



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Ana Carolina Benito Barduco

Produção Microbiana de Biogás Como Fonte de Energia Renovável e
Sua Importância Ambiental

Presidente Prudente

2016

Ana Carolina Benito Barduco

Produção Microbiana de Biogás Como Fonte de Energia Renovável e
Sua Importância Ambiental

Trabalho de Graduação apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Presidente Prudente.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Flora Dalberto Vasconcelos

Presidente Prudente

2016

Benito Barduco, Ana Carolina.
B415p Produção microbiana de biogás como fonte de energia renovável e sua
importância ambiental / Ana Carolina Benito Barduco. - Presidente Prudente :
[s.n], 2016
x, 78 f. : il.

Orientador: Ana Flora Dalberto Vasconcelos
Trabalho de conclusão (bacharelado – Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Biocombustíveis. 2. Biodegradação anaeróbia. 3. Micro-organismos. I.
Benito Barduco, Ana Carolina. II. Vasconcelos, Ana Flora Dalberto. III.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV.
Produção microbiana de biogás como fonte de energia renovável e sua
importância ambiental.

TERMO DE APROVAÇÃO**Ana Carolina Benito Barduco****"Produção microbiana de biogás como fonte de energia renovável e sua importância ambiental"**

Trabalho de graduação aprovado como um dos requisitos parciais para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências e Tecnologia, *campus* de Presidente Prudente – SP, pela seguinte banca examinadora:



Profa. Dra. Ana Flora Dalberto Vasconcelos (Orientadora)



Profa. Dra. Rosane Freire Boina



Profa. Dra. Beatriz Eleutério Goi

Presidente Prudente, 15 de março de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Nydia e Inivaldo,
e a minha irmã Raísa, sem os quais jamais teria
condições de chegar aonde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Flora Dalberto Vasconcelos, por toda atenção prestada, tempo dedicado e ensinamentos oferecidos ao longo da elaboração deste trabalho.

Agradeço à minha mãe Nydia, por toda motivação e incentivo, fazendo com que eu nunca desistisse dos meus objetivos.

Agradeço ao meu namorado Bruno, por todo carinho e auxílio, fazendo com que eu não me sentisse sozinha em nenhum momento.

Agradeço à todas as pessoas e especialmente, a todos os colegas e professores do curso que de alguma maneira contribuíram para que eu pudesse chegar até aqui.

RESUMO

Os estudos crescentes relacionados a temática de energia estão diretamente ligados a busca pela mitigação dos impactos dos gases do efeito estufa na atmosfera. Neste sentido, o biogás surge como um biocombustível promissor. A digestão anaeróbia controlada tem sido o foco de pesquisas para o desenvolvimento desta tecnologia. O entendimento do processo de formação de biogás através da análise do comportamento microbiano é fundamental para otimização das técnicas de obtenção do mesmo, assim como para o alcance de um produto mais energeticamente eficiente, como o biometano. O interesse em se obter energia através da combustão do biogás pode trazer benefícios indiretos ao meio ambiente, como o reaproveitamento de resíduos que contenham matéria orgânica – como resíduos agroindustriais, resíduos municipais, águas residuais, rejeitos de poda, dejetos de animais, entre outros – além da obtenção de biofertilizante como subproduto. A utilização do biogás para produção de energia minimiza indiretamente as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, por meio da substituição de combustíveis fósseis, e consequentemente contribui para a amenização do aquecimento global. Neste contexto, o objetivo deste trabalho de graduação foi constatar, através de revisão bibliográfica, a relevância do desenvolvimento de pesquisas relacionadas a produção de biogás, sua importância ambiental e aproveitamento energético, assim como a necessidade do desenvolvimento de mais estudos na área.

Palavras-chave: Biocombustíveis. Biodegradação anaeróbia. Micro-organismos. Poluição.

ABSTRACT

The increasing studies related to the energy subject are directly linked to the search for mitigation of the impacts of greenhouse gases on the atmosphere. In this sense, biogas appears as a promising biofuel. Controlled anaerobic digestion has been the focus of research for the development of this technology. The understanding of the process of biogas formation through the analysis of microbial behavior is fundamental for the optimization of the techniques of obtaining it, as well as for the reach of a more energy efficient product, such as biomethane. The interest in obtaining energy for the combustion of biogas can bring indirect benefits to the environment, such as the reuse of residues containing organic matter - such as agroindustrial residues, municipal waste, wastewater, agricultural waste, animal waste, among others – and a biofertilizer as a by-product. The use of biogas for energy production indirectly minimizes emissions of carbon dioxide into the atmosphere, through the substitution of fossil fuels, and consequently contributes to a mitigation of global warming. In this context, the objective of this undergraduate study is to verify, through a bibliographic review, a relevance for the development of biogas production research, its environmental importance and energy use, as well as a need to develop studies in the area.

Keywords: Biofuels. Anaerobic biodegradation. Microorganisms. Pollution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reprodução do experimento de Alessandro Volta	16
Figura 2 - Esquema de digestão anaeróbia	23
Figura 3 - Metanogênese, a partir de CO ₂ e H ₂	29
Figura 4 - Metanogênese, a partir de metanol e acetato	31
Figura 5 - Esquemas das reduções de sulfato	35
Figura 6 - Micrografias eletrônicas de varredura de células arqueobactérias metanogênicas, revelando a sua grande diversidade morfológica	37
Figura 7 - Esquema genérico de produção de biogás	42
Figura 8 - Fontes de produção de biogás.....	44
Figura 9 - Biodigestor de pequena vazão.....	50
Figura 10 - Modelo de biodigestor indiano	51
Figura 11 - Modelo de biodigestor chinês	52
Figura 12 - Modelo de biodigestor canadense	53
Figura 13 - Participação na energia elétrica de biomassa	54
Figura 14 - Unidade de cogeração com turbinas a gás	55
Figura 15 - Um trocador de calor em um sistema de cogeração alimentado por biogás	56
Figura 16 - Transição de matrizes energéticas	58
Figura 17 - Cilindro de armazenamento de biometano em veículo particular	60
Figura 18 - Aplicação do biofertilizante	61
Figura 19 - Utilização de biogás no Nepal.....	63
Figura 20 - Projeto “Geo Energética”	65
Figura 21 - Granja Colombari, projeto em parceria com a ITAPU	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica do biogás	19
Tabela 2 - Produção de biogás em diferentes fontes	20
Tabela 3 - Relação C/N para materiais biodegradáveis	39
Tabela 4 - Produção de biogás de acordo com a matéria-prima	45
Tabela 5 - Emissões de GEE no tratamento de efluentes de atividades industriais	46
Tabela 6 - Metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos	47
Tabela 7 - Produção diária de dejetos de animais	49
Tabela 8 - Equivalência de 1 m ³ de biogás com outros combustíveis	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais reações que ocorrem na formação de metano.....	25
Quadro 2 - Substratos convertidos em metano por arqueobactérias metanogênicas.....	27
Quadro 3 - Características de algumas arqueobactérias metanogênicas de acordo com o tipo de substrato utilizado	32
Quadro 4 - Micro-organismos envolvidos na digestão anaeróbia	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS E SÍMBOLOS

CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CH₄ – Gás metano

CO₂ – Gás carbônico

Copel – Companhia Paranaense e Energia Elétrica

COVs – Compostos Orgânicos Voláteis

GEE – Gases do Efeito Estufa

GW – Gigawatts

H₂ – Hidrogênio

H₂S – Gás sulfídrico

K – Potássio

MCI – Motores de Combustão Interna

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MW – Megawatts

N – Nitrogênio

OC – Observatório do Clima

OMS – Organização Mundial de Saúde

P – Fósforo

pH – Potencial de Hidrogênio

ST – Sólidos Totais

UNESP – Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Justificativas	12
3. Objetivos.....	14
2.1. Geral.....	14
2.2. Específicos	14
4. Metodologia	14
5. Revisão bibliográfica.....	15
5.1. Caracterização do biogás	15
5.1.1. Descoberta do biogás	15
5.1.2. Definição e composição do biogás.....	18
5.2. Processo de formação do biogás	22
5.2.1. Biodegradação anaeróbia	22
5.2.2. Principais micro-organismos envolvidos na biodegradação anaeróbia.....	35
5.2.3. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia de um substrato orgânico	38
5.3. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos sólidos	41
5.3.1. Matéria-prima para produção de biogás.....	43
5.3.2. Produção de biogás em biodigestor	49
5.3.3. Aproveitamento energético do biogás	54
5.3.5. Purificação de biogás: Biometano	58
5.3.6. Subproduto da produção de biogás: Biofertilizante	60
5.4. Exemplos da utilização de biogás.....	61
5.4.1. Utilização de biogás em países subdesenvolvidos.....	62
5.4.2. Referências nacionais da utilização de biogás.....	64
5.5. Vantagens e desvantagens ambientais provenientes da tecnologia de biogás.....	66
6. Conclusão.....	68
7. Referências bibliográficas	69

1. Introdução

Desde os primórdios da civilização, a principal fonte de energia utilizada é a oriunda de combustíveis fósseis provenientes da matéria orgânica fossilizada. Os combustíveis fósseis representam cerca de 80% da energia primária consumida em escala mundial e ainda, cerca de 57% da energia destinada ao setor de transportes (LINDFELDT; WESTERMARK, 2009). Devido ao aumento pela demanda de petróleo a nível mundial e aos malefícios que podem causar ao meio ambiente, os combustíveis fósseis vêm sendo substituídos por fontes de energia limpas (ESCOBAR et al., 2009).

A combustão proveniente deste tipo de combustível gera uma quantidade significativa de gases de efeito estufa, sendo os mais importantes o dióxido de carbono (CO_2) e o dióxido de enxofre (SO_2). Desde meados do século passado, a concentração atmosférica de CO_2 está se elevando e atingindo níveis muito altos devido, em parte, à utilização crescente de combustíveis fósseis. Acredita-se que seja este um dos fatores que contribuam para as mudanças climáticas, ocasionando elevação do nível dos oceanos, alteração na intensidade e distribuição das chuvas e a um aumento de fenômenos climáticos extremos (ESCOBAR et al., 2009).

Nos últimos anos o Brasil tem enfrentado uma crise energética decorrente do aumento do consumo de energia elétrica pela população, além da crise hídrica. Segundo a EPE (2015), a participação das hidrelétricas na matriz energética brasileira vem diminuindo gradativamente desde 2012, quando houve redução de 84,5% em 2012 para 79,3% em 2013 e 65,2% em 2014. Por outro lado, os combustíveis fósseis, mais comumente utilizados em larga escala para produção de energia, a exemplo dos derivados de petróleo, são recursos naturais não renováveis e causam alto impacto de poluição ambiental quando queimados. Desta maneira, o investimento em soluções sustentáveis, como fontes de geração de energia limpas e renováveis, é crescente.

O aumento da produção industrial, da população e da urbanização aumenta o consumo de bens e serviços e resulta no aumento da geração de resíduos (BARROS, FILHO, SILVA, 2013). Antigamente o biogás era visto apenas como um subproduto da decomposição de resíduos. A busca por fontes alternativas renováveis de energia tem crescido assim como as pesquisas na área de sustentabilidade. Nos últimos anos, pode-se perceber um aumento da divulgação de temas como emissão de gases do

efeito estufa (GEE), consumo consciente de recursos hídricos e destino adequado de resíduos.

Neste cenário, os biocombustíveis, que englobam todo combustível derivado de fonte orgânica e não fóssil, a exemplo do biogás, têm estimulado a investigação científica. Os biocombustíveis possuem como características a baixa toxicidade, são biodegradáveis, renováveis e são capazes de reduzir as emissões de gases que intensifica o efeito estufa (PALUDO, 2014). O biogás apresenta como seu principal componente o metano (CH_4) e é proveniente da decomposição anaeróbia natural da matéria orgânica oriunda de resíduos orgânicos, resíduos agrícolas, resíduos industriais, dejetos e rejeitos da produção animal, entre outros. Desta forma, o processo anaeróbico apresenta-se como uma alternativa promissora, visando o reaproveitamento de resíduos e a consequente despoluição do meio ambiente. Os micro-organismos anaeróbios são os agentes produtores de biogás e para que se possa aumentar, melhorar e otimizar essa produção, os mesmos têm seu metabolismo minuciosamente estudado.

O aproveitamento energético de biogás, oriundo principalmente de resíduos vegetais, traz impactos positivos ao meio ambiente por apresentar um balanço neutro de carbono durante o processo (PERSSON et al., 2006; BRANCO, 2010). Isto se deve ao fato de o gás carbônico produzido durante o processo, ser absorvido por vegetais que serão novamente utilizados no processo, mantendo desta forma a concentração do gás inalterada na atmosfera, contribuindo para minimização do aquecimento global (BRANCO, 2010).

Sendo assim, o presente trabalho de revisão bibliográfica teve por objetivo principal expor a importância da geração de biogás para a preservação do meio ambiente, abordando aspectos desse processo realizado por micro-organismos anaeróbios ao reunir diferentes artigos científicos, com o propósito de contextualizar estudos atuais relacionadas ao tema.

2. Justificativas

A escolha do tema deste trabalho de graduação justifica-se pelo interesse do autor no tema devido a pesquisa anteriormente desenvolvida. A mencionada pesquisa

tratou-se de um experimento laboratorial desenvolvido durante programa de intercâmbio de graduação sanduíche “Ciências sem Fronteiras”, financiado pela Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), nos Estados Unidos, em University of Wyoming, orientada pelo professor doutor Michael A. Urynowicz, durante os meses de junho e julho de 2015.

O objetivo principal do estudo em questão foi analisar a produção de metano por micro-organismos anaeróbicos, provenientes de uma reserva de carvão mineral, utilizando melaço de beterraba como fonte alternativa de carbono. Essa proposta surgiu como uma continuação de uma tese de mestrado orientada pelo mesmo professor e intitulada “Use of Plant-Derived Carbohydrates as an Alternative Carbon Source for Enhancing the Production of Methane in Powder River Basin Coal”, em português, “O uso de carboidratos vegetais como fonte alternativa de carbono para otimizar a produção de metano na reserva de carvão mineral “Powder River Basin Coal”” realizada na mesma universidade no ano de 2013.

Como resultado, a tese de mestrado obteve que carboidratos simples provenientes de vegetais possuem um grande potencial energético. O carboidrato simples é capaz de produzir maior quantidade de metano em menor período de tempo se comparado ao carboidrato complexo. Por esta razão, o melaço de beterraba foi escolhido para a continuação do estudo do intercâmbio apresentando em sua composição a sacarose, um carboidrato simples de alto teor energético. A proposta para o presente estudo foi otimizar a produção de metano de acordo com os resultados obtidos na tese de mestrado.

Desta forma, o interesse por biocombustíveis que apresentem metano em sua composição se estende para o presente trabalho de graduação. Levou-se em consideração as fontes de produção de biogás encontradas em abundância no Brasil e ao redor do mundo, além do potencial energético do metano já descrito. É importante ressaltar que poucos estudos sobre biogás são desenvolvidos atualmente.

3. Objetivos

2.1. Geral

Expor o potencial do biogás como um biocombustível, dando enfoque a sua forma de produção sustentável, que ocorre a partir do uso de diversos resíduos como matéria-prima por meio da ação microbiana de biodegradação.

2.2. Específicos

- Caracterizar as principais fontes de produção de biogás oriundo de resíduos;
- Analisar a atividade microbiana da produção de biogás com foco em seu metabolismo;
- Identificar os principais micro-organismos envolvidos na produção de biogás;
- Analisar o aproveitamento energético de biogás;
- Exemplificar a eficiência ambiental do biogás por meio da análise de estudos relativos ao tema.

4. Metodologia

O presente trabalho de graduação trata-se de uma revisão bibliográfica realizada por meio de seleção de estudos relativos ao tema de biogás. Para tal, foi utilizado o banco de dados da Universidade Estadual Paulista (UNESP) e outras plataformas científicas como o SciELO e Google Acadêmico para filtragem de material. Foram selecionadas livros, relatórios oficiais governamentais, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos de revistas e jornais científicos levando-se em consideração a veracidade das informações e atualização das mesmas. Ressalta-se que, a maioria dos estudos referenciados são internacionais por não haver muita publicação sobre o referido assunto no Brasil.

5. Revisão bibliográfica

5.1. Caracterização do biogás

5.1.1. Descoberta do biogás

A decomposição de matéria orgânica e consequente geração de biogás, vem sendo aproveitada desde os primórdios da civilização. As primeiras evidências de utilização de biogás datam dos séculos 10 a.C. e 16 d.C., na região Assíria e Pérsia, respectivamente, onde o gás exalado na decomposição de resíduos orgânicos era queimado com o objetivo de aquecer a água utilizada para os banhos (LUSK, 1998; BLEY JR, 2015). No século XIII, o explorador Marco Polo registrou ter observado tanques de sépticos cobertos na China, porém, o motivo pelo qual o biogás era coletado não ficou claro (DING et al., 2010). No entanto, é possível encontrar registros na literatura da China sobre aproveitamento energético de biogás desde muitos anos atrás (BLEY JR, 2015).

No século XVII, Jan Baptista van Helmont foi o primeiro a afirmar que os gases inflamáveis poderiam evoluir a partir de matéria orgânica em decomposição. Em 1776, Alessandro Volta concluiu que havia uma correlação direta entre a quantidade de matéria orgânica em decomposição e a quantidade de gás inflamável produzido. A Figura 1 retrata a recriação do experimento de Volta, demonstrado cerca de 200 anos após o estudo original. Neste experimento, foi utilizado um grande funil invertido para captar o gás emitido da decomposição anaeróbia de sedimentos de água doce. Com o funil submerso na água, os sedimentos foram misturados com um bastão permitindo a liberação de metano. Uma chama foi posicionada próxima abertura do funil, promovendo a combustão do metano (MADIGAN et al., 2010).



Figura 1 - Reprodução do experimento de Alessandro Volta
Fonte: Madigan et al. (2010).

