, M.J.; PRONTO, J.L.; GOOCH, C.A.; WILLIAMSON, A.A.; TRABOLD, T.A. Lifecycle Greenhouse Gas Analysis of an 105 Anaerobic Codigestion Facility Processing Dairy Manure and Industrial Food Waste. **Environmental Science and Technology**, v. 49, p. 11199–11208, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço energético nacional**. 2017. Relatório Final.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION (FAO) 2011. Disponível em <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>>. Acesso em: 05 mar. 2019.
- FERNANDES, D.M.; SUZUKI, A.B.P.; VIEIRA, A.C.; ARAÚJO, I.R.C.; COSTANZI, R.N. Biomassa como fonte alternativa de energia. **Revista da madeira**, Ed. 129, 2011.
- FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. Anaerobic Processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 05, p. 03-19, 2006.
- FORSTER-CARNEIRO, T.; BERNI, M.D.; DORILEO, I.L.; ROSTAGNO, M.A. Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 78–88, 2013.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Biocombustíveis**, FGV Energia, no.8. 2017.
- GALBIATTI, J.A.; CAMELO, A.D.; SILVA, F.G.; GERARDI, E.A.B.; CHICONATO, D.A. Estudo qualitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores

tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 432–437, 2010.

GE, X.; XU, F.; LI, Y. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: recent progress and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 205, p. 239–249, 2016.

GHASIMI, D.S.M.; TAO, Y.; KREUK, M. de., ABBAS, B.; ZANDVOORT, M.H.; VAN LIER, J.B. Digester performance and microbial community changes in thermophilic and mesophilic sequencing batch reactors fed with the fine sieved fraction of municipal sewage. **Water Research**, v. 87, p. 483-493, 2015.

GLATZ, P.; MIAO, Z.; RODDA, B. Handling and treatment of poultry hatchery waste: A 106 review. **Sustainability**, v. 03, p. 216–237, 2011.

GOMES, F.O.de.C.; CAPPI, N. Redução de Sólidos de Dejetos de Poedeiras em Biodigestores Operados com Diferentes Tempos de Retenção Hidráulica. In: **Periódicos UEM. Encontro de Iniciação Científica**, v. 1, 2011.

GOU, C.; YANG, Z.; HUANG, J.; WANG, H.; XU, H.; WANG, L. Effects of temperature and organic loading rate on the performance and microbial community of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and food waste. **Chemosphere**, v. 105, p. 146–151, 2014.

GU, L.; ZHANG, Y.X.; WANG, J.Z.; CHEN, G.; BATTYE, H. Where is the future of China's biogas? Review, forecast, and policy implications. **Petroleum Science**, v. 13, p. 604–624, 2016.

HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J.E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J.LA.; MOSBAEK, H.; CHRISTENSEN, T.H. Method for determination of methane potentials of solid organic waste, **Waste Management**, v. 24, p. 393–400, 2004.

HASSAN, M.; DING, W.; UMAR, M.; RASSOL, G. Batch and semi-continuous anaerobic co-digestion of goose manure with alkali solubilized wheat straw: a case of carbon to nitrogen ratio and organic loading rate regression optimization, **Bioresource Technology**, v. 230, p. 24–32, 2017.

HE, P.J. Anaerobic digestion: an intriguing long history in China. **Waste Management**, v. 03, p.549–50, 2010.

HEIJMAN, W. How big is the bio-business? Notes on measuring the size of the Dutch bio-economy. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 77, p. 5-8, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**, Relatório de Pesquisa, Brasília, 2012.

JANG, H.M.; PARK, S.K.; HA, J.H.; PARK, J.M. Microbial community structure in a thermophilic aerobic digester used as a sludge pretreatment process for the mesophilic anaerobic digestion and the enhancement of methane production, **Bioresource Technology**, v. 145, p. 80–89, 2013.

JHA, P.; SCHMIDT, S. Reappraisal of chemical interference in anaerobic digestion processes, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 954-971, 2017.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás**. 1.ed. Lajeado: Editora da Univates - Rio Grande do Sul, 2014.

KATUWAL, H.; BOHARA, A.K. Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2668–2674, 2009.

KONRAD, O.; SCHMEIER, N.P.; ANATER, A.T.; CASARIL, C.; LUMI, M. Geração de biogás através de digestão anaeróbia utilizando substrato suíno e bovino, **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 12, p. 209–214, 2014.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P.A.V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista Política Agrícola**, n. 3, 2006.

