

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**CRISTINE BRANDT DA SILVA**

**ABORDAGEM TEÓRICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE  
BIOMETANO A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**CRISTINE BRANDT DA SILVA**

**ABORDAGEM TEÓRICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE  
BIOMETANO A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Co-orientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski

**PONTA GROSSA**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa  
n.29/17

S586 Silva, Cristine Brandt da

Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. / Cristine Brandt da Silva -- 2017.

69 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Coorientador: Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

1. Biogás. 2. Biodigestores. 3. Resíduos como combustível. 4. Energia - Fontes alternativas. I. Francisco, Antonio Carlos de. II. Piekarski, Cassiano Moro. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus  
Ponta Grossa  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Título da Dissertação Nº 300/2017**

**ABORDAGEM TEÓRICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE  
RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

**por**

**Cristine Brandt da Silva**

Esta dissertação foi apresentada às 17:30 do dia 30 de Março de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, com área de concentração em **Gestão Industrial**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Thalmo de Paiva Coelho Junior  
(IFES)**

**Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser  
(UTFPR)**

**Prof. Dr. (Nome do 2º membro da UTFPR)  
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco  
(UTFPR) – *Orientador***

**Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco  
(UTFPR)  
Coordenador do PPGEP**

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO  
DE REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR –CÂMPUS PONTA GROSSA**

Dedico esta dissertação à minha pequena  
e tão esperada Rafaela.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus o meu maior agradecimento, obrigada por pela oportunidade de viver, respirar e trabalhar. Por me dar forças para superar as dificuldades e mostrar o caminho certo.

Ao meu querido esposo e melhor amigo, João Henrique, por ser tão importante em minha vida. Agradeço por seu companheirismo, amizade, paciência, compreensão, apoio e por todo amor.

Aos meus pais, Eloi e Rosana, pelas orações, pelo incentivo e pela fé que sempre depositaram em mim.

Ao meu orientador professor Antonio Carlos de Francisco, pela confiança e pela sabedoria, com que me guiou nesta trajetória, me proporcionando enriquecimento cultural e intelectual.

Ao meu co-orientador professor Cassiano Moro Piekarski, pelas sugestões, contribuições e pela disponibilidade.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, incluindo professores, servidores, alunos, funcionários e, em especial, aos amigos do LESP, que por tantas vezes tornaram mais leve o meu trabalho.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite e por contribuírem para o trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Ponta Grossa.

À CAPES/CNPQ pelo auxílio financeiro.

“Por vezes sentimos que aquilo que  
fazemos não é senão uma gota de água  
no mar. Mas o mar seria menor se lhe  
faltasse uma gota”.

(Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

SILVA, Cristine Brandt da. **Abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

A geração de energia renovável desafia as empresas a envolver um processo em cadeia, no qual, todos os elos são corresponsáveis pela geração de novos produtos, processos, e pelo consumo e produção responsável, protegendo o meio ambiente e melhorando a vida das pessoas com que mantém interações. A presente pesquisa objetivou propor uma abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. Para a realização da abordagem teórica, foi construído um Portfólio Bibliográfico e adotadas técnicas de revisões sistemáticas de literatura, para assegurar que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa fossem capturados. A abordagem teórica foi dividida em três principais fases, sendo que a primeira fase do processo de geração de biometano incluiu a escolha, o pré-tratamento e o transporte do material orgânico até o biodigestor. A segunda fase do processo incluiu decisões como, a escolha do modelo do biodigestor e a utilização final do biofertilizante e do biogás gerado. Por fim, a terceira fase do processo de geração de biometano incluiu decisões como, a escolha da tecnologia a ser utilizada para o processo de purificação, e o uso final do biometano. O processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais, é um tema de poucas publicações no Brasil. O uso do biometano em países como Alemanha, Reino Unido e Suécia, está em um estágio consideravelmente avançado em relação a legislação e tecnologias, comparado ao Brasil. Desta forma, a proposta formulada neste estudo, auxilia acadêmicos, pesquisadores e gestores na área, na compreensão do processo como um todo e na tomada de decisões sustentáveis.

**Palavras-chave:** Biometano. Biogás. Biodigestores. Purificação de biogás. Digestão anaeróbica.

## ABSTRACT

SILVA, Cristine Brandt da. **Theoretical approach to the process of generating biomethane from agroindustrial waste.** 2017. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Renewable energy generation challenges companies to engage in a chain process in which all links are co-responsible for the generation of new products, processes and responsible consumption and production, protecting the environment and improving the lives of people with whom Interactions. The present research aimed to propose a theoretical approach of the biomethane generation process from agroindustrial waste. For the accomplishment of the theoretical approach, a Bibliographic Portfolio was constructed and techniques of systematic literature reviews were adopted to ensure that recent and relevant studies on the research topic were captured. The theoretical approach was divided into three main phases, and the first phase of the biomethane generation process included the selection, pretreatment and transport of the organic material to the biodigester. The second phase of the process included decisions such as the choice of biodigester model and the final use of biofertilizer and biogas generated. Finally, the third phase of the biomethane generation process included decisions such as the choice of technology to be used for the purification process and the final use of biomethane. The process of generating biomethane from agro-industrial waste is a subject of few publications in Brazil. The use of biomethane in countries such as Germany, the United Kingdom and Sweden is at a considerably advanced stage compared to legislation and technologies compared to Brazil. Thus, the proposal of this study assists academics, researchers and managers, in understanding the process as a whole and in making sustainable decisions.

**Keywords:** Biomethane. Biogas. Biodigesters. Biogás purification. Anaerobic digestion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimentos metodológicos da dissertação .....	19
Figura 2 – Estrutura da Pesquisa .....	23
Figura 3 - Proporção de energia renovável no consumo final mundial em 2014.....	24
Figura 4 - Substratos utilizados para a produção de biogás na União Européia, 2008 - 2013 .....	25
Figura 5 - Diagrama das ligações das Organizações de financiamento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em tecnologias de energia de biomassa .	29
Figura 6 – 1º Fase do processo de geração de biometano .....	34
Figura 7 – Biodigestor modelo Chinês .....	37
Figura 8 – Biodigestor modelo Indiano.....	38
Figura 9 – Biodigestor de tecnologia Alemã.....	39
Figura 10 – Biodigestor modelo Canadense .....	39
Figura 11 – Lagoa Otimizada .....	40
Figura 12 - Estágios da produção de biogás .....	46
Figura 13 – 1º e 2º fase do processo de geração de biometano.....	48
Figura 14 - 1º, 2º e 3º fase do processo de geração de biometano .....	55
Figura 15 - Processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais .....	57

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultado das buscas por palavras-chave para cada etapa da pesquisa .....	20
Quadro 2 – Principais referências na construção do Portfólio Bibliográfico .....	21
Quadro 3 - O Biogás de 1ª Geração no Brasil.....	26
Quadro 4 - Marcos Regulatórios e Políticas de incentivo do biometano na Alemanha .....	27
Quadro 5 - Normas estabelecidas em favor da utilização do biogás e biometano ....	30
Quadro 6 - Resíduos e efluentes gerados nas atividades agroindustriais.....	33
Quadro 7 - Técnicas de geração do biogás.....	36
Quadro 8 - Modelos de Biodigestores .....	41
Quadro 9 - Biogás no mundo .....	43
Quadro 10 - Processos de purificação do biogás .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de geração de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais .....	45
Tabela 2 - Equivalência do Biogás .....	47
Tabela 3 – Especificações do Biometano – ANP .....	53

## LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CDEAM	Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CRF	Concreto reforçado com fibras
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
EBA	<i>European Biogas Association</i>
EBMA	Empresa Brasileira de Meio Ambiente
EPE	Empresa de pesquisa energética
EGG	<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>
FBS	<i>Flexi-Biogas systems</i>
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
FNR	<i>Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i>
GN	Gás Natural
GNV	Gás Natural Veicular
IME	Instituto Militar de Engenharia
IMUS	<i>Integrated Manure Utilization System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LER	Leilão de Energia de Reserva
LES	Laboratório de Energia Solar
MME	Ministério de Minas e Energia
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída
NIPE	Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético
PCH	Pequenas centrais hidrelétricas
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinil
SIN	Sistema Elétrico Interligado Nacional
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos voláteis
TC	Tecnologia de combustão
TUSDg	Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNB	Universidade de Brasília

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ABIOGAS	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CIBIOGÁS	Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio ambiente
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RENABIO	Rede Nacional de Biomassa para Energia
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network for the 21st Century</i>
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UNIFOR	Universidade de Fortaleza
USP	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 METODOLOGIA.....	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2 CONTEXTO INTERNACIONAL E NACIONAL PARA O USO DO BIOMETANO</b>	<b>24</b>
2.1 POLÍTICAS DE INCENTIVO AO USO DO BIOMETANO.....	27
<b>3 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOMETANO.....</b>	<b>32</b>
3.1 GERENCIAMENTO DO SUBSTRATO.....	32
3.1.1 Resíduos Agroindustriais.....	32
3.1.2 Conclusões da 1º Fase do processo de geração de biometano.....	35
3.2 BIODIGESTORES.....	35
3.2.1 Biodigestor: Modelo Chinês e Indiano.....	37
3.2.2 Biodigestor de tecnologia Alemã.....	38
3.2.3 Biodigestor: Modelo Canadense ou Lagoa Otimizadas.....	39
3.2.4 Biogás.....	43
3.2.5 Potencial de Geração do Biogás.....	44
3.2.6 Digestão Anaeróbica.....	46
3.2.7 Conclusões da 2º Fase do processo de geração de biometano.....	49
3.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	50
3.3.1 Biometano.....	52
3.3.2 Usos finais do biometano.....	53
3.3.3 Conclusões da 3º Fase do processo de geração de biometano.....	56
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A escassez dos combustíveis fósseis, as mudanças climáticas geradas pela queima de combustíveis fósseis, somado às características da economia brasileira, são grandes preocupações para aumentar a produção de energia a partir de resíduos. O aproveitamento de resíduos para a geração de eletricidade, calor e biocombustíveis, estão entre as melhores práticas para a geração de energia com sustentabilidade (GALINKIN et al., 2009).

Desde a década de 1970, com as crises do petróleo, a busca por adoção de energias alternativas tem se intensificado, diversos países procuraram a segurança no fornecimento de energia e a redução da dependência da importação de combustíveis (FERREIRA JR.; RODRIGUES, 2015).

A partir da assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997, a preocupação com a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e as mudanças climáticas, também ganharam forças para a busca de alternativas mais limpas de produção de energia, suprimindo as necessidades econômicas e gerando menos impacto ambiental (FERREIRA JR.; RODRIGUES, 2015).

A tendência é uma forte mudança na política nacional de energia, enfatizando a importância de aumentar a geração de energia renovável, e aproveitar o território brasileiro que tem quase todos os tipos possíveis de fontes primárias de geração de energia elétrica (GUERRA et al., 2015).

É atrativo para o Brasil gerar eletricidade por meios hídricos que são renováveis, contudo, é preocupante a diminuição da disponibilidade de locais para grandes obras hidroelétricas, as distâncias cada vez maiores até os centros de consumo, a degradação do meio ambiente por inundações e linhas de transmissão, e os custos cada vez maiores para a sociedade (FERREIRA JR.; RODRIGUES, 2015).

Outra preocupação é a possibilidade do Brasil passar por uma crise hídrica, passando por níveis abaixo da normalidade dos reservatórios e a necessidade de economia de água que é o combustível das hidrelétricas. O governo e a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, repensam sobre a microgeração e formas de incentivo para a geração de energia descentralizada (MARTINS, 2015). Os recursos hidrelétricos no Brasil são grandes, mesmo assim, Guerra et al. (2015) alertam " temos de considerar a questão das chuvas imprevisíveis, que podem exigir uma atenção especial para este tipo de oferta".

Neste cenário energético, as fontes não convencionais como biogás, acabam ganhando mais espaços na matriz energética brasileira, tendo a necessidade de completar o desenvolvimento tecnológico brasileiro, em termos de geração e uso das energias renováveis, adequando-os para a geração em escala efetiva, segura e competitiva (BLEY JR., 2015).

A disponibilidade potencial de recursos na forma de biomassa para bioeletricidade será adotada como as quantidades projetadas no Plano Nacional de Energia para 2050, que considerou a expansão da oferta destes recursos. A diversidade de tecnologias em energia renovável cria a modalidade conhecida como geração distribuída, onde produz energia para sistemas isolados ou junto a unidade consumidora (TOLMASQUIM, 2016).

Além da aplicação de biogás na geração de eletricidade, calor ou cogeração, coexistem atualmente a injeção em gasodutos e o uso veicular do produto processado a partir da purificação do biogás denominado biometano. O uso do biometano em países como Alemanha, Reino Unido e Suécia, está em um estágio bastante adiante em relação a legislação e tecnologias, comparado ao Brasil (MME, 2016).

O aproveitamento do biometano tende a avançar no Brasil por possuir enorme disponibilidade de resíduos. A energia gerada pela decomposição de resíduos urbanos (em aterros sanitários) ou agropecuários (dejetos de suínos e aves, por exemplo) dependendo da forma de gestão prévia destes resíduos, é uma alternativa que vem contribuindo para a sustentabilidade (GALINKIN et al., 2009).

A gestão dos resíduos baseada na revalorização energética é uma das estratégias da Lei 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), propondo a prática de hábitos de consumo sustentável, propiciando o aumento da reciclagem, reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (IPEA, 2012).

O Sul do Brasil é uma região com forte presença da agroindústria. O aproveitamento dos resíduos agroindustriais, para geração de energia térmica, elétrica pode impactar positivamente os custos de produção. O uso do biometano como biocombustível no transporte e coleta de leite e animais das áreas de produção aos frigoríficos e na distribuição de ração para alimentar milhões de suínos, aves, vacas leiteiras, gado confinado, também acaba impactando positivamente os custos de produção (ABIOGAS, 2016).

A geração de energia renovável desafia as empresas a envolver um processo em cadeia, no qual, todos os elos são corresponsáveis pela geração de novos produtos e processos. Outro desafio é controlar os danos gerados a biosfera pela intervenção humana, protegendo o meio ambiente e melhorando a vida das pessoas com que mantém interações, tudo isso, sem deixar de gerar lucro para os acionistas (BASSETTO, 2010). A geração de energia renovável enfatiza a importância do consumo e produção responsável, assim, essa dissertação propõem os seguintes objetivos:

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar as características dos processos de geração de biometano com base no levantamento do conhecimento científico;
- Classificar os resíduos e as tecnologias de pré-tratamento necessárias para a geração de biomassa;
- Descrever os diferentes tipos de biodigestores, materiais e tecnologias utilizados para a geração do biogás através da digestão anaeróbica;
- Abordar as características, vantagens e desvantagens dos processos de purificação de biogás.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O aumento da demanda por energia e a redução da oferta de combustíveis convencionais, impulsionam comunidades científicas a pesquisar e desenvolver alternativas para a geração de energias limpas e combustíveis renováveis.

O levantamento dos diversos cenários e a caracterização do processo de geração de energia e combustível renovável, fornecem resultados amplamente utilizados para a geração de valor em organizações e nas grandes áreas da Engenharia de Produção e Engenharia da Sustentabilidade, tais como Gestão Ambiental, Gestão de Recursos Naturais e Energéticos e Gestão de Efluentes e Resíduos Industriais.

No Brasil o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, contribui para manter o estado do meio ambiente global sob contínuo monitoramento, alertando povos e nações sobre problemas e ameaças ao meio ambiente e recomendando medidas para melhorar a qualidade de vida da população sem comprometer os recursos e serviços ambientais das gerações futuras.

Os objetivos do desenvolvimento sustentável incluem a identificação e o desenvolvimento de alternativas para minimizar impactos negativos ao meio ambiente causados por padrões insustentáveis de produção e consumo, enfocando, principalmente, na eficiência de recursos, e a assistência ao desenvolvimento de capacidade, de conhecimento científico e transferência de tecnologias para fortalecer a implementação de acordos ambientais multilaterais (PNUMA, 2016).

Os projetos de geração de biometano transformam passivos ambientais em ativos econômicos, pois além de estarem entre as melhores práticas para a geração de biocombustível sustentável, trazem um custo benefício extremamente atrativo para as empresas, podendo ser utilizados em processos industriais, em frota de veículos, como biofertilizantes ou então na comercialização. Porém a ausência de modelos, ou descrições detalhadas do processo de geração de biometano, dificultam o conhecimento e a divulgação destes projetos sustentáveis.