Em 1808, Humphry Davy determinou que o metano estava presente nos gases produzidos na decomposição do esterco bovino (LUSK, 1998; BLEY JR, 2015). A primeira estação de tratamento de efluentes com coletores de biogás, foi construída na Índia em 1857, com a intenção do posterior aproveitamento do gás em motores (OECHSNER; KHANAL; TAHERZADEH, 2014). Em 1868, Antoine Béchamp relatou que a formação de metano que ocorre durante a decomposição da matéria orgânica é devida a ação microbiana (ABBASI, T.; TAUSEEF; ABBASI, 2012).

Em 1884, Louis Pasteur introduz a idéia de que um gás pode vir a prover aquecimento e iluminação (BLEY JR, 2015). Na década de 1890, Omelianski isolou micro-organismos responsáveis pela liberação de hidrogênio, ácido acético e ácido butírico durante a fermentação da celulose. Ele também relatou que o hidrogênio e o dióxido de carbono seriam possíveis atores para formação de metano (ABBASI, T.; TAUSEEF; ABBASI, 2012). Em 1895, Donald Cameron construiu um tanque séptico na Inglaterra, projetado para coletar biogás para posterior uso em aquecimento e iluminação de postes (OECHSNER; KHANAL; TAHERZADEH, 2014; BLEY JR, 2015).

No âmbito da ciência, Söhngen confirmou as descobertas de Omelianski em 1910 e também descobriu que a fermentação de materiais complexos ocorre por reação de

oxirredução, resultando na formação de hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Ele demonstrou que o hidrogênio reage com o dióxido de carbono para formar metano e ainda, supôs que o ácido acético ao sofrer descarboxilação pode ocasionar a fermentação de metano. Esta suposição permaneceu controversa durante décadas, mas hoje em dia é considerada como verdade (ABBASI, T.; TAUSEEF; ABBASI, 2012).

Em 1920, o biogás resultante do tratamento de águas residuais passou a ser utilizado para aquecer o tanque digestor do sistema. Na década de 1930, houve um grande avanço na área de microbiologia o que contribuiu para o estudo de bactérias anaeróbias e produção de metano (BLEY JR, 2015).

A primeira publicação sobre biogás no mundo foi uma monografia publicada na China, em 1935 (XIAODONG, 2009). Na Europa, a utilização da tecnologia de digestão anaeróbia se destacou no tratamento de resíduos agrícolas, industriais e municipais. Esta tecnologia foi incentivada durante e após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), quando o abastecimento normal de energia foi reduzido (LUSK, 1998). A tecnologia de biogás começou a se espalhar na Índia em 1950 através de utilizações em áreas rurais (WARGERT, 2009).

Em 1957, Harold Bates converteu esterco de galinha em combustível gasoso e o processo foi descrito em um documentário anos mais tarde por Tony Ianzelo (BLEY JR, 2015). Em 1958, campanhas para promover os múltiplos usos do biogás ajudaram a popularizar esta tecnologia na China. O governo chinês passou a apoiar o uso desta tecnologia ao identificar sua importância para o desenvolvimento rural (LEE, 2008). Em 1960, na Índia o biogás passou a ser utilizado como gás de cozinha e é utilizado até os dias atuais (BLEY JR, 2015).

Na década de 1980, os europeus, sobretudo ingleses, seguiram o modelo dos programas orientais e passaram a investir ainda mais na tecnologia de biogás. Uma das principais razões para tal foi a intensa oscilação do preço do petróleo, fazendo com que diversos países comesçassem a procurar novas alternativas energéticas (BLEY JR, 2015).

O Brasil, durante as décadas de 1970 e 1980, também enfrentava a crise do petróleo e começaram a surgir diversos programas de incentivo a energia limpa, sendo uma das medidas adotadas, a substituição da gasolina por biogás. Para tal, utilizou-se o biogás gerado em aterros sanitários e reatores anaeróbios. Porém, com

o fim da crise do petróleo estes programas foram paralisados e os derivados de petróleo voltaram a ser a primeira opção como fonte de energia.

Na década de 1990, os malefícios do metano para qualidade do ar passaram a ser questionados nos tratados internacionais como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima e o Protocolo de Kyoto. A criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, pelo Protocolo de Quioto, incentivou os países desenvolvidos a comprarem créditos de carbono, advindos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), de países não-incluídos no Anexo I da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (CETESB, 2006). No Brasil, a Conferência Rio 92 levou a criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), pela ONU e uma das soluções encontradas foi a queima do biogás como medida mitigadora de emissões atmosféricas. Assim, a produção de biogás foi inapropriadamente incentivada para que sua posterior queima gerasse a venda de créditos de carbono, sem que fosse feito o aproveitamento energético (BLEY JR, 2015).

Nos últimos anos estão sendo realizados estudos de investigação para a implantação biorrefinarias anaeróbias que irão converter matérias-primas renováveis em bioenergia e outros produtos afim de satisfazer uma multiplicidade de necessidades da sociedade. Assim, a tecnologia de biogás tem emergido como uma biotecnologia líder no campo da bioenergia, com a expectativa de satisfazer de forma sustentável as crescentes necessidades presentes e futuras do mercado mundial de energia (OECHSNER; KHANAL;TAHERZADEH, 2014).

5.1.2. Definição e composição do biogás

O biogás pode ser definido como uma mistura inflamável de gases, formada principalmente por metano e dióxido de carbono, que resulta do processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica proveniente de resíduos sólidos, efluentes agroindustriais e efluentes sanitários majoritariamente (CETESB, 2006; BERNI; BAJAY, 2006). O biogás possui um alto poder calorífico devido a sua composição principal de metano, e por esta razão, pode ser utilizado diretamente como combustível ou indiretamente, para gerar eletricidade (ABBASI, 2012).

Quando a matéria orgânica, como alimentos, detritos vegetais, estrume animal, lodo de esgoto e partes biodegradáveis de resíduos sólidos urbanos, sofre

decomposição em a ausência de oxigênio livre, gera normalmente um gás que consiste em 40-70% (geralmente 55-65%) metano, sendo o restante principalmente dióxido de carbono com vestígios de outros gases (ABBASI, 2012). É importante ressaltar que as concentrações dos gases na mistura de biogás podem divergir de autor para autor, permanecendo em uma faixa de variação aproximada. De acordo com Karellas, Boukis e Kontopoulos (2010), a composição típica desta mistura pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição típica do biogás

Gases presentes no biogás	Porcentagem (%)
Metano, CH ₄	55 – 75
Dióxido de carbono, CO ₂	25 – 45
Nitrogênio, N ₂	1 – 5
Hidrogênio, H ₂	0 – 3
Monóxido de carbono, CO	0 – 0,3
Sulfeto de hidrogênio, H ₂ S	0,1 – 0,5
Oxigênio, O ₂	Traços

Fonte: Karellas, Boukis e Kontopoulos (2010).

No entanto, a proporção dos gases na mistura de biogás depende principalmente do substrato a ser degradado. O enfoque do presente trabalho são os substratos provenientes de resíduos, porém, é importante ressaltar que a produção de biogás pode ocorrer sem a interferência antrópica como em ambientes de pântano, charcos, fundo de oceanos e lagos assim como, em fontes geotermiais, no trato digestivo de animais, entre outros (MADIGAN et al. 2010). Jönsson et al. (2003), realizaram estudos que resultaram na composição média da proporção de gases do biogás de acordo com seu meio de produção, como pode ser observado na Tabela 2 (JÖNSSON et al., 2003; CETESB, 2006; BERNI; BAJAY, 2006).

Tabela 2 - Produção de biogás em diferentes fontes

Componente/Produção de biogás	Resíduos sólidos	Efluentes agroindustriais	Efluentes domésticos
Metano (%)	45 – 55	60 – 70	55 – 65
Dióxido de carbono (%)	30 – 40	30 – 40	35 – 45
Nitrogênio (%)	5 – 15	< 1	< 1
Sulfeto de hidrogênio (ppm)	50 – 300	10 – 2000	10 – 40

Fonte: Jönsson et al. (2003).

O metano e o dióxido de carbono são produtos metabólicos secundários do processo de decomposição anaeróbia de resíduos, sendo esta atividade a responsável por uma parcela significativa das emissões anuais do gás. A matéria orgânica contida nos resíduos é decomposta pela ação de micro-organismos metanogênicos, que produzem o biogás (CETESB, 2006).

As emissões de metano e dióxido de carbono provenientes de resíduos, envolvem processos ecossistêmicos que resultam de sequências complexas de eventos, que serão detalhados ao longo deste trabalho. Em suma, o processo tem início com a fermentação primária de macromoléculas orgânicas a ácido acético, outros ácidos carboxílicos, álcoois, CO₂ e hidrogênio, seguido de fermentação secundária de álcoois e ácidos carboxílicos em acetato, H₂ e CO₂, que são finalmente convertidos em metano e CO₂ (CONRAD, 1996).

Ademais dos principais componentes citados, o biogás ainda pode conter traços de sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico) e outros compostos de enxofre, assim como siloxanos, nitrogênio, compostos aromáticos, compostos halogenados, compostos orgânicos voláteis (COVs) e vapor d'água. Embora a quantidade destes outros compostos seja relativamente baixa em comparação ao metano na mistura de biogás, estes podem causar impactos ambientais como a degradação da camada de ozônio, intensificando o efeito dos gases estufa e reduzindo localmente a qualidade do ar. Alguns destes componentes podem prejudicar o funcionamento de equipamentos utilizados para o aproveitamento energético do biogás e grande parte dos COVs são considerados potencialmente perigosos para a saúde humana. Outros estudos apontam componentes identificados apenas em biogás gerado em aterros sanitários, como compostos aromáticos, heterocíclicos, alifáticos, cetônicos, terpenicos, alcoólicos e alifáticos halogenados (SCHWEIGKOFER; NIESSNER, 2001; RASI,

2009; CETESB, 2006). De acordo com Persson, Jönsson e Wellinger (2006), o biogás de aterro sanitário pode conter mais de 500 contaminantes diferentes.

O principal composto de enxofre presente no biogás é o sulfeto de hidrogênio, porém, compostos reduzidos de enxofre como sulfuretos, dissulfuretos e tióis também podem ser encontrados. Na presença de água, os compostos de enxofre podem causar corrosão aos equipamentos utilizados para o aproveitamento energético do biogás e por este motivo, devem ser removidos previamente da mistura (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

No processo de biodegradação anaeróbia, o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e outros compostos de enxofre ao serem degradados levam a formação de diversos outros compostos, como o metanotiol e dimetilsulfureto. Quando o dimetilsulfureto sofre redução, durante o processo de metanogênese, forma metano e metanotiol, que por sua vez é convertido em metano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (MADIGAN et al., 2010).

Os resíduos de restos de alimentos possuem alta concentração de nitrogênio assim como os dejetos de animais, emitindo uma grande quantidade de amônia na atmosfera (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006). Uma boa parcela do nitrogênio é perdida durante o armazenamento destes resíduos. Em países como a Dinamarca, aonde os ventos são constantes, as perdas de nitrogênio do armazenamento de estrume em tanques abertos ou lagoas podem chegar a 70%. Nos Estados Unidos, estudos determinam que, quando o estrume animal é descarregado em lagoas abertas, até 50% do nitrogênio é perdido à medida que o dejetos se decompõe. O nitrogênio liberado pelo estrume, é depositado no solo através da ação da chuva e do vento (LEAVENWORTH; SHIFFER, 1998). Caso os resíduos que contenham nitrogênio sejam depositados diretamente no solo, sem um tratamento adequado, podem provocar impactos ao meio ambiente, degradando ecossistemas aquáticos e terrestres, e gerando riscos à saúde humana. Em adição, dejetos de animais também são ricos em fósforo que da mesma maneira que o nitrogênio, pode causar impactos ambientais e riscos à saúde humana (AIRES et al., 2009).

No biogás gerado em aterros sanitários e, dificilmente, em efluentes agroindustriais e domésticos, também são encontrados compostos halogenados que, quando ocorre o aproveitamento energético do biogás, são oxidados durante o processo de combustão e seus produtos, especialmente na presença de água, podem causar a corrosão de equipamentos. Eles também podem iniciar a formação de dioxinas e

furanos se as condições de combustão (temperatura e tempo) forem favoráveis (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006). O nível de alcanos e compostos aromáticos, halogenados e oxigenados depende da composição e estágio de decomposição dos resíduos (ALLEN et al., 1997). Os compostos halogenados são muito usados em indústrias como agregados de refrigerantes, agentes espumantes, solventes e propelentes (SCHEUTZ et al., 2004).

Os compostos orgânicos de silício presentes no biogás podem ser oxidados durante o processo de combustão do biogás, se transformam em dióxido de silício microcristalino, um resíduo que possui características químicas e físicas similares ao vidro. Estas partículas podem causar abrasão e bloqueio em válvulas, turbinas e demais equipamentos utilizados no aproveitamento energético de biogás, fazendo com que haja uma diminuição na capacidade de operação dos mesmos (TOWER, 2003). Ao final do processo de combustão do biogás, alguns compostos orgânicos de silício podem se depositar no óleo dos equipamentos, fazendo com que haja a necessidade da troca desta com maior frequência (MMA, 2010). A maioria dos siloxanos possuem alta pressão de vapor e baixa solubilidade em água indicando que, podem se descolar facilmente do meio aquoso para o gasoso e desta forma são volatilizados no biogás. O acúmulo de compostos de silicato, provenientes da combustão de siloxanos em geradores, está diretamente relacionado ao aumento das emissões de monóxido de carbono durante o processo (TOWER, 2003). Os compostos orgânicos de silício podem ser encontrados em aterros sanitários e efluentes domésticos por serem componentes de produtos de limpeza e higiene pessoal (OHANNESSIAN et al., 2008). Assim, evidencia-se o fato de que a formação de compostos secundários está diretamente ligada a fonte de carbono utilizada.

5.2. Processo de formação do biogás

5.2.1. Biodegradação anaeróbia

A biodegradação anaeróbia, ou digestão anaeróbica, é um processo amplamente utilizada que pode utilizar vários tipos de resíduos orgânicos para a produção de biogás, a partir da decomposição de matéria orgânica em condições estritamente livres de oxigênio (YU; SCHANBACHER, 2010).

A digestão anaeróbia, é o processo no qual micro-organismos anaeróbios transformam a matéria orgânica complexa em compostos simples como metano, dióxido de carbono e vestígios de outros gases (ABBASI, 2012). O processo de biodegradação anaeróbia pode ser dividido em quatro principais fases - hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese - sendo que a última pode ocorrer em cooperação com outros micro-organismos (sintrofia) (KARELLAS; BOUKIS; KONTOPOULOS, 2010; MADIGAN et al., 2010; T. ABBASI, 2012).

Os polímeros provenientes de matéria orgânica em decomposição sofrem hidrólise, em seguida, fermentação (acidogênese), e em seguida, acetogênese e metanogênese, tendo como produtos finais principais o CH_4 e CO_2 (PELLIZARI et al., 2007). O esquema com as principais reações envolvidas e micro-organismo participantes do processo de digestão anaeróbia, pode ser observado na Figura 2.

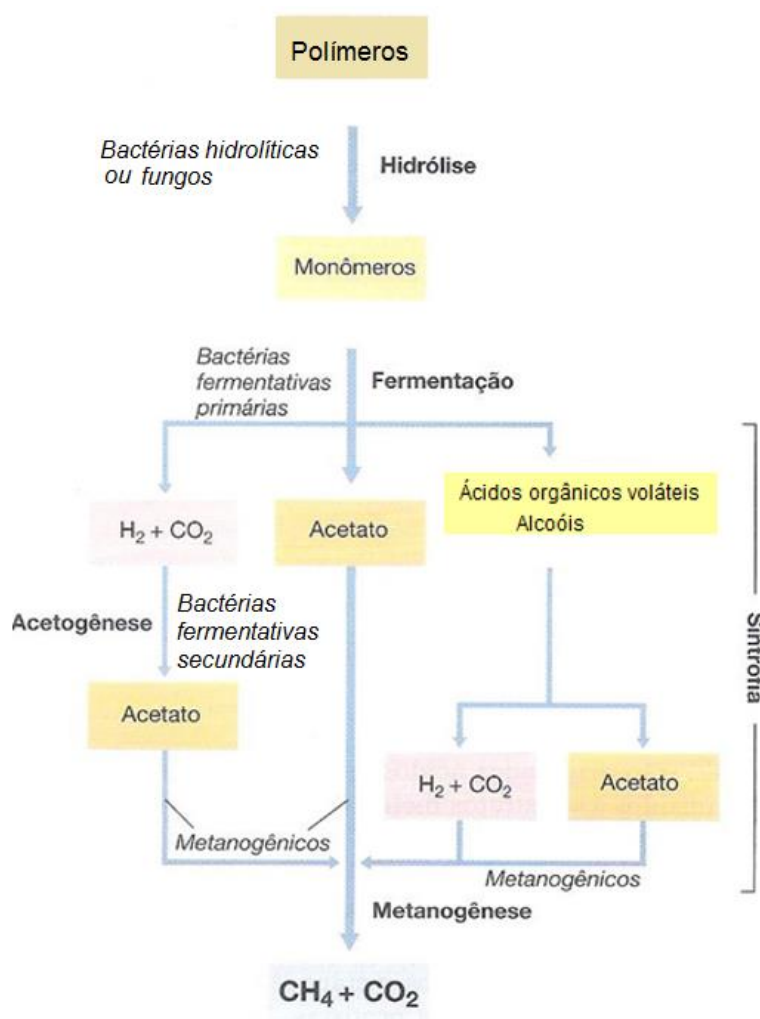


Figura 2 - Esquema de digestão anaeróbia
Fonte: Adaptado de Madigan et al. (2010).

