

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Fabricao Miguel Farinassi

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE UM SISTEMA
DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESÍDUOS INDUSTRIAIS DE FÁBRICA DE
ALIMENTOS**

TAUBATÉ – SP
2019

Fabricio Miguel Farinassi

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE UM SISTEMA
DE PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESÍDUOS INDUSTRIAIS DE FÁBRICA DE
ALIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté como requisito para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

TAUBATÉ – SP
2019

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

F225e Farinassi, Fabricio Miguel
Estudo técnico-econômico de um sistema de purificação de biogás a partir de resíduos industriais de fábrica de alimentos / Fabricio Miguel Farinassi. -- 2019.
63 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior, Departamento de Engenharia Mecânica

1. Biogás. 2. Biometano. 3. Biometanização. 4. Ecoeficiência.
5. Tratamento de efluentes. I. Título. II. Mestrado em Engenharia Mecânica.

CDD – 665.776

Ficha catalográfica elaborada por **Shirlei Righeti – CRB-8/6995**

FABRICIO MIGUEL FARINASSI

**ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO DE UM SISTEMA DE PURIFICAÇÃO DE
BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS DE FÁBRICA DE ALIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté como requisito para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Herlandi de Souza Andrade – Escola de Engenharia – Universidade de São Paulo – Lorena-SP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara – Universidade de Taubaté – Taubaté-SP

Assinatura: _____

Dedico este trabalho à minha amada Viviane
pela paciência, compreensão e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de conhecer e poder estudar uma pequena parte da dimensão de Sua sabedoria infinita.

Aos meus pais, Antonio Caravelli Farinassi e Maria Regina Miguel Farinassi, que desde muito cedo me incentivaram a estudar e a buscar o conhecimento e, por muitas vezes, fazendo isto com muitas privações e dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior, pelo apoio, parceria e todo o suporte necessário para elaboração deste trabalho.

À empresa Sanergy, da qual faço parte, pelo apoio logístico e pela cessão de informações e materiais para desenvolvimento da pesquisa.

“A sabedoria é árvore que dá vida a quem a abraça; quem a ela se apegar será abençoado.” Provérbio 3.18.

“Assim diz o Senhor: Não se glorie o sábio em sua sabedoria nem o forte em sua força, nem o rico em sua riqueza.” Jeremias 9.23.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é definir, com requisitos técnicos e econômicos, a tecnologia mais viável para o tratamento de efluentes de uma indústria de alimentos para obtenção de biometano e de energia. O biogás é uma fonte de energia renovável que pode ser uma alternativa para o atendimento das demandas globais de energia nos próximos anos e reduz os resíduos e as emissões de gases do efeito estufa. O biogás é obtido pela degradação microbiológica dos resíduos orgânicos em um ambiente isento de oxigênio, sendo que para controle deste processo são usados biodigestores anaeróbios, o mais eficiente o *UASB*. Apesar do grande potencial de uso do biometano, o biogás produzido pela biodigestão anaeróbica oriundo de efluentes contém inúmeros contaminantes que prejudicam os equipamentos de combustão e também a eficiência energética do uso do combustível tornando imprescindível sua. Há inúmeras técnicas de remoção dos contaminantes do biogás, porém a tecnologia mais viável para eliminação de gás sulfídrico é a que utiliza de sistema biológico de remoção e a melhor tecnologia para eliminação do gás carbônico é o sistema de membranas. Neste trabalho, pode-se concluir que, na indústria de alimentos objeto de estudo, as tecnologias propostas apresentaram excelentes resultados de sustentabilidade em termos técnicos, com uso de resíduos para geração de biometano purificado e de subprodutos com alto valor agregado. Também se atingiu excelentes resultados financeiros, através da geração de valor ao negócio, conforme os indicadores econômicos e o modelo de negócio avaliado e proposto.

Palavras-chave: Biogás, Biometano, Biometanização, Ecoeficiência, Tratamento de Efluentes, Aproveitamento energético.

ABSTRACT

The objective of this work is to define, with technical and economic requirements, the most viable technology for the treatment of effluents from a food industry to obtain biomethane and energy. Biogas is a renewable energy source that can be an alternative to meet global energy demands in the coming years and reduces waste and greenhouse gas emissions. The biogas is obtained by the microbiological degradation of the organic residues in an oxygen-free environment, and to control this process are used anaerobic biodigesters, the most efficient the UASB. Despite the great potential of use of biomethane, the biogas produced by anaerobic biodigestion from effluents contains numerous contaminants that harm combustion equipment and also the energy efficiency of the use of the fuel making it essential. There are a number of biogas contaminant removal techniques, but the most feasible technology for the disposal of sulfuric gas is the biohazard removal system, and the best technology for the disposal of carbon dioxide is the membrane system. In this work, it can be concluded that, in the food industry studied, the technologies proposed presented excellent results in terms of technical sustainability, with the use of residues for the generation of purified biomethane and high added-value by-products. Excellent financial results were also achieved through the generation of business value, according to the economic indicators and the business model evaluated and proposed.

Key words: Biogas, Biomethane, Ecoefficiency, Waste Water Treatment, Energy Reuse.

LISTA DE FIGURAS

1	Princípios do Desenvolvimento Sustentável.....	13
2	Fontes de produção e aplicações para o biogás.....	19
3	Produção de biometano.....	20
4	Fluxograma relacionando o nível de pressão, tratamento e uso do biogás em empreendimentos bioenergéticos rurais e industriais.....	21
5	Modelo indiano de biodigestor anaeróbico.....	23
6	Modelo chinês de biodigestor anaeróbico.....	23
7	Modelo tipo batelada de biodigestor anaeróbico.....	24
8	Representação esquemática de biodigestor UASB.....	24
9	Rotas tecnológicas de dessulfurização de biogás.....	26
10	Desenho esquemático do lavador de gases com água ou solvente orgânico.....	30
11	Desenho esquemático do sistema de absorção química com aminas....	31
12	Desenho esquemático do sistema PSA.....	32
13	Desenho esquemático do sistema purificação por separação criogênica.....	33
14	Processo de filtração de biogás usando membranas.....	34
15	Processo de separação de metano por separação seletiva.....	34
16	Saturação de limalha de ferro após tempo de uso.....	36
17	Representação de uma torre anóxica de dessulfurização com uso de bactéria <i>Thiobacillus ferroxidans</i> e anéis Pall antes e após formação de enxofre elementar.....	38
18	Sistema de dessulfurização com múltiplas barreiras para remoção das frações grossa e residual de H ₂ S do biogás e do CO ₂	39
19	Fluxograma da veiculação dos efluentes líquidos e gasosos do estudo laboratorial.....	44
20	Fluxograma atual do tratamento de efluentes.....	45
21	Fluxograma proposto para instalação em indústria de sucos e alimentos.....	46

LISTA DE TABELAS

1	Comparação do Poder de Combustão dos Diferentes Combustíveis..	22
2	Composição do biogás e principais contaminantes do biometano.....	26
3	Valores dos componentes do biogás obtidos de fontes diferentes.....	28
4	Resultados do ensaio de laboratório.....	51
5	Coeficientes de produção de produtos de interesse a cada metro cúbico de efluente bruto.....	51
6	Estimativa de uso da tecnologia de purificação de biogás.....	52
7	Comparativo de fluxos de caixa atual e com nova tecnologia proposta em US\$.ano ⁻¹	53

LISTA DE QUADROS

1	Métodos de Remoção de CO ₂ de Biogás.....	30
2	Métodos de Remoção de H ₂ S de Biogás.....	31
3	Critérios de avaliação técnica de tecnologias	45
4	Questionário para elaboração do plano estratégico de negócios.....	49
5	Comparativo técnico entre tecnologias de purificação de biogás.....	49

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANP	Agência Nacional de Petróleo
°C	Graus Celsius
Ca(OH)₂	Hidróxido de Cálcio
CH₄	Gás Metano
CO	Gás Monóxido de Carbono
CO₂	Gás Dióxido de Carbono
DMEA	DiMetil Etanol Amina
DQO	Demanda Química de Oxignio
Fe²⁺	íon de Ferro II
Fe³⁺	íon de Ferro III
FeCl₂	Cloreto Ferroso
FeCl₃	Cloreto Férrico
Fe₂O₃	xido de Ferro III
Fe(OH)₃	Hidróxido de Ferro III
Fe₂S₃	Sulfeto Férrico
FeS	Sulfeto de Ferro II
FeSO₄	Sulfato de Ferro II
Fe-EDTA	Complexo de Ferro em cido EtilenoDiamino Tetracético
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
H₂	Gás Hidrognio
H₂CO₃	cido Carbnico
H₂O	gua
H₂S	Gás Sulfidrico
K₂CO₃	Carbonato de Potássio
kcal.m⁻³	Quilocalorias por metro cúbico
kg.m⁻³	Quilograma por metro cubico
KI	Iodeto de Potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
MEA	Metil Etanol Amina
m³	Metro Cúbico
mg m⁻³	Miligrama por metro cúbico
mm	Milímetros

N₂	Gás Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH₃	Gás Amônia
N.m⁻³	Normal Metro Cúbico
NO⁻³	Íons Nitrato
O₂	Gás Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Partes Por Milhão
ppmv	Partes Por Milhão em Volume
PSA	<i>Pressure Swing Absorption</i> (Absorção por Variação de Pressão)
R\$	Real Brasileiro
S	Enxofre
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket - Biodigestores Anaeróbios de Fluxo Ascendente
US\$	Dólar Americano
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
SUMÁRIO.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1. Mudanças climáticas: redução de resíduos e aproveitamento bioenergético	18
3.2. Biogás e Biometano	20
3.3. Biodigestores e Purificação do Biometano	22
3.3.1. Purificação usando lavagem com água (WS) ou solvente orgânico.....	30
3.3.2. Purificação usando absorção química com aminas.....	32
3.3.3. Purificação por variação de pressão de adsorção (PSA).....	32
3.3.4. Purificação por separação criogênica.....	34
3.3.5. Purificação por membrana.....	35
3.3.6. Purificação com colunas de limalha de ferro - óxido e hidróxido de ferro $Fe(OH)_3/Fe_2O_3$ com lã ou pellets de aço.....	36
3.3.7. Remoção de H_2S pela adição de cloretos de ferro no biodigestor ($FeCl_3$, $FeCl_2/FeSO_4$).....	37
3.3.8. Absorção química usando $Fe(OH)_3$ ou $FeCl_3/NaOH$ ou $Fe-EDTA$	37
3.3.9. Remoção biológica.....	38
3.3.9.1. Torre de dessulfurização em ambiente anóxico.....	38
3.3.10. Sistemas de purificação com múltiplas barreiras (bioquímica, seguida de físico-química).....	40
3.4. Análise técnico-econômica de tecnologias e modelo de negócios	41
3.4.1. Análise técnica.....	41
3.4.2. Análise econômica.....	41
3.4.3. Modelo de Negócios.....	43
4. METODOLOGIA.....	43
4.1. Pesquisa teórica - Análise técnica das metodologias de purificação existentes	44
4.2. Pesquisa científica experimental - técnica	45
4.2.1. Materiais.....	45
4.2.2. Método laboratorial.....	46
4.2.2. Método experimental – proposta técnica.....	46
4.3. Pesquisa científica experimental - econômica	48
4.4. Planejamento estratégico – CANVAS®	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1. Revisão de trabalhos existentes	49
5.2. Resultados de laboratório	51
5.3. Resultados da tecnologia em planta industrial	52
5.4. Análise econômica da tecnologia em planta industrial	53
5.4.1. VPL, TIR e TMA.....	54
5.5. Análise estratégica - CANVAS	55
6. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE I – Modelo de Plano de Negócios CANVAS® (Fonte: Analista de Negócios, 2019).....	62
APÊNDICE II – CANVAS® Preenchido (Fonte: Analista de Negócios, 2019).....	63

1. INTRODUÇÃO

Estudos científicos atuais demonstram que estão ocorrendo significativas mudanças climáticas no planeta, decorrentes da emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), representando 98% do total (Rubio *et al.*, 2013). Esses gases são produzidos, predominantemente, pela queima de combustíveis fósseis, pela agropecuária intensiva e pelas atividades industriais e humanas com geração e descarte de resíduos orgânicos, sendo que, devido ao aumento populacional e à melhoria do poder econômico dos países em desenvolvimento, há perspectivas de que haja elevação na emissão destes gases, com aumento do risco de catástrofes naturais com consequências irreversíveis ao planeta e ao sistema econômico adotado pela ausência de sustentabilidade.