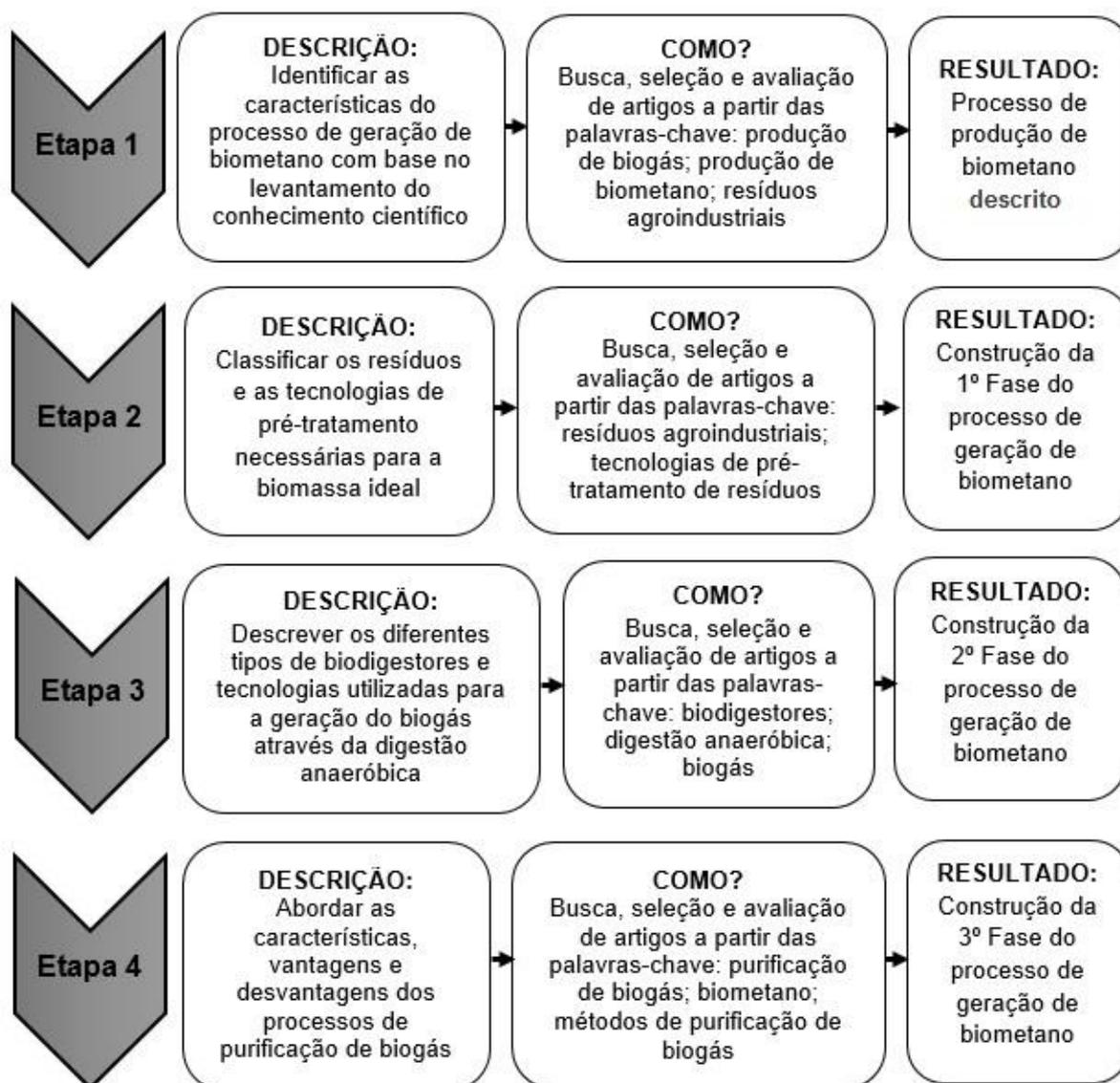
Assim, esta pesquisa poderá contribuir para avanços no desenvolvimento científico e tecnológico sobre processo de geração de biometano, tema já consolidado em vários países e em crescimento no Brasil.

### 1.3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para a proposta central desta pesquisa, que é uma abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.

Para tanto, os procedimentos da metodologia da dissertação, baseou-se nas etapas demonstrada na Figura 1, onde é dividida em:

**Figura 1 – Procedimentos metodológicos da dissertação**



Fonte: Autoria própria

Utilizou-se como procedimento técnico a pesquisa bibliográfica para a construção de um portfólio bibliográfico restrito ao processo de geração de biometano a partir do biogás extraído de resíduos agroindustriais, processo que ocorre em biodigestores.

Foram adotadas técnicas de revisões sistemáticas de literatura, para assegurar que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa fossem capturados. Foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão de artigos e, acima

de tudo, uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

Os critérios de inclusão e exclusão foram realizados em cada etapa da pesquisa, que incluíram a determinação de palavras-chave, tanto no português, como no inglês. Incluíram também a aplicação de dois filtros de seleção, o primeiro foi para buscar em: “*Article title, Abstract, Keywords*”. O segundo foi relacionado ao tipo de documento: “*article*” ou “*journals*”.

Primeiramente a pesquisa foi limitada aos últimos 5 anos, período de 2001 a 2016. Um número pequeno de publicações foi obtido com a restrição de data, por isso, foi excluído esse critério, e utilizada todas as publicações encontradas sobre o assunto.

As consultas foram por meio do portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que disponibiliza documentos nacionais e internacionais. Optou-se pelas bases de dados que permitiram obter informações completas e gratuitas: *ISI Web of Science, Science Direct, Scopus e Scielo*. O Quadro 1 apresenta o resultado das buscas dos artigos por palavras-chave referente a cada etapa, por base de dados.

**Quadro 1 – Resultado das buscas por palavras-chave para cada etapa da pesquisa**

	<b>Palavras-chave</b>	<b>Base de dados</b>	<b>Nº de artigos encontrados</b>
<b>Etapa 1</b>	produção de biogás; produção de biometano; resíduos agroindustriais. <i>biogas production;</i> <i>biomethane production;</i> <i>agroindustrial waste.</i>	ISI Web of Science	27
		Science Direct	127
		Scielo	4
		Scopus	1
<b>Etapa 2</b>	Resíduos agroindustriais; tecnologia de pré-tratamento de resíduos. <i>agroindustrial waste;</i> <i>waste pre-treatment</i> <i>technology.</i>	ISI Web of Science	4
		Science Direct	2
		Scielo	1
		Scopus	0

(Continua...)

(Continuação)

	Palavras-chave	Base de dados	Nº de artigos encontrados
<b>Etapa 3</b>	biodigestor; digestão anaeróbica; biogás. <i>biodigester;</i> <i>anaerobic digestion;</i> <i>biogas.</i>	ISI Web of Science	23
		Science Direct	24
		Scielo	5
		Scopus	47
	Palavras-chave	Base de dados	Nº de artigos encontrados
<b>Etapa 4</b>	purificação de biogás; biometano; métodos de purificação de biogás. <i>biogas purification;</i> <i>biomethane;</i> <i>methods of biogas purification.</i>	ISI Web of Science	3
		Science Direct	27
		Scielo	1
		Scopus	10

Fonte: Autoria própria

Utilizou-se do *software* EndNote para a manipulação, remoção dos artigos duplicados e dos artigos que não apresentavam textos completos. Após a leitura de todos os títulos e resumos, partiu-se para a leitura integral dos artigos a fim de confirmar o alinhamento com o tema da pesquisa em questão.

Também foram consultados trabalhos no Banco de Teses e Dissertações da Capes, programas nacionais e regionais de fomento ao uso de biogás/biometano, legislação e aspectos regulatórios. O Quadro 2 apresenta os principais autores utilizados para cada etapa da pesquisa.

**Quadro 2 – Principais referências na construção do Portfólio Bibliográfico**

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS	
<b>Etapa 1</b>	Lora; Andrade (2009); FNR (2013); Raboni et al.(2013); ABIOGAS (2015); Bley Jr. (2015); EBA (2015); ANEEL (2016); ANP (2016); EBA (2016); Hijazi et al. (2016); MME (2016); Veiga (2016).
<b>Etapa 2</b>	Kunz; Oliveira (2006); ANEEL (2008); Galinkin et al (2009); FNR (2013); EPE (2014); Bley Jr. (2015); FEAM (2015); Coluna (2016).

(Continua...)

(Continuação)

<b>Etapa 3</b>	Oliveira (1993); Santos (2000); Gaspar (2003); Oliveira (2004); Coldebella et al (2006); Rodrigues (2006); ANEEL (2008); Galinkin et al (2009); Bonfante (2010); Cervi et al (2010); Colatto; Langer (2011); Flesch et al (2011); Martelli (2011) ; Oliveira et al (2011); Oliveira (2012); FNR (2013); Okello et al (2013); Ribeiro; Raiher (2013); Santos; Nardi Jr. (2013); Cheng et al (2014); Haasjes (2014); Karlsson (2014); Weber et al(2014); Bley Jr. (2015); FEAM (2015); Machado (2015); Nogueira et al (2015); Sovacool et al (2015); Machado (2016); Zhang et al (2016)
<b>Etapa 4</b>	Khapre et al. (2005); Hullu et al (2008); Mann et al. (2009); Petersson Wellinger (2009); Makaruk et al. (2010); Souza (2010); Kao et al. (2012); Chmielewski et al. (2013); FNR (2013); Miyawaki (2014); Salazar (2014); Bley Jr. (2015); Liu et al. (2015); Reinheimer (2015); Budzianowski; Brodacka (2016); CIBiogás Energias Renováveis (2016); Veiga (2016).

**Fonte: Autoria própria**

Os trabalhos selecionados corresponderam aqueles que contribuíram com a caracterização de cada fase do processo de geração de biometano a partir do biogás extraído de resíduos agroindustriais. No final de cada fase descrita, foi realizada a construção da abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.

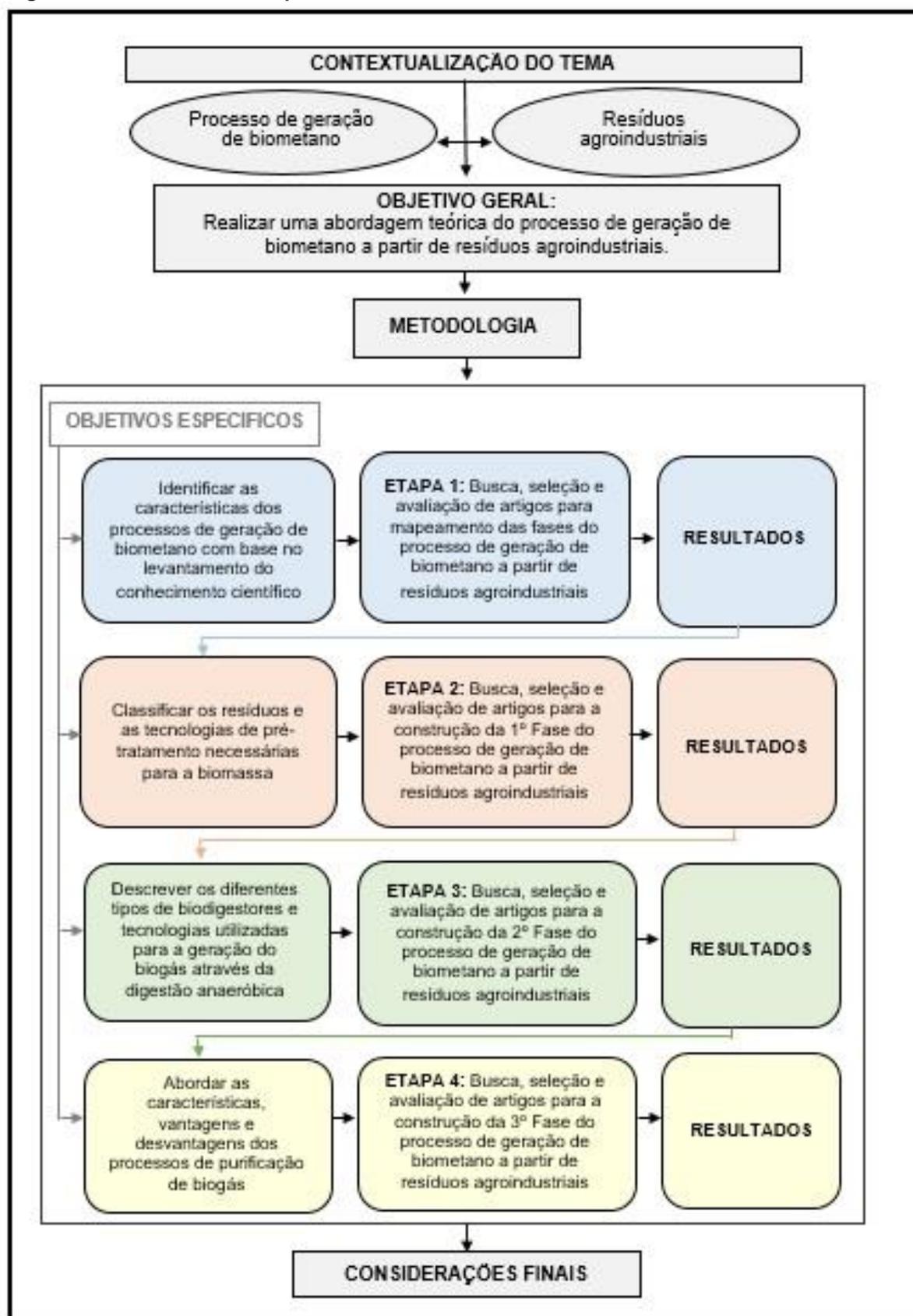
#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos. O primeiro capítulo apresentou a contextualização do tema, trazendo o tema da pesquisa, os objetivos, a justificativa do estudo e a metodologia do trabalho.

O capítulo dois abordou o uso do biometano em um contexto internacional e brasileiro. O terceiro capítulo apresentou a descrição de cada fase do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais, e como resultado, no final de cada fase, foi apresentada a abordagem teórica do processo. Por fim, o capítulo quatro apresenta as considerações finais do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Com o intuito de fornecer uma visão geral do desenvolvimento deste estudo, a Figura 2 ilustra um fluxograma dos passos delineados nesta dissertação.

Figura 2 – Estrutura da Pesquisa

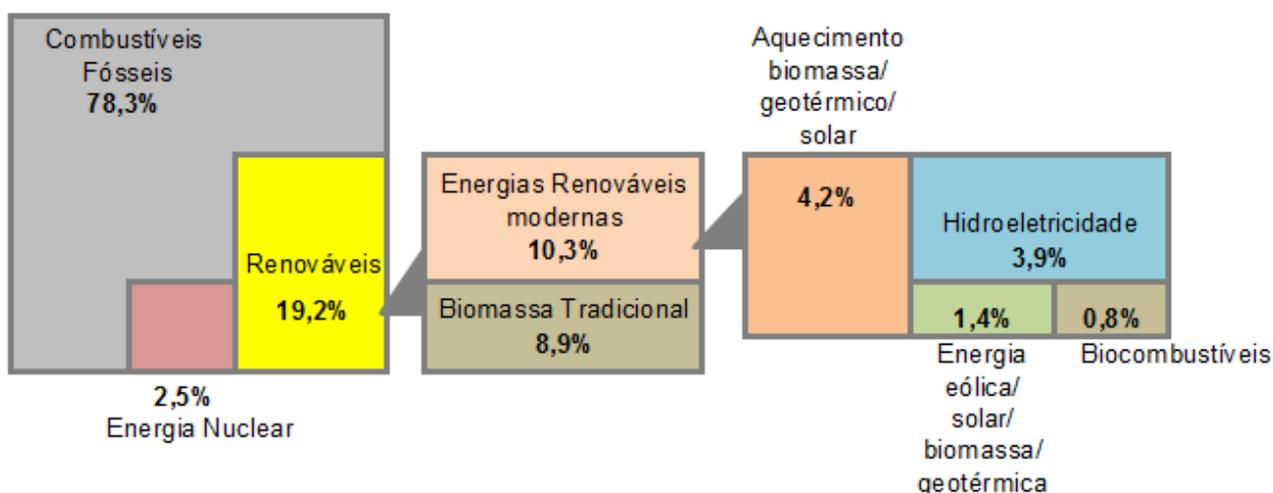


Fonte: Autoria Própria

## 2 CONTEXTO INTERNACIONAL E NACIONAL PARA O USO DO BIOMETANO

Um dos maiores desafios enfrentados pelas nações é a busca por fontes renováveis limpas e baratas, alternativas sustentáveis que trazem benefícios ambientais, por serem menos poluentes e econômicas, uma vez que diminuem a dependência dos combustíveis fósseis. A intensificação do desenvolvimento e uso de fontes alternativas de energia promoveram uma alteração na matriz energética mundial, passando a contemplar de maneira mais significativa as fontes renováveis. A Figura 3 mostra a proporção de energia renovável no consumo final mundial.