No processo de degradação anaeróbia, polímeros complexos como proteínas, lipídios, celulose e outros polissacarídeos, sofrem hidrólise através da ação de bactérias celulolíticas, outras bactérias hidrolíticas ou até mesmo fungos, resultando em monômeros. As bactérias fermentativas primárias realizam a fermentação dos monômeros resultando em hidrogênio, dióxido de carbono e acetato. Nesta etapa, a formação de ácidos graxos, álcoois e outros compostos também ocorre sendo estes compostos fermentados novamente, mas, desta vez por bactérias fermentativas secundárias resultando em hidrogênio, dióxido de carbônico e acetato. Todo hidrogênio, dióxido de carbônico e acetato produzidos são degradados majoritariamente por arqueobactérias metanogênicas, ora hidrogenotróficas, ora acetoclásticas, respectivamente. (MADIGAN et al., 2010; PELLIZARI et al., 2007).

Teoricamente, o biogás deve conter volumes iguais (50-50) de metano e dióxido de carbono. No entanto, a acetogênese tipicamente produz hidrogênio e para cada 4 mols de hidrogênio consumido por arqueobactérias metanogênicas hidrogenotróficas, um mol de dióxido de carbono é convertido em metano. Gorduras e proteínas podem produzir maiores quantidades de hidrogênio levando a um maior teor de metano típico para esses substratos. Em certas condições, essas moléculas também podem ser convertidas em produtos diferentes do metano. Portanto, o rendimento global do biogás e o teor de metano variam para diferentes substratos, consórcios biológicos e condições do digestor (ABBASI, 2012).

As principais reações químicas que ocorrem no processo de digestão anaeróbia podem ser observadas na Quadro 1.

Quadro 1 - Principais reações que ocorrem na formação de metano

Tipo de reação	Reação
Fermentação de glicose a acetato, H ₂ e CO ₂	Glicose + 4H ₂ O > 2 acetato + 2HCO ₃ ⁻ + 4H ⁺ + 4H ₂
Fermentação de glicose a butirato, H ₂ e CO ₂	Glicose + 2H ₂ O > butirato + 2HCO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2H ₂
Fermentação de butirato a acetato e H ₂	Butirato + 2H ₂ O > 2 acetato + H ⁺ + 2H ₂
Fermentação de propionato a acetato, H ₂ e CO ₂	Propionato + 3H ₂ O > acetato + H ⁺ + HCO ₃ + H ₂
Fermentação de etanol a acetato e H ₂	2 etanol + 2H ₂ O > 2 acetato + 2H ⁺ + 4H ₂
Fermentação de benzoato a acetato, H ₂ e CO ₂	Benzonato + 7H ₂ O > 3 acetato + 3H ⁺ + HCO ₃ + 3H ₂
Metanogênese a partir de H ₂ + CO ₂	4H ₂ + 3HCO ₃ ⁻ + H ⁺ > CH ₄ + 3H ₂ O
Metanogênese a partir de acetato	Acetato + H ₂ O > CH ₄ + HCO ₃ ⁻
Acetogênese a partir de H ₂ + CO ₂	4H ₂ + 2HCO ₃ ⁻ + H ⁺ > acetato + 4H ₂ O

Fonte: Madigan et al., 2010.

As quatro etapas da digestão anaeróbia – hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese – assim como as possíveis etapas de sintrofia e sulfetogênese, serão descritas a seguir.

5.2.1.1. Hidrólise

A biodegradação anaeróbia da matéria orgânica se inicia com o processo de hidrólise uma vez que os micro-organismos não capazes de sintetizar macromoléculas, como proteínas, lipídios, celulose e outros polissacarídeos, sendo necessário um processo de quebra. As bactérias fermentativas hidrolíticas excretam exoenzimas capazes de converter polímeros complexos em monômeros, como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, para que estes sejam capazes de atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas secundárias (IANNICELLI, 2008; T. ABBSI, 2012).

A velocidade em que ocorre a hidrólise limita todo o processo de digestão anaeróbia, ou seja, a velocidade com que o material orgânico é convertido em biogás é limitada pelo andamento da hidrólise (MADIGAN et al., 2010).

5.2.1.2. Acidogênese

Os produtos oriundos da fase de hidrólise são novamente metabolizados, agora por bactérias fermentativas secundárias ou bactérias fermentativas acidogênicas, originando compostos mais simples. Estes produtos são então fermentados durante a acidogênese para formar ácidos orgânicos voláteis, principalmente ácido láctico, propiónico, butírico e valérico (ABBSI, 2012). Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos desta nova fase, as bactérias fermentativas secundárias são comumente designadas como bactérias fermentativas acidogênicas. Os demais produtos gerados são: alcoóis, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio (IANNICELLI, 2008).

Grande parte das bactérias fermentativas acidogênicas é anaeróbia estrita, sendo apenas 1% facultativas que realizam oxidação do substrato orgânico. As espécies mais comumente estudadas são *Clostridium* e *Bacteroides*. A *Clostridium*, por ser uma espécie anaeróbia e formar esporos, pode sobreviver a ambientes extremos, enquanto que a *Bacteroides* podem ser encontradas no trato digestivo e são responsáveis pela degradação de açúcares e aminoácidos (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

5.2.1.3. Acetogênese

De acordo com Iannicelli (2008) e Abbsi (2012), na acetogênese os produtos gerados na acidogênese são oxidados pelas bactérias acetogênicas afim de que se transformem em substratos apropriados para as bactérias metanogênicas, como por exemplo ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio. Durante este processo, uma grande quantidade de hidrogênio também é formada, fazendo com que potencial de hidrogeniônico (pH) do meio diminua. Este hidrogênio será consumido no meio devido a ação de bactérias metanogênicas para produção de metano ou durante a formação

de ácidos orgânicos em reações de hidrogênio com dióxido de carbono e acetato (MADIGAN et al., 2010).

No entanto, dentre todos os produtos resultantes da acetogênese apenas o hidrogênio e o acetato podem ser diretamente utilizados por bactérias metanogênicas. Os demais produtos devem ser posteriormente decompostos por bactérias acetogênicas até que se obtenha hidrogênio e acetato (IANNICELLI, 2008).

5.2.1.4. Metanogênese e sintrofia

De acordo com Anastácio (2010), a metanogênese é a fase final no processo global de biodegradação anaeróbia. Neste processo, os micro-organismos metanogênicos consomem acetato, hidrogênio e parte do dióxido de carbono para produzir metano. Metabolicamente, a metanogênese ocorre através da respiração anaeróbia utilizando três principais vias bioquímicas de formação de metano, são elas: via hidrogenotrófica, via acetotrófica e via metilotrófica (ABBASI, 2012). Os substratos utilizados por cada uma das vias bioquímicas estão descritos na Quadro 2.

Quadro 2 - Substratos convertidos em metano por arqueobactérias metanogênicas

Substratos do tipo CO ₂	Substratos metil	Substratos acetotróficos
Dióxido de carbono	Metanol	Acetato
Formiato	Metilamina	Piruvato
Monóxido de carbono	Dimetilamina	
	Trimetilamina	
	Metilmercaptop	
	Dimetilsulfeto	

Fonte: Adaptado de Madigan et al. (2010).

As vias hidrogenotrófica, acetotrófica e metilotrófica estão descritas a seguir:

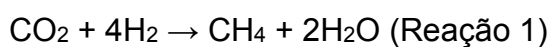
- Via hidrogenotrófica: Metanogênese a partir de dióxido de carbono e hidrogênio (CO₂ + H₂)

A redução do CO₂ é realizada pelas arqueobactérias metanogênicas hidrogenotróficas através do H₂. O CO₂ atua como o aceptor de elétrons cedidos pelo

H₂ que são removidos dos compostos orgânicos através da ação de enzimas específicas (MADIGAN et al. 2010; IANNICELLI, 2008).

A composição do global biogás produzido no processo de biodegradação anaeróbia varia de acordo com as condições ambientais. A proporção do dióxido de carbono em relação ao metano pode variar abruptamente de acordo com o composto orgânico que está sendo degradado (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com Madigan et al. (2010), a redução do CO₂ ocorre conforme apresentado na Reação 1.



Na Reação 1, um mol de dióxido de carbono reage com 4 mols de hidrogênio formando 1 mol de metano e 2 mols de água. Na Figura 3 é possível se observar todas as reações químicas envolvidas na formação de metano através da via hidrogenotrófica.

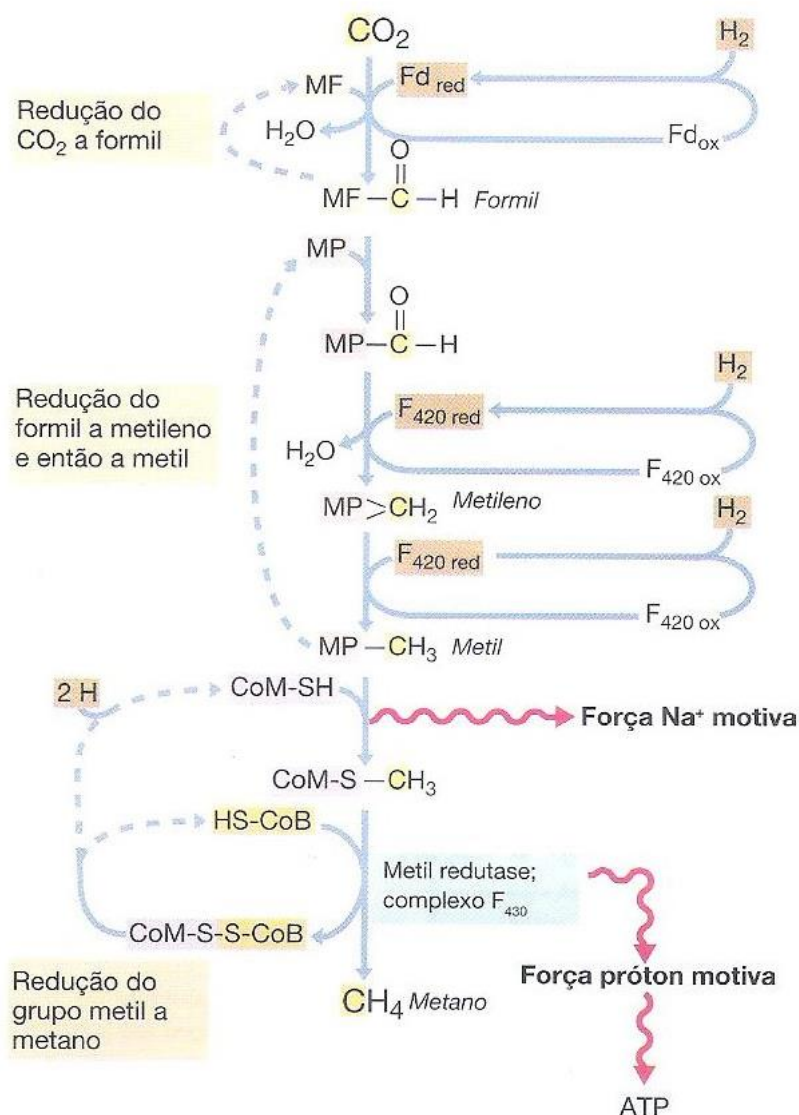


Figura 3 - Metanogênese, a partir de CO₂ e H₂
Fonte: Madigan et al. (2010).

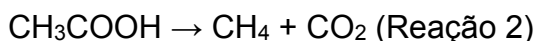
Na Figura 3 é possível observar as etapas da metanogênese a partir de CO₂ e H₂ com mais detalhes. O átomo de carbono destacado em amarelo é reduzido de acordo com a sua fonte de elétrons respectiva, destacada em marrom. As siglas representam: MF, metanofurano; MP, metanoptertina; CoM, coenzima M; F_{420red}, coenzima F₄₂₀ reduzida; F₄₃₀, coenzima F₄₃₀; Fd, ferredoxina; CoB, coenzima B (MADIGAN et al., 2010).

- Via acetotrófica e via metilotrófica: Metanogênese a partir de acetato e compostos metil

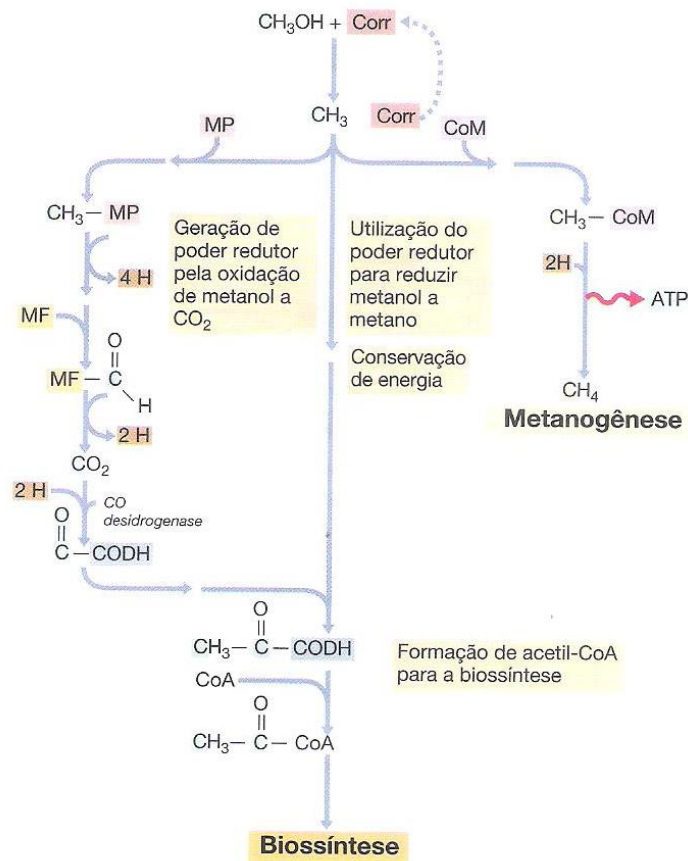
A clivagem do acetato é realizada pelas arqueobactérias metanogênicas acetoclásticas que utilizam como substratos compostos metil e acetato, majoritariamente na ausência do H_2 . O metano pode ser produzido a partir de compostos metilados, por meio do processo de redução da mesma forma que ocorre com o CO_2 no caso de metanogênese a partir de $CO_2 + H_2$ (IANNICELLI, 2008).

Quando não há poder redutor (como H_2) disponível para conduzir a etapa final, parte do metanol deve ser oxidada a CO_2 para promover a liberação de elétrons com esse propósito. Essa reação ocorre pela reversão das etapas da metanogênese. (MADIGAN et al., 2010, p. 633)

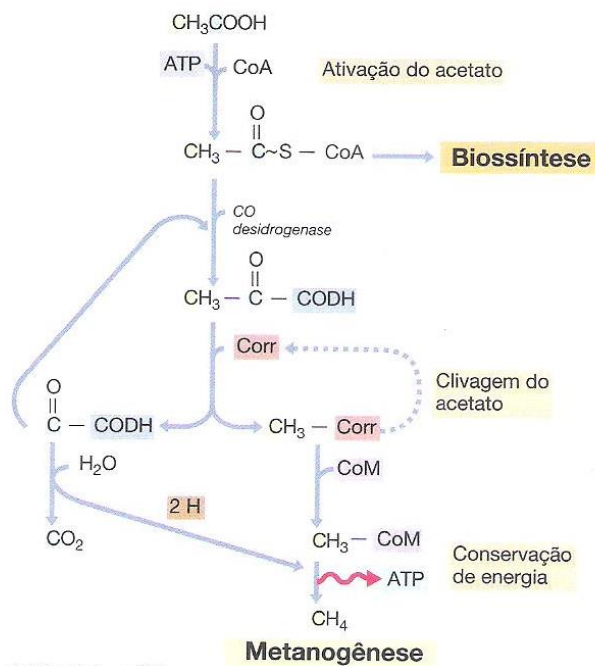
Quando o acetato é o substrato da metanogênese, seu grupo metil é conduzido à etapa terminal da metanogênese e simultaneamente, o grupo CO é oxidado, originando os produtos finais do catabolismo do acetato, $CH_4 + CO_2$ (IANNICELLI, 2008; MADIGAN et al., 2010). Sendo assim, a clivagem do acetato ocorre conforme a Reação 2.



Na Reação 2, o grupo metil do acetato é reduzido a metano havendo também formação de dióxido de carbono. Na Figura 4 é possível se observar todas as reações químicas envolvidas na formação de metano através das vias (a) metilotrófica e (b) acetotrófica.



(a) Metanol a CH_4



(b) Acetato a CH_4

Figura 4 - Metanogênese, a partir de metanol e acetato
Fonte: Madigan et al. (2010).

Através da Figura 4, é possível observar as etapas da metanogênese a partir de metanol e acetato com mais detalhes. Nota-se que tanto a via (a) metanol, quanto a via (b) acetato possuem partes da via do acetil-CoA. Na via (a) metanol, uma maior quantidade do carbono presente no metanol é convertida a CH_4 e uma quantidade menor, a CO_2 ou ainda, pela formação de acetil-CoA, é assimilada em compostos celulares. As siglas Corr e CODH correspondem a proteína contendo corrinóide e monóxido de carbono desidrogenase, respectivamente (MADIGAN et al., 2010).

Analisando-se as reações de formação de metano descritas e sintetizadas no Quadro 3, pode-se constatar que a maioria dos micro-organismos metanogênicos obtém CH_4 a partir de CO_2 e que apenas uma pequena parte dos mesmos se utiliza de acetato e outros substratos para tal. Para que ocorra uma maior conversão de compostos orgânicos a CH_4 , os micro-organismos metanogênicos devem se associar aos micro-organismos sintróficos. A sintrofia consiste em uma relação de cooperação entre dois ou mais organismos resultando em degradação anaeróbica de compostos orgânicos (MADIGAN et al., 2010).