Neste cenário, a maior parte da população mundial tem demonstrado preocupações sobre a mudança climática, existindo, atualmente, uma quebra de paradigma, do simples uso contínuo de recursos naturais para sistemas com a reutilização e recuperação de recursos, destacando-se a busca pelo crescimento sustentável. O termo crescimento sustentável tem sido frequentemente usado por empresas, programas governamentais e estudos científicos, porque a economia humana é um subsistema de um ecossistema global finito que não cresce, não é sustentável por longos períodos de tempo. (Daly, 1990).

Atualmente, a definição correta de sustentabilidade é o desenvolvimento sustentável, porque a economia possui recursos limitados e o uso correto dos mesmos deve respeitar os dois princípios fundamentais, de colheita/extração e regeneração e o princípio de emissão e assimilação de resíduos que são resumidos na Figura 1.

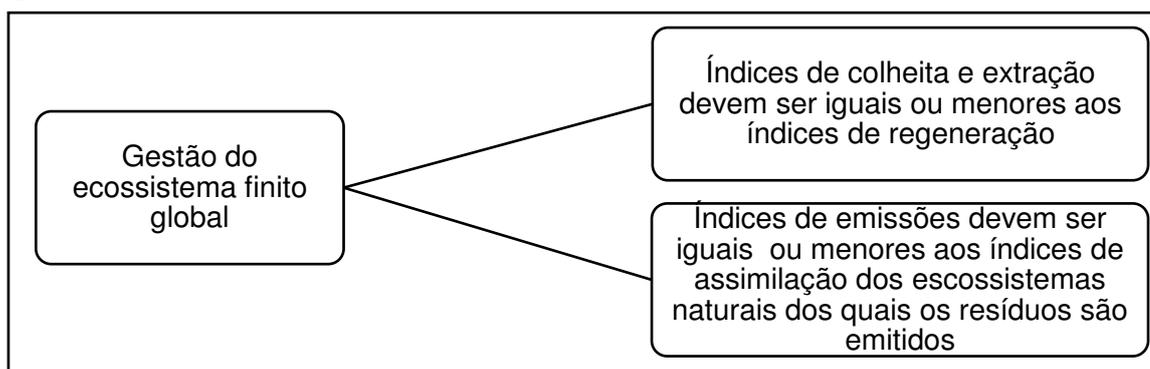


Figura 1. Princípios do Desenvolvimento Sustentável (Adaptado de Daly, 1990).

O princípio um apregoa que as tecnologias de produção e de exploração de recursos naturais devem ser focadas para equilibrar o consumo com a geração dos mesmos recursos.

O uso de biomassa como combustível é uma fonte renovável, pois em contraste com os combustíveis fósseis, pode ser reposta, sem dificuldade, em um curto espaço de tempo, equilibrando consumo e geração. Já os combustíveis fósseis levam milhares de anos para ser produzidos por processos naturais e, conseqüentemente, seu consumo é significativamente superior a sua capacidade de reposição.

O princípio dois dissemina que as emissões de resíduos de um subsistema humano devem ser iguais à capacidade natural de assimilação, desta forma, sistemas baseados em biomassa o atendem em detrimento aos de base fóssil.

Com relação aos gases do efeito estufa, o CH₄, possui um potencial prejudicial ao efeito estufa 23 vezes superior ao do CO₂ e sua concentração atmosférica vem aumentando a 0,2–1% ano⁻¹. Ele é emitido, principalmente, a partir de atividades de tratamento de resíduos como aterros sanitários, sistemas compostagem e tratamento de efluentes industriais. O CH₄ representa, aproximadamente, 14 % do total de gases do efeito estufa em todo o mundo. (Rubio *et al*, 2013).

Condizente ao segundo princípio de sustentabilidade a emissão dos gases de efeito estufa pode ser compensada pela sua reassimilação ao ecossistema nos quais foram produzidos, sendo o caso mais destacado a agroenergia, ou energia derivada de atividades agrícolas, que se tornou um conceito cada vez mais importante, porque é uma energia limpa e renovável e vem se tornando mais relevante na matriz energética global e esta relevância deverá continuar nos próximos anos. Calcula-se que uma parte importante do objetivo de energias renováveis da União Europeia será atingida até 2020, utilizando bioenergia, dos quais pelo menos 25% será o biogás. Além disso, a capacidade global de geração de energia a partir de instalações comerciais de biogás mais do que duplicará na próxima década, passando de 14,5 gigawatts (GW) em 2012 para 29,5 GW em 2022.

Ainda com relação ao segundo princípio de desenvolvimento sustentável, os resíduos orgânicos industriais, agrícolas e urbanos, na forma de resíduos sólidos ou

efluentes, quando descartados, são geradores de poluentes na forma de metano, nos aterros sanitários e estações de tratamento de efluentes sem aproveitamento energético e também na forma de gás carbônico, no sistema mais comumente utilizado em indústrias e estações de tratamento de esgoto, o sistema aeróbio. Tendo como base os princípios do desenvolvimento sustentável, faz-se necessário desenvolver tecnologias para reduzir a emissão e geração de poluentes, bem como, reaproveitar e substituir as fontes energéticas oriundas do petróleo por outras fontes.

Neste contexto, o uso do biogás, através do reaproveitamento de efluentes de indústrias, esgoto sanitário e de aterros sanitários, vem se tornando cada vez mais comum em diversos locais do mundo, bem como em diversos segmentos de negócio. Entretanto, tal tecnologia possui limitações, pois o biogás, oriundo de tais fontes, possui inúmeros contaminantes que prejudicam seu uso e aplicação industrial e comercial.

O biogás é uma fonte de energia renovável que pode ser uma alternativa para o atendimento das demandas globais de energia nos próximos anos. Também reduz os resíduos e as emissões de gases do efeito estufa (GEE). A produção de biogás, quando comparada com a produção de outros recursos renováveis, como o etanol de cana-de-açúcar ou milho e o biodiesel dos óleos vegetais tem a vantagem de não competir por espaço com tais setores, notadamente as áreas agriculturáveis para alimentos, e não colocar a produção destes em risco.

Além de ter um alto teor de energia, o tratamento dos resíduos orgânicos evita possível degradação dos rios e dos reservatórios que são causa da proliferação de doenças associadas a eles e pode causar a contaminação dos lençóis freáticos.

O mecanismo consolidado de obtenção do biogás por meio do tratamento de resíduos orgânicos é a tecnologia de digestão anaeróbica que tem sido aplicada em larga escala para aproveitar a energia contida na biomassa descartada. A produção de energia elétrica e os sistemas de cogeração são obtidos pela queima do metano produzido pela digestão da biomassa, utilizando geradores movidos por motores de combustão interna. A queima do metano produz, para cada molécula, uma molécula de gás carbônico que causa 23 vezes menos efeito danoso para o efeito estufa.

O biogás é produzido a partir da metanação de biomassa e resíduos orgânicos. No entanto, ele, naturalmente, contém várias impurezas que reduzem a

eficiência de queima e comprometem a durabilidade dos motores de combustão interna. Assim, a purificação e limpeza do biogás é fundamentalmente importante para assegurar a difusão e consumo de tal combustível.

O contaminante mais danoso existente no biogás é o sulfato de íons metálicos diversos. Ele é indesejável no bioprocessamento anaeróbico porque é reduzido ao sulfeto, que é odorífero, corrosivo, tóxico e é um conhecido inibidor da metanogênese. No entanto, o sulfato é um componente que deve ser tratado no processo anaeróbio, devido à sua presença nos esgotos e em diversas águas residuais industriais e agrícolas. O H_2S e seus produtos de combustão são perigosos para tubulações, motores a gás e sistemas térmicos, porque são gases corrosivos, presentes no biogás em concentrações de até 0,5%. Portanto, a remoção de componentes de enxofre é um dos primeiros passos durante a melhoria do biogás.

As tecnologias mais comumente utilizadas para remoção do H_2S do biogás são processos que estão à jusante da etapa de produção. Frequentemente, processos fisicoquímicos como oxidação de gás úmido são usados. No entanto, estes processos necessitam de alto investimento e possuem custos operacionais elevados.

Existem também os processos com tratamento biológico de gases que se baseiam na digestão microbiana de contaminantes no gás de modo que as rotas metabólicas dos microrganismos eliminam os mesmos.

Como tecnologias, ocorrem as remoções de H_2S obtidas em filtros biológicos aeróbicos e anóxicos, fotobiorreatores com algas e bactérias e digestores sob condições microaeróbicas.

Além do gás sulfídrico, o biogás possui como contaminante de ampla importância, pela quantidade, o dióxido de carbono, prejudicial ao rendimento de queima do gás gerado e também sendo um dos gases do efeito estufa.

Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento e aplicação de tecnologias para a purificação deste gás gerado para torná-lo acessível e interessante para uso amplo.

O presente trabalho é dividido em duas etapas. A primeira etapa visa avaliar a tecnologia mais adequada e/ou a combinação mais adequada de tecnologias a ser implementada na purificação do biogás para a eliminação dos seus contaminantes e a produção de biometano a partir de resíduos industriais. Na segunda etapa, a

tecnologia escolhida, por meio de estudos técnicos, econômicos e estratégicos, será projetada para ser instalada em uma indústria de alimentos de Caçapava-SP.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é definir, com requisitos técnicos e econômicos, a tecnologia mais viável para o tratamento de efluentes de uma indústria de alimentos para obtenção de biometano e de energia.

Os objetivos específicos são:

- Definição do conceito global do projeto;
- Definição do fluxo do processo e dos equipamentos do projeto com base em critérios técnicos e econômicos;
- Elaboração de um modelo de negócios para execução do projeto.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Mudanças climáticas: redução de resíduos e aproveitamento bioenergético

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013) apontou que a temperatura da superfície da terra cresceu aproximadamente 0,6°C e o nível dos mares e oceanos elevaram-se por volta de 15 cm nos últimos 100 anos, ocasionados pelo aumento da atividade industrial humana. Existe a projeção de acréscimo de até 1°C nos próximos 50 anos.

Cerca de 80,3% da energia primária gerada é por meio de combustíveis fósseis que geram mudanças climáticas por meio da geração de gases do efeito estufa, podendo ocasionar em até 150.000 mortes adicionais por ano, devido às enchentes, eventos climáticos, escassez de alimentos e água e por doenças (Lora e Venturini, 2012).

A geração de energia por meio do consumo de combustíveis fósseis é considerada como principal fonte de geração do aquecimento global (IPCC, 2013).

Walsh *et al.* (1996) citam que a crise energética iniciada em 1973 pelo embargo ao petróleo árabe trouxe uma grande preocupação com o uso de combustíveis renováveis. Sequencialmente, um grande número de projetos patrocinados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, por outros fundos governamentais e indústrias privadas avaliaram o uso de sistemas de tratamento anaeróbico para a produção de bioenergia, reduzindo o consumo de combustíveis

fósseis e aproveitando os resíduos que gerariam gases do efeito estufa.