**Figura 3 - Proporção de energia renovável no consumo final mundial em 2014**



Fonte: adaptado de REN21 (2016)

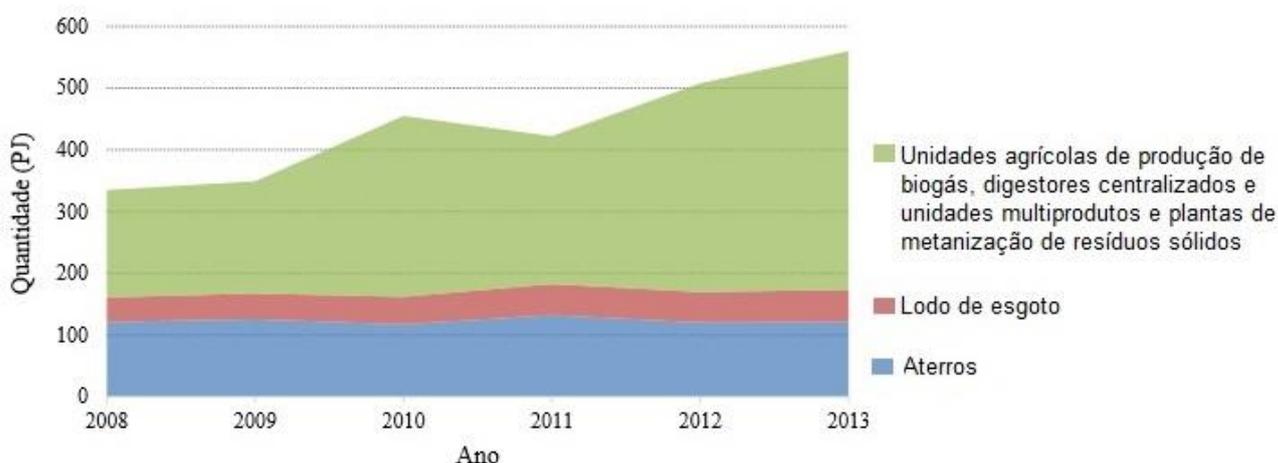
As fontes renováveis em 2014, correspondiam em 19,2% do consumo final de energia mundial, dos quais os biocombustíveis, representaram apenas 0,8% (figura 3). O principal uso final do biogás na Europa, é a produção de eletricidade em sistemas de cogeração ou não-cogeração, seguido do aquecimento distrital e autoprodução de calor utilizado em processos produtivos (VEIGA, 2016).

Os países do Norte da Europa, Suíça e na Suécia, em particular, são os que mais se preocupam com o uso do biometano para o transporte. Na Suécia, todos os novos biodigestores são alimentados por matrizes orgânicas, e equipados com sistemas capazes de transformar o biogás em biometano. Nesses países várias frotas de veículos para o transporte público são abastecidos por biometano ou gás natural (RABONI et al., 2013).

Em muitas cidades suecas, a utilização do biometano para o transporte é favorecida por diferentes formas de incentivos, por exemplo, estacionamento gratuito, redução ou isenção de impostos na compra de biometano, faixas exclusivas para os táxis com biometano e o apoio financeiro para a aquisição de veículos alimentados com biometano (RABONI et al., 2013).

De acordo com Hijazi et al. (2016) a Europa possui unidades de biogás de alto padrão técnico, e a maioria dos sistemas são constituídos como principal insumo, substratos de biomassa agrícola ou animal, combinados com resíduos da indústria e resíduos municipais (Figura 4).

**Figura 4 - Substratos utilizados para a produção de biogás na União Européia, 2008 - 2013**



Fonte: adaptado de Veiga (2016)

Em 2013 o biometano foi produzido em 14 países Europeus e em mais de 230 plantas de biometanização com uma capacidade total de 0,8 bilhões de metros cúbicos por ano (EBA, 2013).

Em 2014, com o desenvolvimento da indústria do biometano, foi registrado 367 plantas de biometanização, um aumento de 23% comparado com o ano de 2013. As 367 instalações de digestão anaeróbica de biometano na Europa têm uma capacidade total para produzir 310.000 metros cúbicos de biogás por hora. A Alemanha lidera a taxa de crescimento com 178 plantas, seguida pela Suécia com 59 e Reino Unido com 37. A Suécia é considerada o principal impulsor na produção de biometano na Europa, pois gasta 78% de sua produção de 1.303 gigawatts-hora (GWh) para alimentar cerca de 50.000 veículos (EBA, 2015; MME, 2016).

O Brasil tem muito para se destacar no cenário de produção de biogás e biometano, pois possui um enorme potencial de efluentes e resíduos. As condições tropicais e subtropicais brasileiras conferem à produção do biogás e do biometano vantagens comparativas em relação às que ocorrem em países frios, nos quais hoje, detém conhecimento e tecnologias de referências mundiais. O Brasil é primeiro mundo em termos de clima e biodiversidade, mas toda esta vantagem não é aproveitada (ABIOGÁS, 2015).

Segundo Bley Jr. (2015), o biogás e o biometano começa a ganhar visibilidade no Brasil, pois tem saído das sombras provocadas pelos erros do passado, especialmente em três momentos em que ele foi utilizado como fonte energética, apresentados a seguir, no Quadro 3.

**Quadro 3 - O Biogás de 1ª Geração no Brasil**

<b>O BIOGÁS DE 1º GERAÇÃO</b>	<p><u>Nos anos de 1970</u> houve a introdução de novas tecnologias para a produção de alimentos, com base na genética vegetal e animal direcionada para o confinamento de animais em escalas crescentes de produção. O uso da biodigestão ganhou força ao acompanhar a introdução da suinocultura. Mas a falta de cuidado com a biomassa, o emprego de materiais inadequados na construção de biodigestores e o uso do biogás bruto para geração de energias, foram erros importantes para que os produtores e investidores em biodigestores os abandonassem.</p>
	<p><u>Nos anos de 1980</u> tendo a produção de alimentos ficado sem alternativa para tratamento de dejetos dado ao fracasso dos biodigestores, e com o avanço da legislação ambiental no Brasil, os produtores adotaram controles industriais de poluição hídrica, que se constituíam de sistemas de tratamento de dejetos em lagoas de estabilização da matéria orgânica. Nem sempre eficientes para efluentes com altas cargas orgânicas como os dejetos dos animais estabulados, ou sangue, vísceras e penas dos efluentes agroindustriais.</p>
	<p><u>Nos anos de 1990</u> a questão ambiental ganhou grande impulso com a realização da Conferência Rio-92, que tentou estabelecer o pacto global para a redução de emissões de gases de efeito estufa, mas a queima do biogás não garantiu a sustentabilidade dos seus processos.</p>

Fonte: adaptado de Bley Jr. (2015)

O biogás apareceu e desapareceu em cada um desses cenários e praticamente 40 anos foram perdidos desde a sua primeira tentativa de uso nos anos 1970. Nenhuma das políticas públicas focou suas características econômicas como

fonte renovável de energia, mas puxavam os interesses para poluição hídrica ou a poluição atmosférica, desaparecendo com o biogás (BLEY JR., 2015).

Apesar de várias tentativas empreendedoras, a não tropicalização de tecnologias e a falta de padrões de qualidade no mercado são exemplos de barreiras para que não fosse possível a construção de um caminho de sucesso para o biogás e o biometano no Brasil (ABIOGÁS, 2015). Para Bley Jr. (2015) o setor produtivo brasileiro consolida lentamente e progressivamente o reconhecimento de características físicas, químicas e biológicas do biogás. O Biogás de 2º Geração começa a ser de passivo ambiental para ativo energético.

## 2.1 POLÍTICAS DE INCENTIVO AO USO DO BIOMETANO

A Europa foi fortemente impulsionada a implantar usinas de biogás, por dois fatores, segurança energética e mudanças climáticas. Principalmente a Alemanha no cumprimento das metas para redução de emissões de GEE, teve um grande avanço para ser o principal produtor mundial de biogás (VEIGA, 2016). O Quadro 4 destaca alguns marcos regulatórios e políticas de incentivo ao uso de biometano na Alemanha.

**Quadro 4 - Marcos Regulatórios e Políticas de incentivo do biometano na Alemanha**

ANO	MARCO REGULATÓRIO / POLÍTICAS DE INCENTIVO	DESCRIÇÃO
2000	Ato das Fontes Renováveis de Energia (do inglês, <i>Renewable Energy Sources Act</i> /EGG - do alemão, <i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i> )	Define as tarifas <i>feed-in</i> para a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. A lei beneficia indiretamente pois estabelece valores adicionais sobre a tarifa paga aos produtores de eletricidade e calor que utilizem biometano obtido da rede de distribuição de gás.
2001	Decreto da Biomassa (do inglês, <i>Biomass Ordinance</i> )	Regula a aplicação da Lei das Fontes Renováveis de Energia, fornecendo a definição de biomassa, tecnologias elegíveis e critérios ambientais que devem ser observados na produção de energia renovável que utilizem biomassa. Esta norma aceita o uso de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica, mas não permite que os benefícios decorrentes da aplicação do EGG sejam auferidos quando produzido a partir de resíduos sólidos domésticos.

(Continua...)

(Continuação)

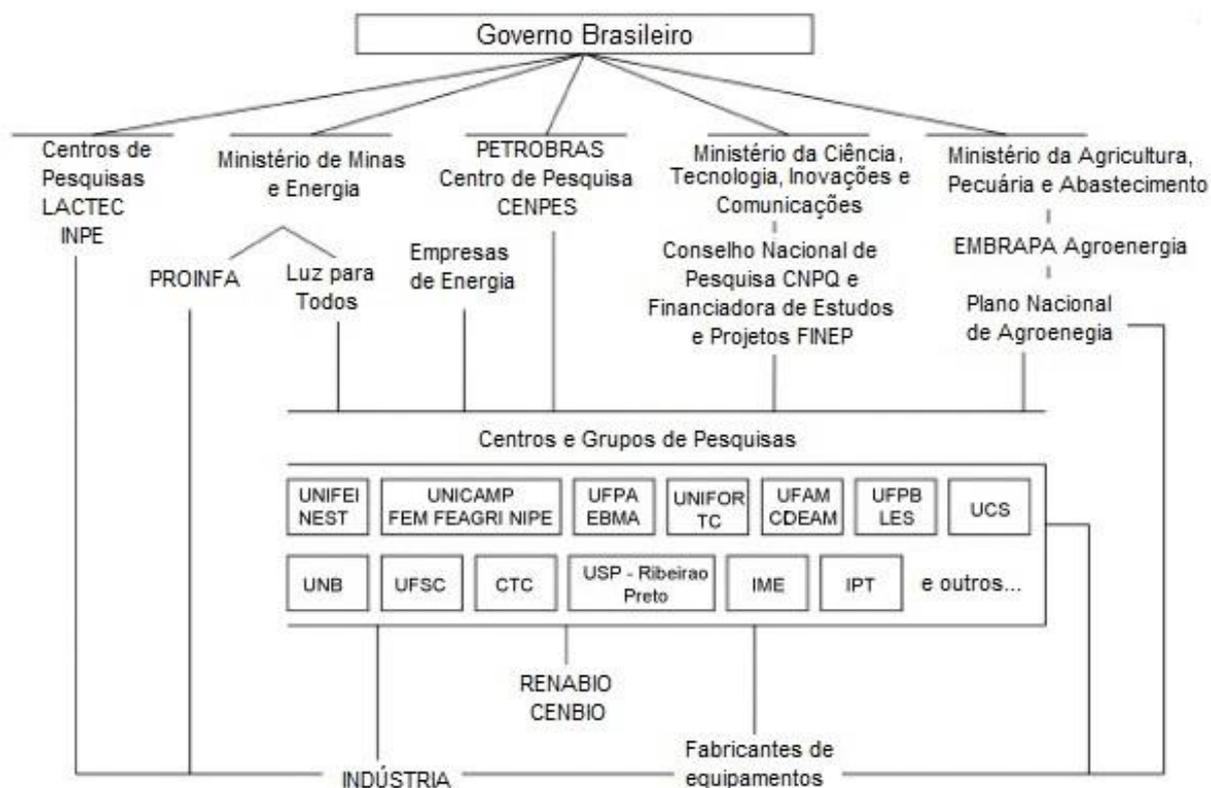
ANO	MARCO REGULATÓRIO / POLÍTICAS DE INCENTIVO	DESCRIÇÃO
2001	Decreto da Biomassa (do inglês, <i>Biomass Ordinance</i> )	Regula a aplicação da Lei das Fontes Renováveis de Energia, fornecendo a definição de biomassa, tecnologias elegíveis e critérios ambientais que devem ser observados na produção de energia renovável que utilizem biomassa. Esta norma aceita o uso de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica, mas não permite que os benefícios decorrentes da aplicação do EGG sejam auferidos quando produzido a partir de resíduos sólidos domésticos.
2009 (revisada em 2011)	Lei do Calor obtido de Fontes Renováveis (do inglês, <i>Renewable Energies Heat Act</i> )	Estabelece que 14% da demanda de calor alemã deve ser fornecida por fontes renováveis. De acordo com esta lei, os edifícios construídos a partir de janeiro de 2009, são obrigados a utilizar fontes renováveis de calor para suprir sua demanda de aquecimento. Este requisito é atingido quando 30% da demanda for suprida por biogás.
Revisado em 2010	Decreto de acessos aos gasodutos (do inglês, <i>Gas Network Access Ordinance</i> )	Considera acesso preferencial aos fornecedores de biometano, que arcam apenas com 25% dos custos de conexão (para distâncias menos que 10 km, contemplando a tubulação, estação de medição de pressão, compressor e estação de medição). Os outros 75% dos custos de conexão ficam a cargo dos operadores do gasoduto, que devem garantir uma disponibilidade de no mínimo 96% da rede e preferência no transporte do biometano.
2010	Decreto sobre a geração de biocombustíveis a partir de biomassa (do inglês, <i>Ordinance on the Generation of Biofuels from Biomass</i> )	Elaborada em consonância com as diretivas da União Européia relacionadas à adequação ambiental da biomassa utilizada para a geração de energia, o decreto estabelece que apenas projetos que utilizem biomassa não oriundas de áreas protegidas e cujo uso incorra em uma redução de emissões de GEE maior em comparação ao uso de combustíveis fósseis são elegíveis a receberem subsídios financeiros e podem ser contabilizados nas quotas de biocombustíveis.

Fonte: adaptado de Veiga (2016)

A redução em pelo menos 20% nas emissões de GEE, o aumento no uso de fontes alternativas de energia em 20% e redução de 20% no consumo de energia através da adoção de medidas de eficiência energética, são objetivos a serem alcançados até 2020, como mais uma forma de incentivo ao uso de fontes alternativas de energia, promovido pelo Parlamento Europeu, sob a diretiva de Energias Renováveis - o Pacote de Energia e Mudanças Climáticas (FNR, 2013).

No Brasil, uma quantidade considerável de recursos estão sendo utilizados para financiar projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias de energias de biomassa, a Figura 5 resume em um diagrama como essas pesquisas estão organizadas.

**Figura 5 - Diagrama das ligações das Organizações de financiamento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em tecnologias de energia de biomassa**



Fonte: adaptado de Lora, Andrade (2009)

Além das organizações que coordenam esforços com os grupos de pesquisas, como o CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa e RENABIO - Rede Nacional de Biomassa para Energia, têm se destacado também em termos de pesquisa, desenvolvimento e tecnologias, o programa Biogásfert da EMBRAPA, o projeto Probiogás coordenado pelo Ministérios das Cidades em cooperação com a agência alemã de cooperação internacional - GIZ, e a Itaipu Binacional com o Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás, CIBiogás. Além de mais de noventa grupos de pesquisa relacionados ao tema cadastrado nas bases do CNPQ (LORA; ANDRADE, 2009; ABIOGÁS, 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, vêm estabelecendo regulamentações específicas para a promoção da utilização do biogás como recurso

para a geração de eletricidade. E com relação ao uso do biogás como biocombustível passível de ser injetado em rede de distribuição de gás natural e uso como combustível veicular, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, elaborou a resolução que trata das especificações do biometano (VEIGA, 2016). O Quadro 5 apresenta algumas normas estabelecidas em favor da utilização do biogás e biometano.