Quadro 3 - Características de algumas arqueobactérias metanogênicas de acordo com o tipo de substrato utilizado

Ordem/Gênero	Morfologia	Substratos para metanogênese
<i>Methanobacteriales</i>		
<i>Methanobacterium</i>	Bacilos longos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$, formiato
<i>Methanobrevibacter</i>	Bacilos curtos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$, formiato
<i>Methanosphara</i>	Cocos	Metanol + H_2
<i>Methanothermus</i>	Bacilos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$
<i>Methanothermobacter</i>	Bacilos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$, formiato
<i>Methanococales</i>		
<i>Methanococcus</i>	Cocos irregulares	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$, piruvato + CO_2 , formiato
<i>Methanothermococcus</i>	Cocos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$, formiato
<i>Methanocaldococcus</i>	Cocos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$
<i>Methanotorris</i>	Cocos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$
<i>Methanomicrobiales</i>		

Continuação do Quadro 3 - Características de algumas arqueobactérias metanogênicas de acordo com o tipo de substrato utilizado

<i>Methanomicrobium</i>	Bacilos curtos	H ₂ + CO ₂ , formiato
<i>Methanogenium</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , formiato
<i>Methanospirillum</i>	Espirílos	H ₂ + CO ₂ , formiato
<i>Methanoplanus</i>	Células discoides	H ₂ + CO ₂ , formiato
<i>Methanocorpusculum</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , formiato, alcoóis
<i>Methanoculleus</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , formiato, alcoóis
<i>Methanofolis</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , formiato
<i>Methanolacinia</i>	Bacilos irregulares	H ₂ + CO ₂ , alcoóis
<i>Methanosarcinales</i>		
<i>Methanosarcina</i>	Grandes cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , metanol, metilaminas, acetato
<i>Methanolobus</i>	Cocos irregulares agregados	Metanol, metilaminas
<i>Methanohalobium</i>	Cocos irregulares	Metanol, metilaminas
<i>Methanococcoides</i>	Cocos irregulares	Metanol, metilaminas
<i>Methanohalophilus</i>	Cocos irregulares	Metanol, metilaminas, metil, sulfetos
<i>Methanosaeta</i>	De bacilos longos a filamentos	Acetato
<i>Methanosalsum</i>	Cocos irregulares	Metanol, metilaminas, dimetilsulfeto
<i>Methanopyrales</i>		
<i>Methanopyrus</i>	Bacilos em cadeia	H ₂ + CO ₂

*As ordens taxonômicas estão em itálico e negrito.

Fonte: Madigan et al. (2010).

Os micro-organismos sintróficos podem ser identificados como as principais bactérias fermentadoras secundárias que convertem compostos orgânicos em metano. A função destes micro-organismos é realizar a fermentação dos produtos dos fermentadores primários, gerando, *a priori* H₂, CO₂ e acetato. Entretanto, para que possam se desenvolver os micro-organismos sintróficos necessitam de micro-organismos parceiros que sejam capazes de consumir H₂. Desta maneira, os produtos finais da parceria entre micro-organismos sintróficos e consumidores de H₂,

metanogênicos, são CO_2 e CH_4 . Ainda, pode-se assumir que qualquer composto orgânico, nas dadas condições, será convertido nos mesmos produtos citados previamente. Alguns exemplos de bactérias sintróficas, são: *Syntrophomonas wolfei*, *Syntrophobacter wolinii* e *Syntrophus gentianae* (MADIGAN et al., 2010).

5.2.1.5. Sulfetogênese

Dependendo da composição química da fonte utilizada para produção de biogás, a digestão anaeróbia pode apresentar ainda uma última fase, a de sulfetogênese. Resíduos que contenham compostos de enxofre, devem ser submetidos a este tratamento (VISSER, 1995). Na biodegradação da matéria orgânica destes resíduos, o sulfato e outros compostos de enxofre são os aceptores finais de elétrons na oxidação dos compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

As bactérias redutoras de sulfato, que reduzem sulfatos e outros compostos de enxofre ao sulfeto de hidrogênio, também estão presentes durante o processo de digestão anaeróbia (VISSER, 1995; CHERNICHARO, 1997; LUSK, 1998). A maioria do sulfeto de hidrogênio reage com ferro e outros sais de metais pesados para formar sulfetos insolúveis, mas sempre haverá algum sulfeto de hidrogênio no biogás (LUSK, 1998).

Na Figura 5 é possível observar todas as reações químicas envolvidas na etapa de sulfetogênese.

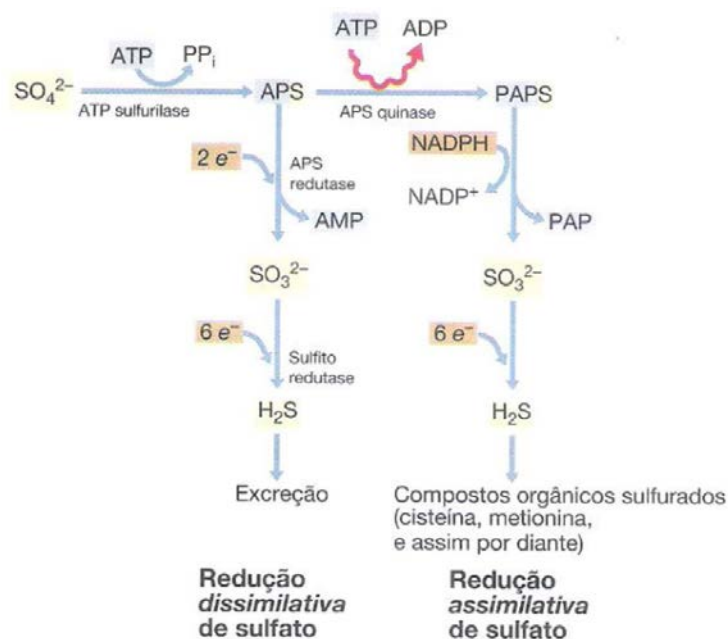


Figura 5 - Esquemas das reduções de sulfato
Fonte: Madigan et al. (2010).

5.2.2. Principais micro-organismos envolvidos na biodegradação anaeróbia

Abbasi (2012), identificou os micro-organismos envolvidos nos quatro estágios principais da digestão anaeróbia, de acordo com a Quadro 4.

Quadro 4 - Micro-organismos envolvidos na digestão anaeróbia

Estágio	Micro-organismos
Hidrólise	Diversos micro-organismos distintos
Acidogênese	<i>Bacteroides</i> , <i>Clostridium</i> , <i>Butyrivibrio</i> , <i>Eubacterium</i> , <i>Bifidobacterium</i> , <i>Lactobacillus</i>
Acetogênese	<i>Desulfovibrio</i> , <i>Syntrophobacter</i> , <i>Wolinii</i> , <i>Syntrophomonas</i>
Metanogênese	<i>Methanobacterium Formicicum</i> , <i>Methanobacterium Bryantii</i> , <i>Methanobrevibacter</i> , <i>Ruminantium</i> , <i>Methanobrevibacter Arboriphilus</i> , <i>Methanospirillum Hungatei</i> , <i>Methanosarcina Barkeri</i>

Fonte: Adaptado de Abbasi (2012).

De acordo com Iannicelli (2008) e Pellizari et al. (2007), os micro-organismos que atuam no processo de biodegradação anaeróbia da matéria orgânica podem ser

divididos em três principais grupos, de acordo com seus respectivos comportamentos fisiológicos e que estão resumidos a seguir:

5.2.2.1. Bactérias fermentativas primárias

As bactérias fermentativas primárias hidrolíticas transformam, através de hidrólise, polímeros (proteínas, lipídios, celulose e outros polissacarídeos) em monômeros (açúcares, aminoácidos) e ainda, através de acidogênese, monômeros em $H_2 + CO_2$, acetato, ácidos orgânicos e alcoóis. Os exemplos deste tipo de bactéria, são: *Eubacterium*, *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*. É importante ressaltar que, fungos filamentosos e leveduras também podem atuar neste processo.

5.2.2.2. Bactérias acetogênicas

As bactérias acetogênicas são produtoras de hidrogênio e realizam a conversão dos produtos gerados pelas bactérias fermentativas primárias (ácidos orgânicos e alcoóis) em $H_2 + CO_2$ e acetato, através da acetogênese. Os exemplos deste tipo de bactéria, são: *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrivibrie*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*.

5.2.2.3. Bactérias metanogênicas

As bactérias metanogênicas utilizam os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas, $H_2 + CO_2$ e acetato, como substratos para produzir $CH_4 + CO_2$, através da metanogênese. A função principal destas bactérias é consumir o H_2 produzido nas etapas anteriores, fazendo com que a pressão parcial de hidrogênio no meio diminua e as reações de acidogênese e acetogênese continuem ocorrendo.

A Figura 6, assim como o Quadro 3 (coluna sobre morfologia) evidenciam a grande diversidade morfológica que ocorre entre as espécies de arqueobactérias metanogênicas através de imagens de micrografias eletrônicas de varredura. Pode-se observar um comparativo entre as espécies (a) *Methanobrevibacter ruminantium*, (b) *Methanobrevibacter arboriphilus*, (c) *Methanospirillum hungatei* e (d) *Methanosarcina barkeri*. Fisiologicamente, as arqueobactérias metanogênicas são

consideradas anaeróbias obrigatórias, havendo a necessidade de um meio anaeróbio restrito para o seu desenvolvimento (MADIGAN et al., 2010).

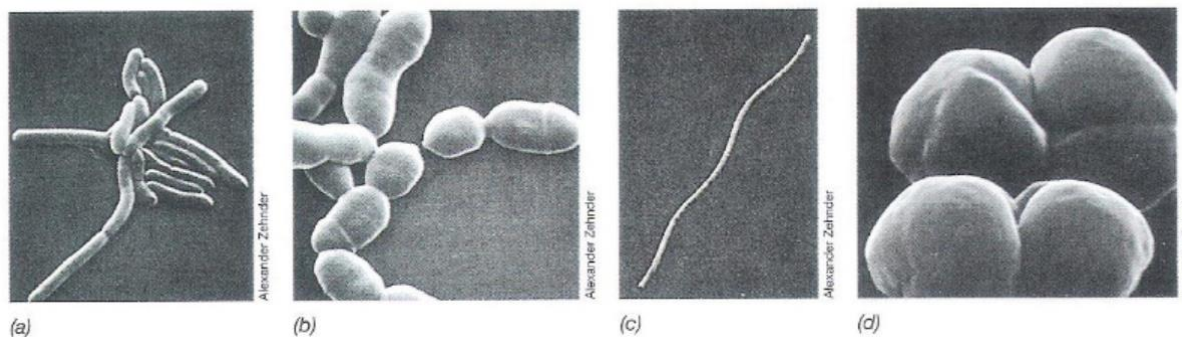


Figura 6 - Micrografias eletrônicas de varredura de células arqueobactérias metanogênicas, revelando a sua grande diversidade morfológica
Fonte: Madigan et al. (2010).

As metanogênicas podem ser divididas em dois grupos principais, de acordo com o substrato que utilizam como aceptor de elétrons para formação de metano, são eles: a) hidrogenotróficas, que utilizam $H_2 + CO_2$ e b) acetoclásticas, que utilizam compostos metil e acetato.

a) Arqueobactérias metanogênicas hidrogenotróficas

As arqueobactérias metanogênicas hidrogenotróficas são aquelas capazes de produzir metano através de $H_2 + CO_2$. Estas arqueobactérias encontram-se em maioria em relação as demais. Os gêneros mais comumente estudados, são: *Methanobacterim*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter* (IANNICELLI, 2008).

b) Arqueobactérias metanogênicas acetoclásticas

Arqueobactérias metanogênicas acetoclásticas são aquelas capazes de produzir metano através do acetato. Poucas arqueobactérias são capazes de realizar sintetizar acetato, como pode ser constatado no Quadro 3. As arqueobactérias metanogênicas acetoclásticas se dividem em dois gêneros principais: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*. Considera-se que as *Methanosarcinas* sejam as mais versáteis em comparação com as demais, pois são capazes de utilizar hidrogênio, acetato e

metilaminas como aceptores de elétrons e ainda, se desenvolvem mais rapidamente em altas concentrações de acetato (SOUBES, 1994).

A principal função destas arqueobactérias é converter o acetato em biogás, composto de CO₂ e, principalmente, metano ($\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}^-$). De acordo com vários autores, esta reação é a principal responsável pela metanogênese na digestão anaeróbia. Alguns asseguram que ela é responsável por cerca de 70% da produção de metano na digestão anaeróbia. (ANDRADE NETO, 2004, p. 40)

5.2.3. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia de um substrato orgânico

A digestão anaeróbia é um processo intrínseco para o crescimento de micro-organismos. As proporções e a disponibilidade dos nutrientes num dado substrato determinam a taxa de crescimento da comunidade microbiana. Sendo assim, o balanço de nutrientes é responsável pelo grau de degradação do substrato e, portanto, pela eficiência da produção de biogás. Logo, uma limitação de qualquer um dos nutrientes leva a limitação da eficiência de produção de biogás (GUSTAVSSON et al., 2013). A presença de quantidades adequadas de nitrogênio, micronutrientes e água é essencial para que um substrato orgânico seja submetido à digestão anaeróbica e produza biogás rico em metano. Estes são essencialmente os requisitos dos micro-organismos mencionados na Quadro 4, especialmente as bactérias metanogênicas (ABBASI, 2012).

Os carboidratos e lipídios advêm de um dado substrato orgânico e proporcionam principalmente carbono, oxigênio e hidrogênio, enquanto que o nitrogênio e o enxofre são fornecidos através de proteínas. Juntamente com esses elementos, a maioria dos substratos orgânicos fornece potássio, sódio, magnésio, cálcio e ferro e até traços de metais (micronutrientes). Os traços de elementos são frequentemente encontrados no sítio ativo de enzimas essenciais para digestão anaeróbia (GUSTAVSSON et al., 2013).

Como os micro-organismos são os atores que direcionam a digestão anaeróbia, gerar condições favoráveis para o desenvolvimento dos mesmos assegura o sucesso do processo (ABBASI, 2012). Assim, existe a necessidade de fornecer nutrientes em quantidades e proporções adequadas para manter o crescimento ótimo de bactérias e arqueobactérias para que seja possível obter uma produção de biogás eficiente, a partir de um dado substrato (GUSTAVSSON et al., 2013).

O nitrogênio pode ser encontrado em grande quantidade nos dejetos animais e o carbono, em resíduos de culturas (palha ou forragem) (PERMINIO, 2013). A proporção relativa de carbono e nitrogênio presentes no material orgânico é expressa em termos de relação carbono/nitrogênio (C/N). O valor de C/N considerado ótimo para a digestão anaeróbia deve estar entre 20 e 30 (ABBASI, 2012; PERMINIO, 2013). Se a relação C/N for mais alta do que a adequada, o nitrogênio será consumido mais rapidamente pelas metanogênicas e a produção de biogás decairá. Se a relação C/N for mais baixa do que a adequada, o nitrogênio é liberado e se acumula na forma de amônia, aumentando o pH do meio. Quando o pH é maior do que 8,5, o meio começa a exercer um efeito tóxico sobre as bactérias metanogênicas.

Os resíduos de animais, como o esterco de bovinos, tem sido a fonte de alimentação preferida para sistemas de biogás de baixa capacidade e possuem uma razão C/N média de 24. Os substratos vegetais contêm uma elevada porcentagem de carbono e devido a este fato, a relação C/N é alta (ABBASI, 2012). Para manter o nível ótimo C/N os materiais orgânicos podem ser misturados (ABBASI, 2012; PERMINIO, 2013). A Tabela 3 mostra as relações C/N das principais fontes de alimentação de sistemas produtores de biogás.

Tabela 3 - Relação C/N para materiais biodegradáveis

Material	Relação C/N
Esterco de pato	8
Excremento humano	8
Esterco de frango	10
Estrume de cabra	12
Esterco de porco	18
Estrume de ovelha	19
Esterco de vaca	24
Resíduos sólidos urbanos	40
Palha de milho	60
Palha de arroz	70
Palha de trigo	90

Fonte: Adaptado de Abbasi (2012).

A produção ótima de biogás é alcançada quando o valor de pH da mistura está entre 6 e 7. Durante o período inicial de digestão anaeróbica, grandes quantidades de

ácidos são produzidas e o pH da mistura diminui. Com as próximas fases do processo de digestão anaeróbia, a concentração de amônia aumenta, devido à digestão de nitrogênio, e valor do pH aumenta. Quando a produção de gás metano se estabiliza, o pH permanece entre 7,2 e 8,2. Se a degradação da matéria orgânica ocorre em um sistema descontínuo, o estágio de acetogênese ocorre mais rapidamente, produzindo ácidos orgânicos que reduzem o pH. Em tais situações, a redução do pH geralmente pode ser controlada com a adição de cal (ABBASI, 2012). A faixa ótima de pH para crescimento da maioria das bactérias está entre 5 e 6, tendo estas uma maior tolerância à baixos valores de pH do que as bactérias metanogênicas. Na digestão anaeróbia que ocorre através da ação de consórcios microbianos deve-se buscar a faixa de pH em que o crescimento ótimo da maior parte dos micro-organismos é atingido (SANT'ANNA JR, 2010).

Dentro do consórcio microbiano que atua na digestão anaeróbia, as bactérias metanogênicas são as mais afetadas pela variação de temperatura do meio. Diferentes espécies de bactérias metanogênicas possuem diferentes temperaturas ótimas para se desenvolverem. Elas podem ser classificadas como termófilas (50-65 °C), mesofílicas (20-45 °C) ou psicrófilas (<20 °C) (MONNET, 2003). Fora destes intervalos de temperatura, os consórcios microbianos não são capazes de sobreviver (ABBASI, 2012).