Lora e Venturini (2012) demonstram a grande concentração de combustíveis fósseis no oriente médio e que a produção e as reservas existentes tendem a não atender a demanda mundial nos próximos anos, gerando a necessidade de uso de outras fontes de energia.

Santos (2016) afirma que nos próximos anos as fontes de energia renováveis terão participação cada vez mais relevante na matriz energética global. Ele destaca que o aproveitamento dos resíduos orgânicos pode evitar a proliferação de doenças, contaminação do lençol freático e geração de gases do efeito estufa. A descoberta de que há produção de gases através dos materiais orgânicos em decomposição gerou o interesse no aproveitamento dos mesmos para uso como biomassa, gerando energia renovável e, concomitantemente, minimizando os problemas ambientais a eles associados.

A biodigestão anaeróbica tem sido aplicada em grande escala, visando o aproveitamento de energia contida nesta biomassa descartada. Sistemas de cogeração de energia e produção de energia elétrica são obtidos pela queima do metano produzido através dos sistemas de biodigestão (Santos, 2016).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/10, trouxe a necessidade de redução da destinação final de resíduos para aterros sanitários e incentivou o aproveitamento energético dos gases gerados o que vem proporcionando inúmeros projetos de uso do biometano. (ABRELPE, 2015).

A Figura 2 resume os fluxos de produção de biogás, desde as fontes de geração, até o uso final.

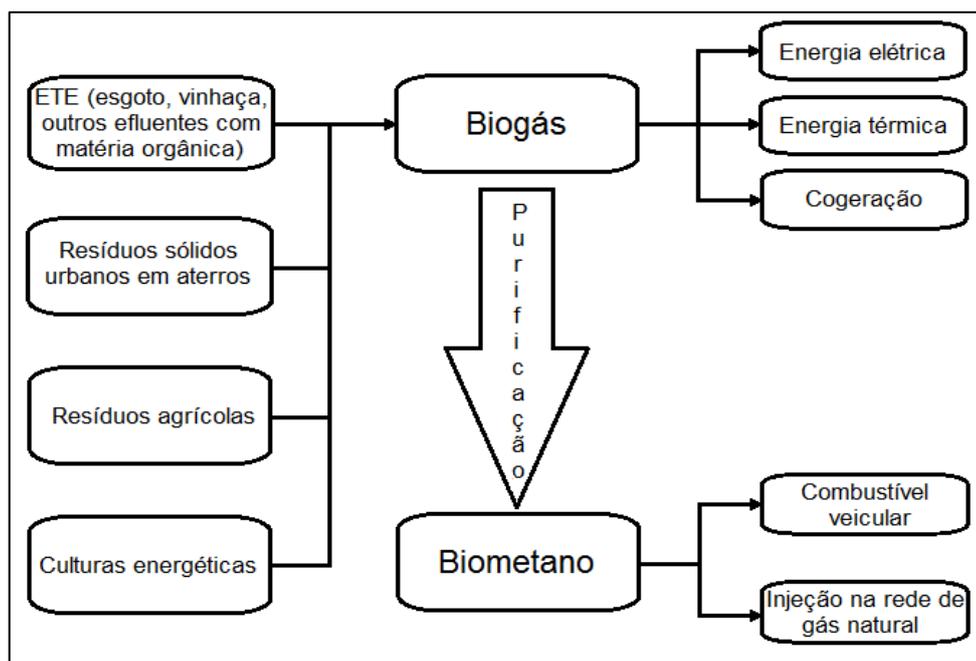


Figura 2. Fontes de produção e aplicações para o biogás

Adaptado de Veiga e Mercedes (2015)

Santos (2016) pontua que o biogás pode ser usado diretamente para energia elétrica, térmica e/ou cogeração, porém, com baixa eficiência e com risco de deterioração dos equipamentos usados para aproveitamento da energia, sendo importante a sua purificação.

3.2. Biogás e Biometano

Walsh *et al* (1996) definem o biogás como sendo o produto da digestão anaeróbica de hidrocarbonetos, gerando uma combinação de metano, dióxido de carbono e outros constituintes. Este biogás foi considerado por muitos anos como descarte de sistemas de tratamento de efluentes. Os fundamentos da obtenção de biogás envolvem a degradação microbiológica dos resíduos orgânicos em um ambiente isento de oxigênio, tendo como principais produtos o metano e o dióxido de carbono.

Segundo a Resolução ANP N° 8 Art. 3º, ficam estabelecidas as seguintes definições: I - Biogás: gás bruto obtido da decomposição biológica de produtos ou resíduos orgânicos; II - Biometano: biocombustível gasoso constituído essencialmente de metano, no mínimo 96%, derivado da purificação do Biogás; III - Gás Natural Veicular (GNV): denominação do combustível gasoso, tipicamente proveniente do gás natural ou biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso

veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP (ANP, 2015);

A Figura 3 ilustra as rotas de obtenção do biometano pelos processos de hidrólise, acidogênese e acetogênese em anaerobiose.

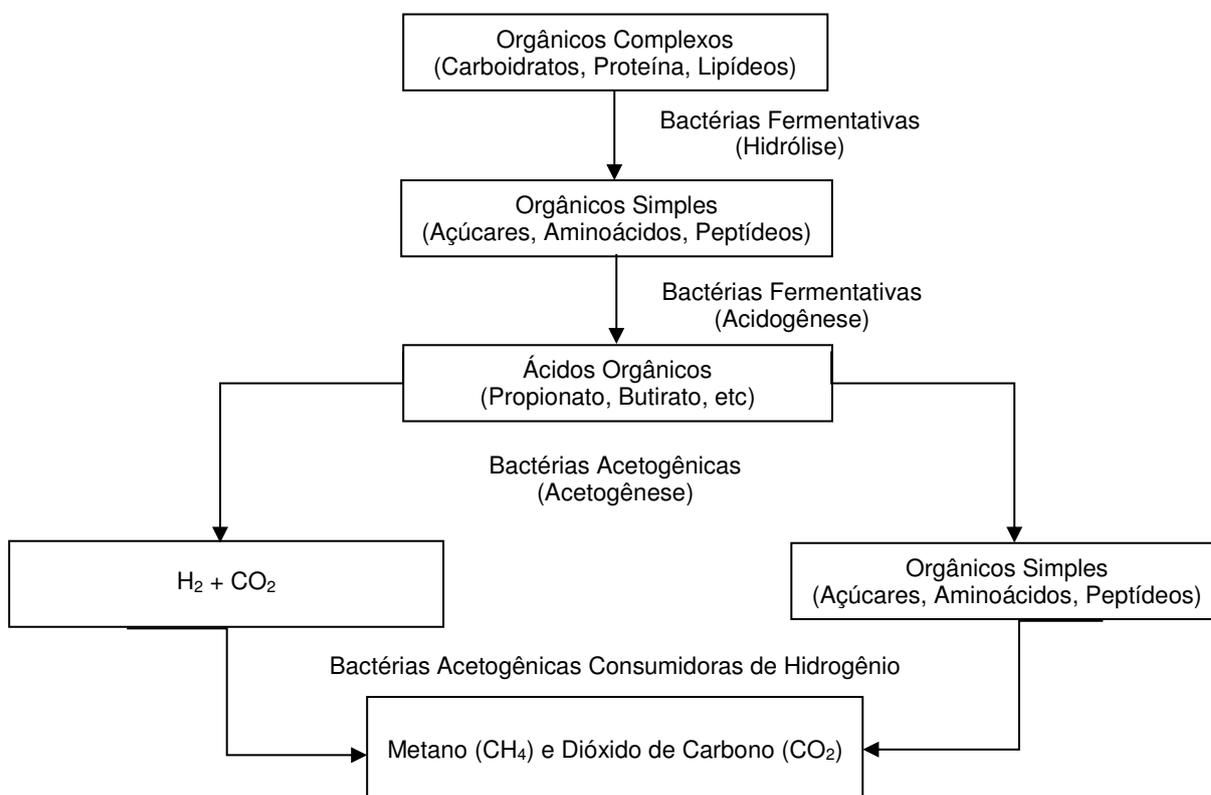


Figura 3 - Produção de biometano
Adaptado de Santos (2016)

De acordo com Lora e Venturini (2012) nas etapas de hidrólise e acidogênese, compostos mais complexos são transformados em compostos mais simples por meio de enzimas extracelulares excretadas por bactérias fermentativas hidrofílicas. Após isto, na etapa de acetogênese onde os compostos previamente formados são oxidados a acetato, H_2 e CO_2 com o objetivo de fornecer substrato apropriado aos microrganismos metanogênicos que a partir das substâncias anteriores podem gerar CH_4 e CO_2 . A partir de acetato, H_2 e CO_2 em meios contendo enxofre, por meio de reação de redução, são produzidos também sulfeto de hidrogênio (H_2S) e CO_2 .

Conforme a Tabela 1, o metano possui excelente poder de combustão, superando diversos outros gases e combustíveis líquidos, porém, o biogás com seus contaminantes, possui baixo poder calorífico que pode prejudicar sua queima e seu

aproveitamento energético.

Segundo Godoy Junior (2010), o biogás tem poder calorífico médio de 5.500 kcal/m³, mostrando poder calorífico inferior aos demais componentes usados para o mesmo fim e, portanto, sendo necessária sua purificação para melhor aproveitamento energético (alta pressão) ou o uso com baixo rendimento (baixa pressão) demonstrado na Figura 4.

Tabela 1. Comparação do Poder de Combustão dos Diferentes Combustíveis
(Adaptado de Singhal *et al*, 2017).

Combustível	Energia de combustão (kcal.m ⁻³)
Butano	11.845
Biogás	5.500
Gasolina	11.217
Diesel	10.552
Gás Natural	12.128
Metano	13.264

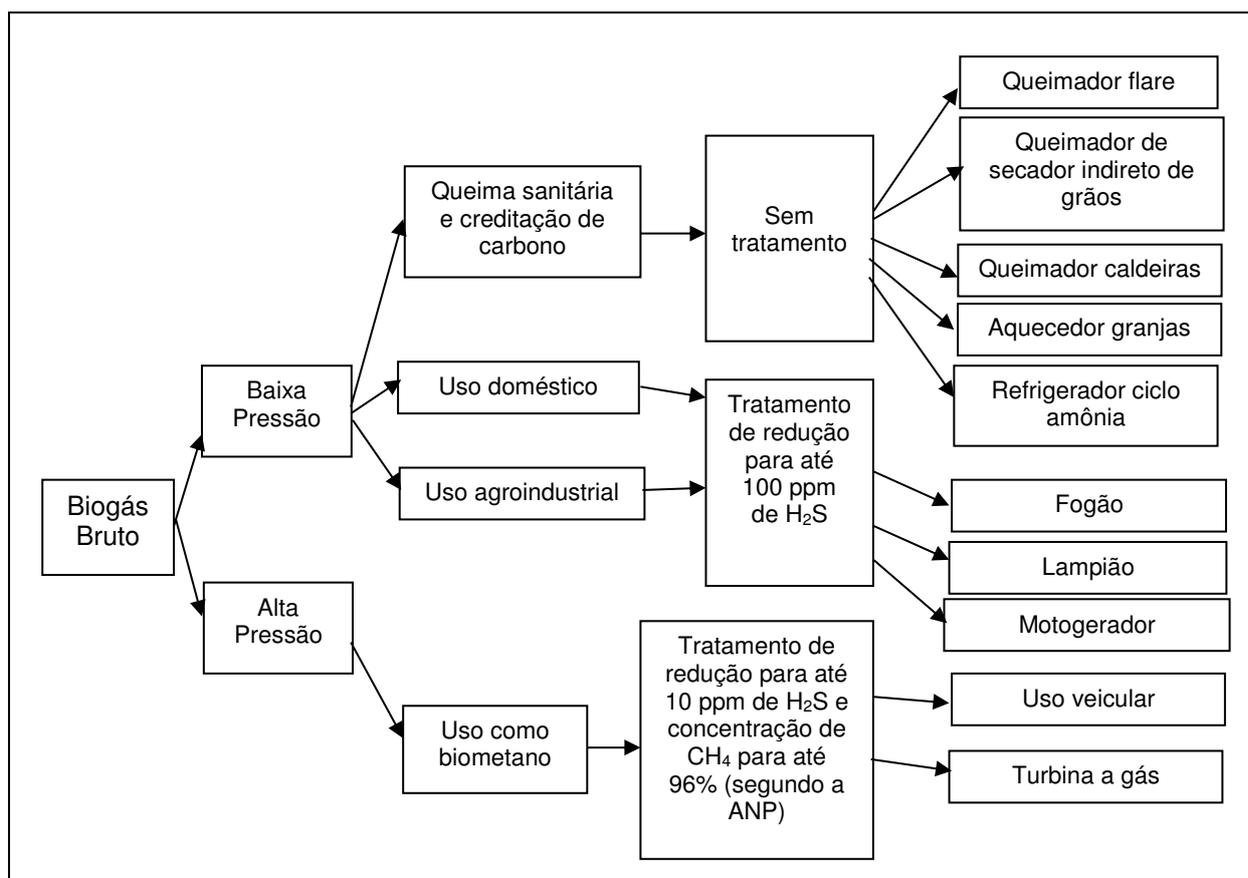


Figura 4 - Fluxograma relacionando o nível de pressão, tratamento e uso do biogás em empreendimentos bioenergéticos rurais e industriais. (Adaptado de Godoy Junior, 2010).