KUNZ, A.; MIELE, M.; STEINMETZ, R.L.R. Advanced swine manure treatment and utilization in Brazil, **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5485-5489, 2009.

KWIETNIEWSKA, E.; TYS, J. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 491–500, 2014.

LASTELLA, G.; TESTA, C.; CORNACCHIA, G.; NOTORNICOLA, M.; VOLTASIO, F.; SHARMA, V.K. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: Biogas production and its purification, **Energy Conversion and Management**, v. 43, p. 63–75, 2002.

LEITE, V.D.; LOPES, W.S.; SOUSA, J.T.de.; PRASAD, S.; SILVA, S.A. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos Anaerobic treatment of organic solid waste with high and low concentrations of solids, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 190–196, 2009.

LI, C.; NGES, I.A.; LU, W.; WANG, H. Assessment of the degradation efficiency of full-scale biogas plants: A comparative study of degradation indicators, **Bioresource Technology**, v. 244, p. 304-312, 2017.

LI, Y.; LUO, W.; LU, J.; ZHANG, X.; LI, S.; WU, Y.; LI, G. Effects of digestion time in anaerobic digestion on subsequent digestate composting, **Bioresource Technology**, v. 267, p. 117–125, 2018.

LIANHUA, L.; DONG, L.; YONGMING, S.; LONGLONG, M.; ZHENHONG, Y.; XIAOYING, K. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 7261–7266, 2010.

LIU, T.; ZHOU, Z.; LI, Z.; WANG, X.; SUN, J. Effects of liquid digestate pretreatment on biogas production for anaerobic digestion of wheat straw, **Bioresource Technology**, v. 280, p. 345–351, 2019.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X. REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540-555, 2015.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; MACÉ, S.; ASTALS, S. Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling, **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 31, p. 99–111, 2011.

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

MILANI, M.; MONTORSI, L. Energy Recovery of the Biomass from Livestock Farms in Italy: The Case of Modena Province, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, v. 6, p. 464-480, 2018.

MILANEZ, A.Y.; GUIMARÃES, D.D.; MAIA, G.B.da.S.; SOUZA, J.A.P.de.; LEMOS, M.L.F. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas, **BNDES Setorial**, v. 47, p. 221-276, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Biodiversidade Brasileira. 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-brasileira>. Acesso em: 11 mar. 2019.

MOTTA, F.S.da. **Produza sua energia: biodigestores anaeróbios**. Recife: SETE. 1986.

MUSTAFA, G.de S. **Introdução à Engenharia Bioquímica**. Salvador. 2014.

NÁTHIA-NEVES, G.; BERNI, M.; DRAGONE, G.; MUSSATTO, S.I.; FORSTER-CARNEIRO, T. Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments, **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 15, p. 2033–2046, 2018.

NEGI, S.; DHAR, H.; HUSSAIN, A.; KUMAR, S. Biomethanation potential for co-digestion of municipal solid waste and rice straw: A batch study, **Bioresource Technology**, v. 254, p. 139–144, 2018.

NGHIEM, L.D.; KOCH, K.; BOLZONELLA, D.; DREWES, J.E. Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 354–362, 2017.

NESHAT, S.A.; MOHAMMADI, M.; NAJAFPOUR, G.D.; LAHIAJNI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308–322, 2017.

ORRICO, A.C.A.; SUNADA, N.da.S.; LUCAS JUNIOR, J.de.; ORRICO JUNIOR, M.A.P.; SCHWINGEL, A. W. Codigestão anaeróbia de dejetos de suínos e níveis de inclusão de óleo de descarte, **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 657–664, 2015.

PALHARES, J.C.P. **Biodigestores, a solução?**. Suinocultura Industrial, no.07, p.12-22. 2007.

PALUDO, G.B. Microrganismos geneticamente modificados e sua relação com o aumento na produção de biocombustíveis, **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, p. 2209–2225, 2014.

PENG, J.F.; SONG, Y.H.; WANG, Y.L.; YUAN, P.; LIU, R. Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor, **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 80, p. 60–65, 2013.

PENTEADO, M.C.; SCHIRMER, W.N.; DOURADO, D.C.; GUERI, M.V.D. Análise do potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da vinhaça e bagaço de cana, **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, p. 26-33, 2018.