A digestão anaeróbia em larga escala é geralmente realizada no modo mesofílico, com menor número de digestores operando em modo termofílico e muito menor no modo psicrófilo. Apesar do intervalo de temperatura mesofílica estar entre 20 e 45 °C, a temperatura considerada mais adequada para a digestão anaeróbia é de 35 °C. Na digestão termofílica, 55 °C é a temperatura considerada ideal. Embora o processo de digestão anaeróbica termofílica seja geralmente mais eficiente do que o processo mesofílico, ele é mais difícil de se controlar e também necessita de insumos de energia extra (ABBASI, 2012). Geralmente, há duas razões pelas quais as temperaturas mesofílicas e termofílicas são preferidas. Em primeiro lugar, temperaturas mais elevadas fazem com que o processo seja mais rápido podendo se processar uma maior quantidade de material orgânico em menos tempo. Em segundo lugar, temperaturas mais altas aumentam a destruição de patógenos presentes nos dejetos (LUSK, 1998).

A toxicidade é outro fator que limitante para o processo de digestão anaeróbia. Íons minerais, especialmente de metais pesados, e detergentes estão entre os

materiais que inibem o crescimento normal de bactérias em um digestor. Os metais pesados como cobre, níquel, cobalto, crômio, zinco e chumbo são essenciais para o crescimento bacteriano em quantidades muito pequenas, mas quantidades maiores têm um efeito tóxico. Detergentes como sabão, antibióticos e solventes orgânicos também inibem as bactérias (ABBASI, 2012).

5.3. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos sólidos

Conhecendo-se o processo de digestão anaeróbia é possível reproduzi-lo artificialmente em prol do tratamento de resíduos. Na engenharia ambiental, a tecnologia em digestão anaeróbia tem sido amplamente utilizada para tratamento de efluentes domésticos e industriais. Muito tempo após a descoberta desta tecnologia, o interesse pela aplicação da mesma passou a ser na área de bioenergia, principalmente na Europa onde há inúmeras políticas de incentivo. Em 2012, a Europa tinha mais de 13.800 estações de aproveitamento de biogás, sendo a Alemanha a líder mundial com 8.700 estações, somando à produção total energética de 3,4 gigawatts (GW). Estas modernas usinas de biogás não somente geram calor e eletricidade, mas também, 137 delas possuem sistemas de purificação de biogás gerando o biometano, que é utilizado para injeção em redes de gás natural ou para uso como combustível em transportes (OECHSNER, KHANAL & TAHERZADEH, 2014).

Em 2013, foram registrados no Brasil, 22 aterros sanitários com captação de biogás destinado ao abastecimento de 1,67 milhões de residências. Ainda em 2013, foi instalado o Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás, o CIBiogás-ER, no Parque Tecnológico Itaipu, dedicado à geração de energia a partir do biogás, sendo o único do continente americano. Em 2014, ainda no Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou a Nota Técnica 13/14, Demanda de Energia-2050, uma das componentes do Plano Nacional de Energia de 2050 (PNE 2050), trazendo diretrizes para inserção do biogás e do biometano na matriz energética brasileira a médio e longo prazos (EPE, 2014).

De acordo com diferentes autores, a matéria-prima a ser utilizada em um estabelecimento gerador de biogás para o aproveitamento energético, constitui-se de um ou mais tipos de biomassa citados a seguir:

- Resíduos orgânicos gerais (dejeito de animais, efluentes domésticos e agroindustriais, resíduos sólidos) (JINGURA; MATENGAIFA, 2009; BRUNO; ORTEGA-LÓPEZ; CORONAS, 2009)
- Resíduos de culturas agrícolas (milho, trigo, soja, girassol) (MADLENER; ANTUNES; DIAS, 2009; SEPPÄLÄ et. al, 2009; CONTRERAS et. al, 2009)
- Outras matérias-primas orgânicas (por exemplo, glicerol) (YANG; TSUKAHARA; SAWAYAMA, 2008)

Na Figura 7 pode-se observar um esquema genérico de aproveitamento de biogás a partir de qualquer matéria orgânica utilizada como matéria-prima.

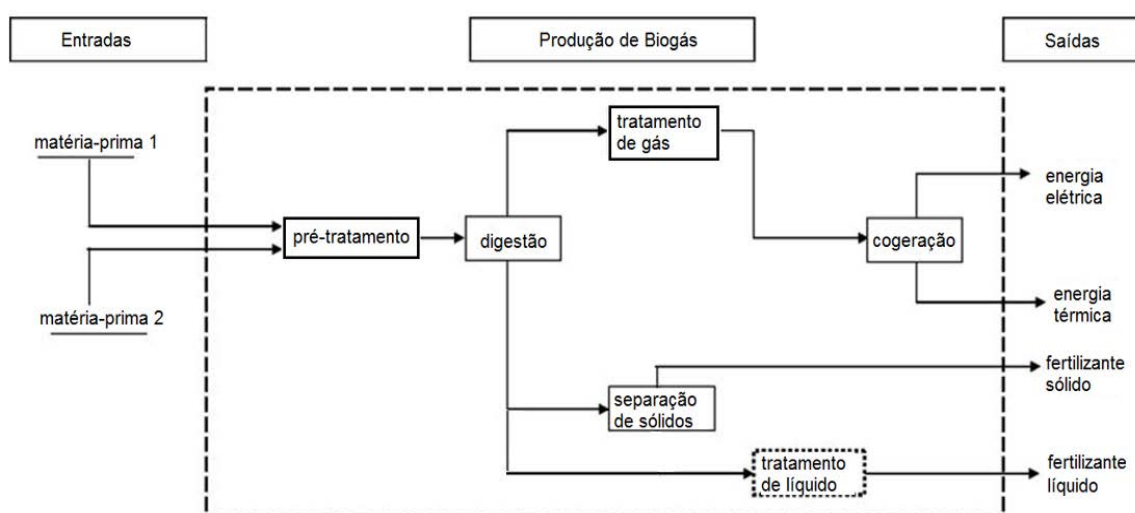


Figura 7 - Esquema genérico de produção de biogás
Fonte: Adaptado de Karellas, Boukis e Kontopoulos (2010).

A primeira etapa do processo de produção de biogás é o pré-tratamento, destinado a preparar as diversas matérias-primas e homogeneizá-las em um único fluxo de alimentação padronizado (criação de condições favoráveis para o desenvolvimento dos micro-organismos anaeróbios) antes da entrada no biodigestor. De acordo com Abbasi (2012), micro-organismos patogênicos podem estar presentes nos resíduos, sendo necessário um tratamento pré-tratamento a 70 °C durante pelo menos 1 hora. O biodigestor é a componente chave de todo sistema que utilize o processo anaeróbio e pode operar nas seguintes condições, levando-se em consideração as características da matéria-prima (SINGH; PRERNA, 2009):

- Temperatura mesofílica (20-35 °C) ou termofílica (45-65 °C) (MONNET, 2003);

- Com agitação interna (agitadores) ou externa (circulação do biogás produzido);
- Em condições pouco úmidas (teor de sólidos totais (ST) > 20%) ou muito úmidas.

Os estabelecimentos geradores de biogás, no decorrer do processo de digestão anaeróbica, que se utilizam de culturas agrícolas com alto teor de nitrogênio, normalmente trabalham na faixa mesofílica devido ao aumento da liberação de NH_3 que ocorre em temperaturas mais elevadas. A amônia é um fator inibidor para o processo de metanogênese. O biodigestor é a estrutura responsável por cerca de 90% da produção de biogás e, didaticamente, pode ser dividido em biodigestor primário, aonde ocorre a maioria dos processos anaeróbios e biodigestor secundário, aonde ocorre o armazenamento do biogás formado nos processos. A fase de tratamento de gás, é constituída por dispositivos de limpeza de biogás (geralmente, um purificador com o objetivo de fornecer biogás com baixo teor de H_2S a motores de combustão interna (MCI), dispositivos para a geração de energia (geralmente, MCI modificados para operar no modo de cogeração) e dispositivos de emergência para a incineração de excesso de produção de biogás, no caso de não funcionamento dos sólidos totais (ST) por alguma razão (manutenção programada ou falha do equipamento) (KARELLAS; BOUKIS; KONTOPOULOS, 2010).

A linha de tratamento de sólidos, que trata a biomassa digerida é constituída por: um decantador, que separa a fração de fibra (ST 35%) da fração líquida (ST 2,5%), uma estrutura para o tratamento de fração líquida, que geralmente apresenta um evaporador (que também utiliza a energia térmica/calor residual dos MCI) ou um reator de membrana. Em alguns casos, a fração líquida pode ser utilizada diretamente para irrigação, mas em outros é necessário remover os componentes inorgânicos (principalmente N, P, K) antes da eliminação final, dependendo do estado do solo (KARELLAS; BOUKIS; KONTOPOULOS, 2010).

5.3.1. Matéria-prima para produção de biogás

O biogás pode ser produzido a partir de qualquer matéria-prima que contenha matéria orgânica. A este tipo de matéria-prima se dá o nome de biomassa. A tecnologia de digestão anaeróbia pode ser aplicada no processo de decomposição

destes resíduos (ANASTÁCIO, 2010), desde que atenda as condições necessárias já explicitadas neste trabalho. As principais matérias-primas que servem como substratos para a produção de biogás, podem ser observadas na Figura 8 e são descritas a seguir.

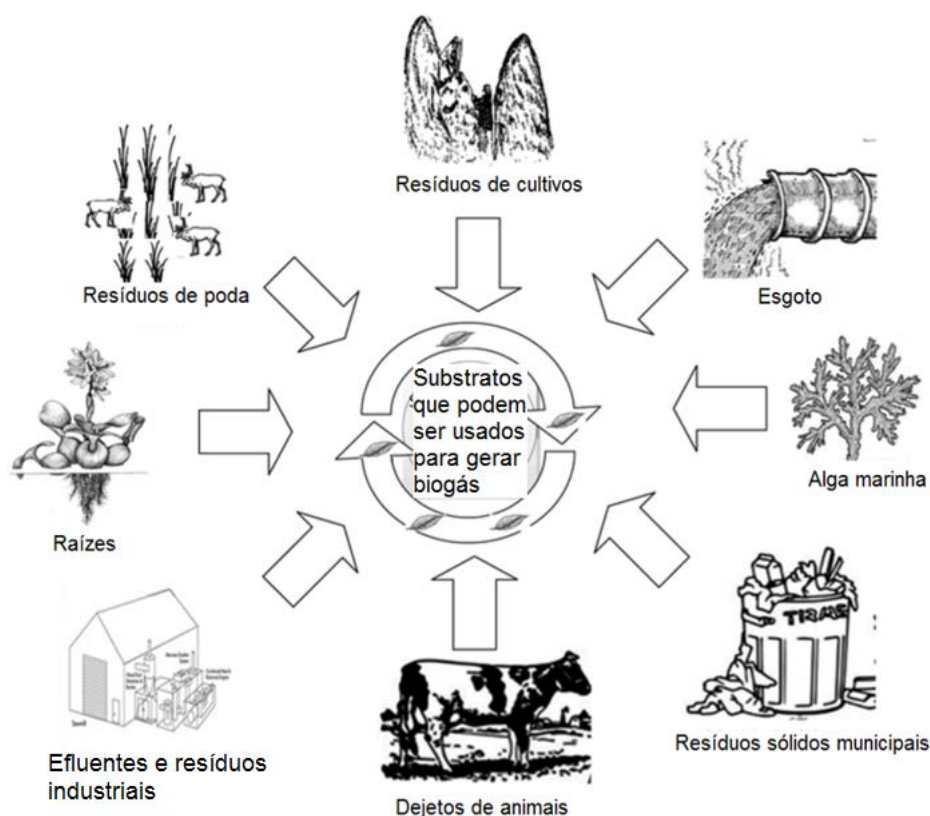


Figura 8 - Fontes de produção de biogás
Fonte: Adaptado de Abbasi (2012).

Os principais substratos que podem ser utilizados no processo de digestão anaeróbia controlada, são: dejetos de animais, resíduos agrícolas e florestais, frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos, resíduos de indústria alimentar, águas residuais, efluentes industriais e algas marinhas (ANASTÁCIO, 2010; ABBASI, 2012). Ressalta-se que os resíduos agrícolas são capazes de produzir 7 vezes mais biogás em comparação com os dejetos de animais, porém, os resíduos que contenham pesticidas ou herbicidas não devem ser utilizados pois são tóxicos para as bactérias metanogênicas. Os dejetos de animais como suínos e aves, possuem uma degradabilidade de 3 a 4 vezes maior que os dejetos de bovinos, devido a presença de compostos celulósicos e de lignina em maior quantidade. Os dejetos de animais

ruminantes são capazes de produzir biogás mais rapidamente que outros devido a presença de micro-organismos metanogênicos que possuem em seu aparelho digestivo, no rúmen. Considerando-se a produção de biogás proveniente de efluentes industriais, o uso deste tipo de substrato é mínimo (ANASTÁCIO, 2010). As algas marinhas também são utilizadas em menor escala e apresentam a vantagem de não exalarem odor de enxofre durante a produção de biogás (MONTINGELLI; TEDESCO; OLABI, 2015).

Os biocombustíveis de primeira geração são feitos de matérias-primas comestíveis como milho, soja e cana-de-açúcar. A não mais utilização desses recursos para a produção de energia foi atribuída ao aumento dos preços dos alimentos. A segunda geração de biocombustíveis, é a partir de resíduos e matérias-primas lignocelulósicas. As principais vantagens destes substratos são o maior rendimento e menor exigência de terra em termos de qualidade e quantidade. O principal problema associado à conversão de lignocelulose em biocombustíveis é a sua forte resistência à degradação. Assim, os biocombustíveis de segunda geração ainda carecem de viabilidade econômica em grande escala. A matéria-prima de biocombustíveis de terceira geração é representada por micro e macroalgas, que apresentam vantagens adicionais em relação às duas anteriores. Esta biomassa marinha apresenta perspectivas de rendimentos elevados que não requerem o uso de terras aráveis (CHISTI, 2007; AHMAD et al., 2011; DAROCH; GENG; WANG, 2012).

Na Tabela 4 pode-se observar a produção de biogás equivalente à uma matéria-prima específica (dejetos). As porcentagens de presença de metano no biogás de cada substrato também são apresentadas.

Tabela 4 - Produção de biogás de acordo com a matéria-prima

Matéria-prima	%CH₄	Produção de biogás (m³/kg SV*)
Dejetos de suínos	70-80	0,25-0,50
Dejetos de bovinos	50-80	0,20-0,30
Dejetos de aves	60-80	0,35-0,60
Restos de alimentos	70-80	0,50-0,60

*SV = Sólidos Voláteis.

Fonte: Monnet (2003).

As principais fontes de matéria-prima para produção de biogás foram agrupadas e serão brevemente explicitadas a seguir.

3.3.1.1. Águas residuais

As águas residuais compreendem no geral efluentes sanitários e industriais. Sabe-se que a digestão anaeróbica controlada da matéria orgânica para produção de biogás, desenvolveu-se a partir do tratamento de resíduos de esgoto, com o uso de biodigestores, evoluindo para um processo que visa hoje em dia a purificação do metano como o objetivo aplicação no setor de transportes, como combustível. Esta é uma tendência que surgiu na Suécia e nos últimos anos, tem levando a uma reorientação da economia mundial (KARLSSON et al., 2014). Devido às dificuldades geradas pela crise energética e o aquecimento global, muitos países têm investido significativamente em tecnologia de biogás, especificamente em estações de tratamento de efluentes (MMA, 2010).

A Tabela 5 ilustra a evolução da emissão de gases GEE proveniente de efluentes de diferentes setores industriais, de acordo análises das estimativas de emissões de GEE do setor de resíduos, produzidas pelo Observatório do Clima (OC).

Tabela 5 - Emissões de GEE no tratamento de efluentes de atividades industriais

Setor/Ano	1970	1990	2000	2014
Aves	1%	2%	2%	1%
Bovinos	12%	12%	7%	6%
Cervejas	4%	5%	5%	1%
Leite Cru	39%	34%	18%	11%
Leite Pasteurizado	9%	9%	2%	1%
Suínos	2%	3%	2%	1%
Papel e celulose	33%	35%	31%	27%
Álcool	-*	-*	12%	18%
Açúcar	-*	-*	21%	34%

*Dados não contabilizados.

Fonte: Manetti, Ragone e Albuquerque (2016).

Analisando-se as emissões de GEE em estações de tratamento de efluentes, e sabendo-se dos impactos nocivos gerados por meio do descarte inadequado destes resíduos em corpo d'água, justifica-se a relevância do desenvolvimento de pesquisas que visem a otimização deste tipo de tratamento. Os sistemas de tratamento de

efluentes doméstico e industrial fazem parte das atividades que compõem o saneamento, que, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) pode ser definido como o controle de todos os fatores do meio físico que exercem ou podem exercer efeito deletério sobre o bem-estar físico, mental e social do homem.

3.3.1.2. Resíduos sólidos urbanos

O crescimento da população mundial e sua consequente intensificação de atividades durante as últimas décadas ocasionou um acelerado aumento da produção de resíduos. O crescimento desordenado de grandes centros urbanos dificulta as ações de manejo de resíduos, os quais, muitas vezes são dispostos inadequadamente em lixões (MMA, 2010). De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE de 2008, cerca de 3 mil municípios brasileiros descartam inadequadamente seus resíduos em lixões. Deslumbrando-se uma maneira de lidar com o descarte inadequado de resíduos, foi aprovada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). As metas desta Política podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

Meta/Ano	2015	2019	2023	2027	2031
Eliminação total dos lixões até 2014	100%	100%	100%	100%	100%
Redução dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterros sanitários	22%	28%	34%	40%	45%
Redução dos resíduos recicláveis úmidos dispostos em aterros sanitários	19%	28%	38%	46%	53%
Recuperação de gases de aterro – Potencial de 300 MWh	50 MWh	100 MWh	150 MWh	200 MWh	250 MWh

Fonte: PNRS (2010).