3.3. Biodigestores e Purificação do Biometano

Santos (2016) destaca que a digestão anaeróbica é uma tecnologia

processada em equipamentos com ambiente controlado, denominados biodigestores que sob condições propícias promove o crescimento de grupo de bactérias que degrada o material orgânico e libera gás.

Digestores anaeróbicos são tipicamente utilizados para o tratamento biológico de lodo, estrume e outros resíduos com alto teor de sólidos. Os digestores podem ser de vários tipos como fluxo simples em um estágio, múltiplos estágios ou de alimentação contínua. (Camiloti *et al*, 2014).

Segundo Godoy Junior (2010), os biodigestores podem ser naturais ou artificiais, anaeróbios (sem a presença de ar), aeróbios (com a presença de ar atmosférico) e anóxicos (sem ar atmosférico, porém na presença de aceptores de elétrons, como o nitrato, nitrito, o fosfato e o sulfato).

Biodigestores anaeróbios naturais podem ser exemplificados como os pântanos, o leito de material em decomposição nos rios e lagos, e o intestino de animais de sangue quente, principalmente. Biodigestores artificiais podem ser exemplificados pelos sistemas de biodigestores anaeróbios, sendo os mais importantes e amplamente utilizados para geração de biogás o chinês, o indiano, o tipo batelada e o *UASB* (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Os biodigestores anaeróbios de fluxo ascendente (*UASB*) possuem vantagens em relação aos demais por serem compactos, possuírem baixos custos de implantação e operação, produzirem pouco lodo, possuírem baixo consumo de energia, possuírem boa eficiência de redução de DQO, terem a possibilidade de rápido início e reinício de operação, terem elevada concentração de lodo excedente com baixa produção deste lodo e com baixa hidratabilidade. (Godoy Junior, 2010).

Os primeiros países a utilizarem o processo de biodigestão foram Índia e China, a partir de década de 1950. Em ambientes rurais, os sistemas mais usuais são os sistemas intermitente e contínuo.

No estado da arte, o sistema, em geral, num tanque subterrâneo, de alvenaria ou material plástico, no qual a alimentação de substrato (resíduo) é feita por tubulação de entrada, ocorre a fermentação anaeróbica com microorganismos presentes no lodo, há uma saída lateral do lodo e resíduo fermentado pela e na parte superior o biogás é coletado e acumulado em um gasômetro e há um sistema de controle de vazão e pressão. (Cañote *et al*, 2018).

As Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram modelos de biodigestores indiano, chinês, batelada e *UASB*, respectivamente.

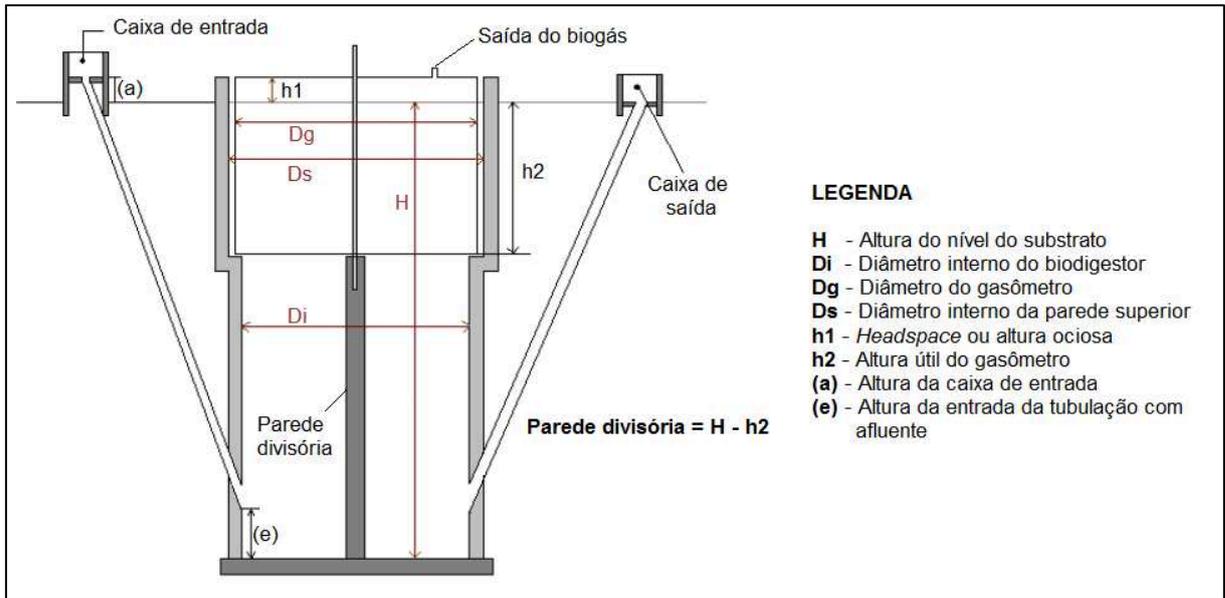


Figura 5. Modelo indiano de biodigestor anaeróbico (Deganutti *et al*, 2019).

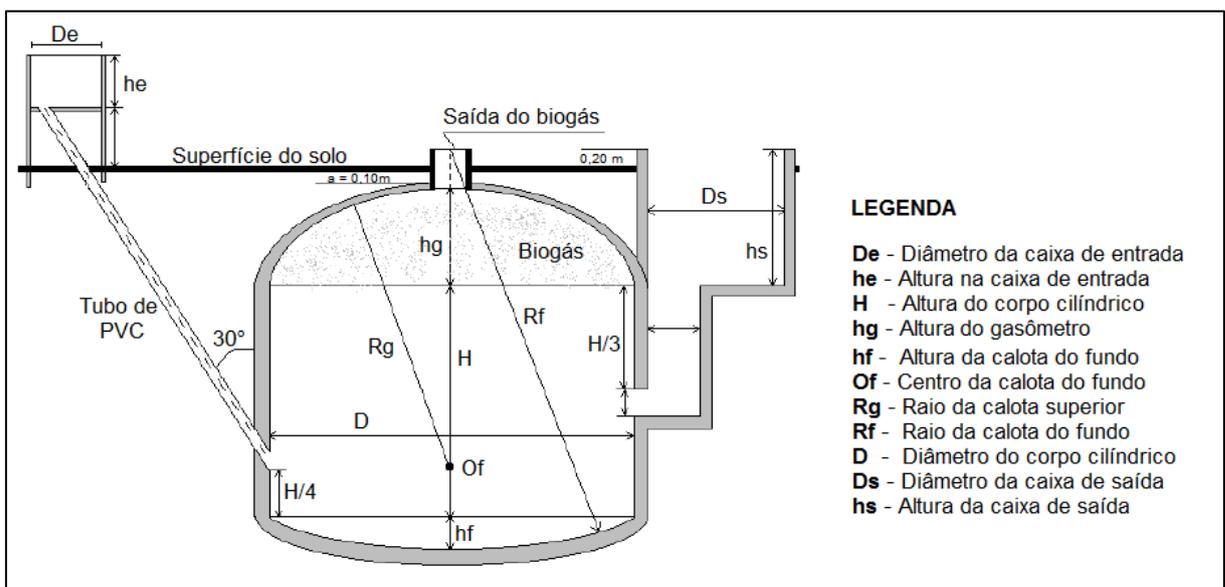


Figura 6. Modelo chinês de biodigestor anaeróbico (Deganutti *et al*, 2019).

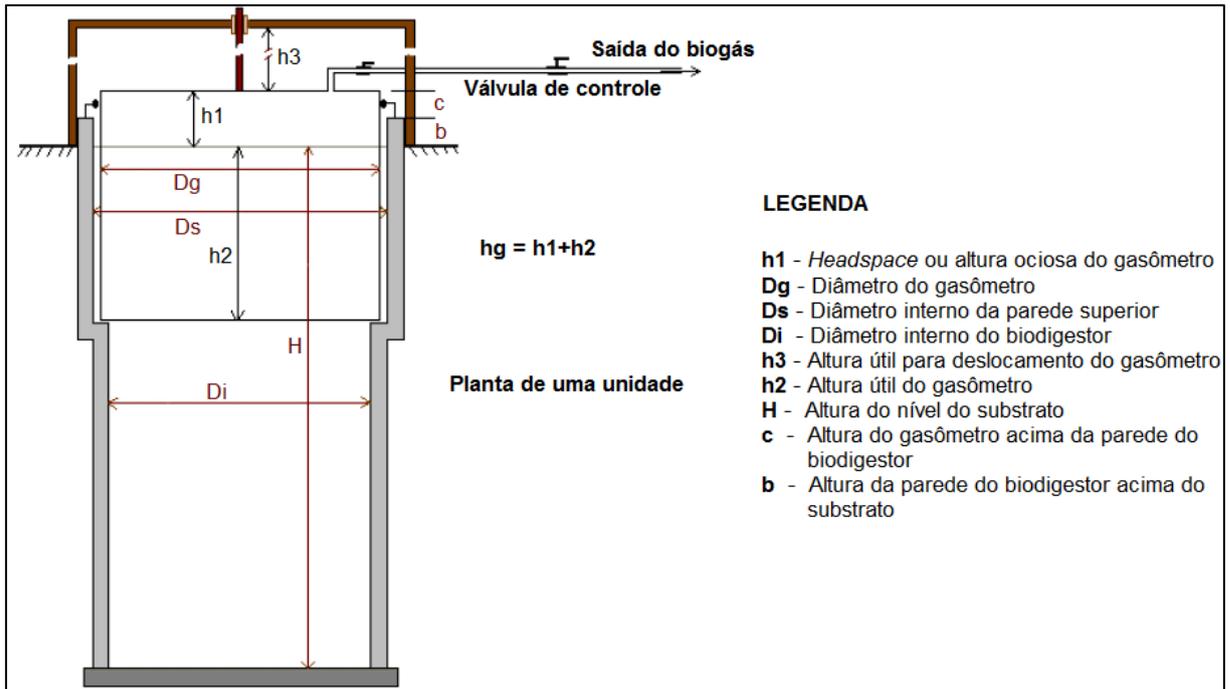


Figura 7. Modelo tipo batelada de biodigestor anaeróbico (Deganutti *et al*, 2019).