PEREIRA, G. Viabilidade econômica da instalação de um biodigestor em propriedades rurais, **Revista de Administração e Ciências Contábeis do Ideau**, v. 6, 2011.

PIROTA, R.D.P.B.; TONELOTTO, M.; DELABONA, P. da S.; TREMACOLDI, C.R.; FARINAS, C.S. Caracterização de fungos isolados da região Amazônica quanto ao potencial para produção das enzimas envolvidas na conversão da biomassa vegetal, **Revista Ciência Rural**, v. 45, p. 1606–1612, 2015.

POULSEN, T.G.; ADELARD, L. Improving biogas quality and methane yield via codigestion of agricultural and urban biomass wastes, **Waste Management**, v. 54, p.118–125, 2016.

QUADROS, D.G.de.; OLIVERA, A.de.P.M.; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P.H.F.de.; FERREIRA, E.de.J. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 326–332, 2010.

RIYA, S.; SUZUKI, K.; TERADA, A.; HOSOMI, M. Influence of C / N Ratio on Performance and Microbial Community Structure of Dry- Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Swine Manure and Rice Straw, **Journal of Medical and Bioengineering**, v. 05, p. 11–14, 2016.

RODRIGUEZ-VERDE, I.; REGUEIRO, L.; CARBALLA, M.; HOSPIDO, A.; LEMA, J.M. Assessing anaerobic co-digestion of pig manure with agroindustrial wastes: The link between environmental impacts and operational parameters, **Science of the Total Environment**, v. 497–498, p. 475–483, 2014.

ROSA, M.F.; Souza Filho, M.S.M.; Figueiredo, M.C.B.; Morais, J.P.S.; Santaella, S.T.; Leitão, R. C. Biorrefinaria: um conceito sustentável para agregação de valor a resíduos. **II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais – II SIGERA**, 15 a 17 de março de 2011 - Foz do Iguaçu, PR, v. I, pp. 98–105, 2011.

SCANO, E.A.; ASQUER, C.; PISTIS, A.; ORTU, L.; DEMONTIS, V.; COCCO, D. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results

on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant, **Energy Conversion and Management**, v. 77, p. 22–30, 2014.

SCHIEVANO, A.; TENCA, A.; SCAGLIA, B.; MERLINO, G.; RIZZI, A.; DAFFONCHIO, D.; OBERTI, R.; ADANI, F. Two-Stage vs Single-Stage Thermophilic Anaerobic Digestion: Comparison of Energy Production and Biodegradation Efficiencies, **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 8502–8510, 2012.

SGANZERLA, E. **Biodigestor: uma solução**. Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SILVA, G.A.; MORAIS JR, J.A.; ROCHA, E.R. Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos, **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 11–16, 2016.

SOUZA, E.L.de.; SELLIN, N.; MARANGONI, C.; Souza, O. The Influence of Different Strategies for the Saccharification of the Banana Plant Pseudostem and the Detoxification of Concentrated Broth on Bioethanol Production, **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, p. 943–965, 2017.

SUKHESH, M.; RAO, P. Anaerobic Digestion of Crop Residues: Technological Developments and Environmental Impact in the Indian Context, **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, 2018.

SUN, C.; CAO, W.; BANKS, C.J.; HEAVEN, S.; LIU, R. Biogas production from undiluted chicken manure and maize silage: A study of ammonia inhibition in high solids anaerobic digestion, **Bioresource Technology**, v. 218, p.1215–1223, 2016.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill, 978p, 1993.

TIETZ, C.M.; RODRIGO, P.; SOARES, H.; GABRIELA, K. Produção de energia pela biodigestão anaeróbia de efluentes: o caso da bovinocultura, **Revista Acta Iguazu**, v. 2, p. 15–29, 2013.

TURKENBURG, W.C. (coord.). **Renewable energy Technologies**. In: World Energy Assessment of the United Nations, UNDP, New York, 2000.

UNIVERSITY OF ADELAIDE. **Brief History of Biogas**. Retrieved, 19th December 2010, 2010. Disponível em: <http://www.adelaide.edu.au/biogas/history/>. Acesso em: 11 mar. 2019.

VALERO, D.; MONTES, J.A.; RICO, J.L.; RICO, C. Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests, **Waste Management**, v. 48, p. 193-198, 2016.

VERMA, S. **Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes**, 2002.