**Quadro 5 - Normas estabelecidas em favor da utilização do biogás e biometano**

NORMAS	CONTEÚDO
ANEEL - Resolução Normativa nº 77, de 18 de Agosto de 2004. Alterada pela Resolução Normativa nº 271, de 03 de Julho de 2007.	Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000 kW.
ANP - Resolução nº 16, de 17.6.2008 – DOU 18.06.2008	Estabelece a especificação do gás natural, nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional.
ANEEL - Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
ANP - Resolução nº 41, de 05.11.2013 - DOU 06.11.2013.	Estabelece os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de revenda varejista de combustíveis automotivos e a sua regulamentação.
ANEEL - Resolução Homologatória nº 1807, de 01 de Outubro de 2014.	Aprova o Edital do Leilão ANEEL 008 de 2014 e seus Anexos, denominado LER de 2014 ou 6º LER, o qual se destina à contratação de energia de reserva proveniente de empreendimentos de geração a partir de fontes solar fotovoltaica, eólica e biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto, para início de suprimento em 01.10.2017, e estabelece as TUST e as TUSDg de referência para as centrais geradoras que participarem do aludido certame.
ANP - Resolução nº 8, de 30.1.2015 - DOU 2.2.2015	Estabelece as especificações do Biometano.
MME - Portaria nº 14, de 8 de janeiro de 2016	Aprova conforme definido no Anexo à presente Portaria, as Diretrizes da Sistemática a serem aplicadas na realização do Leilão de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração, denominado Leilão “A-5”, de 2016, previsto na Portaria MME no 382, de 12 de agosto de 2015. § 2º Para efeito do disposto no caput, a ANEEL deverá publicar como adendo ao Edital do Leilão “A-5”, de 2016, o Detalhamento da Sistemática prevendo:...1- um produto de disponibilidade termoelétrica a biomassa e carvão com início de suprimento em 1º de janeiro de 2021 e término de suprimento em 31 de dezembro de 2045;

Fonte: a autora a partir de ANEEL (2016), ANP (2016) e MME (2016)

Com a recente regulamentação da ANEEL, o biogás torna-se cada vez mais viável sobre geração distribuída, possibilitando, nos próximos anos, integrar e conectar ao sistema uma constelação de micro e pequenos geradores (BLEY JR., 2015).

A Regulamentação da ANP, possibilita o biometano produzido a partir de produtos e resíduos agroindustriais, ser tratado de maneira análoga ao gás natural (GN), podendo ter a mesma valoração econômica do GN desde que atenda às exigências de qualidade do produto estabelecidas pela mesma (ANP, 2015).

O aproveitamento de outras fontes renováveis, como o biogás e o biometano, contribui para a inserção de novos negócios, proporcionando o aprimoramento de perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais. Nas produções industriais, as matérias-primas passam por um ou mais processos de transformação com diversos objetivos. Seus resíduos orgânicos também podem gerar produtos se passarem por processos de biodigestão (BLEY JR., 2015).

A biodigestão, também chamada de biometanização ou digestão anaeróbia, é um processo com ampla aplicabilidade para a conversão de resíduos e efluentes orgânicos em biogás, biometano e biofertilizante, associando o tratamento adequado à geração de energia renovável. A implantação de uma usina de biometano pode-se configurar com uma alternativa que fecha o ciclo de produção e consumo, promovendo um retorno dos resíduos e efluentes orgânicos à cadeia produtiva, incrementando significativamente a sustentabilidade dos processos industriais (FEAM, 2015).

O processo de geração de biometano é composto por várias fases, as quais serão apresentadas detalhadamente no próximo capítulo, resultando na construção da abordagem teórica do processo como um todo.

### 3 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOMETANO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nesta dissertação. O capítulo 3 objetiva relatar o conhecimento pesquisado referente as fases de um processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. No final de cada fase descrita, foi realizada a construção da abordagem teórica.

#### 3.1 GERENCIAMENTO DO SUBSTRATO

O substrato pode ser classificado como qualquer matéria orgânica passível de ser transformado em energia elétrica, mecânica ou térmica. As fontes de biomassa podem ser de resíduos agrícolas, pecuários, florestais e também de rejeitos urbanos e industriais, e o potencial energético varia de acordo com a matéria-prima e da tecnologia de processamento utilizada (ANEEL, 2008).

Com o advento das mudanças climáticas, os riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos, os resíduos agroindustriais passaram a ter maior apelo, pois além de serem renováveis, provenientes de biomassa cultivada, uma vez que os animais consomem os vegetais produzidos continuamente, seu aproveitamento evita a decomposição dos dejetos, que provocaria a emissão de metano para a atmosfera e de chorume para o solo, assim como, substitui os combustíveis fósseis que seriam utilizados para gerar aquela mesma quantidade de energia (EPE, 2014).

Nas produções industriais as matérias-primas passam por um ou mais processos de transformação com diversos objetivos. Já os seus resíduos orgânicos se submetidos a processos de biodigestão podem gerar dois produtos: um líquido, chamado de digestato, efluente do processo, e outro gasoso, o biogás (GALINKIN et al., 2009)

##### 3.1.1 Resíduos Agroindustriais

Os resíduos agroindustriais compõem o que Galinkin et al. (2009) classificam como biomassa residual, que são os restos de vegetais inaproveitáveis para consumo ou plantio, como grãos, sementes, palhas, etc. e os efluentes sólidos e líquidos da produção pecuária, que possam ser biodegradados, como dejetos, esterco, etc.

A produtividade de biogás pode variar em relação a tipologia de resíduo/efluente, que difere em função do conteúdo de material biodegradável presente nos substratos. No Quadro 6 são listadas algumas atividades produtivas agroindustriais, com elevado potencial de utilização de sistemas de biometanização para a produção de biogás.

**Quadro 6 - Resíduos e efluentes gerados nas atividades agroindustriais**

ATIVIDADE PRODUTIVA	RESÍDUO/EFLUENTE
Produção de Carne e Açougues	Efluentes, sangue, intestinos, carne não comercializável e gordura
Produção de Laticínios	Soro de leite, lotes estragados e resíduos dos separadores de gordura
Produção de Amidos e Farinhas de cereais, mandioca, batatas	Efluentes e restos da produção
Agricultura e Pecuária	Cascas, fezes, urina, palha e outros substratos utilizados no recobrimento de currais

Fonte: adaptado de FEAM (2015)

O correto manejo e tratamento dos resíduos agroindustriais devem ser considerados parte do processo produtivo, e devem ser observados os critérios técnicos das tecnologias necessárias e nível de tratamento desejável (COLUNA, 2016).

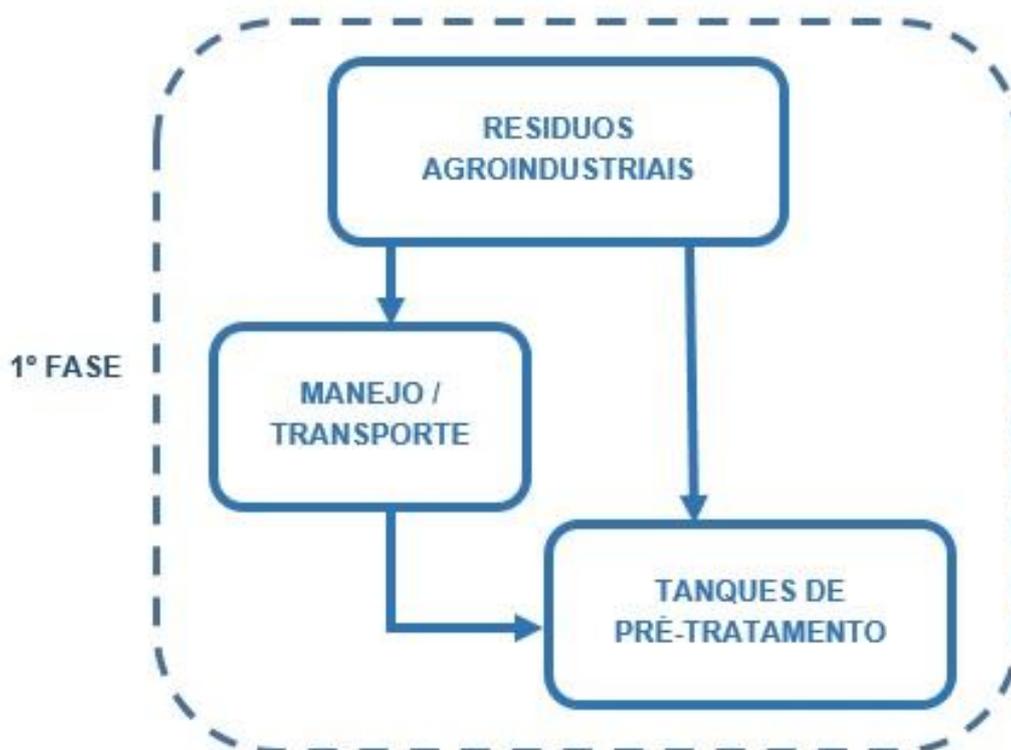
No modelo europeu, grupos de produtores transportam dejetos animais em caminhões ou tratores até um biodigestor. Depois de tratados no biodigestor, voltam para as propriedades também movidos a diesel, na forma de digestato, para ser aplicado aos solos, resultando em uma logística duplamente negativa (BLEY JR., 2015).

No Brasil, com relação aos resíduos gerados a partir da criação de animais, com as transformações dos sistemas de produção, passando de um sistema de criação extensivo para um modelo intensivo de confinamento, o fato dos animais permanecerem a maior parte do tempo nos currais facilita a coleta e destinação dos dejetos para a produção de biogás (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

Os substratos das atividades agroindustriais podem ser bombeados diretamente do processo produtivo para um biodigestor, dispensando local de armazenamento e transporte (FEAM, 2015), ou então, podem ser encaminhados para um tanque de armazenamento, cuja finalidade seja para facilitar a alimentação do biodigestor de acordo com as demandas do processo.

O tanque preliminar pode existir também com o propósito de preparação dos substratos ou homogeneização, como trituração e diluição. Dependendo do tipo de substrato, pode ser necessário separar materiais estranhos, fragmentar ou misturar com água para tornar bombeável (FNR, 2013). A Figura 6 resume a primeira fase do processo de geração de biometano.

**Figura 6 – 1º Fase do processo de geração de biometano**



**Fonte: a autora a partir de FEAM (2015)**

A quantidade de substrato também determina o dimensionamento de todos os equipamentos e volumes de reservatórios, e a qualidade dos substratos determina qual tecnologia deve ser adotada (FNR, 2013). Após o pré-tratamento os substratos são submetidos a digestão anaeróbia em estrutura chamadas de biodigestores.

### 3.1.2 Conclusões da 1ª Fase do processo de geração de biometano

Essa primeira fase começa com a delimitação do tipo e da quantidade de resíduos agroindustriais que serão utilizados no processo para geração de biometano. É muito importante já nessa fase controlar todos os resíduos que serão aproveitados no processo, pois a falta de controle pode gerar problemas na quantidade e qualidade do biometano gerado nas próximas etapas.

O manuseio desses resíduos pode ser simplificado por instalações que bombeiam os resíduos agroindustriais direto para o biodigestor ou então para tanques de armazenamento ou de pré-tratamento. Na falta de tubulações e dependendo da consistência dos substratos, pode ser necessário o transporte por equipamentos mecânicos.

No tanque de pré-tratamento pode ocorrer processos como triagem, trituração e diluição. A fragmentação para tornar o tamanho dos substratos sólidos apropriado, e a homogeneização, para a dispersão dos nutrientes de maneira uniforme. Depois da homogeneização, o substrato está pronto para ser introduzido no biodigestor.

## 3.2 BIODIGESTORES

Os biodigestores são as estruturas projetadas para produzir a degradação da biomassa residual, proporcionando condições para que alguns tipos de bactérias provoquem uma degradação mais acelerada na matéria. Os biodigestores recebem efluentes líquidos criando um ambiente sem oxigênio ajudando na liberação de gases, gerados pela ação de micro-organismos sobre o substrato, resultando no biogás. Todo esse processo acontece sem que haja qualquer tipo de contato com o ar atmosférico (COLATTO; LANGER, 2011).

A escolha do equipamento técnico a ser utilizado na usina depende principalmente do substrato disponível. A qualidade dos substratos (teor de matéria seca, estrutura, origem, etc.) determina qual tecnologia será adotada no projeto. Para diferentes técnicas de geração de biogás, são classificados alguns critérios conforme Quadro 7.

**Quadro 7 - Técnicas de geração do biogás**

CRITÉRIO	TIPO
Teor de matérias dos substratos	- digestão úmida - digestão seca
Tipos de alimentação	- descontínua - semicontínua - contínua
Nº de fases do processo	- uma fase - duas fases
Temperatura do processo	- psicrófilico (abaixo dos 25°C) - mesófilico (em torno de 37° a 42° C) - termófilico (entre 50° e 60° C)

**Fonte: FNR (2013)**

Com relação a consistência dos substratos (quadro 7), a digestão úmida é realizada com substratos bombeáveis e a digestão seca com uso de substratos empilháveis. O tempo de retenção hidráulica necessário à estabilização completa do biodigestor e a temperatura é outro critério muito importante, pois afetam diretamente as velocidades das reações bioquímicas. Cada micro-organismo envolvido no processo apresenta diferentes faixas de temperatura ideal ao seu desenvolvimento e variações muito bruscas podem ocasionar a inibição parcial ou total do processo (FNR, 2013).

Nos meses de inverno, pode haver a necessidade de aquecer o substrato e manter constante a temperatura dentro do biodigestor para obter um melhor rendimento de geração de biogás. A agitação também facilita o contato entre o substrato, os microrganismos e os nutrientes, fornecendo temperatura uniforme ao longo do processo, além de evitar a formação de camadas de sedimentos próximas à borda do biodigestor (KARLSSON, 2014).

Com relação aos critérios de alimentação (quadro 7), um tipo de biodigestor que possui um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional é o biodigestor descontínuo, no qual, é abastecido com os substratos de uma só vez, e, é mantido fechado por um período conveniente para fermentar a matéria orgânica e na sequência ser descarregada. Dependendo da demanda de biogás, da disponibilidade

e da qualidade da matéria prima utilizada, o processo pode ser em um ou mais tanques anaeróbicos (OLIVEIRA, 2012).

Outro tipo, é o biodigestor contínuo, bastante utilizados em comunidades rurais de pequeno e médio porte. São biodigestores que necessitam de carregamento periódico, geralmente diário, para o uso de diversos resíduos orgânicos, de animais e vegetais (OLIVEIRA, 2012).

### 3.2.1 Biodigestor: Modelo Chinês e Indiano

Os biodigestores mais difundidos correspondem aos criados por chineses e indianos. Estes dois modelos basicamente são compostos por duas partes, a primeira por um tanque para abrigar e conduzir a digestão da biomassa, e o segundo, por um gasômetro (campânula) para armazenar o gás (MARTELLI, 2011). A Figura 7 é um exemplo de biodigestor modelo Chinês.

**Figura 7 – Biodigestor modelo Chinês**



**Fonte: Martelli (2011)**

O biodigestor modelo Chinês funciona com abastecimento periódico e esvaziamento não-periódico, construído exclusivamente de alvenaria, por ser feito dentro da terra, isola naturalmente a temperatura, mantendo-a constante, a parte

superior deve ser protegida com materiais impermeáveis e não-porosos (GASPAR, 2003).

A China, em busca de fertilizantes para produzir alimentos para a população, desenvolveu um tipo de biodigestor mais simples e econômico. Enquanto a Índia, procurando suprir do déficit energético do país, desenvolveu um tipo de biodigestor mais sofisticado para uma melhor eficiência na geração do biogás (CODEBELLA et al., 2006). A Figura 8 é um exemplo de biodigestor modelo indiano.