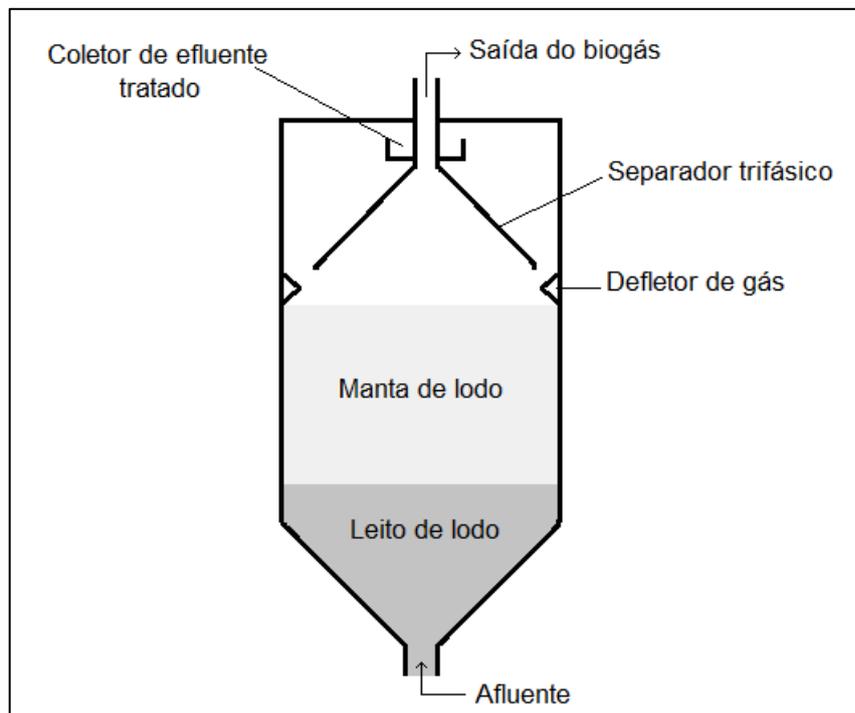


Figura 8. Representação esquemática de biodigestor *UASB* (Adaptado de Bustillo e Mehrvar, 2016)

Santos *et al.*(2017) definiram que dentre os modelos clássicos, chinês, indiano e batelada, o de melhor performance é o indiano, porém, com instalação de sistema de automação do nível de gás e controle de saída. Entretanto, nenhum destes modelos possui a eficácia associada ao modelo contínuo *UASB* que é de

maior aplicabilidade para volumes médios e grandes de resíduos, isto é, pequenas, médias e grandes unidades agrícolas, industriais e de esgotos domésticos.

De acordo com Awe *et al*(2017), o melhor sistema para geração de biogás, em termos técnicos e econômicos é o *UASB*.

Para Borschiver e Da Silva (2015), apesar do grande potencial de uso do biometano, o biogás produzido pela biodigestão anaeróbica oriundo de efluentes contém inúmeros contaminantes que prejudicam os equipamentos de combustão e também a eficiência energética do uso do combustível.

Tabela 2. Composição do biogás e principais contaminantes do biometano.
(Adaptado de Boschiver e Da Silva (2015))

Componente	Teor
CH ₄	45-80%
CO ₂	20-55%
H ₂	0-5%
H ₂ S	0-80.000 ppmv
NH ₃	Traços
CO	0-1%
N ₂	0-2%
O ₂	0-5%
Siloxanos	50 ppmv

Sun *et al.* (2015) definem que o critério técnico de seleção das tecnologias a serem utilizadas para remoção das impurezas deve ser, primeiramente o custo, tanto de investimento quanto de operação do sistema, porém, também deve levar em consideração as barreiras tecnológicas ainda existentes, uma vez que há inúmeros estudos, artigos e pesquisas científicas sobre a eliminação de contaminantes, todavia, há poucas plantas de larga escala instaladas e operando de maneira eficaz ao redor do mundo.

Além das tecnologias de remoção de contaminantes, outro ponto crucial para o controle adequado das rotas de produção de biometano pode gerar metano de alta qualidade e evitar muitos dos contaminantes, incluso os microcontaminantes como ácidos graxos voláteis, é a caracterização adequada do efluente e também o controle do processo de produção de biogás (Aquino e Chernicharo, 2005).

Dos contaminantes presentes no biogás, dióxido de carbono e gás sulfídrico são os principais, sendo que o que apresenta maior criticidade ao seu uso como

biocombustível é o gás sulfídrico originado de gases com altas concentrações de sulfeto. (Dias, 2015).

De acordo com a Figura 9 há algumas rotas para purificação do biogás.

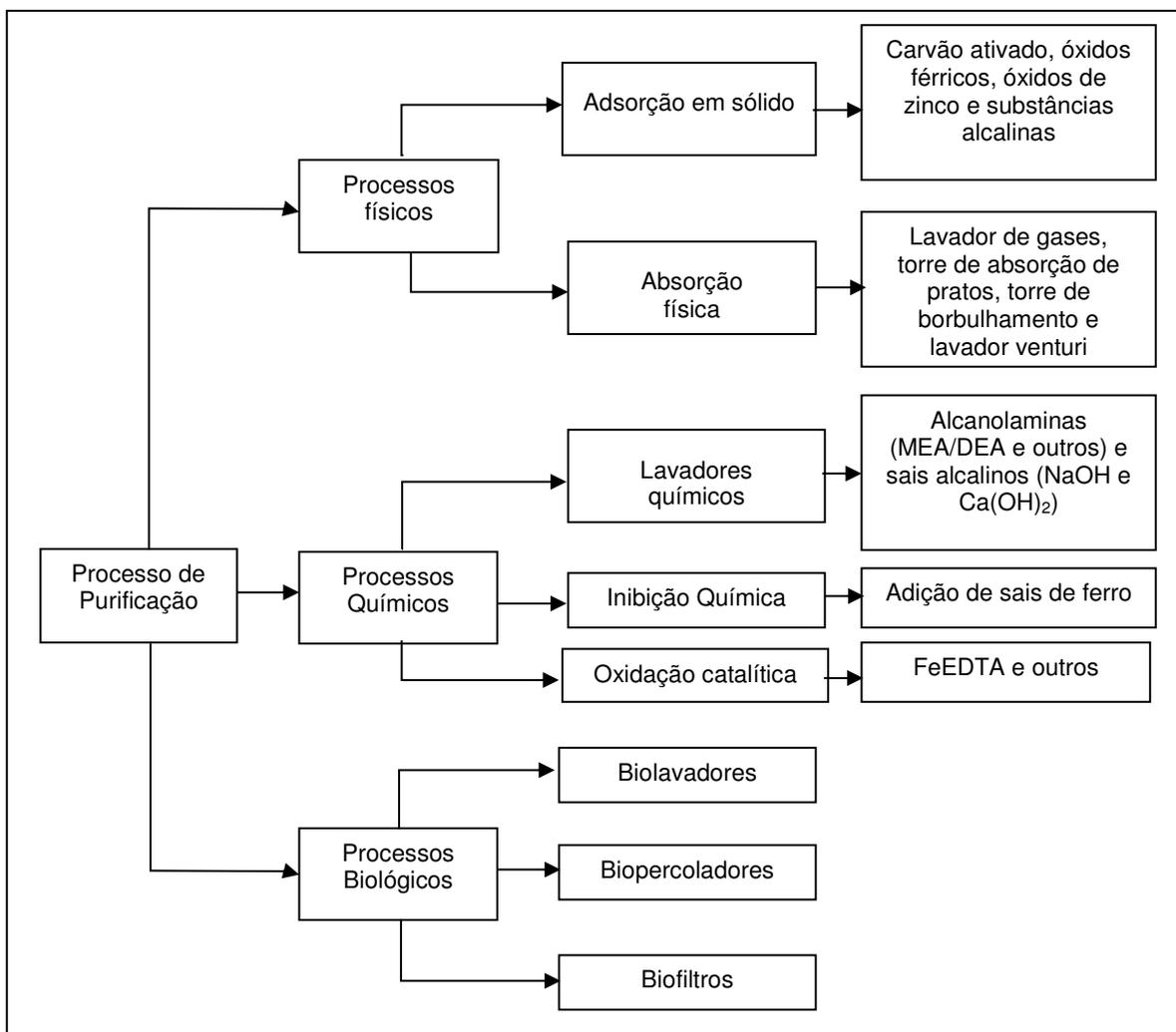


Figura 9. Rotas tecnológicas de dessulfurização de biogás

Fonte: Colturato (2015)

Segundo Colturato (2015), dos processos tecnológicos, os biológicos são os que apresentam maior campo de estudo e possibilidade de desenvolvimento tecnológico por possuírem menores custos de instalações e operação, não gerarem resíduos não-renováveis e não consumirem grandes quantidades de produtos químicos, além de poderem gerar um subproduto de interesse comercial, o enxofre elementar.

Segundo Paudel *et al* (2017), a viabilidade da utilização do biogás como combustível é debatida, particularmente devido aos seus custos substanciais de limpeza e purificação. Sistemas de limpeza de gás são projetados para ajustar as

propriedades naturais de biogás, para que ele atenda às especificações técnicas do equipamento a ser usado. O biogás não é obtido em uma forma pura e normalmente contém numerosos contaminantes gasosos e partículas sólidas. O percentual dos constituintes do biogás e a performance do biodigestor pode variar dependendo da biomassa usada na decomposição e dos pré-tratamentos estabelecidos para a biomassa, conforme Tabela 3

Tabela 3. Valores dos componentes do biogás obtidos de fontes diferentes
(Adaptado de Allegue *et al* 2012)

Componente	Resíduo Agrícola	Lodo de Esgoto	Resíduo Industrial	Aterro Sanitário
CH ₄	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
H ₂ O	Vapor Saturado	Vapor Saturado	Vapor Saturado	Vapor Saturado
H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
H ₂ S	100-700 ppmv	0-10.000 ppmv	0-80.000 ppmv	0,5-100 ppmv
NH ₃	Traços	Traços	Traços	Traços
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Traços
N ₂	0-1%	0-3%	0-1%	0-2%
O ₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Siloxanos	-	-	-	50 mg m ⁻³

A purificação do biogás é feita para isolar o metano dos seus demais constituintes. Quanto maior a concentração de metano, maior o potencial de queima do biogás e, portanto, maior a energia por unidade de massa que ele pode produzir. Assim, do ponto de vista técnico, o uso de métodos de purificação e limpeza que maximizem a concentração de metano do biogás é desejável para seu. (Rodero *et al.*, 2018)

De acordo com Shingal *et al* (2017) a dessulfurização é uma das etapas mais importantes do tratamento de biogás porque a presença de sulfeto de hidrogênio no biometano pode corroer compressores, motores e tanques de armazenamento de gás. A remoção de sulfeto de hidrogênio também é importante porque é de natureza venenosa, um risco ambiental devido à conversão em dióxido de enxofre na combustão e interfere na remoção de dióxido de carbono no processo de melhorias do biogás.