XIE, S.; HAI, F.I.; ZHAN, X.; GUO, W.; NGO, H.H.; PRICE, W.E.; NGHIEM, L.D. Anaerobic co-digestion: A critical review of mathematical modelling for performance optimization, **Bioresource Technology**, v. 222, p. 498–512, 2016.

- XIE, S.; LAWLOR, P.G.; FROST, J.P.; HU, Z.; ZHAN, X. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage, **Bioresource Technology**, v. 102, p. 5728–5733, 2011.
- ZHANG, T.; MAO, C.; ZHAI, N.; WANG, X.; YANG, G. Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk, **Waste Management**, v. 35, p. 119–126, 2015.
- ZHAO, Y.; SUN, F.; YU, J.; CAI, Y.; LUO, X.; CUI, Z.; HU, Y.; WANG, X. Co-digestion of oat straw and cow manure during anaerobic digestion: Stimulative and inhibitory effects on fermentation, **Bioresource Technology**, v. 269, p. 143-152, 2018.
- ZHU, L.; HILTUNEN, E. Application of livestock waste compost to cultivate microalgae for bioproducts production: a feasible frame work, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p.1285–1290, 2016.
- ZEALAND, A.M.; ROSKILLY, A.P.; GRAHAM, D.W. Effect of feeding frequency and organic loading rate on biomethane production in the anaerobic digestion of rice straw, **Applied Energy**, v. 207, p.156–165, 2017.
- XU, R.; ZHANG, K.; LIU, P.; KHAN, A.; XIONG, J.; TIAN, F.; LI, X. A critical review on the interaction of substrate nutrient balance and microbial community structure and function in anaerobic co-digestion, **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1119–1127, 2018.
- XU, F.; WANG, Z.W.; TANG, L.; LI, Y. A mass diffusion-based interpretation of the effect of total solids content on solid-state anaerobic digestion of cellulosic biomass, **Bioresource Technology**, v. 167, p. 178–185, 2014.
- WANG, X.; YANG, G.; FENG, Y.; REN, G.; HAN, X. Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw, **Bioresource Technology**, v. 120, p. 78–83, 2012.
- WANG, X.; CHEN, Y.; SUI, P.; GAO, S.W.; QIN, F.; WU, X.; XIONG, J. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: An emergy evaluation based on LCA, **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 234–245, 2013.
- WANG, Y.; LI, G.; CHI, M.; SUN, Y.; ZHANG, J.; JIANG, S.; CUI, Z. Effects of co- digestion of cucumber residues to corn stover and pig manure ratio on methane production in solid state anaerobic digestion, **Bioresource Technology**, v. 250, p. 328–336, 2018.
- WARTELL, B.A.; KRUMINS, V.; ALT, J.; KANG, K.; SCHWAB, B.J.; FENNELL, D.E. Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding, **Bioresource Technology**, v. 112, p. 42–50, 2012.
- WEI, S.; ZHANG, H.; CAI, X.; XU, J.; FANG, J.; LIU, H. Psychrophilic anaerobic co-digestion of highland barley straw with two animal manures at high altitude for enhancing biogas production, **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 40–48, 2014.
- WICKHAM, R.; GALWAY, B.; BUSTAMANTE, H.; NGHIEM, L.D. Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes, **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 113, p. 3–8, 2016.

YAN, Z.; SONG, Z.; LI, D.; YUAN, Y.; LIU, X.; ZHENG, T. The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw, **Bioresource Technology**, v. 177, p. 266–273, 2015.

YAO, Y.; LUO, Y.; YANG, Y.; SHENG, H.; LI, X.; LI, T.; SONG, Y.; ZHANG, H.; CHEN, S.; HE, W.; HE, M.; REN, Y.; GAO, J.; WEI, Y.; NA, L. Water free anaerobic co-digestion 117 of vegetable processing waste with cattle slurry for methane production at high total solid content, **Energy**, v. 74, p. 309–313, 2014.

YE, J.; LI, D.; SUN, Y.; WANG, G.; YUAN, Z.; ZHEN, F.; WANG, Y. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure, **Waste Management**, v. 33, p. 2653–2658, 2013.

YIN, D.; LIU, W.; ZHAI, N.; YANG, G.; WANG, X.; FENG, Y.; REN, G. Anaerobic digestion of pig and dairy manure under photo-dark fermentation condition, **Bioresource Technology**, v. 166, p. 373–380, 2014.