Considerando-se que uma das metas brasileiras é a recuperação de gases de aterro sanitário, os estudos relativos a tecnologia de biogás deve evoluir. A recuperação de energia a partir de resíduos urbanos é uma prática comum em países

como os Estados Unidos, o Japão, a Austrália e em diversos países europeus. O ciclo de produção e aproveitamento energético do biogás de aterro normalmente ocorre da seguinte maneira (OLIVEIRA et al., 2001):

- a) Primeiramente, os resíduos sofrem compactação a uma densidade específica formando camadas estratificadas, iniciando-se o processo de decomposição;
- b) Início da metanogênese;
- c) Instalação do sistema de extração de biogás, através da perfuração o aterro sanitário e instalação de uma série de poços de biogás, com seus respectivos encanamentos. É importante obedecer uma ordem de inclinação desejável para os encanamentos.
- d) Em relação aos poços de extração e suas tubulações, é importante obedecer uma ordem de inclinação desejável para os encanamentos para que se possa retirar o condensado;
- e) A geração elétrica inicia-se quando a rede coletora for conectada ao motor, ou turbina, que deve ser adequado para o uso com gás de baixa qualidade de metano.

Para que seja possível estimar a quantidade de biogás produzida em um aterro sanitário, existem diferentes metodologias empregadas para o cálculo do volume de emissões de metano. As metodologias mais aplicadas são a metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e a metodologia da USEPA (1996), dependendo do tamanho da região que se pretende avaliar. Ressalta-se que a USEPA propõe também uma metodologia de avaliação para a viabilidade econômica de recuperação do biogás (ALVES, 2000).

3.3.1.3. Dejeito de animais

O crescimento e a concentração da indústria pecuária criam oportunidades para o descarte adequado das grandes quantidades de dejetos produzidos em fazendas em bovinos, suínos e aves. Os principais problemas de poluição associados a estes resíduos são a contaminação das águas superfícies e subterrâneas e a poluição do ar causada por odores, poeiras e amoníaco. Também há preocupação com a contribuição das emissões de metano para a mudança climática global.

Consequentemente, os sistemas de gestão de dejetos que permitam prevenir a poluição e produzir energia, estão a tornar-se cada vez mais atraentes (LUSK, 1998).

A produção animal é uma das atividades que pode gerar impacto ambiental em demasia, devido ao seu potencial de degradação de solos e recursos hídricos através do despejo inadequado de dejetos. Uma maneira encontrada para minimizar a poluição causada pela produção animal é a implantação de biodigestores (GASPAR, 2003). Na Tabela 7 é possível observar a produção média de dejetos por dia de acordo com o tipo de animal.

Tabela 7 - Produção diária de dejetos de animais

Produção animal	Média de produção de dejetos (kg/dia)
Bovinos	10
Suínos	2,25
Aviários	0,18
Equinos	10

Fonte: Adaptado de Colatto e Langer (2012).

5.3.2. Produção de biogás em biodigestor

O biodigestor pode ser entendido como sendo uma estrutura projetada exclusivamente para que ocorra a degradação de matéria orgânica residual, sem presença de oxigênio. O intuito é criar um ambiente que proporcione condições ideais para o desenvolvimento de micro-organismos anaeróbios e consequentemente, a produção de biogás seja otimizada. O biodigestor é alimentado com o efluente bruto, que em solução aquosa irá sofrer a digestão anaeróbia e produzir o biogás que ficará armazenado na área livre (parte superior) da estrutura. O biogás poderá então ser canalizado e destinado a múltiplos usos (BLEY JR et al., 2009).

Os resíduos de origem animal e vegetal podem ser processados em biodigestores anaeróbios como um líquido ou uma pasta misturada com água. Os digestores anaeróbios são geralmente compostos de um suporte de fonte de alimentação, um tanque de digestão, uma unidade de recuperação de biogás e trocadores de calor para manter a temperatura necessária para a digestão bacteriana. Os biodigestores domésticos são de pequena escala e apresentam uma capacidade de cerca de 750

litros, podendo ser utilizados para fornecer combustível de cozinha ou iluminação elétrica em casas rurais. Estima-se que milhões de lares em regiões menos desenvolvidas, incluindo a China e partes da África, utilizam biodigestores domésticos como fonte de energia renovável. Os biodigestores de grande escala, normalmente encontrados em fazendas agropecuárias, armazenam o dejetos dos animais em forma líquida. Um biodigestor eficiente pode produzir 200-400 m³ de biogás contendo 50-75 % de metano por tonelada seca de resíduos de entrada (LUSK, 1998). A Figura 9 apresenta um biodigestor para pequenas vazões comumente utilizados em áreas rurais no Brasil (BLEY JR, 2015).



Figura 9 - Biodigestor de pequena vazão
Fonte: Bley Jr (2015).

Dependendo do resíduo a ser biodegradado, existem diferentes tipos de biodigestores que podem ser mais ou menos indicados. Por esta razão, é importante conhecer as características físicas e químicas dos substratos a serem utilizados visando o melhor rendimento para o processo de produção de biogás (ANASTÁCIO, 2010). Os biodigestores podem ser classificados de acordo com a maneira como seu abastecimento é realizado, sendo por batelada (descontínuo) ou em modo contínuo.

No modo descontínuo, o abastecimento é realizado por bateladas, ou seja, por períodos que podem durar cerca de 45 dias (XAVIER; LUCAS JR, 2010). Desta forma, a matéria-prima ficará em descanso até que se finalize o processo de fermentação anaeróbia. No modo contínuo, o biodigestor é abastecido constantemente durante todo o processo. Os tipos de biodigestor mais utilizados atualmente são os modelos, de sistema contínuo, indiano, chinês e canadense, sendo este último o mais difundido nos dias atuais (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

Os biodigestores se difundiram na Índia devido à falta de combustíveis fósseis. A China, apesar de ser um país autossuficiente em petróleo, ao temer ataques nucleares na época da Segunda Guerra Mundial, passou a utilizar biodigestores principalmente em suas áreas rurais, de difícil acesso e baixo poder aquisitivo (BARRERA, 2001).

O modelo indiano, observado na Figura 10, diferencia-se dos demais modelos de biodigestores por apresentar uma campânula (redoma) flutuante que funciona como gasômetro, o que faz com que sua pressão esteja sempre constante. O reservatório aonde ocorre a digestão anaeróbia é dividido longitudinalmente em duas câmaras, uma para entrada do material injetado e outra para saída do material decomposto (NISHIMURA, 2009).

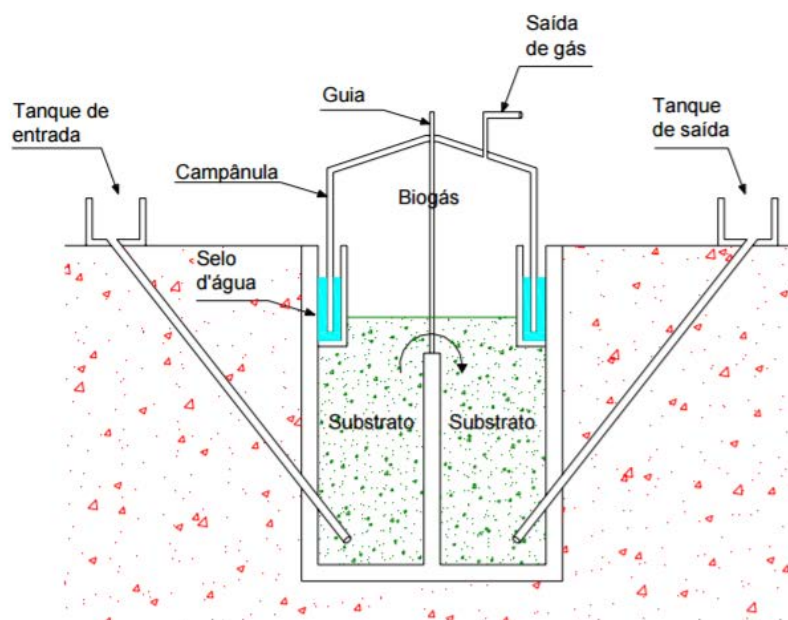


Figura 10 - Modelo de biodigestor indiano
Fonte: Nishimura (2009).

O biodigestor de modelo Indiano é mais eficaz em países que apresentam baixas temperaturas, uma vez que ocorrem grandes perdas de calor através do reservatório de gás. Por este modelo ser mais sofisticado em termos técnicos, é possível realizar um maior aproveitamento de biogás (ANASTÁCIO, 2010).

O modelo chinês, aproveita o biofertilizante para a agricultura e para a produção de alimentos, devido ao grande contingente populacional em que se encontra o país. Este modelo é mais simples e econômico do que o indiano por não necessitar de gasômetro (ANASTÁCIO, 2010). Sua estrutura pode ser observada na Figura 11, sendo composta apenas pelo reator e tanques de entrada e saída, e canaleta para saída de biogás.

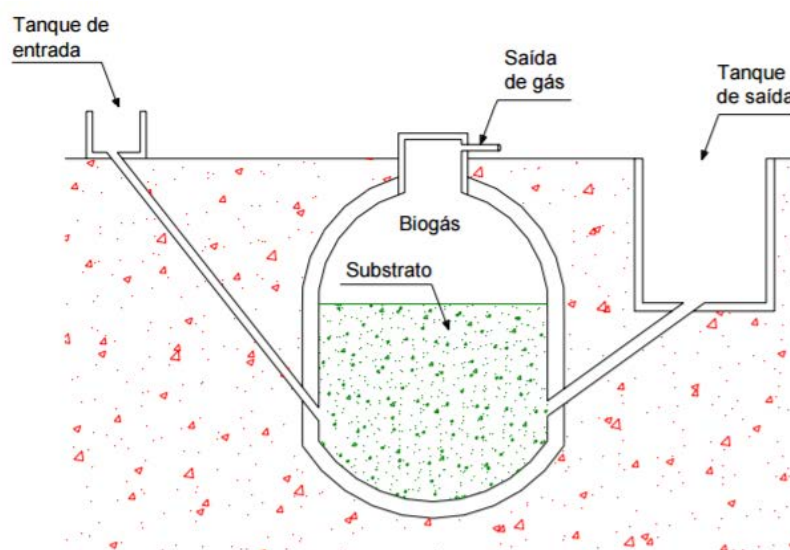


Figura 11 - Modelo de biodigestor chinês
Fonte: Nishimura (2009).

O modelo canadense caracteriza-se por possuir um gasômetro constituído por uma manta flexível que consiste de uma geomembrana sintética de polietileno de alta densidade (PEAD). Este compartimento é fixado ao tanque que recebe o substrato e possui uma base (valeta) por onde circunda água. Este sistema é preferido para regiões com temperaturas elevadas pois há uma troca de calor entre o meio e a cobertura de PEAD, ajudando a manter a temperatura adequada para digestão anaeróbia. Em adição, o PEAD oferece resistência contra radiação ultravioleta, ozônio e compostos químicos (AGCERT, 2005). A Figura 12 apresenta o modelo canadense.

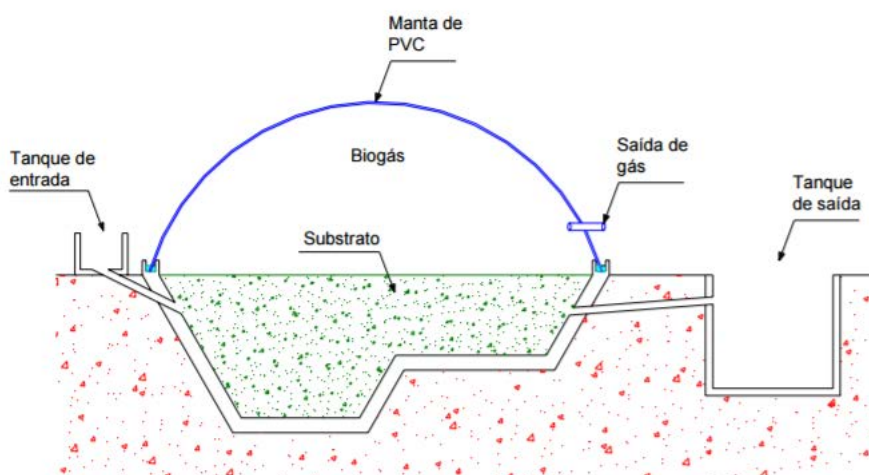


Figura 12 - Modelo de biodigestor canadense
Fonte: Nishimura (2009).

3.3.2.1. Condições ideais para o funcionamento do biodigestor

Além das condições ideais para o desenvolvimento da digestão anaeróbia, existem também fatores operacionais ideais para funcionamento dos biodigestores.

O tempo de retenção é a duração pela qual o material orgânico (substrato) e os micro-organismos devem permanecer no biodigestor para atingir a degradação completa. Quanto menor for o tempo de detenção hidráulica, mais eficiente é o biodigestor. Contudo, para se atingir baixos tempos de retenção, é necessário que haja uma grande quantidade de micro-organismos (ABBASI, 2012). O tempo médio varia entre 15 a 60 dias, de acordo com a temperatura e a composição da matéria-prima (PONTES, 2005).

A mistura regular é necessária para manter a homogeneidade do fluido e, portanto, a estabilidade do biodigestor, prevenindo a sedimentação da matéria orgânica. Uma mistura muito rápida pode perturbar a comunidade bacteriana, promovendo ruptura celular, sendo preferível uma agitação mais lenta. (MONNET, 2003; ABBASI, 2012).

Outro parâmetro ideal é a carga orgânica, que refere-se à quantidade de matéria orgânica por volume que alimenta o biodigestor. Normalmente, a carga orgânica varia entre 2 e 30 kg CQO/(m³.dia), sendo CQO a carência química de oxigênio (PONTES, 2005). Este é um importante parâmetro de controle do processo, especialmente quando a digestão é realizada em modo contínuo. A sobrecarga pode levar a falha do sistema causando um aumento significativo na concentração de ácidos graxos voláteis, levando a uma queda acentuada do pH. Quando isso acontece, a taxa de

alimentação do sistema tem que ser reduzida por um tempo até que o processo se estabilize novamente (ABBASI, 2012).

5.3.3. Aproveitamento energético do biogás

O biogás coletado nos biodigestores poderá então ser transformado em energia térmica e/ou elétrica (LUSK, 1998; RAISI, 2009; ABBASI, 2012; BLEY JR, 2015), ou ainda passar por processo de refinamento para obtenção de biometano (PIERCE, 2007; OLIVER, 2008; BLEY JR, 2015), sendo este último posteriormente explanado no decorrer deste trabalho.

Estima-se que em 2010 foram produzidos 54 GW de energia através da biomassa, de acordo com o Renewables 2010: Global Status Report (REN21, 2010). A Figura 13 apresenta os países responsáveis pela produção de energia neste setor, destacando-se como principais geradores os países emergentes.

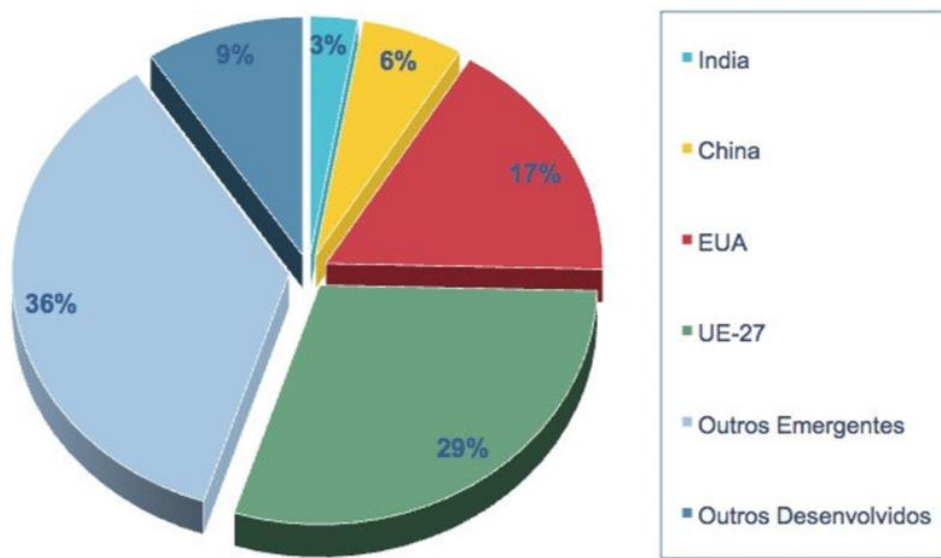


Figura 13 - Participação na energia elétrica de biomassa
Fonte: MMA (2010).

Especificamente para a energia elétrica proveniente do biogás houve um crescimento de 7% em relação aos anos anteriores. Os países que apresenta a maior capacidade instalada em biogás é a Alemanha, com 1,7 GW e aproximadamente 4.700 usinas. Outros países que se destacam em tecnologia de biogás, são os Estados Unidos, Inglaterra e Brasil com a produção de 790 MW, 680 MW e 311 MW,

respectivamente. Os países em desenvolvimento em geral apresentam um interesse crescente por esta tecnologia (REN21, 2010).

No processo de produção de energia elétrica, ainda se é possível obter calor. A conversão do biogás em energia térmica ocorre por meio da sua combustão direta ou ainda, por meio de cogeração. O sistema de cogeração permite o aproveitamento do calor produzido durante o processo para o próprio processo, gerando água quente, vapor, calefação e refrigeração por absorção e proporcionando uma significativa economia de energia e combustível. Este sistema pode ser utilizado, por exemplo em estações de tratamento de efluentes para aquecimento dos digestores e do secador de lodo (MMA, 2010). O biogás pode ser utilizado como combustível alternativo neste processo, tornando-o uma alternativa viável ao meio ambiente. O sistema de cogeração pode atingir um rendimento global (aproveitamento energético) de de 80-90%, enquanto que os MCI atingem cerca de 30% (CETESB, 2006). Nas Figuras 14 e 15 pode-se observar uma típica unidade cogeneradora de energia, que utiliza turbinas a gás.