Awe *et al* (2017) demonstraram que a eliminação dos gases sulfídrico e carbônico do biogás torna seu uso viável como biometano, pois o teor de metano

alcançado atende às principais normas internacionais de gás metano. Eles realizaram um revisão completa de todas as tecnologias existentes para purificação de biogás, apontadas nos Quadros 1 (eliminação do gás carbônico) e 2 (eliminação do gás sulfídrico)

Quadro 1. Métodos de Remoção de CO₂ de Biogás
(Adaptado de Awe *et al* (2017))

Tecnologia/Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Absorção em água (<i>Water Scrubbing</i>)	Alta eficiência (>97% CH ₄); Remove simultaneamente H ₂ S; Baixa perda de CH ₄ (<2%); Possível regeneração da água.	Alto investimento e alto custo operacional; Custo: R\$ 0,53 m ⁻³ (US\$ 0,13) Possível formação de espuma; Risco de contaminação bacteriológica; Baixa flexibilidade à variação do gás de entrada. Limitado a baixas vazões.
Absorção (solvente orgânico polietilenoglicol)	Alta eficiência (>97% CH ₄); Remove simultaneamente H ₂ S; Baixa perda de CH ₄ (<2%); Possível regeneração do solvente.	Alto investimento e alto custo operacional; Custo: R\$ 0,27 m ⁻³ (US\$ 0,07); Alta dificuldade operacional; Requer uso de vapor para recuperação do solvente. Limitado a baixas vazões.
Absorção química (aminas)	Alta eficiência (>99% CH ₄); Baixa perda de CH ₄ (<0,1%); Menor custo operacional que com água.	Alto investimento; Não remove H ₂ S; Requer uso de calor para regeneração; Apresenta corrosão de componentes; Há decomposição de aminas gerando substâncias tóxicas; Há precipitação de sais e formação de espuma
PSA (<i>Pressure Swing Adsorption</i>)	Alta eficiência (>95% CH ₄); Baixo uso energético; Remove simultaneamente H ₂ S; Sistema compacto.	Alto investimento e alto custo operacional; Controle intensivo do processo; Pode ocorrer altas perdas de CH ₄ .
Tecnologia com membranas	Alta eficiência (>96% CH ₄); Remove simultaneamente H ₂ S; Construção simples; Operação simples; Pode-se obter CO ₂ puro	Alto custo operacional; Custo: R\$ 1,05 m ⁻³ (US\$ 0,26) Membranas são passivos ambientais; Podem ocorrer perdas de até 10% de CH ₄ .
Separação criogênica	Boa eficiência (90-98% CH ₄);	Alto investimento e alto custo operacional; Alta demanda energética;
Remoção biológica	Alta eficiência (>96% CH ₄); Remove simultaneamente H ₂ S; Baixo custo operacional	Risco de produção de H ₂ ; Não há plantas em larga escala ainda.

Quadro 2. Métodos de Remoção de H₂S de Biogás
(Adaptado de Awe *et al* (2017))

Tecnologia/Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Absorção em água (<i>Water Scrubbing</i>)	Alta eficiência (>97% CH ₄); Remove simultaneamente CO ₂ ; Baixa perda de CH ₄ (<2%);	Alto custo operacional; Não há possibilidade de regeneração da água
Adição de cloretos de ferro no biodigestor (FeCl ₃ , FeCl ₂ /FeSO ₄)	Formação de S elementar; Baixo investimento;	Alto custo operacional (sais de ferro); Baixa eficiência; Pode ocorrer variação de pH e temperatura prejudicando formação de biogás; Não remove CO ₂ .
Óxido e hidróxido de ferro (Fe(OH) ₃ /Fe ₂ O ₃) Lã de ou pellets de aço	Alta eficiência de remoção de H ₂ S (Até 100%);	Alto custo operacional; Sensível à água; Risco de queima pela regeneração; Não remove CO ₂ .
Absorção química Fe(OH) ₃ ou Fe-EDTA	Alta eficiência (>95% CH ₄); Baixo custo operacional	Altíssimo investimento R\$ 13,56 m ⁻³ (US\$ 3,36) Técnica difícil; Não remove CO ₂ .
Absorção química FeCl ₃ /NaOH	Alta eficiência (>96% CH ₄); Baixo custo operacional	Altíssimo investimento Não regenerativa; Não remove CO ₂ .
Remoção biológica	Alta eficiência (>97% CH ₄); Formação de S elementar; Baixo investimento e baixo custo; Remove também CO ₂ . Construção simples; Operação simples;	Requer controle estrito das condições ótimas para as bactérias; Risco de sobras de H ₂ S de até 300 ppmv para efluentes com alto teor de enxofre
Tecnologia com membranas	Alta eficiência (>96% CH ₄); Remove também CO ₂ .	Alto investimento e alto custo operacional; Membranas são passivos ambientais; Solução altamente complexa
Absorção com carvão ativado (Impregnado com KI 1-5%)	Alta eficiência de remoção de H ₂ S (Até 100%); Formação de S elementar; Tecnologia compacta;	Alto investimento e alto custo operacional; Possíveis perdas de CH ₄ ; Regeneração somente a 450 °C.

3.3.1. Purificação usando lavagem com água (WS) ou solvente orgânico

O sistema de lavagem com água (*Water Scrubbing*) ou solvente orgânico (*Scrubbing*) é um dos mais amplamente utilizados e com boa eficiência de purificação do biogás, entretanto, somente quando usado para baixos volumes. O processo envolve duas colunas, uma para absorção e outra para dessorção conforme Figura 10. (Awe *et al*, 2017)

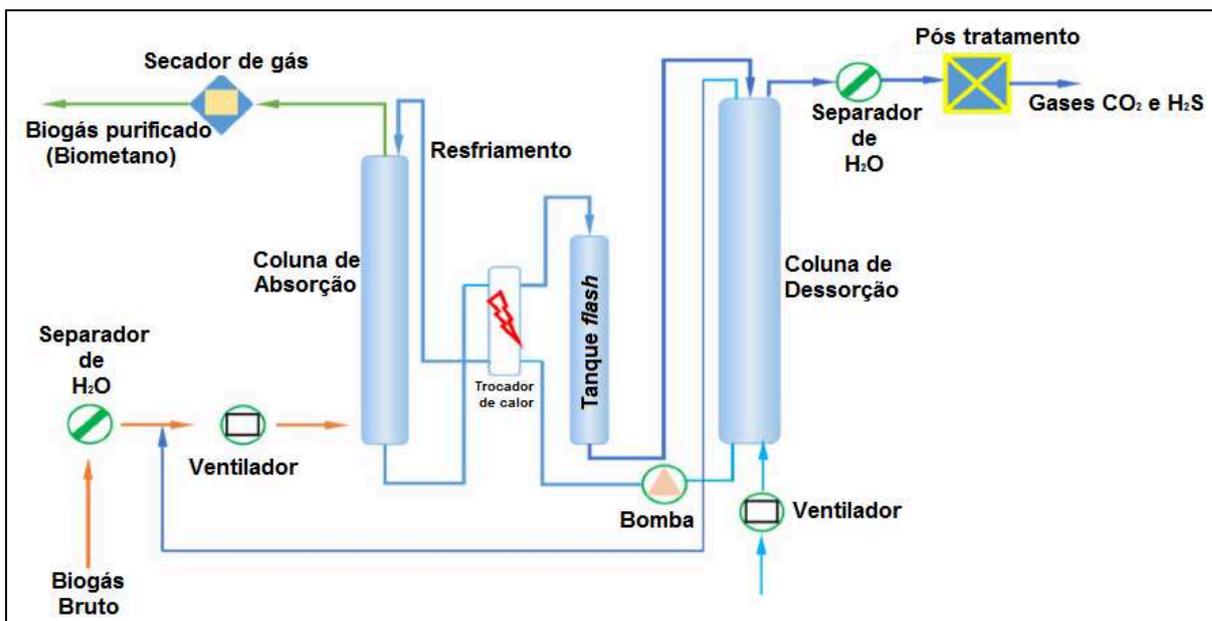


Figura 10. Desenho esquemático do lavador de gases com água ou solvente orgânico (Fonte: Adaptado de Awe *et al*, 2017)

O sistema usa água pressurizada ou solvente orgânico (polietilenoglicol) pressurizado em gotículas de spray para facilitar a absorção dos contaminantes, em esquema de contracorrente com o fluxo de biogás que é pressurizado e injetado na base da torre de lavagem. Assim, o processo de absorção ocorre devido ao CO_2 e o H_2S terem maior solubilidade em água que o metano CH_4 . (Miltner, 2017)

O CO_2 e o H_2S dissolvidos em água geram ácido carbônico, H_2CO_3 , e o ácido sulfídrico que são coletados na torre de absorção, gerando um gás mais rico em metano, CH_4 . A água ou solvente que sai da coluna de absorção segue para um trocador de calor, depois um tanque *flash* e finalmente para o tanque de dessorção, onde o gás dissolvido é lançado na atmosfera enquanto água ou solvente degaseificado é reenviado ao sistema. A água pode ser reciclada quando alimentada em direção oposta ao fluxo de ar usado na primeira coluna de lavagem de biogás, conforme Figura 10 acima.

Com esse sistema de purificação do biogás, há possibilidade de obtenção de CH_4 puro, desde que fatores como dimensões da coluna de lavagem, pressão do biogás, controle de perdas e pureza da água utilizada sejam controlados. Países como Suécia, França e Estados Unidos tem, frequentemente, usado este processo para remoção de CO_2 e H_2S . Porém, estudos demonstram que 10% do CO_2 total permanece associado ao biogás após o processo. (Miltner, 2017).

A principal vantagem do uso deste sistema é sua eficiência e a principal desvantagem são os custos envolvidos.

3.3.2. Purificação usando absorção química com aminas

Utiliza o mesmo princípio que lavagem com água ou solvente que é a transferência de massa de biogás-líquido, porém, ocorre a reação química entre o solvente e as substâncias absorvidas. As substâncias absorventes utilizadas são mono etanol amina (MEA) ou di-metil etanol amina (DMEA) e soluções aquosas alcalinas como KOH, K_2CO_3 , NaOH, $Fe(OH)_3$. A unidade consiste em um leito fixo (aleatório ou estrutural) associado a uma unidade de dessorção equipada com reboiler para simplificar a configuração do processo, sem risco de crescimento de biomassa como resultado de pH alto das soluções de amina (Awe *et al.* (2017)).

O H_2S deve ser removido previamente devido ao risco de envenenamento por amina. Todo o processo está esquematizado na Figura 11.

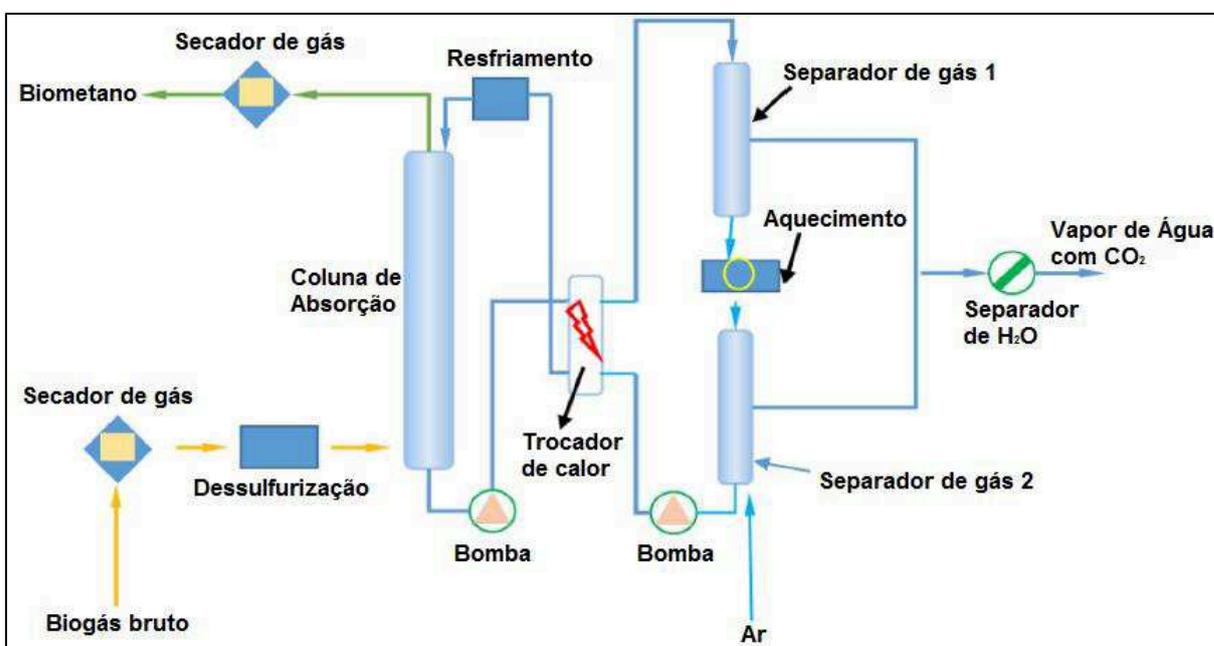


Figura 11. Desenho esquemático do sistema de absorção química com aminas (Fonte: Adaptado de Awe *et al.*, 2017)

3.3.3. Purificação por variação de pressão de adsorção (PSA)

O sistema de variação de pressão de adsorção (PSA) é geralmente usado para separar componentes de uma mistura de gases sob pressão, considerando as características moleculares e capacidade de adsorção em material destes gases. O método PSA possui grande versatilidade e é considerado um sistema de adsorção com modulação de pressão. A Figura 12 representa o modelo do sistema PSA (Silva, 2009)

A Figura 12 demonstra que o material de adsorção selecionado para esta aplicação inclui carvão ativado, sílica gel e alumina, que são materiais comumente selecionados como filtros moleculares em filtros com aplicação de pressão.