**Figura 8 – Biodigestor modelo Indiano**



**Fonte: Martelli (2011)**

O biodigestor modelo indiano tem abastecimento e esvaziamento periódicos, é mais difícil o isolamento por isso tem perdas de calor pela câmara de gás metálica, não sendo muito indicado para regiões de climas mais frios, geralmente é mais caro por depender do custo da campânula (GASPAR, 2003).

### 3.2.2 Biodigestor de tecnologia Alemã

A Alemanha investiu fortemente no desenvolvimento de biotecnologia para o setor de biodigestão anaeróbica, e hoje dispõem de tecnologia avançada para a construção de sistemas eficientes. Com projetos altamente eficientes, o investimento inicial também é alto, e este fato inspira criadores a tentar desenvolver projetos mais baratos (MACHADO, 2016). A Figura 9 apresenta um biodigestor de tecnologia alemã.

**Figura 9 – Biodigestor de tecnologia Alemã**



**Fonte: Machado (2015)**

O biodigestor de tecnologia Alemã é construído acima do solo, no formato redondo. O biodigestor possui um processo altamente controlável e estável, sendo equipado com agitadores que fornecem uma boa mistura e produção contínua de gás. Possui também isolamento térmico e aquecimento para uma digestão rápida (HAASJES, 2014).

### 3.2.3 Biodigestor: Modelo Canadense ou Lagoa Otimizadas

Outro modelo igualmente utilizado que também ganhou espaço é o Canadense (Figura 10), modelo este construído de forma horizontal, ao contrário dos modelos Chinês e Indiano que são verticais (BONFANTE, 2010; MARTELLI, 2011).

**Figura 10 – Biodigestor modelo Canadense**



**Fonte: Martelli (2011)**

Os modelos canadenses possuem uma câmara de digestão unida a um gasômetro e são de largura e dimensões maiores que a profundidade, recebendo assim, maiores incidências de raios solares, favorecendo a degradação da matéria orgânica e o processo de geração do biogás (BONFANTE, 2010; MARTELLI, 2011).

Uma versão muito utilizada no Brasil são as lagoas otimizadas (Figura 11), que consistem em escavações no solo, de forma horizontal, com cobertura e revestimento completo da base e das paredes por uma camada de geomembrana de policloreto de vinil (PVC) ou de polietileno de alta densidade (PEAD) (FEAM, 2015).

**Figura 11 – Lagoa Otimizada**



Fonte: FEAM (2015)

As lagoas otimizadas podem ser consideradas como uma versão tropicalizada dos biodigestores canadenses, utilizadas para o tratamento de efluentes da suinocultura (FEAM, 2015). No Brasil, as grandes extensões territoriais e o clima tropical possibilitam a biodigestão anaeróbica, com biodigestores ligados diretamente aos sistemas de produção de animais estabulados, e próximos às terras que recebem os digestatos (GALINKIN et al., 2009)

Uma série de novas abordagens sobre biodigestores foi criada e, atualmente, não é possível estimar o impacto de cada uma. O Quadro 8 relaciona as publicações que contribuíram, descrevendo os diferentes tipos, materiais e tecnologias dos biodigestores utilizados em diversos países.

Quadro 8 - Modelos de Biodigestores

AUTORES / PAÍS	DESCRIÇÃO DO BIODIGESTOR
FLESCHE, T. K. et al. (2011) Canadá	A utilização <i>Integrated Manure Utilization System</i> (IMUS) um biodigestor desenvolvido por Highmark Renewables Inc. e o Conselho de Pesquisa Alberta. Opera ao lado de um confinamento de gado de corte (capacidade de 36.000 cabeças) e usa digestão anaeróbia para a produção de biogás a partir de estrume de gado, bem como outras matérias-primas orgânicas. Formado por: tanques de digestores; funil de matéria-prima que entra na instalação de matéria-prima; tenda fertilizante em que os sólidos são separados a partir do digerido; lagoa de escoamento; alargamento do gás; anemômetro sônico leste da instalação; e refletor a laser do metano.
OLIVEIRA, S. V. W.B. et al. (2011) Brasil	Três biodigestores chamados "minibiodigestores", cuja construção é simples e rápida. Consiste em cavar uma trincheira com uma máquina de escavação de terra, onde reveste o fundo e os lados da trincheira com uma lona plástica para evitar a percolação do líquido no chão e cobrindo este "tanque" com outra lona, que infla quando o biogás é produzido. Após os dias de degradação, o resíduo dos biodigestores é transferido para uma vala aberta, também alinhada com a lona, ao lado dos biodigestores, onde o fertilizante organomineral é recolhido. Para reduzir o poder de corrosão do biogás, um purificador sob a forma de uma bobina é construído alguns metros de profundidade, por meio do qual o biogás passa. Além dos purificadores enterrados, existem mais dois filtros anteriores ao compressor.
OKELLO, C. et al. (2013) Uganda	O biodigestor usado é um projeto de cúpula-fixa que foi modificado a partir do projeto do chinês pelo Centro de Mecanização Agrícola e Tecnologia Rural (CAMARTEC) na Tanzânia. O design CAMARTEC biodigestor geralmente é construído abaixo da superfície. Os volumes de digestores variam de 8 m <sup>3</sup> para 16 m <sup>3</sup> .
RIBEIRO, M. F. S. e RAIHER, A. P. (2013) Brasil	A tecnologia de digestão anaeróbia começou com os modelos chineses e indianos. Atualmente são produzidos numa base comercial: o gasômetro em PVC; o digestor tubular; o reator anaeróbio e o reator anaeróbio de manta de lodo.
CHENG, S. et al. (2014) Bolívia, Cuba, Peru, Equador, Colômbia, América Central e México.	Uma estrutura tubular selada, constituído por um longo cilindro feito de cloreto de polivinilo (PVC), polietileno (PE), ou lama vermelha de plástico. No modelo de tubo PE low-cost ou saco digestor, ambas as extremidades de um filme PE tubular com duas camadas de 300 mm são dobrados em torno de um cano de PVC de 6 polegadas. Este filme é então enrolado com uma pulseira de borracha de pneus reciclados de tubos para produzir um sistema isolado hermético.
CHENG, S. et al. (2014) Índia	A forma do reservatório é tipicamente cilíndrico, e as plantas são pré-fabricadas com menos de 6 m <sup>3</sup> . O gasômetro de ferro-cimento de cúpula-fixa requer medidas especiais de vedação; a confiabilidade é comprovada por folha de alumínio e cimento. Khadi e Indústrias de Aldeia da Comissão na Índia tentaram inicialmente usar bambu na construção do digestor; no entanto, esta experiência falhou porque os bambus foram atacadas por ratos.

(Continua...)

(Continuação)

AUTORES / PAÍS	DESCRIÇÃO DO BIODIGESTOR
CHENG, S. et al. (2014) Índia	Um digestor que tem várias características de engenharia construídas para obter a máxima eficiência do processo em termos de redução de sólidos, alta taxa de carregamento, baixo tempo de retenção hidráulica e para evitar problemas operacionais. É um novo e compacto digestor de alta velocidade que pode ser pré-fabricado utilizando diferentes materiais de construção, tais como folha de metal, PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro), PEAD (polietileno de alta densidade), PP (polipropileno), ou CRF (concreto reforçado com fibras).
CHENG, S. et al. (2014) Índia	A unidade de biogás compacta ARTI é um biodigestor de cúpula flutuante feito de dois tanques de água PEAD, que são tipicamente de 0,75 m <sup>3</sup> e 1 m <sup>3</sup> de volume; as funções do tanque menor é a retenção de gás na parte superior e o tanque maior serve como o digestor na parte inferior. Este modelo ganhou o Prêmio Ashden 2006 para a Energia Sustentável na categoria Segurança Alimentar.
CHENG, S. et al. (2014) Suécia	Um digestor portátil foi construído a partir de tecidos fornecidos pelo FOV Tecidos AB, na Suécia. A forma do digestor se assemelha a uma pirâmide com um volume de trabalho de 100 L.
CHENG, S. et al. (2014) Malásia	Digestor típico portátil formado por: tubo de gás; selo; anel de vedação; flange; tubo conectando; cotovelo de 90°; portão-butterfly; placa-cego; anel de vedação; capa; escória.
CHENG, S. et al. (2014) África do Sul	Modelo de biodigestor utilizado é enterrado no chão como um tanque séptico. É mais adequado para aplicações rurais muitas vezes substituindo fossas sépticas, e em ambientes formais de esgoto onde a aplicação está abaixo do solo com a profundidade de entrada de esgoto de 330 mm.
SOVACOO, B. K. et al. (2015) Quênia	Os <i>flexi-biogas systems</i> (FBS), utilizam um balão (ou tubo), são digestores feitos de um polietileno PVC ou saco. O típico FBS inclui quatro partes principais: tubos de entrada e de saída de um saco de plástico, plástico reforçado como digestor, tubos de plástico para o transporte de biogás ou o armazenamento, e uma cobertura para estufa de plástico.

Fonte: Autoria própria

As implantações de biodigestores nas propriedades rurais e indústrias em geral, podem variar em função do tamanho de cada propriedade e também em função da quantidade de animais e a capacidade de geração de resíduos. Com a escolha da melhor alternativa para a empresa, o investimento em biodigestores pode representar medidas muito eficazes no combate à poluição de rios, solos, lençóis freáticos, pode contribuir para destinação correta dos resíduos, diminuir a emissão dos gases de efeito estufa, ganhar inserção no mercado de carbono, e cada vez mais, tornar-se uma alternativa viável para a produção de energia (SANTOS; NARDI JR., 2013).

### 3.2.4 Biogás

A utilização do biogás para a produção de energia não é uma novidade, é algo muito antigo e difundido mundialmente, há centenas de anos estudiosos pesquisam o grande potencial de gás gerado a partir de resíduos. O Quadro 9 resume a história do biogás no mundo.

**Quadro 9 - Biogás no mundo**

<b>BIOGÁS NO MUNDO</b>	
<b>10 a. C.</b>	Os primeiros relatos do biogás datam do século 10 a.C., da região da Assíria, quando o gás era usado para aquecer banhos.
<b>1200</b>	No século 13, o explorador Marco Polo conta que os chineses cobrem os tanques de esgoto, a fim de gerar energia, o que já era descrito na literatura do país oriental há muitos anos.
<b>1600</b>	Durante o século 17, o médico e químico belga Jan Baptista van Helmont prova que gases inflamáveis podem ser originados a partir de decomposição de matéria orgânica.
<b>1700</b>	Em 1776, o físico italiano Alessandro Volta conclui que existe uma relação direta entre a quantidade de material decomposto e a quantidade de gás inflamável produzido.
<b>1800</b>	1808: ano em que o químico inglês sir Humphry Davy anuncia que o metano está presente nos gases obtidos a partir da digestão anaeróbica do esterco bovino.
	A partir do século 19, surge uma fase mais tecnológica do biogás. O primeiro equipamento biodigestor foi criado em Mumbai, Índia.
	Em 1884, o cientista francês Louis Pasteur introduz na Academia de Ciências a ideia de que um gás pode ser usado para fins de aquecimento e iluminação.
	O sistema chega à Inglaterra em 1895, quando o biogás é produzido a partir do tratamento de uma estação de esgoto e usado para abastecer lâmpadas de uma rua da cidade de Exeter.
<b>1900</b>	Na Dinamarca, em 1920, o gás resultante do tratamento de águas residuais é usado, inicialmente, para aquecer um tanque digestor.
	A evolução da microbiologia, principalmente na década de 1930, contribui para identificar e estudar as bactérias anaeróbicas e as condições que permitem a produção de metano.
	Em 1957 o inventor britânico Harold Bates consegue converter esterco de galinha em combustível gasoso. O processo é descrito no documentário Bate'sCar: Sweet as a Nut (1974), de Tony Lanzelo.
	O uso do biogás alcança destaque na Índia, em 1960, quando ganha força nas comunidades, que usam até hoje o combustível para cozinhar.
	A China segue o mesmo caminho e, nos anos 1980, instala inúmeros equipamentos em cidades.

(Continua...)

(Continuação.)

BIOGÁS NO MUNDO	
<b>1900</b>	Os programas orientais inspiram os europeus - principalmente os ingleses - a investir ainda mais a tecnologia na década de 1980. Uma das razões é a intensa oscilação do preço do petróleo. O mundo inteiro começa a procurar por novas alternativas.
<b>2000</b>	Cerca de 1.483 usinas utilizam resíduos para produção de energia. O Japão lidera o ranking com 800 usinas, seguido pela Europa (452), China (100) e Estados Unidos (86). Na América do Sul o destaque é o Brasil.

Fonte: adaptado de Bley Jr. (2015)

No Brasil, em 2002, foi instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

O Brasil ganha destaque na América do Sul, pois uma das maiores usinas de energia a partir de biogás do mundo se encontra no estado de São Paulo, a usina termelétrica UTE Aterro Bandeirantes. Em 2013, o Aterro Gramacho, na Baixada Fluminense, tornou-se o único fornecedor de biogás do mundo exclusivo para uma refinaria de petróleo. No mesmo ano, 22 aterros já utilizavam o biogás para abastecer os lares de 1,67 milhões de brasileiros, e no Parque Tecnológico Itaipu, é instalado o Centro Internacional de Energias Renováveis (BLEY JR., 2015).

Com relação a utilização de biogás a partir de resíduos agroindustriais, a Companhia Paranaense de Energia - Copel assinou em 2009 os primeiros contratos no setor elétrico brasileiro para aquisição de energia elétrica, e os quatro produtores, Sanepar, Cooperativa Lar, Granja Colombari e Star Milk atenderam a demanda, oferecendo energia elétrica totalizando uma potência de 524 kW (quilowatts), energia suficiente para atender centenas de moradias de padrão médio (GALINKIN et al., 2009).

### 3.2.5 Potencial de Geração do Biogás

O material orgânico contido no resíduo pode ser agrupado em três classes com características próprias na produção de metano (carboidratos 0,42 - 0,47 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg, proteínas 0,45 - 0,55 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg e lipídios acima de 1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg). Nos resíduos

rurais ou industriais o valor mais aceitável para a avaliação da potencialidade de produção de metano são os sólidos voláteis (SV) (OLIVEIRA, 2004).

A Tabela 1 apresenta alguns dos valores de m<sup>3</sup> de biogás, nos quais são os mais citados em pesquisas sobre a produção de biogás (COLDEBELLA et al. 2006; CERVI et al. 2010; RIBEIRO; RAIHER, 2013; WEBER et al. 2014; EMBRAPA, 2015).

**Tabela 1 - Potencial de geração de biogás a partir de diferentes resíduos orgânicos animais**

Referência	Animal (peso vivo)	m <sup>3</sup> biogás/kg SV	m <sup>3</sup> biogás/animal/dia
Oliveira (1993)	Bovino (500kg)	0,094 - 0,31	0,36
	Suíno (90kg)	0,37 - 0,50	0,24
	Aves (2,5 kg)	0,31 - 0,62	0,014
Santos (2000)	Bovino engorda entre 120kg a 520kg	0,28	0,292
	Porca reprodutora em ciclo fechado	0,45	0,86
	Galinha poedeira em baterias (2 kg)	0,46 - 0,77	0,010 - 0,017

Fonte: adaptado de Oliveira (1993), Santos (2000). SV: Sólidos voláteis

O potencial dos dejetos animais para produzir biogás mensurado de acordo com o biogás gerado por kg de sólidos voláteis (tabela 1), pode variar devido a diversos fatores que influenciam na degradação dos dejetos pelas bactérias, como por exemplo, temperatura, nível de pH, relação Carbono/Nitrogênio, presença ou não de oxigênio, quantidade de bactérias vezes o volume de biomassa, presença de substâncias tóxicas as bactérias e teor de água adequado (GASPAR, 2003).

O potencial de geração de biogás também está ligado a eficiência da tecnologia de biodigestão utilizada nos biodigestores (Quadro 8). O processamento de matéria orgânica em biodigestores se altera de acordo com os substratos utilizados, de acordo com os tipos de agitadores, como funciona a automação, o tamanho dos biodigestores, etc.