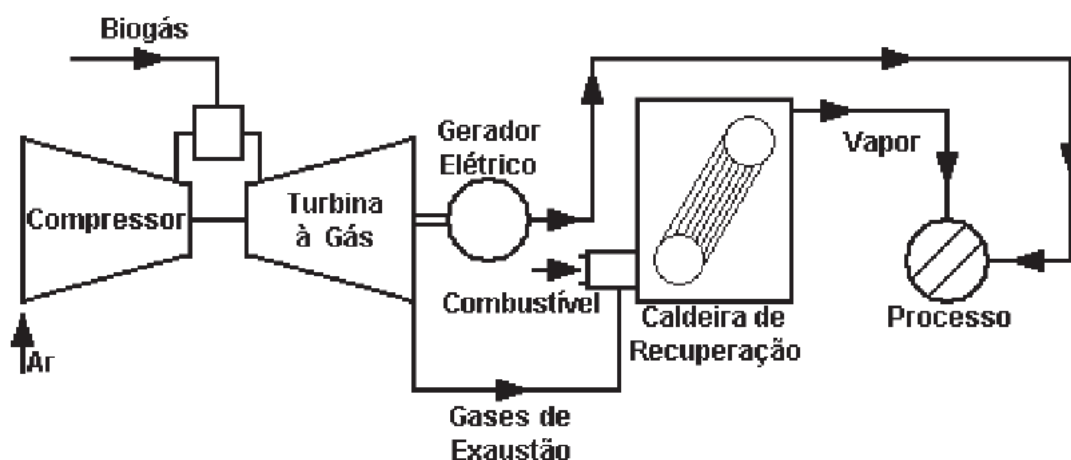


Figura 14 - Unidade de cogeração com turbinas a gás
Fonte: CETESB (2006).



Figura 15 - Um trocador de calor em um sistema de cogeração alimentado por biogás
Fonte: Abbasi (2012).

Apenas para parâmetros de equidade, considerando-se que o poder calorífico do biogás pode variar entre 5.000 a 7.000 kcal/m³, sua eficiência energética equivalente é comparada a outros combustíveis na Tabela 8. Ressalta-se que, o poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente em sua composição (ZACHOW, 2000).

Tabela 8 - Equivalência de 1 m³ de biogás com outros combustíveis

Combustível	Equivalência energética a 1 m ³ de biogás
Gasolina	0,000613 m ³
Querosene	0,000579 m ³
Diesel	0,000553 m ³
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,000454 ton.
Álcool	0,00079 m ³
Carvão mineral	0,000735 ton.
Lenha	0,00353 ton.
Eleticidade	0,00143 MWh

Fonte: Oliver (2008).

Visando o melhor aproveitamento energético do biogás e a conservação dos equipamentos de conversão de energia, o mesmo deve ser seco e filtrado. A secagem do biogás é feita através do processo de resfriamento com auxílio de um chiller,

provocando a condensação da umidade presente na mistura. Após a secagem, o biogás deve ser submetido a filtragem em um filtro de carvão ativado, com especificação definida em função da composição da mistura. O pré-tratamento de biogás proveniente de biodigestores é essencial para qualquer sistema de cogeração ou geração de energia, evitando desgaste prematuro e manutenção excessiva (BARROS, 2015).

A Figura 16 evidencia a transição feita entre combustíveis utilizados para produção de energia que vem ocorrendo ao longo dos anos, assim como apresenta uma projeção para o futuro. De acordo com Hefner III (2007), a matriz energética do futuro será o hidrogênio e para que se alcance este objetivo o domínio da tecnologia de biogás será necessário. Na Figura 16 é possível verificar que a matriz energética mundial está em constante evolução tendo início com o uso de combustíveis sólidos (madeira), passando para a era atual dos combustíveis líquidos (derivados de petróleo) e aproximando-se para era dos gases (hidrogênio). Porém, para que se chegue ao uso do hidrogênio é preciso aprimorar a tecnologia de biogás em relação a sua logística de geração e distribuição. Ainda, é possível relacionar os períodos clássicos do desenvolvimento socioeconômico com o uso de combustíveis.



Figura 16 - Transição de matrizes energéticas
Fonte: Bley Jr (2015).

Analisando a evolução dos combustíveis, principalmente em relação as projeções futuras, é possível identificar a necessidade da otimização do processo de produção de biogás, para que seja possível obter um biocombustível de melhor qualidade. Para que este objetivo seja atingido, pesquisando sobre a purificação de biogás vêm sendo desenvolvidas.

5.3.5. Purificação de biogás: Biometano

O biogás pode ser também considerado um biocombustível e se usado em automóveis emite baixas concentrações de óxido de nitrogênio, hidrocarboneto e monóxido de carbono em comparação com combustíveis fósseis. O interesse pelo uso deste biocombustível tem aumentado (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Visando o aproveitamento energético, o biogás está atrelado ao processo de otimização tendo em vista que altas concentrações de metano são requeridas. O número de tecnologias que realizam o processo de otimização de biogás tem crescido rapidamente nos últimos anos acompanhando o crescimento do uso do biocombustível (LANTZ et al. 2007). A biodigestão anaeróbica controlada, é o processo de obtenção do biogás, porém não é suficiente para que se obtenha qualidade combustível do biogás. A qualidade somente será obtida com processos de refino (OLIVER, 2008).

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP), o biometano pode ser definido como o “gás constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás”. O objetivo é de que o biocombustível seja destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais no Brasil. Quando combustíveis gasosos são utilizados como combustível veicular, geralmente as reduções de emissões comparadas ao diesel podem ser de 60-85% para compostos nitrogenados, 60-80% para particulados e 10-70% para monóxido de carbono (PIERCE, 2007). A Figura 17 ilustra o armazenamento de biometano veicular, em ITAIPU Binacional. Segundo Bley Jr (2015), os projetos conduzidos pela ITAIPU produzem biometano por meio do refino de biogás proveniente do aproveitamento de dejetos de suinocultura, obtendo uma composição de cerca de 94% de metano.

O biometano é obtido através da filtragem do biogás, aonde é feita a separação do metano dos demais componentes da mistura. A necessidade da purificação do biocombustível justifica-se a partir de: o gás carbônico atuar como um antichama e o gás sulfídrico ser corrosivo. O material particulado e o vapor d'água também são removidos durante a filtragem. Desta maneira, o poder calorífico do biogás, transformado em biometano, é aumentado assim como sua eficiência energética, podendo atingir até 12.000 kcal/m³. (GASPAR, 2003; OLIVER, 2008). No entanto, segundo a ANP, o biometano pode vir a apresentar “componentes inertes do ponto de vista da aplicação, tais como nitrogênio, oxigênio e dióxido de carbono, bem como traços de outros constituintes”.



Figura 17 - Cilindro de armazenamento de biometano em veículo particular
Fonte: Bley Jr (2015).

Pode-se dizer assim que, o processo de produção de biogás finaliza-se com a obtenção de biometano em sistemas que visam alcançar um biocombustível mais puro do que o próprio biogás bruto. No entanto, além dos combustíveis que são formados a partir da matéria orgânica digestada, existe ainda o resíduo deste processo, que será analisado a seguir.

5.3.6. Subproduto da produção de biogás: Biofertilizante

Além de gerar energia térmica, elétrica e veicular, o biogás gera também um subproduto que pode ser reaproveitado. Após ocorrer a digestão anaeróbica no interior do biodigestor, o material rejeitado pode vir a ser utilizado como biofertilizante. Este subproduto apresenta em média 1,5 a 2,0% de nitrogênio (N), 1,0 a 1,5% de fósforo (P) e 0,5 a 1,0% de potássio (K), proporcionando alta qualidade para uso agrícola. O biofertilizante é considerado um adubo orgânico e possui as seguintes características:

- pH médio de 7,5, atuando como um corretivo de acidez do solo e consequentemente, dificultando a proliferação de micro-organismos patógenos;

- Possui uma menor relação C/N da matéria orgânica, favorecendo sua utilização agrícola;
- Possibilita uma melhor assimilação de nutrientes por vegetais, por apresentar os mesmos em formas facilmente absorvíveis;
- Contribui para o arejamento do solo, criando uma estrutura porosa no solo;
- Favorece o desenvolvimento de bactérias, possibilitando assim a recuperação de solos degradados;
- Inibe a germinação de sementes de plantas daninhas.

No uso agrícola, o biofertilizante pode ser utilizado em forma líquida ou sólida sendo aplicado diretamente no solo. Quando a aplicação é feita diretamente sobre a cobertura vegetal, aconselha-se a diluição de 1 litro de biofertilizante para cada 10 litros de água, seguida de peneiração. O biofertilizante também pode ser utilizado para o controle de pragas agrícolas (OLIVER, 2008). A Figura 18 demonstra a aplicação de biofertilizante no solo.



Figura 18 - Aplicação do biofertilizante
Fonte: Oliver (2008).

5.4. Exemplos da utilização de biogás

A biodegradação controlada para fins de geração de energia, é favorecida em países com o clima tropical e subtropical como por exemplo, o Brasil. A alta

temperatura, comum durante boa parte do ano é propícia para o desenvolvimento de micro-organismos decompositores envolvidos no processo de digestão anaeróbia. Desta forma, os países que apresentam estas condições possuem uma vantagem para o desenvolvimento de tecnologia de biogás, em comparação com os países de clima mais frio. Paradoxalmente, e os estabelecimentos de aproveitamento de biogás estão mais comumente presentes em na Alemanha, Dinamarca, Holanda e outros países europeus. Apesar das vantagens competitivas que o Brasil apresenta, ainda não há estímulo suficiente para o desenvolvimento desta tecnologia. As atividades que apresentam grande potencial de produção de biogás no Brasil, como o setor sucroalcooleiro, a agropecuária industrial e os serviços de saneamento, ainda desperdiçam o biogás em seus processos. É sabido que pequenas instalações como aterros sanitários, estações de tratamento de esgotos, granjas, criações de suínos, bovinos ou aves são capazes de se tornar autossustentáveis no quesito energia. Lamentavelmente, no Brasil o biogás ainda é visto apenas como um subproduto da digestão anaeróbia, levando muito estabelecimentos a fazer a queima do mesmo como uma medida de mitigação de impacto ambiental (BLEY JR, 2015).

5.4.1. Utilização de biogás em países subdesenvolvidos

Nos países subdesenvolvidos, os impactos positivos dos digestores anaeróbios domésticos utilizados para produção de biogás são ainda mais profundos, especialmente nas áreas rurais, por fornecerem recursos energéticos essenciais como gás de cozinha e iluminação (Figura 19). A China e a Índia destacam-se pela grande quantidade de biodigestores anaeróbios domésticos em operação (ABBASI, 2012; OECHSNER; KHANAL; TAHERZADEH, 2014). Os países em desenvolvimento apresentam dificuldade em relação ao suprimento energético, pois a energia é escassa e onerosa. Nestes países a digestão anaeróbia tem uma relevância muito maior do que para os países desenvolvidos. O desenvolvimento da tecnologia de biogás tem sido particularmente forte na Índia e na China. Esses dois países têm, de certa forma, dado a liderança para vários outros, especialmente no sudeste asiático (ABBASI, 2012).



Figura 19 - Utilização de biogás no Nepal
Fonte: Abbasi (2012).

A Índia é creditada por ter construído o primeiro digestor anaeróbio, em 1897, quando o Matunga Leper Asylum em Bombaim utilizou resíduos humanos para gerar gás para atender às suas necessidades de iluminação (OECHSNER; KHANAL; TAHERZADEH, 2014). Anos mais tarde, desenvolveu o modelo de biodigestor indiano. Além das usinas de biogás domésticas, foram instaladas unidade de biogás de nível comunitário para fornecer gás a famílias que não possuíam criação de animais. Os banheiros públicos que incorporam unidades de biogás têm sido uma opção atrativa, especialmente em áreas semiurbanas e pequenas cidades da Índia que não possuem instalações adequadas de tratamento de resíduos e a energia extra na forma de biogás é bem-vinda (ABBASI, 2012).

A China tem o maior programa de biogás do mundo. Mais de vinte e cinco milhões de famílias na China usam o biogás, o que representa mais de 10% de todas as famílias rurais. No final de 2005, existiam 2.492 digestores de biogás de média e grande escala em explorações pecuárias e avícolas, enquanto 137.000 digestores de biogás foram construídos para a purificação de efluentes domésticos. Somente na província de Sichuan, cerca de cinco milhões de usinas domésticas de biogás foram construídas até 2010. O governo chinês oferece um substancial subsídio do governo para instalação de unidades de biogás (ABBASI, 2012).

No Nepal, entre 2004 e 2005, foram instaladas 17.803 unidades de aproveitamento de biogás, elevando o número total instalado desde 1992 para mais de 140.000. Nos últimos anos, até 62 empresas de construção de biogás foram criadas no Nepal, juntamente com 15 oficinas para a fabricação de aparelhos de biogás. Cerca de 140 instituições de micro finanças estão envolvidas no financiamento de unidades de aproveitamento de biogás em áreas rurais. Estas unidades melhoraram as condições sociais e ambientais de cerca de 800.000 pessoas. Os benefícios anuais do uso de biogás no Nepal foram estimados como, o abandono do uso de madeira de lenha (2 toneladas), aproveitamento de resíduos agrícolas (1 tonelada), aproveitamento de dejetos de animais (250 kg), abandono do uso de querosene (70 kg) e reaproveitamento na forma de biofertilizante (39 kg de nitrogênio, 19 kg de fósforo e 39 kg de potássio). Além disso, os benefícios para a saúde são alcançados através da redução da poluição do ar em ambientes fechados e da instalação de vasos sanitários em 72% dos domicílios que possuem unidades de aproveitamento de biogás. O programa de apoio ao biogás gerou emprego direto para 11.000 pessoas e acredita-se ser particularmente benéfico para as mulheres, pois reduz o trabalho pesado (média de 3 horas por dia por trabalho doméstico) além de reduzir o desmatamento e as emissões de gases de efeito estufa (ABBASI, 2012).

5.4.2. Referências nacionais da utilização de biogás

Durante o ano de 2014, foram iniciados projetos pioneiros de aproveitamento de biogás pela ITAIPU Binacional que servem como referências nacionais. O Projeto “Geo Energética” localiza-se no município de Paraíso do Norte, Paraná e trata-se de uma unidade de aproveitamento energético de biogás em uma usina de açúcar e álcool em uma área de 10 hectares. A usina disponibiliza seus rejeitos de produção para produção de biogás, recebendo em troca o biofertilizante. A energia gerada, de 4 MW, é despachada para Companhia Paranaense e Energia Elétrica (Copel). A unidade de aproveitamento de biogás foi feita dentro do conceito de sustentabilidade e abriga a área de armazenamento dos resíduos, biorreatores, reservatórios de biogás e geradores de energia. O objetivo atual do projeto é ampliar sua capacidade de geração de energia para 16 MW e ainda, produzir biometano para substituir o óleo diesel. Na Figura 20 é possível observar os biodigestores e linhas de transmissão de energia do projeto Geo Energética (BLEY JR, 2015).



Figura 20 - Projeto “Geo Energética”
Fonte: Bley Jr (2015).

A Granja Colombari, localizada em São Miguel do Iguaçu, Paraná, foi o projeto pioneiro da ITAIPU em parceria com produtores rurais e uma empresa canadense almejando difundir o biogás como fonte energética renovável. A granja possui aproximadamente 3 mil suínos em terminação com uma vazão média de 36 m³/dia de dejetos, equivalente a 750 m³/dia de biogás produzido. A propriedade foi a protagonista de um dos primeiros contratos para o MDL realizados junto a uma empresa canadense, com intuito de vender créditos por redução de emissões de carbono. A granja trocou créditos de carbono pela instalação de um biodigestor e assim iniciou seu projeto energético. A unidade passou então a comercializar energia elétrica, além de seus produtos rurais. O excedente da energia transformou-se em um novo centro de custos e negócios para a atividade rural. O faturamento do mês de fevereiro de 2011 foi de cerca de R\$ 2.500,00, relativos a venda de pouco mais de 19 MW hora/mês, ao preço de R\$ 135 por MW hora/mês. A Figura 21 apresenta o biodigestor utilizado na granja.



Figura 21 - Granja Colombari, projeto em parceria com a ITAPU
Fonte: de Bley Jr (2015).

5.5. Vantagens e desvantagens ambientais provenientes da tecnologia de biogás

De acordo com Balsam (2006), o aproveitamento energético de biogás apresenta diversos benefícios ao meio ambiente e oferece muitas vantagens em relação a outras formas de tratamentos de resíduos, tais como:

- Redução de GEEs;
- Substituição de combustíveis fósseis;
- Redução da poluição de solos e recursos hídricos, proveniente do tratamento de efluentes doméstico e industriais que possuem grandes cargas orgânicas;
- Possibilidade de obtenção do subproduto biofertilizante, propiciando ao agricultor alguma independência;
- Potencial de adaptação para diferentes especificações de projeto.

Considerando-se a capacidade de cogeração de energia que o biogás apresenta, como uma fonte renovável, tem o potencial de reduzir as emissões de GEE. Atualmente, esta tem sido uma das melhores formas de mitigar a emissão de metano e promover a redução do efeito estufa (WHITING; AZAPAGIC, 2014). O IPCC está constantemente avaliando os valores de potencial de aquecimento global (GWP, sigla em inglês) de 44 gases, usando um horizonte de tempo de 100 anos. A estimativa mais recente do IPCC do metano foi em 2014. A primeira estimativa foi publicada em 1992. As mudanças do valor GWP entre 1992 e 2014 refletem a evolução da compreensão científica. Por exemplo, em 1992, o GWP do metano era 11 vezes maior do que o do dióxido de carbono, mas em 2007 subiu para 21. Isto significa que uma dada massa de metano poderia aumentar o forçamento radiativo da atmosfera em uma quantidade 21 vezes mais do que o forçamento associado com a mesma massa de dióxido de carbono. Esta avaliação representa o maior e mais abrangente resumo da situação de mudança climática mundial, citando mais de 6.000 estudos científicos revisados por pares, produzidos por milhares de autores, editores e revisores de dezenas de países (IPCC, 2014).