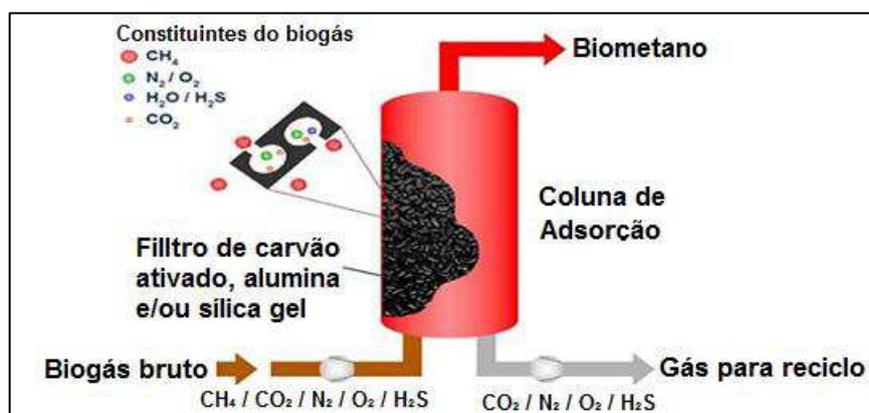


Figura 12. Desenho esquemático do sistema PSA (Silva, 2009)

O processo de adsorção é realizado pela injeção do biogás na base da coluna de absorção onde CO_2 , H_2S , N_2 , e O_2 ficam retidos, ocasionando que na saída superior da coluna há um gás com concentração alta de CH_4 porque este gás é pouco adsorvido pelo material da coluna. De acordo com Monteiro (2009) através do sistema PSA é possível separar de maneira efetiva o CO_2 , entretanto, há necessidade de cuidados especiais para a remoção do H_2S por se tratar de um gás tóxico que é absorvido de forma irreversível pelo recheio da coluna. A água também é removida por este sistema devido a contaminar e prejudicar o uso do biometano.

O processo de regeneração é realizado através da sequência de despressurização da coluna até atingir a pressão atmosférica, seguida pelo retorno às condições de vácuo da coluna. O gás retirado da coluna nesta etapa contém grandes quantidades de CH_4 que será reciclado em recirculação através do biogás purificado. A regeneração é assistida por uma purga contendo pequena quantidade de produto purificado.

Antes da etapa de adsorção, cada coluna é despressurizada para as condições necessárias com gás para equalização de pressão em toda a coluna com uma mistura de produto purificado com biogás bruto. Este ciclo é repetido periodicamente, atingindo operação contínua. É feito o uso de um modo de operação em multi camadas de equipamentos.

As vantagens deste sistema estão relacionadas à minimização do consumo de energia elétrica e atingimento de alta concentração de metano no gás final, cerca de 98%.

As desvantagens estão associadas com a perda significativa do que fica adsorvida à superfície sólida do filtro.

Alguns fornecedores desta tecnologia aperfeiçoaram o sistema usando quatro unidades de adsorção, tornando possível a recuperação de, aproximadamente, 98% do metano. Estes sistemas requerem um controle apurado e constante manutenção, devido suas complexidades. (Monteiro, 2011)

O sistema é composto por quatro colunas de adsorção em um sistema operacional regenerativo da coluna. Antes da primeira coluna ficar completamente saturada com impurezas, a fase de adsorção é interrompida e o gás é direcionado para outra coluna que já foi regenerada, garantindo ao sistema operação contínua e melhor eficiência. (VUT, 2012)

3.3.4. Purificação por separação criogênica

Esta é uma tecnologia mais recente e de uso apenas em escala laboratorial. Utiliza a diferença de temperatura para separar os gases. CO₂ tem um ponto de ebulição de -78 ° C, enquanto o metano é de -160 ° C, resultando na separação do CO₂ do biogás, através do resfriamento das misturas gasosas a pressão elevada, conforme Figura 13. Neste sistema, o biogás bruto é pressurizado e resfriado até os gases nele contida se liquefazem. Na coluna de destilação, em diferentes temperaturas, os gases são separados conforme ponto de ebulição (Awe *et al.*, 2017)

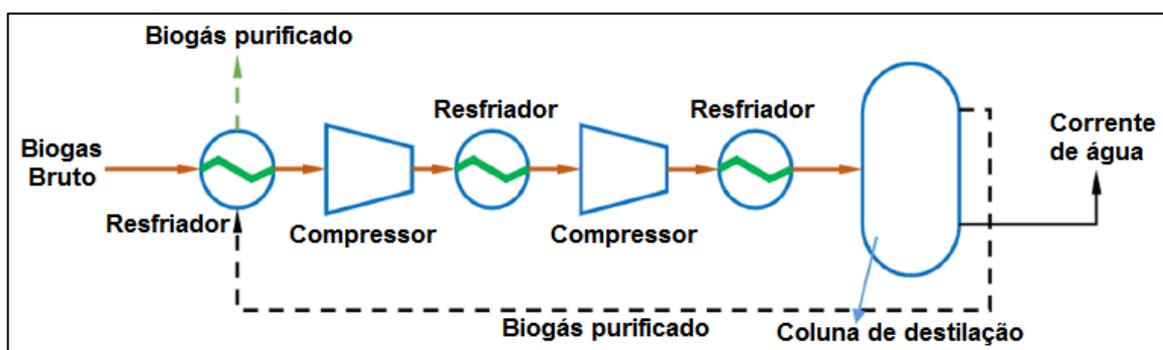


Figura 13. Desenho esquemático do sistema purificação por separação criogênica
(Fonte: Adaptado de Awe *et al.*, 2017)

3.3.5. Purificação por membrana

O processo de purificação por membrana envolve a aplicação de membranas específicas para purificação e enriquecimento do biogás. Nos últimos anos a aplicação desse processo vem reduzindo suas desvantagens financeiras, através da redução do valor de investimento. Ele possui fácil operação, baixo impacto ambiental, capacidade de secagem do gás e alta confiabilidade (Shingal *et al*, 2017).

O sistema consiste da passagem do biogás através de uma membrana fina (<1 mm) na qual alguns compostos ficam retidos (Silva, 2009). O transporte de cada um dos componentes ocorre através da membrana devido às diferenças de pressão parcial dos gases e depende da permeabilidade do material da membrana. Desta forma, as duas características básicas que definem a performance da membrana são: (1) permeabilidade, associada com o fluxo dos gases através da membrana e (2) seletividade que define a preferência de passagem ou retenção dos gases. A Figura 14 demonstra o processo de filtração de biogás através de uma membrana.

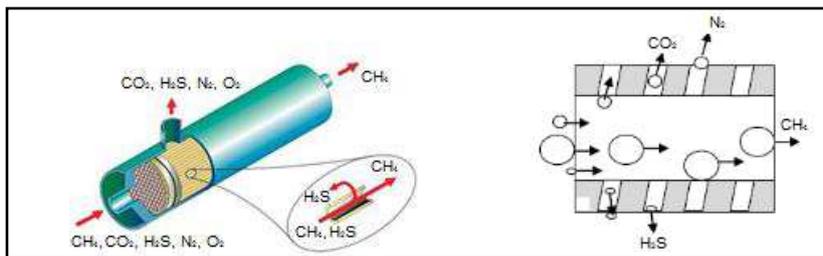


Figura 14. Processo de filtração de biogás usando membranas (Adaptado de Medal, 2016)

Para utilizar um sistema de purificação de biogás para obter o gás metano (CH_4) é necessário utilizar uma membrana com alta permeabilidade para alcançar a pureza desejada. Uma membrana eficaz é constituída de polímeros de etil celulose que é de 20 a 60 vezes mais permeável ao gás carbônico (CO_2) e ao sulfeto de hidrogênio (H_2S) do que ao CH_4 . Adicionalmente, a membrana deve ser feita de material permeável ao vapor de água e amônia. Para isto ser possível, a pressão de operação do sistema varia entre 25 e 40 bar. A Figura 15 ilustra a separação seletiva através da membrana permeável.

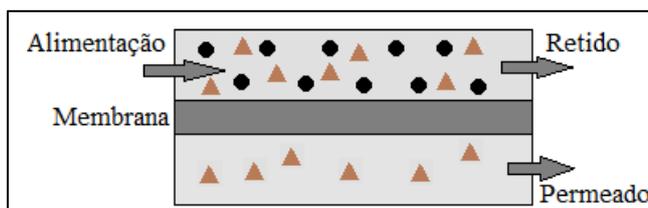


Figura 15. Processo de separação de metano por separação seletiva (Silva, 2009)

H_2S , CO_2 , N_2 e O_2 podem passar através de membrana de maneira

razoavelmente fácil, enquanto o CH₄ não consegue ficando retido. Além disso, antes de passar por essa membrana, o biogás é filtrado para reter água e gotículas de óleo, que, se não eliminadas, podem comprometer o funcionamento da membrana. A diferença de pressão parcial do sistema aumenta o fluxo de gás através da membrana proporcionalmente. Assim, quanto maior a diferença de pressão, menor a área de membrana necessária. No entanto, a pressão máxima que a membrana pode suportar deve ser considerada, pois alta pressão na membrana pode ocasionar grandes perdas de CH₄. A vida útil da membrana é de até três anos, após o que pode ocorrer perda de permeabilidade devido à saturação. (Silva, 2009)

3.3.6. Purificação com colunas de limalha de ferro - óxido e hidróxido de ferro Fe(OH)₃/Fe₂O₃ com lã ou pellets de aço

Estudos demonstram que este é um dos mais antigos métodos de remoção de H₂S do biogás. A técnica foi introduzida na Europa a mais de um século atrás e continua sendo amplamente utilizada na purificação do biogás. (Godoy Junior, 2010).

De acordo com Bui (2007) o processo de purificação ocorre pela injeção de biogás seco através de uma coluna de pó de ferro oxidado na forma de óxido férrico (Fe₂O₃) com coloração alaranjada, que resulta na dessulfurização de biogás pela redução de H₂S que é retido na forma de sulfeto férrico (Fe₂S₃) de acordo com a equação 1.



Como o recheio da coluna se satura, visivelmente identificado pela mudança para coloração preta, ele precisa ser regenerado através da passagem de oxigênio de modo controlado através do filtro. Este processo deve ser feito de maneira lenta, devido à reação ser exotérmica, para prevenir combustão e queima do recheio da coluna. Esta reação de regeneração segue descrita na equação 2. Como precaução, para prevenir a combustão espontânea do sulfeto férrico (Fe₂S₃), recomenda-se umedecer periodicamente o filtro com spray de água.