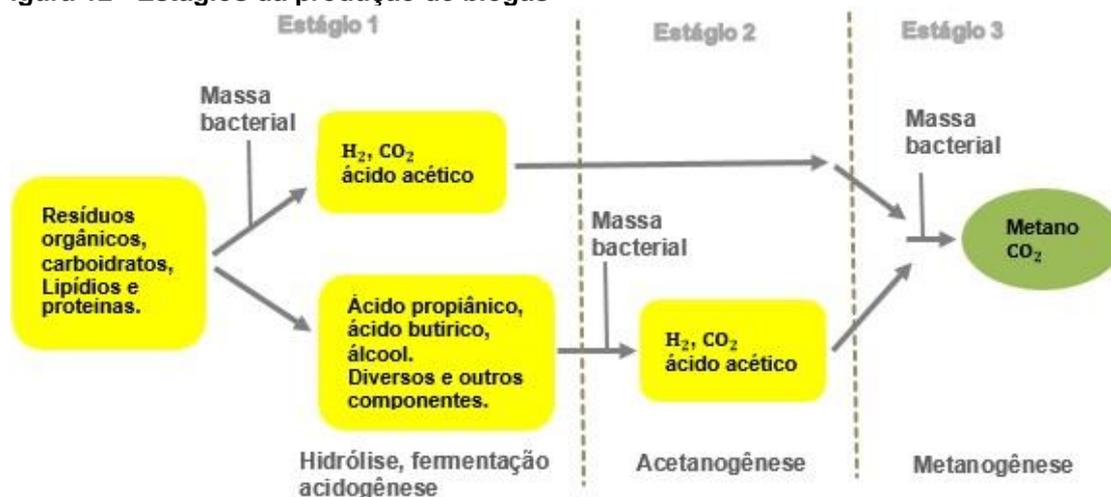
A combinação de vários tipos de resíduos pode influenciar na produtividade do biogás, e essa combinação é tema de muitos testes de co-digestão com dois ou mais substratos, na tentativa de equilibrar a relação carbono/nitrogênio da matéria-prima (ZHANG et al., 2016).

### 3.2.6 Digestão Anaeróbica

A cadeia produtiva do biogás demanda, consome e gera resultados econômicos. O biogás é obtido a partir de digestão anaeróbica de matéria orgânica, basicamente, acontece durante a decomposição da matéria viva por bactérias, onde as bactérias retiram da biomassa parte das substâncias de que necessitam para continuarem vivas, e lançam na atmosfera o biogás, que são os gases e o calor gerado. É uma mistura composta de metano ( $\text{CH}_4$ ) 40-70% vol., dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) 30-60% vol. e outros gases 1-5% vol. (ANEEL, 2008; GALINKIN et al., 2009).

A geração de biogás na biodegradação anaeróbica se dá em três estágios, hidrólise, acetogênese e metanogênese, como mostra a Figura 12.

**Figura 12 - Estágios da produção de biogás**



Fonte: Galinkin et al. (2009)

No primeiro estágio as bactérias liberam enzimas extracelulares, para promover a hidrólise das partículas e degradar os sólidos em suspensão maiores em moléculas menores, solúveis no meio; no segundo estágio as bactérias produzem ácidos para transformar as moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos existentes na biomassa, em ácidos orgânicos (ácido láctico, ácido butílico), etanol, amônia, hidrogênio e dióxido de carbono, entre outros. Por último as bactérias metanogênicas atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em metano ( $\text{CH}_4$ ) (GALINKIN et al., 2009).

O biogás gerado a partir dos três estágios é armazenado em locais chamado de gasômetro. Os gasômetros são compostos de lonas impermeáveis e resistentes a

pressão. Os gasômetros são utilizados como cúpulas sobre o biodigestor (integrado) ou como depósitos de gás instalados externamente (FNR, 2013).

Se o dimensionamento do gasômetro não garantir o volume de biogás produzido, é necessário a implantação de *flare* de segurança para garantir a queima do biogás (FEAM, 2015).

Além do biogás gerado no biodigestor, o biofertilizante é um outro subproduto obtido a partir da digestão anaeróbica. A biomassa que é fermentada e sobra no interior do biodigestor é rica em material orgânico, com um elevado potencial de fertilização (RIBEIRO; RAIHER, 2013).

Esse biofertilizante aplicado ao solo melhora as condições físicas, ajuda a retornar os nutrientes ao solo, aumentando a produtividade e trazendo muitos outros benefícios (NOGUERIA et al., 2015).

O biofertilizante é um subproduto que já possui destinação economicamente viável e ambientalmente adequada, podendo ser para utilização nas próprias plantações ou então para a comercialização, gerando uma renda extra (FEAM, 2015).

A variação do poder calorífico do biogás (de 5.000 a 7.000 kcal/m<sup>3</sup>) depende da quantidade de metano presente no mesmo. Quanto maior a quantidade de metano, maior será a pureza do biogás e, assim, maior será o seu poder calorífico. O biogás altamente purificado pode alcançar até 12.000 kcal/m<sup>3</sup> (RODRIGUES, 2006; GALINKIN et al., 2009).

A Tabela 2 mostra a relação entre o biogás e algumas fontes de energia comerciais de uso difundido na sociedade.

**Tabela 2 - Equivalência do Biogás**

<b>Um metro cúbico de BIOGÁS equivale a :</b>	0,613 litro de gasolina
	0,579 litro de querosene
	0,553 litro de óleo diesel
	0,454 litro de gás de cozinha
	1,536 quilo de lenha
	0,790 litro de álcool hidratado
	1,428 kW de eletricidade

Fonte: adaptado de Rodrigues (2006)

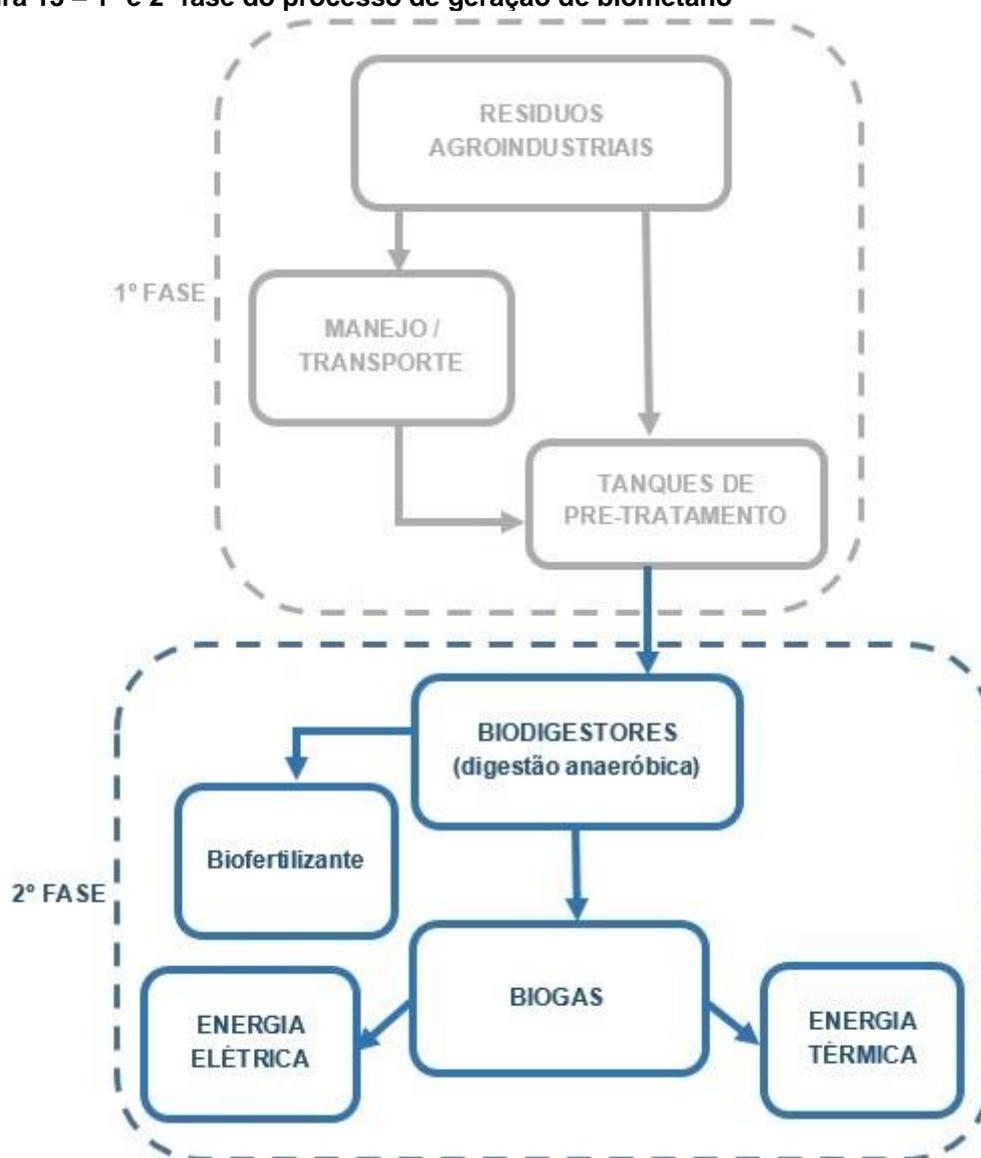
O biogás gerado pode ser utilizado como fonte de energia industrial ao calor, vapor, eletricidade e refrigeração (NOGUEIRA et al., 2015). Funcionando em motores,

geradores, moto picadeiras, resfriadores de leite, aquecedor de água, geladeira, fogão, lampião, lança-chamas (RODRIGUES, 2006).

Uma forma muito utilizada do biogás é a cogeração, que consiste na geração simultânea de energia térmica e de eletricidade ou de energia mecânica, usando combustíveis fósseis ou renováveis. Os grupos geradores utilizados nesse processo são compostos por um motor à combustão acoplado a um gerador elétrico, também conhecido como CHP - Combined Heat and Power (FEAM, 2015).

A Figura 13 inclui na abordagem teórica, a 2ª fase do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.

**Figura 13 – 1º e 2º fase do processo de geração de biometano**



Fonte: a autora a partir de FEAM (2015)

A digestão anaeróbica, portanto, é o principal processo de obtenção do biogás, mas não é suficiente para obter-se qualidade combustível do gás ali gerado. A qualidade será obtida com processos de refino, que pode variar de intensidade até a obtenção do biometano (BLEY JR., 2015).

### 3.2.7 Conclusões da 2ª Fase do processo de geração de biometano

A segunda fase começa com a transferência dos resíduos já homogeneizados e pré-tratados para o biodigestor. A alimentação do biodigestor com os substratos pode ser de acordo com as demandas do processo e de acordo com a disponibilidade dos resíduos.

Os substratos que entram no biodigestor precisam de monitoramento com relação à quantidade de sólidos totais (ST) e de sólidos voláteis (SV) a fim de fornecer a carga orgânica ideal ao processo. A temperatura dos substratos é outro fator no processo que precisa de atenção.

O controle de aquecimento pode ser necessário para manter a faixa de temperatura adequada dentro do biodigestor e assim atingir o máximo de rendimento em todo o processo de geração do biogás. A agitação durante todo o processo garante um contato total e permanente das bactérias com o substrato, distribui uniformemente a temperatura e evita a formação de camadas de sedimentos.

Com o acompanhamento de todos os fatores que fazem parte do processo da digestão anaeróbica, é obtido o biogás. O biogás produzido é armazenado em locais chamados de gasômetros, que podem ser cúpulas integradas ao biodigestor ou depósitos externos.

O excesso de lodo que sobra no interior do biodigestor, é uma biomassa rica em material orgânico que possibilita a produção de biofertilizante. O biofertilizante pode ser utilizado em solos da própria propriedade, ou então, ser comercializado.

O biogás pode ser utilizado como energia térmica e energia elétrica. O uso mais simples do biogás é geralmente a queima em caldeiras ou em sistemas de aquecimento. Para a queima do biogás com o objetivo de geração de calor, a remoção da umidade é necessário. Já para os usos energéticos, há necessidade da remoção do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), que é o principal composto indesejável presente no biogás. Outra forma muito utilizada do biogás é a cogeração, que consiste na geração de duas ou mais formas de energia a partir de uma fonte.

Para a geração do biometano, foco desse estudo, o biogás precisa passar por mais uma etapa, a da purificação.

### 3.3 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O processo de purificação do biogás tem como objetivo o aumento do poder calorífico do gás e de sua qualidade, além de evitar danos aos equipamentos. O enfoque do processo de purificação é isolar o metano ( $\text{CH}_4$ ) do restante dos componentes presentes, com isso, através do isolamento do mesmo, são reduzidas as emissões de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera, e aumentando assim seu potencial energético. Após a separação de  $\text{CO}_2$  do biogás, é necessário fazer uma limpeza do biogás (inevitável). Essa limpeza se deve pela existência de diversos tipos de resíduos e impurezas deixadas pelo  $\text{CO}_2$  (SALAZAR, 2014).

A presença das impurezas são indicadores de contaminação para o biogás, prejudicando no processo de combustão e diminuindo, concomitantemente, o processo de eficiência do biocombustível (MAKARUK, et al., 2010).

Abaixo (Quadro 10) são listados os mais importantes métodos de purificação de biogás listados na literatura, suas descrições, vantagens, desvantagens e a porcentagem de obtenção do metano puro pelo processo.

**Quadro 10 - Processos de purificação do biogás**

Processos / Referência	Descrição	Vantagens	Desvantagens	% final do metano
<b>Purificação por Membrana</b>  LIU et al., (2015); CHMIELEWSKI et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação de membranas;</li> <li>- Construídas por polímeros;</li> <li>- São transportados por membrana fina (&lt;1 mm), enquanto alguns ficam retidos;</li> <li>- São transportadas através da diferença de pressão arterial e pela dependência do componente a permeabilidade do material da membrana;</li> <li>- Temperatura de 25°C e uma pressão de 5,5 bar (melhor separação);</li> <li>- Quanto maior a diferença de pressão, menor é a área requerida da membrana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo</li> <li>- Economia de energia;</li> <li>- Facilidade de operação;</li> <li>- Temperatura ambiente;</li> <li>- Segurança;</li> <li>- Inexistência de produtos perigosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resíduos de saída ainda contém concentração de metano (<math>\text{CH}_4</math>).</li> </ul>	90 a 96

(Continua...)

(Continuação)

Processos / Referência	Descrição	Vantagens	Desvantagens	% final do metano
<p><b>Purificação criogênica</b></p> <p>HULLU et al., (2008)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratamento criogênico (separação do CH<sub>4</sub> e do CO<sub>2</sub> a temperaturas muito baixas);</li> <li>- Abrange a retificação (liquefação de gases) que origina o CO<sub>2</sub> líquido. Temperaturas baixas fazem com que ocasione o congelamento do CO<sub>2</sub>.</li> <li>- Anterior ao procedimento de purificação criogênica é preciso fazer a dessulfurização (reduz dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) emitido para a atmosfera) e secagem do gás.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É economicamente viável com grandes quantidades de biogás;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de equipamentos extras, como: compressores, turbinas, etc.</li> <li>- Tratamento mais complexo;</li> <li>- Alto consumo de energia.</li> </ul>	97
<p><b>Lavagem por água</b></p> <p>BHATTACHARYA et al., (1988); KHAPRE, (1989)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizada para remover CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, por ser mais solúvel em água;</li> <li>- Consiste na pressurização do biogás;</li> <li>- O biogás é comprimido e alimentado em uma coluna de leito fixo e a água pressurizada é pulverizada contracorrente a partir do topo.</li> <li>- A água pode ser reciclada através de uma torre de regeneração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabalham com baixas vazões de biogás;</li> <li>- Requer menos infraestrutura;</li> <li>- Econômico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O efluente líquido precisa de pós-tratamento;</li> <li>- Dependente de outros fatores, tais como: taxas de fluxo de água, composição do biogás bruto, entre outras.</li> </ul>	95 a 100
<p><b>Purificação por absorção</b></p> <p>HULLU et al., (2008); KAPDI et al., (2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Através desse processo o dióxido de carbono é removido do biogás por meio da absorção com diferentes pressões;</li> <li>- O biogás entra no fundo do reservatório, o material adsorvente fixa o CO<sub>2</sub> e ao final do processo se obtém o biogás purificado com concentrações de 95% de CH<sub>4</sub> e eficiência de recuperação de metano no biogás de 85% a 90%, dependendo do material adsorvente. Quando o material adsorvente está completamente saturado com dióxido de carbono, o biogás passa para o reservatório seguinte, que foi previamente regenerado pela despressurização até a pressão atmosférica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil operação;</li> <li>- Boa retenção de umidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessita de alta temperatura e pressão;</li> <li>- O processo é mais caro.</li> </ul>	97

(Continua...)