Embora o fornecimento de energia brasileira dependa de fontes de energia não renováveis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, fontes renováveis como biomassa, hidráulica, eólica e outras, são responsáveis por 39,4% do fornecimento de energia (MME, 2015). A biomassa é uma fonte renovável de energia abundante que pode ser derivada de qualquer matéria orgânica oriunda de atividades humanas ou naturais, incluindo resíduos agroindustriais, resíduos sólidos urbanos, resíduos florestais, resíduos agrícolas e dejetos de animais (IVES et al., 2013; KOHL et al., 2014; KYLILI; FOKAIDES, 2014; WYMYSLOWSKI et al., 2010). Outra vantagem da utilização de biogás para produção energética é que esta fonte pode ser acessada sob demanda, ao contrário de outras fontes renováveis como a eólica e a solar, que são intermitentes. A tecnologia de biogás é de particular interesse para os produtores agrícolas, pois ao além de converter resíduos agrícolas em energia, também pode-se obter fertilizantes (WHITING; AZAPAGIC, 2014).

Os produtores rurais geralmente são mais afetados pela escassez de abastecimento energético. Para fins de cocção muitos se utilizam ainda de lenha, porém este é um recurso escasso e gerador de grande impacto ambiental decorrente de desmatamento. Em adição, a queima da lenha pode provocar problemas respiratórios. Todavia, o GLP e o querosene possuem alto valor aquisitivo e ainda,

aparelhos que funcionam a pilha geram significativos impactos ao meio ambiente (OLIVER, 2008). Desta maneira, a produção autossustentável de biogás nas áreas rurais, é incentivada ao passo que traz economia para os produtores e reduz a taxa de poluição ambiental.

O manejo inadequado de dejetos de animais pode acarretar impactos ao meio ambiente e à saúde, podendo atuar como vetor de doença e contaminante para os recursos hídricos e solo. O despejo destes dejetos diretamente no solo, sem um pré-tratamento, pode acarretar: disseminação de micro-organismos patogênicos, sequestro de nitrogênio causando deficiência nos vegetais, entre outros. Quando ocorre o aproveitamento energético de biogás, estes dejetos são transformados em biofertilizantes, trazendo benefícios para o produtor rural. A biodigestão anaeróbia destes rejeitos promove o aproveitamento de resíduos agropecuários contribuindo para melhora da qualidade do saneamento ambiental e ainda, produzindo adubo. Esta atividade agrega valor à produção rural, otimizando a produção agrícola e permitindo uma maior integração entre o setor agropecuário (OLIVER, 2008).

Entretanto, algumas desvantagens do processo de produção de biogás são apontadas por Anastácio (2010):

- Baixo valor monetário para venda de energia elétrica;
- A necessidade de haver uma purificação do biogás para certos tipos de uso;
- Possibilidade de haver baixo rendimento de metano, devido ao substrato utilizado.

Sendo assim, pode-se concluir que a utilização da tecnologia de biogás gera mais vantagens do que desvantagens, sendo assim uma considerável alternativa para substituição de combustíveis fósseis.

6. Conclusão

O aproveitamento de biogás ocasiona diversos impactos positivos ao meio ambiente. A sua principal característica, que o difere dos demais combustíveis, é a sua capacidade de mitigação da poluição ambiental. Neste contexto, o biogás surge como um biocombustível e fonte renovável de energia capaz de reverter cenário de degradação ambiental. Ao passo que a disposição de resíduos acarreta transtornos ao homem desde os primórdios da civilização, encontrar maneiras para reverter este quadro tem sido o objetivo de muitos estudos. O verdadeiro diferencial da tecnologia

de biogás, está em sua capacidade de transformar um problema em uma solução. Além de possibilitar a reutilização de rejeitos de composição orgânica, esta tecnologia ainda prevê adição destes rejeitos novamente ao ciclo de produção, como produtos. Os resíduos tornam-se então matéria-prima (substrato) para obtenção de energia. É importante ressaltar que, a queima do biogás é muito mais conveniente do que o seu livre escape para a atmosfera devido a sua alta taxa de metano. Sendo assim, no processo de queima é muito pertinente que se ocorra o aproveitamento energético.

Há de se considerar ainda, a possibilidade de se obter o biofertilizante e o biometano proporcionando ainda mais impactos positivos ao meio ambiente. A redução de emissões de GEE e contribuição para o não agravamento do aquecimento global, surge como principal benefício indiretamente ligado ao aproveitamento energético de biogás, seus produtos (biogás e biometano) e subproduto (biofertilizante).

A biodegração que pode ocorrer através da digestão anaeróbia controlada mostrou-se como um sistema complexo, porém, com muitas alternativas ao seu favor. A evolução dos estudos nesta área levam a compreensão das condições ideais necessárias ao desenvolvimento de micro-organismos capazes de decompor a matéria orgânica. Desta forma, o sistema pode ser replicado e manipulado sem grandes objeções. Ressalva-se que, o desenvolvimento de um maior número de pesquisas na área é necessário para o aprimoramento da tecnologia de biogás possibilitando a sua aplicação no cotidiano.

7. Referências bibliográficas

ABBASI, Tasneem; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A.. Biogas and Biogas Energy: An Introduction. **Biogas Energy**, [s.l.], p.1-10, 22 set. 2011. Springer Nature.

ABDULSALAM, Surajudeen; YUSUF, Mustapha. A Kinetic Study of Biogas Produced from Cow and Elephant Dungs Using the Residual Substrate Concentration Approach. **Chemical Engineering and Science**, v. 3, n. 1, p. 7-11, 2015.

AGCERT. Projeto de Mitigação GHG AWMS BR05-B-03, Brasil. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo UNFCCC. Documento de Design do Projeto. 2005.

AIRES, A.M.A. Biodigestão anaeróbia da cama de aviários de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida. 2009. 134f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

ALLEN, Matthew R.; BRAITHWAITE, Alan; HILLS, Chris C.. Trace Organic Compounds in Landfill Gas at Seven U.K. Waste Disposal Sites. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 31, n. 4, p.1054-1061, abr. 1997.

ALVES, J.W.S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos. São Paulo. 2000, Dissertação (Mestrado) – PIPGE/Universidade de São Paulo.

ANASTÁCIO, M. C. F. **Produção de Energia na Forma de Biogás a Partir de Resíduos Animais Para o Desenvolvimento Rural**. 2010. 63f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Portugal, 2010.

ANDRADE NETO, C. O. **Filtro Anaeróbio Aplicado ao Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2004. 188f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2004.

Balsam, Jonh. **Anaerobic Digestion of Animal wastes: Factors to Consider**. Publication of ATTRA - National Sustainable Agriculture Information Service, 1-800-346-9140, 2006.

BARRERA, Paulo. Biodigestão: energia, fertilizante e saneamento para zona rural. São Paulo: Ícone, 2001.

BARROS, Daniel. Cogeração de Energia Com Biogás a Partir De Lodo Biológico. In: Congresso Sobre Geração Distribuída e Energia No Meio Rural, 10., 2015, São Paulo. Anais... . São Paulo: Agrener Gd 2015, 2015. p. 3 - 8.

BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; SILVA, Tiago Rodrigo da. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. [s. L.]: Energy Policy, 2013.

BERNI, Mauro Donizeti and BAJAY, Sergio Valdir. O contexto dos biocombustíveis para o transporte rodoviário no Brasil.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas.

BLEY JR 2009 et al Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais/Maurício Galinkin, editor; Cícero Bley Jr. ... [et al.]. 2ª ed. rev. - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009.

BLEY JUNIOR, Cícero. **BIOGÁS: A ENERGIA INVISÍVEL**. 2. ed. São Paulo: Itaipu, 2015.

BRANCO, M. S. R. C. Avaliação do impacto da presença de siloxanos em sistemas de aproveitamento de biogás. 142 fl. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

BRUNO, Joan Carles; ORTEGA-LÓPEZ, Víctor; CORONAS, Alberto. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: case study of a sewage treatment plant. **Applied energy**, v. 86, n. 6, p. 837-847, 2009.

CETESB. Biogás Pesquisas e Projetos No Brasil. São Paulo: Cetesb, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias Volume 5: Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

AHMAD, A. L. et al. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 584-593, 2011.

COLATTO ,L; LANGER, M. Unoesc & Ciência – ACET, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, jul./dez. 2012.

CONRAD, Ralf. Soil Microorganisms as Controllers of Atmospheric Trace Gases. *Microbiologic al Reviews*, [s. L.], v. 60, n. 4, p.609-640, dez. 1996.

CONTRERAS, Ana M. et al. Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 8, p. 772-779, 2009.

DAROCH, Maurycy; GENG, Shu; WANG, Guangyi. Recent advances in liquid biofuel production from algal feedstocks. **Applied Energy**, v. 102, p. 1371-1381, 2013.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2015.

Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf>. Acesso em: 10/10/2016.

GASPAR, M. B. L. Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região de Toledo-PR. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2003.

Glus, P. H., Liang, K. Y., Li, R. & Pope, R. J. 2001. Recent advances in the removal of volatile methylsiloxanes from biogas at sewage treatment plants and landfills. Paper presented at the annual Air and Waste Management (AWMA) Conference. Orlando, Florida.

Gustavsson J, Shakeri Yekta S, Sundberg C, Karlsson A, Ejlertsson J, Skyllberg U, Svensson BH. Bioavailability of cobalt and nickel during anaerobic digestion of sulfur-rich stillage for biogas formation. *Appl Energy*. 2013.

Hefner III. *The Age of Energy Gases*. [s. L.]: The Ghk Company, 2007.

IANNICELLI, André Luiz. **Reaproveitamento Energético do Biogás de Uma Indústria Cervejeira**. 2008. 84f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, São Paulo, 2008.

IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. [s. L.]: Ibge, 2010.

IPCC 2014 - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/drafts/fd/AR5_SYR_FD.pdf>. Acesso em: 10/02/2017.

IVES, M. C.; SCANDOL, J. P.; GREENVILLE, J. A bio-economic management strategy evaluation for a multi-species, multi-fleet fishery facing a world of uncertainty. **Ecological modelling**, v. 256, p. 69-84, 2013.

JINGURA, Raphael M.; MATENGAIFA, Rutendo. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 5, p. 1116-1120, 2009.

KARELLAS, Sotirios; BOUKIS, Ioannis; KONTOPOULOS, Georgios. Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. Atenas, Grécia, p. 1-10. dez. 2009.

KARLSSON, Anna; BJÖRN, Annika; YEKTA, Sepehr Shakeri. *Improvement Of The Biogas Production Process: Biogas Research Center*. Linköping: Linköping University, 2014.

KOHL, Thomas; LAUKKANEN, Timo P.; JÄRVINEN, Mika P. Integration of biomass fast pyrolysis and precedent feedstock steam drying with a municipal combined heat and power plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, p. 413-430, 2014.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. Aproveitamento de Dejetos de Animais para Geração de Biogás. *Revista de Política Agrícola*, ano XV, n. 3. Brasília, jul./ago./set. 2006.

KYLILI, Angeliki; FOKAIDES, Paris A. Competitive auction mechanisms for the promotion renewable energy technologies: The case of the 50mw photovoltaics projects in cyprus. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 226-233, 2015.

LANTZ, Mikael et al. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden: Incentives, barriers and potentials. **Energy Policy**, Washington, v. 35, n. 3, p.1830-1843, mar. 2007.

LEAVENWORTH, Stuart; SHIFFER, James Eli. Airborne menace. **Sunday Raleigh New and Observer (July 5, 1998) A**, v. 8, 1998.

LEE, Amanda. **Renewable Energy and Agriculture: Promoting Biogas in the Rural Communities of the Lashihai Wetland Nature Reserve**. Yunnan: Clark University, 2008.

LINDFELDT, E.G.; WESTERMARK M.O. 2009. Biofuel production with CCS as a strategy for creating a CO2-neutral road transport sector. *Energ. Procedia* 1, 4111-4118.

LUSK, Philip D.. **Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook**. Golden: Us. Department Of Energy, 1998. 147 p.

MADIGAN, Michael; Martinko, John; Dunlap, Paul; Clark, David. **Microbiologia de Brock**. 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

MADLENER, Reinhard; ANTUNES, Carlos Henggeler; DIAS, Luis C. Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1084-1094, 2009.

MME – Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília: Editado por EPE, 2015.

MONNET, Fabien. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes. **Remade Scotland**, p. 1-48, 2003.

MONTINGELLI, M.e.; TEDESCO, S.; OLABI, A.g.. Biogas production from algal biomass: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. Scotland, Uk, p. 961-972. nov. 2014.

NISHIMURA, Rafael. Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

OECHSNER, Hans; KHANAL, Samir Kumar; TAHERZADEH, Mohammad. Advances in Biogas Research and Application. **Bioresource Technology**, [s.i.], v. 233, n. 11, p.03-03, 2 jan. 2014.

OHANNESSIAN, A. et al. Volatile organic silicon compounds: the most undesirable contaminants in biogases. **Water Sci Technol.**, [s.i.], v. 9, n. 58, p.1775-1781, nov. 2008.

OLIVER, André de Paula Moniz. Manual de Treinamento em Biodigestão. Salvador/Bahia: Instituto Winrock, fevereiro de 2008.

Oliveira et al. 2001 Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta, publicado pelo Instituto Virtual Internacional de Mudanças Climáticas – IVIG/COPPE.

PALUDO, G. B. Microrganismos geneticamente modificados e sua relação com o aumento na produção de biocombustíveis. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 10, n. 18, 2014.

PELLIZARI, Vivian H.; NAKAYAMA, Cristina R.; ARAÚJO, Ana Carolina V.. Metano Mudanças Climáticas Globais e a Microbiologia. Microbiologia em Foco, São Paulo, v. 1, n. 1, p.4-9, jul. 2007.

PERMINIO, Guilherme Bezerra. Viabilidade do Uso de Biodigestor Como Tratamento de Efluentes Domésticos Descentralizado. 2013. 57 f. Monografia (Especialização) - Curso de Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2013.

PERSSON, Margareta. **Evaluation of upgrading techniques for biogas**. Lund: Swedish Gas Center, 2003. 69 p.

PERSSON, Margareta; JÖNSSON, Owe; WELLINGER, Arthur. **Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection**. Malmö: Iea Bioenergy, 2006.

Pierce, J. L. Landfill Gas to Vehicle Fuel: Assessment of its Technical and Economics Feasibility. SWANA's annual Landfill Gas Symposium. 2007.

RASI, Saija Emilia. **Biogas Composition and Upgrading to Biomethane**. 2009. 79f. Dissertação (Mestrado) – University Of Jyväskylä, Finlândia, 2009.

REN21. Renewables 2010: Global Status Report. Paris: Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (gtz) GmbH, 2010.

SANT'ANNA JR, Geraldo Lippel. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. IV-IV, 2010.

Scheutz C.; Mosbaek H.; Kjeldsen P. Attenuation of methane and volatile organic compounds in landfill soil covers. **J Environ Qual.**, [s.i], v. 1, n. 33, p.61-71, jan. 2004.

SCHWEIGKOFER, Martin; NIESSNER, Reinhard. Determination of Siloxanes and VOC in Landfill Gas and Sewage Gas by Canister Sampling and GC-MS/AES Analysis. **Environ. Sci. Technol.**, [S.l.], v. 20, n. 33, p.3680-3685, 03 set. 1999.

SEPPÄLÄ, Mari et al. Biogas production from boreal herbaceous grasses—specific methane yield and methane yield per hectare. **Bioresource technology**, v. 100, n. 12, p. 2952-2958, 2009.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS.

SEBRAE. Cadeia produtiva da avicultura: cenários econômicos e estudos setoriais. Sebrae, 2008. Disponível em: <<http://177.52.17.17:8030/downloads/avicultura.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

SINGH, S. P.; PRERNA, Pandey. Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6, p. 1569-1575, 2009.

SOUBES, M. Microbiologia de la digestion anaerobia. In: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO “TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES III”. 1994. Montevideo, Uruguay. Anais... 1994. p.15-28.

Tower, P. (2003) New technology for removal of siloxanes in digester gas results in lower maintenance costs and air quality benefits in power generation equipment. WEFTEC 78th Annual Technical Exhibition and Conference.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um manual para regiões de clima quente. Epgraf Ed. – Campina Grande, 1994.

VISSER, A, 1995, Wageningen. **International course of anaerobic treatment::** Anaerobic treatment of sulphate containing in waste water.. Wageningen: University / Ihe Delft., 1995. 11 p.

WARGERT, David. **Biogas in developing rural areas**. Lund: Environmental And Energy Systems Studies, 2009. 16 p.

WHITING, Andrew; AZAPAGIC, Adisa. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. **Energy**, v. 70, p. 181-193, 2014.

WYMYSLOWSKI, Mateusz et al. Methane fermentation of poultry slaughterhouse waste. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 12, n. 3, p. 15-18, 2010.

XAVIER, Cristiane de A. N.; LUCAS JÚNIOR, Jorge de. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO PARA BIODIGESTORES BATELADA OPERADOS COM DEJETOS DE VACAS LEITEIRAS COM E SEM USO DE INÓCULO. Eng. Agríc, Jaboticabal, Sp, v. 30, n. 2, p.212-223, fev. 2010.

XIAODONG J. "National Biogas-Household Program - A Case Study of Datong Municipality, Shanxi Province" University of Technology, Berlin, 2009.

YANG, Yingnan; TSUKAHARA, Kenichiro; SAWAYAMA, Shigeki. Biodegradation and methane production from glycerol-containing synthetic wastes with fixed-bed bioreactor under mesophilic and thermophilic anaerobic conditions. **Process Biochemistry**, v. 43, n. 4, p. 362-367, 2008.

YU, Zhongtang; SCHANBACHER, Floyd L. Production of methane biogas as fuel through anaerobic digestion. In: **Sustainable biotechnology**. Springer Netherlands, 2010. p. 105-127.

ZACHOW, C. R. (2000). Biogás. Panambi, 12p. Dissertação de graduação.