(Continuação)

Processos / Referência	Descrição	Vantagens	Desvantagens	% final do metano
<b>Purificação biológica</b>  KAO et al., (2012); MANN et al., (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produz biomassa no processo de fixação de CO<sub>2</sub> por meio da fotossíntese. A fixação biológica de CO<sub>2</sub> pode ser efetuada por plantas e microrganismos fotossintéticos como as microalgas;</li> <li>- Na fotossíntese, a célula utiliza a energia do sol para oxidar a água e, assim, produzir o oxigênio e reduzir o CO<sub>2</sub>;</li> <li>- A fotossíntese possibilita a conversão da luz em energia química, conduzindo a produção e matérias-primas requeridas para a síntese de diversos combustíveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção de biomassa no processo de fixação de CO<sub>2</sub> por meio de fotossíntese agregando valor no processo;</li> <li>- Aplicação de microalgas como uma alternativa de menor custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poucos estudos sobre a purificação biológica.</li> </ul>	87 a 97

Fonte: Autoria própria; adaptado de Miyawaki (2014)

O processo mais utilizado para purificação dos biogás é por membranas, pois é seguro e de operação simples. A técnica de purificação criogênica tem sido bastante estudada, porém pouco comercializada, por ser economicamente viável se a separação for de uma grande quantidade de biogás. O método de lavagem por água é o menos complicado e que exige menos infraestrutura. A tecnologia por absorção é utilizada em todo o mundo pois também é um sistema simples e de fácil operação, e a purificação biológica vem crescendo e surgindo como uma alternativa de menor custo (MIYAWAKI, 2014).

Uma vez purificado, o biogás obtido do processo de biodigestão é composto, principalmente, por metano (CH<sub>4</sub>), gás inodoro e inflamável que é mais leve que o ar (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

### 3.3.1 Biometano

O biometano resulta, após a etapa de purificação do biogás, em um combustível gasoso com elevado teor de metano, com características equivalentes ao gás natural (BUDZIANOWSKI; BRODACKA, 2016).

A composição final do biometano depende principalmente do tipo de matéria-prima (biomassa) utilizada na produção do biogás na etapa da digestão anaeróbica.

De acordo com a Resolução ANP nº 8 de 02.02.2015, o biometano deve apresentar concentrações limitadas de componentes potencialmente corrosivos (Tabela 3).

**Tabela 3 – Especificações do Biometano – ANP**

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITE	Método		
			NBR	ASTM	ISO
<b>Metano</b>	% mol.	96,5	14903	D1945	6974
<b>Oxigênio, máx.</b>	% mol.	0,5	14903	D1945	6974
<b>CO<sub>2</sub>, máx.</b>	% mol.	3,0	14903	D1945	6974
<b>CO<sub>2</sub>+ O<sub>2</sub>+ N<sub>2</sub>, máx.</b>		3,5	14903	D1945	6974
<b>Enxofre Total, máx.(3)</b>	mg/m <sup>3</sup>	70	15631	D5504	6326-3 / 6326-5 19739
<b>Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S), máx.</b>	mg/m <sup>3</sup>	10	15631	D5504 D6228	6326-3 19739
<b>Ponto de orvalho de água a 1 atm, máx.</b>	°C	-45	15765	D5454	6327 / 10101-2 10101-3 / 11541 (4)

Fonte: ANP (2015)

A Resolução define também, que o biometano é intercambiável com o gás natural entregue à distribuição nas regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul e requer os mesmos cuidados, na compressão, distribuição e revenda, dispensados ao gás natural (BLEY JR., 2015).

### 3.3.2 Usos finais do biometano

O biometano com o objetivo de ser injetado na rede de distribuição de gás tem a necessidade de ser submetido a um ajuste de pressão de acordo com o padrão de qualidade do gás natural, ajuste do poder calorífico, e ainda, deve ser odorizado para que possa ser sentido em caso de vazamentos (FNR, 2013; PROBIOGÁS, 2016).

A produção de calor, eletricidade, cogeração, aplicações indústrias e combustível veicular, são também importantes usos finais do biometano (BUDZIANOWSKI e BRODACKA, 2016). Porém a produção de eletricidade e calor é mais utilizada a partir do uso direto do biogás (VEIGA, 2016).

As formas de utilização e comercialização do biometano, inclui tanques adequados para o armazenamento de biometano gasoso, como reservatórios

esféricos, tanques tubulares ou garrafas cilíndricas; biometano liquefeito como tanques criogênicos e garrafas criogênicas cilíndricas, ou então, armazenado em redes de gás (BUDZIANOWSKI e BRODACKA, 2016).

Para operar com biometano em veículos a combustível líquido, são instalados kits de conversão para gás comprimido. Os kits geralmente incluem componentes como regulador, tubulações e guarnições de alta pressão, um medidor de pressão, injetor, mangueiras, braçadeiras, um sistema de conexão de circuito fechado, um emulador, um processador de variação de avanço, um comutador de combustível, assim como o respectivo cabeamento, correias e parafusos. O tanque de gás natural exige espaço, ou seja, para realizar a conversão para gás natural comprimido é necessário abrir mão de espaço no porta-malas (PROBIOGÁS, 2016).

Não é recomendável que se utilize cilindros fabricados para GNV (Gás Natural Veicular) para armazenar o biometano. É necessário a construção de cilindros especiais, respeitando as normas de composição, fabricação, aspecto e identificação dos mesmos (SOUZA, 2010).

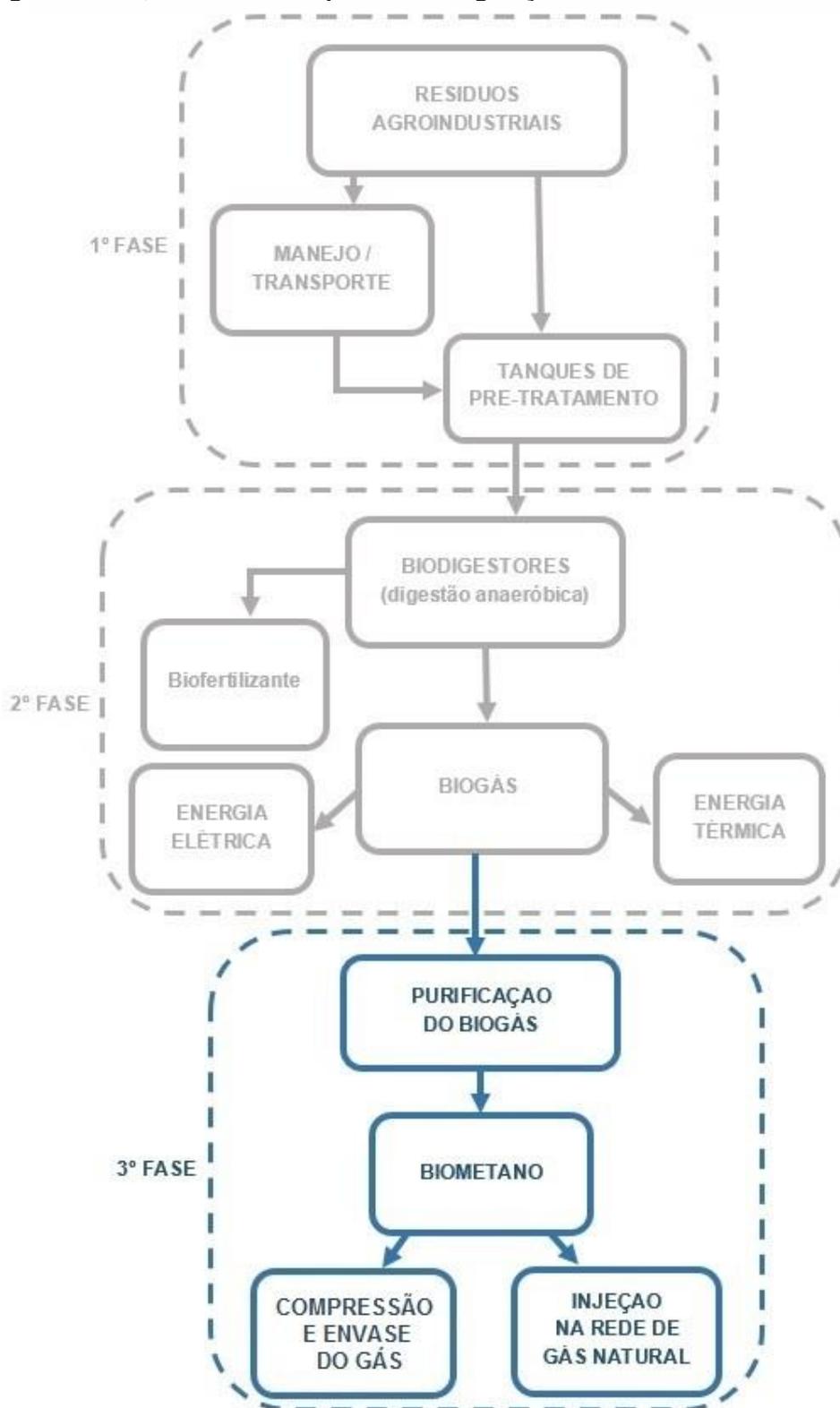
A Resolução ANP nº 8/2015, confirma que o biometano de procedência qualificada, pode ser misturado ao gás natural e comercializado por meio de conexão à rede de distribuição de gás canalizado, ou então, na forma de gás comprimido, distribuído em botijões (ANP, 2015).

Com a divulgação da Resolução da ANP sobre as especificações do biometano, a usina de biogás instalada em Passo da Serra, fruto da uma parceria da Ecocitrus, com a empresa Naturovos e a Companhia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul – Sulgás, pretende multiplicar a produção de biometano. A produção, ainda em caráter experimental, fornece energia para as instalações da cooperativa e abastece cerca de 40 veículos da própria Ecocitrus e de associados que fizeram a adaptação. A planta é uma das primeiras no Brasil a transformar biometano em gás natural veicular, a partir de resíduos agroindustriais (REINHEIMER, 2015).

Outra unidade de biogás que produz biometano para uso veicular, é a Granja Haacke, localizada em Santa Helena, no oeste do Paraná. A propriedade participa do projeto de Mobilidade a Biometano, desenvolvido pelo CIBiogás, em parceria com a Scania do Brasil, ITAIPU Binacional e Fundação PTI, com o objetivo de fomentar a mobilidade a biometano, produzido a partir de dejetos de animais e resíduos da agricultura (CIBIOGAS ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2016).

A Figura 14 inclui na abordagem teórica a 3ª fase do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais.

Figura 14 - 1º, 2º e 3º fase do processo de geração de biometano



Fonte: a autora a partir de FEAM (2015)

No Brasil, considerando a frota de veículos movidos a gás natural, o uso do biometano como combustível parece ser uma boa opção. Dos aproximadamente 16,7 milhões de veículos a gás natural existentes no mundo inteiro em 2012, aproximadamente 1,74 milhões estão no maior país da América do Sul, isso corresponde a um percentual de 11,2%. Além disso, existem 1.633 postos de abastecimento no Brasil, principalmente em grandes cidades, que oferecem gás natural veicular (GNV) como combustível (PROBIOGAS, 2016).

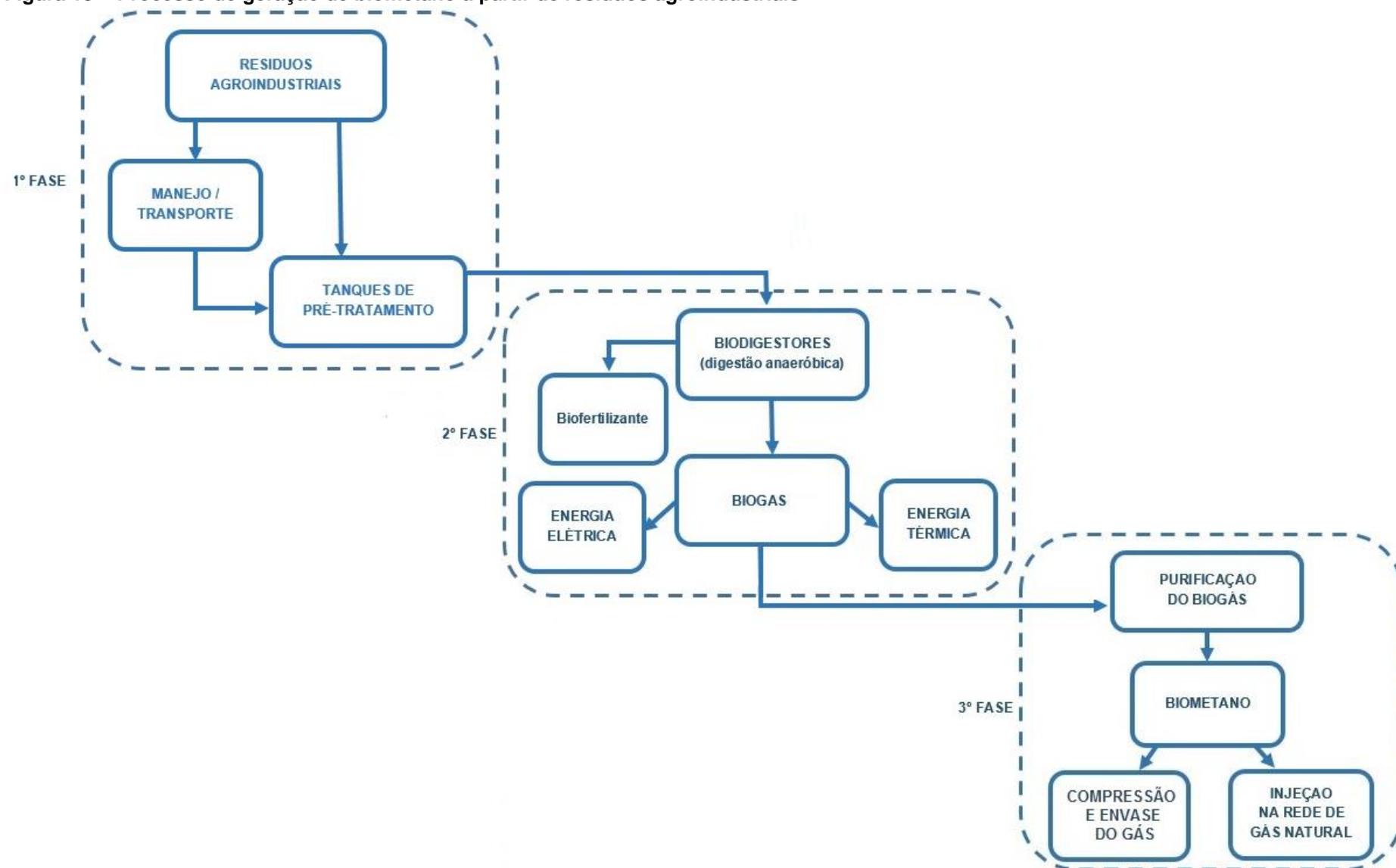
### 3.3.3 Conclusões da 3ª Fase do processo de geração de biometano

A terceira fase começa com a transferência do biogás para um equipamento de purificação. Essa fase é o tratamento do biogás para a remoção de componentes não combustíveis, resultando em um aumento do poder calorífico e um combustível gasoso com elevado teor de metano, com características equivalentes ao gás natural.

Há diferentes tecnologias de purificação, com vantagens e desvantagens, envolvendo vários estágios, cuja combinação resulta em isolar o metano dos outros constituintes. Entre as tecnologias mais utilizadas, destaca-se a purificação por membranas, considerada a mais segura e de simples operação, e o percentual de metano fica entre 90% a 96%. A purificação criogênica é indicada para grandes quantidades de biogás, é considerada uma tecnologia mais complexa, de alto consumo de energia, e obtém um percentual de metano de 97%. A tecnologia de lavagem por água é econômica e para baixas vazões de biogás, e o percentual de metano obtido fica entre 95% a 100%. Por fim, uma técnica que vem crescendo muito, é o estudo com microalgas e fotossíntese. Essa nova técnica é considerada de baixo custo e alcança um percentual de metano entre 87% a 97%.

Além de gerar um gás com poder calorífico elevado (teor de metano acima de 96,5%), essa fase de tratamento é imprescindível para a injeção nas redes de distribuição de gás natural e principalmente prevenir a corrosão em equipamentos. O biometano produzido a partir de resíduos agroindustriais passa ser tratado de maneira semelhante ao gás natural, desde que atenda às exigências de qualidade do produto estabelecidas na Resolução - ANP. É um gás que pode ser transportado e aproveitado nas infraestruturas pelos consumidores de gás natural, e ainda pode ser comprimido e utilizado como GNV em veículos movidos a gás natural disponíveis no mercado, ou que possuam kits de conversão para gás comprimido.

Figura 15 - Processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais



Fonte: a autora a partir de FEAM (2015)

A figura 15 apresenta as fases mínimas que precisa conter um processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. Na prática, os processos de geração de biometano podem envolver outras fases ou etapas que resultem no mesmo produto final ou até em novos produtos ainda não estudados.

Para que a produção de biometano a partir de resíduos agroindustriais aumente, é preciso que sejam desenvolvidas tecnologias modernas e sustentáveis relacionadas ao campo, com o aproveitamento de seu enorme e inexplorado potencial.

O investimento em processos de geração de biometano como fonte de energia renovável, traz benefícios ambientais que colaboram com a mitigação do metano, um dos principais gases responsável pelo efeito estufa. Traz também benefícios socioeconômicos, com o desenvolvimento e uso de tecnologia, equipamentos e insumos nacionais, contribuindo para o aumento do emprego de mão de obra qualificada e não qualificada nas várias fases do processo.

Com o grande potencial agroindustrial que o Brasil possui, a implantação de processos de geração de biometano, ajuda a promover a adequação ambiental no setor, ganhando reconhecimento em práticas sustentáveis no cenário nacional e internacional.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral propor uma abordagem teórica do processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. Para que este objetivo pudesse ser alcançado, foi necessário responder aos objetivos específicos traçados na introdução deste trabalho.

Para a realização de cada objetivo específico, foi construído um Portfólio Bibliográfico e adotadas técnicas de revisões sistemáticas de literatura, para assegurar que estudos recentes e relevantes sobre o tema da pesquisa fossem capturados.

Foram poucos os artigos encontrados que descrevessem sobre o processo da geração de biometano, por isso, além da busca de artigos nas principais bases de dados do Portal da Capes, houve a necessidade de consultar outros materiais publicados sobre o tema, como teses, dissertações, livros e programas nacionais e regionais de fomento ao uso de biogás/biometano.

Com base no Portfólio Bibliográfico levantado, foi realizada a descrição do processo de geração de biometano em resposta ao objetivo específico de identificar as características dos processos de geração de biometano com base no levantamento do conhecimento científico.

A abordagem teórica foi dividida em três principais fases, sendo que os resultados do objetivo específico de classificar os resíduos e as tecnologias de pré-tratamento necessárias para a biomassa ideal, subsidiaram os resultados da 1ª Fase.

A primeira fase do processo de geração de biometano incluiu a escolha, o pré-tratamento e o transporte do material orgânico até o biodigestor. As fontes de biomassa se diferenciam de acordo com suas características ou origens, e constituem a base para decidir questões como, tipos e dimensões de tecnologias que serão utilizadas tanto no pré-tratamento quanto no processo de geração do biometano, transporte dos resíduos e principalmente quantidade e qualidade na geração do biometano.

No que se refere ao terceiro objetivo específico, este trabalho descreveu sobre os biodigestores utilizados em vários países, comparou os diferentes tipos de tecnologias de biodigestores existentes, e também apresentou um histórico das diversas utilizações do biogás no mundo.

Esse terceiro objetivo contribuiu para a segunda fase do processo de geração de biometano, que incluiu decisões como, a escolha do modelo do biodigestor com processo de digestão anaeróbica, no qual da origem ao biogás. Além do biogás gerado no biodigestor, um outro subproduto é obtido a partir da digestão anaeróbica, o biofertilizante. Nessa segunda fase do processo, podem ser tomadas decisões de utilização final do biofertilizante e do biogás gerado.

Pode-se escolher pela utilização do biofertilizante nas próprias plantações, aumentando a produtividade e trazendo muitos benefícios ao solo, ou então, a comercialização do subproduto, gerando uma renda extra. O biogás nessa fase, pode ser utilizado como energia térmica e energia elétrica.

Por fim, a terceira fase do processo de geração de biometano foi concluída com o último objetivo específico deste trabalho: abordar as características, vantagens e desvantagens dos processos de purificação de biogás. Essa fase incluiu decisões como, a escolha da tecnologia a ser utilizada para o processo de purificação, e o uso final do biometano.

Para uso próprio ou para comercialização, o biometano gerado pode ser misturado ao gás natural e comercializado por meio de conexão à rede de distribuição de gás canalizado, ou então, na forma de gás comprimido, distribuído em botijões. A decisão de armazenamento, exige uma atenção quanto a construção de cilindros. Os cilindros devem ser especiais para armazenamento do biometano, respeitando as normas de composição, fabricação, aspecto e identificação dos mesmos.

Com o alcance dos resultados para cada objetivo específico traçado, reunindo todas as informações apresentadas neste trabalho, pôde-se chegar na abordagem teórica da geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais. Assim, essa pesquisa auxilia a acadêmicos, pesquisadores e gestores na área, na compreensão do processo como um todo e na tomada de decisão sustentável nas várias áreas da Engenharia de Produção.

#### 4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas oportunidades para futuras pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho, foram identificadas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Sendo elas:

- Comparar a abordagem teórica deste estudo com um processo de geração de biometano já existente, para identificar possíveis diferenças ou complementar novas fases;
- Realizar um levantamento de todos os custos envolvidos no processo de geração de biometano a partir de resíduos agroindustriais, para realizar cálculos de viabilidade econômica e financeira;
- Desenvolver abordagens teóricas para processo de geração de biometano a partir de resíduos ainda não estudados;

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO - ABIOGAS. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB**. 2015. Disponível em: <[http://ebe-cms.s3.amazonaws.com/energiahoje/files\\_static/arquivos/2016/07/19/proposta\\_de\\_programa\\_nacional\\_do\\_biogas\\_e\\_do\\_biometano\\_1.pdf](http://ebe-cms.s3.amazonaws.com/energiahoje/files_static/arquivos/2016/07/19/proposta_de_programa_nacional_do_biogas_e_do_biometano_1.pdf)>. Acesso em: 01 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **ABiogás debate alternativas para uso do biometano em veículos pesados**. 2016. Disponível em: <<http://www.abiogas.org.br/seminario-tecnico-biometano>>. Acesso em: 04 out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. – Brasília: ANEEL, 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 77, de 18 de Agosto de 2004**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2004077.pdf>>. Acesso em 14 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em 14 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução Homologatória nº 1807, de 29 de Outubro de 2014**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\\_geracao/documentos/reh20141813.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/reh20141813.pdf)>. Acesso em 14 out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Resolução ANP nº 16, de 17 de Junho de 2008**. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em 14 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 41, de 05 de Novembro de 2013**. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em 14 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Resolução ANP nº 8, de 30 de Janeiro de 2015**. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll?f=templates&fn=default.htm&vid=anp:10.1048/enu>>. Acesso em: 14 out. 2016.

BASSETTO, L. I. A incorporação da responsabilidade social e sustentabilidade: um estudo baseado no relatório de gestão 2005 da companhia paranaense de energia – COPEL. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 17, n. 3, p. 639-651, jul. 2010.

BHATTACHARYA, T. K.; MISHRA TN, SINGH B. Techniques for removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S from biogas. **XXIV annual convention of ISAE**, held at PKV, Akola, 1988.

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

BONFANTE, 2010; T. M. **Análise da viabilidade econômica de projetos que visam à instalação de biodigestores para o tratamento de resíduos da suinocultura sob as óticas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e da geração de energia**. 2010. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2010.

BUDZIANOWSKI, W. M.; BRODACKA, M. Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability. **Energy Conversion and Management**. Disponível online, ago. 2016.

CERVI, R. G. et al. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 30, n. 5, set./ out. 2010.

CIBIOGAS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Granja Haacke**. Disponível em: <[https://cibiogas.org/granja\\_haacke](https://cibiogas.org/granja_haacke)>. Acesso em: 30 nov. 2016.

CHENG, S. et al. Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 34, p. 387-400, jun. 2014.

CHMIELEWSKI, A. G. et al. Membrane enrichment of biogas from two-stage pilot plant using agricultural waste as a substrate. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 219-228, 2013.

COLATTO, L. LANGER, M. Biodigestor: resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 119-128, jul./dez. 2011.

COLDEBELLA, A. et al. **Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite.** Energia no Meio Rural. 2006, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000200053&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200053&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 13 out. 2016.

COLUNA, N. M. E. **Análise do Potencial Energético dos Resíduos provenientes da cadeia agroindustrial da proteína animal no estado de São Paulo.** 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION - EBA. **Proposal for a European Biomethane Roadmap.** 2013. Disponível em: <[http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2014/02/GGG\\_European-Biomethane-Roadmap-final.pdf](http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2014/02/GGG_European-Biomethane-Roadmap-final.pdf)> Acesso em: 13 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **EBA Biogas Report 2015 published** – a record growth in Europe! 2015. Disponível em: <<http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2015/12/2015.12.17-Press-Release-Biogas-Report-2015-a-record-growth-in-Europe.pdf>> Acesso em: 19 out. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **PDE 2023** – Plano Decenal de Expansão de Energia. Rio de Janeiro, outubro de 2014.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE - FEAM. **Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria.** Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015.

FERREIRA JR., J. C. G., RODRIGUES, M. G. Um estudo sobre a energia eólica no Brasil. **Ciência Atual**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 02-13, 2015.

FLESCH, T. K., et al. Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. **Biomass and Bioenergy**. v. 35, n. 9, p. 3927-3935, oct. 2011.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. – FNR. **Biogas an introduction.** 2013. Disponível em: <<https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch.biogas-2013-en-web-pdf.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

GALINKIN, M. et al. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais.** 2ª ed. rev. - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional,

Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009.

GASPAR, R. 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.** 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

GUERRA, J. B. S. O. A., et. al. Future scenarios and trends in energy generation in brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production.** v. 103, n.15, p. 197–210, set. 2015.

HAASJES, J. **O produtor rural como fornecedor de bio-combustível.** 2014. Fórum Brasil-Alemanha de Biogás. Disponível em:<[http://www.ahkbrasilien.com.br/fileadmin/ahk\\_brasilien/portugiesische\\_seite/departamentos/Meio\\_Ambiente/Forum\\_Brasil-Alemanha/Biodigestor\\_e\\_sustentabilidade.pdf](http://www.ahkbrasilien.com.br/fileadmin/ahk_brasilien/portugiesische_seite/departamentos/Meio_Ambiente/Forum_Brasil-Alemanha/Biodigestor_e_sustentabilidade.pdf)>. Acesso em 21: out. 2016.

HIJAZI, O., et al. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 54, p. 1291-1300, feb. 2016.

HULLU, J.; et al. Comparing different biogas upgrading techniques. **Technical University of Eindhoven**, 03 jul. 2008.

KAO, C. Y. et al. Ability of a mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. **Applied Energy**, v. 93, p. 176-183, 2012.

KAPDI, S. S. et al. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. **Renewable energy**, v. 30, n. 8, p. 1195-1202, 2005.

KARLSSON, T. et al. **Manual básico de biogás.** 1º ed. – Lajeado: Ed. da Univates, 2014.

KHAPRE U. L. Studies on biogas utilization for domestic cooking. **XXV annual convention of ISAE**, held at CTAE, Udaipur; 1989.

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

LIU, X. et al. Continuous process of biogas purification and co-production of nano calcium carbonate in multistage membrane reactors. **Chemical Engineering Journal**, v. 271, n. 1, p. 223-231, 2015.

LORA, E. S; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 13, p. 777-788, may. 2009.

MACHADO, G. B. **Biodigestor da Cooperativa agrícola Gottingen**. 2015. Disponível em: < <http://www.portaldobiogas.com/biodigestor-da-cooperativa-agricola-de-gottingen/>>. Acesso em 30 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Biodigestor Anaeróbico**. 2016. Disponível em: < <http://www.portaldobiogas.com/biodigestor-anaerobio/>>. Acesso em: 30 out. 2016.

MAKARUK, A. et al. Membrane biogas upgrading processes for the production of natural gas substitute. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 1, p. 83-92, 2010.

MANN, G. et al. Biogas-conditioning with microalgae. **Agronomy Research**, v. 7, n. 1, p. 33-38, 2009.

MARTELLI, L. F. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa da matéria orgânica de solo sob a aplicação de efluente de esgoto tratado em biodigestor anaeróbico**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado Química) - Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

MARTINS, V. A. **Análise do potencial de políticas públicas na viabilidade de geração distribuída no Brasil**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

MIYAWAKI, B. **Purificação de biogás através de cultivo de microalgas em resíduos agroindustriais**. 2014. 137 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**. ed. 96. fev. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732805/Boletim+DCR+n%C2%BA+96+-+fevereiro+de+2016.pdf/9db5f193-af66-4124-80c1-0abc74ed63f7>>. Acesso em: 04 out. 2016.

\_\_\_\_\_. **Portaria nº 14, de 8 de Janeiro de 2016.** Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3189515/Portaria\\_n\\_14-2016/bd768975-095b-4702-9196-91dde857573c?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3189515/Portaria_n_14-2016/bd768975-095b-4702-9196-91dde857573c?version=1.0)>. Acesso em: 11 out. 2016.

NOGUEIRA, C. E. C., et. al. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48 , p. 300-305, ago. 2015.

OLIVEIRA, A. J. **Estudo da viabilidade econômica do uso do biogás, extraído da suinocultura, como fonte de energia elétrica renovável.** 2012. 50 f. Dissertação (Mestrado Ecologia e Produção Sustentável) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás. GIOÂNIA, 2012.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos suínos.** Concórdia: EMBRAPA-CNPSA. Documentos Técnicos, nº. 27, 188 p. 1993.

\_\_\_\_\_. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas.** Concórdia: EMBRAPA Suínos e Aves. 109 p. 2004.

OLIVEIRA, S. V. W. B. et al. Generation of bioenergy and biofertilizer on a sustainable rural property. **Biomass and Bioenergy**. v. 35, n. 7, p. 2608-2618, jul. 2011.

OKELLO, C. et al. Development of bioenergy technologies in Uganda: A review of progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 18, p. 55-63, feb. 2013.

PETERSSON, A; WELLINGER, A. **Biogas upgrading technologies – developments and innovations.** IEA Bioenergy. 2009. Disponível em: <[https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading\\_rz\\_low\\_final.pdf](https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2016.

PROBIOGÁS. **Biometano como combustível veicular.** Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) ; Uwe Becher. Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – PNUMA. **Desenvolvimento Sustentável na Prática: a Aplicação de uma Abordagem Integrada.** Experiências na América Latina e no Caribe. Cidade do Panamá, Panamá, 2016.

RABONI, M., et al. **The future of biofuels for a sustainable mobility**. The 3rd World Sustainability Forum. nov. 2013.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY – REN21. **Renewables 2016 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat. 2016.

RIBEIRO, M. F. S., RAIHER, A. P. Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná. **Energy Policy**, v. 60 , p. 208-216, set. 2013.

RODRIGUES, F. F. C. **Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro**. 2006. 171 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós Graduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

SALAZAR, A. R. G. **Estudo da utilização do biogás como fonte de energia renovável no processo produtivo de indústrias de bebidas**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) – Faculdades de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2014.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: Um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

SANTOS, E. L. B., NARDI JR., G. Produção de biogás a partir de dejetos de origem animal. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v. 4, n. 2, ago., 2013.

SOUZA, J. **Desenvolvimento de Tecnologias para compressão de biogás**. 2010. 82 p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, 2010.

SOVACOO, B. K. et al. Scaling and commercializing mobile biogas systems in Kenya: A qualitative pilot study. **Renewable Energy**. v. 76, p. 115-125, apr. 2015.

TOLMASQUIM, M.T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VEIGA, A. P. B. **Contribuição à avaliação das barreiras e oportunidades regulatórias, econômicas e tecnológicas do uso de biometano produzido a partir de gás de aterro no Brasil.** 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) Programa de Pós-Graduação em Energia - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

WEBER, R. et al. Produção de biogás com relação ao teor de sólidos voláteis dos dejetos de bovinocultura de leite. **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v.3, p. 43-55, 2014.