Neste sistema recomenda-se a operação com duas colunas de filtro paralelas, com controle individual, para operar uma com filtração, enquanto a outra fica em

regeneração, alternando-se esta configuração e mantendo o sistema em operação contínua, devido à saturação do ferro demonstrada na Figura 16.



Figura 16. Saturação de limalha de ferro após tempo de uso
(Fonte: Bui *et al* 2007)

As vantagens desta técnica são o baixo custo de operação, simplicidade de instalação e a possibilidade de remoção completa do sulfeto de hidrogênio pela sua reação com óxido de ferro gerando sulfeto férrico. Dependendo da vazão, concentração e tempo de exposição, o óxido férrico pode ser usado na forma de lâ de aço, aparas de corte, limalha e resto de ferrugem. (Godoy Junior, 2010)

Óxido férrico é conhecido como “esponja de ferro” e pode ser usado em diferentes formas como lâ de aço, cavacos e lascas. Aparas de madeira impregnadas com óxido de ferro podem ser usadas como leitos de suporte do processo, elevando a porosidade e reduzindo a queda de pressão de gás. Madeira de pinho é uma boa opção devido a ter boa área superficial disponível. (Godoy Junior, 2010).

3.3.7. Remoção de H₂S pela adição de cloretos de ferro no biodigestor (FeCl₃, FeCl₂/FeSO₄)

O H₂S pode ser reduzido pela adição de Fe²⁺ ou Fe³⁺ na forma de FeCl₂, FeCl₃ e Fe(SO₄)₂ no digestor ou no influente do tanque de mistura, sendo o FeCl₂ o mais regularmente usado como Fe²⁺ que reage com S²⁻, levando a formação de sulfeto de ferro (FeS) insolúvel de acordo com a equação 3. (Awe *et al.*, 2017)



Este método é bastante simples, porém possui baixa eficiência e custos altos com os sais de ferro.

3.3.8. Absorção química usando Fe(OH)₃ ou FeCl₃/NaOH ou Fe-EDTA

A remoção de H₂S através da transferência de massa, pode ocorrer através da adição de reagentes como FeCl₃/ NaOH, Fe(OH)₃ e Fe/EDTA. Para todos estes

reagentes o mecanismo básico de eliminação do gás sulfídrico é regido pela equação 4



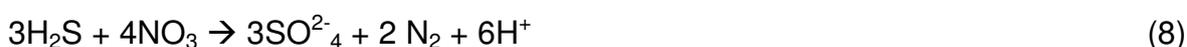
Dos reagentes envolvidos nestas reações, o mais comumente utilizado é o ferro quelado em presença de EDTA pelos custos menores em relação aos demais e maior capacidade de regeneração.

3.3.9. Remoção biológica

Awe *et al.* (2017) compilaram informações de tecnologias biológicas para remoção de contaminantes e descreveram que, basicamente, o consumo dos contaminantes alvo por microorganismos são regidos pelas equações 5 e 6, para CO_2 e H_2S , respectivamente:



Em ambos os casos, há dependência da presença de hidrogênio e oxigênio e estes gases podem ser fornecidos em ambientes anóxicos, conforme descrito anteriormente por Montebelo *et al* (2012) e descrito nas equações 7 e 8:



3.3.9.1. Torre de dessulfurização em ambiente anóxico

A operação de uma torre de biodessulfurização é um sistema que converte H_2S em enxofre elementar que é demandado pelas indústrias químicas e na área agrícola. (Montebelo *et al*, 2012)

De acordo com Montebelo *et al* (2012) sua operação é baseada na introdução e percolação de biogás rico em H_2S em um ambiente anóxico, mas na presença de solução de nitrato e microorganismos dessulfurizantes. A solução de nitrato pode ser obtida sinteticamente ou através de tratamento aeróbio de resíduos orgânicos contendo amônia como lodo e efluente líquido anteriormente destinado a tratamento aeróbio. O biogás é introduzido no fundo da coluna e o biometano coletado no topo da coluna. (Montebelo *et al*, 2012)

Internamente, a coluna de biodessulfurização é preenchida com elementos filtrantes termoplásticos, similares a cilindros perfurados aletados, chamados anéis de Pall. (Figura 17)

A diferença entre este sistema de dessulfurização e outros está na adição de um reator anóxico de inoculação de lodo neste sistema, ou no uso da área anóxica de um efluente de uma planta de tratamento aeróbico nas torres de bio-dessulfuração.

Depois de iniciar o sistema e recircular o efluente anóxico em contracorrente ao fluxo de biogás, um biofilme rico em *Thiobacillus ferrooxidans* cresce e cobre os elementos filtrantes e promove a conversão de H₂S em enxofre elementar. A fixação do enxofre elementar no biofilme, ou sua precipitação no fundo da torre, possibilitando sua recuperação, é vista como uma vantagem econômica significativa, já que este subproduto da biometanização tem alto valor agregado. (Montebelo *et al*, 2012)

Devido ao sistema possuir torres preenchidas com anéis Pall que aumentam a superfície de contato do biogás com a solução anóxica a área ocupada para tratamento de grandes volumes de biogás é pequena comparada com a capacidade de purificação. Outra vantagem deste sistema é o baixo consumo energético, pequeno consumo de produtos químicos e não geração de passivos ambientais. Como desvantagem, por se tratar de um sistema biológico, há necessidade de controle e gestão constante do sistema para assegurar a eficácia de funcionamento e o teor de pureza do biometano obtido. (Montebelo *et al*, 2012).

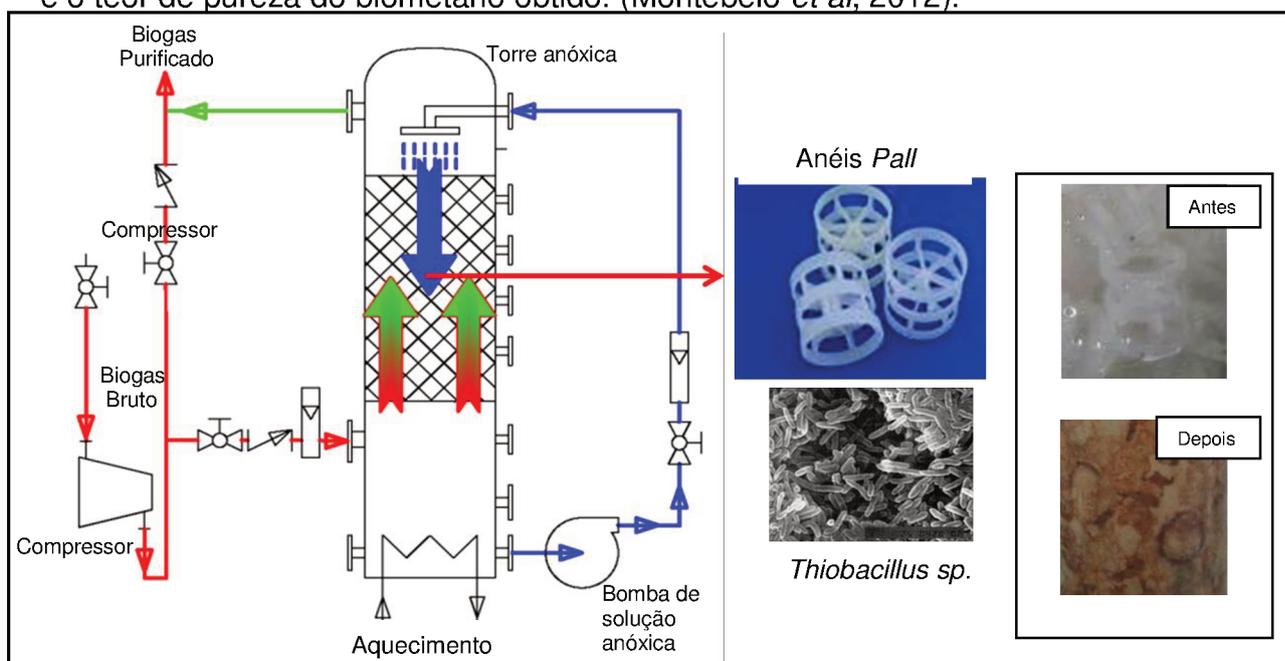


Figura 17 – Representação de uma torre anóxica de dessulfurização com uso de bactéria *Thiobacillus ferrooxidans* e anéis Pall antes e após formação de enxofre elementar (Fonte: Montebelo *et al*, 2012)

3.3.10. Sistemas de purificação com múltiplas barreiras (bioquímica, seguida de físico-química)

Baseado nas análises das tecnologias disponíveis para purificação de biogás, Awe *et. al.* (2017) sugere não existir uma solução única para tal fim e propõe a utilização de um sistema híbrido que combine diferentes técnicas. Esse sistema também pode ser definido como de múltiplas barreiras.

O principal sistema de múltiplas barreiras consiste na remoção da principal ou maior fração de H₂S bioquimicamente, por ser a forma mais eficaz e econômica, seguida da remoção físico-química da fração residual de gás sulfídrico, além do gás carbônico e outros microcontaminantes (Marín *et al.*, 2018),

A principal fração do H₂S pode ser removida bioquimicamente por meio de uma ou várias tecnologias: torres anóxicas, usando nitrato como aceptor de elétrons; foto-reatores onde as algas promovem a oxidação do H₂S; e micro aeração no topo de digestores anaeróbicos (Godoy Junior, 2010).

A remoção da fração residual de H₂S também pode ser realizada exclusivamente bioquimicamente como o caso do sistema de torre anóxica, mas a combinação de tecnologias bioquímicas e métodos físico-químicos permite maior segurança operacional e garante a qualidade do biometano final. (Godoy Junior, 2010).

Um exemplo de um sistema multiplas barreiras é ilustrado na Figura 18. Ele envolve a instalação de uma torre de dessulfuração, preenchida com anéis Pall, revestidos com a bactéria do biofilme *Thiobacillus ferroxidans*, através da qual o biogás circula em contracorrente ao efluente nutricional. Isto é seguido por um sistema em paralelo com filtros de cavacos oxidados redundantes (Montebelo *et al*, 2012).

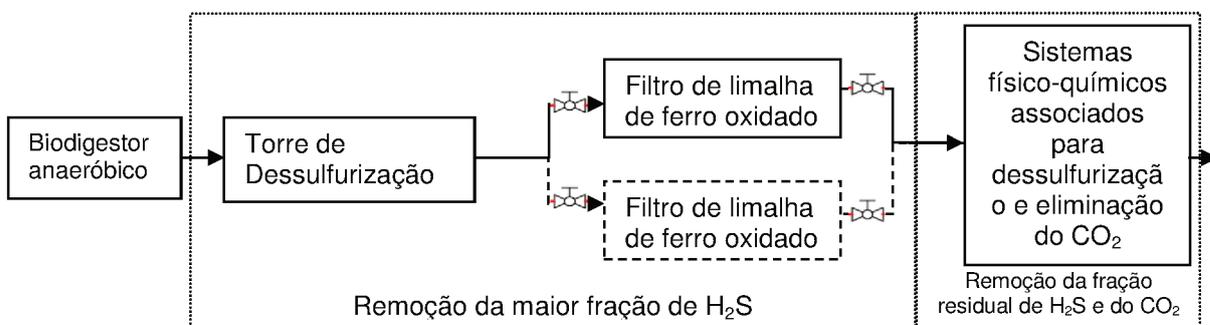


Figura 18 – Sistema de dessulfuração com múltiplas barreiras para remoção das frações grossa e residual de H₂S do biogás e do CO₂ (Fonte: Adaptado de Santos, 2016 e Awe *et al*, 2017).

Para a remoção do dióxido de carbono, utiliza-se uma das soluções físico-químicas, como *water scrubber*, PSA ou membranas. Outra possibilidade de eliminação de CO₂, segundo Awe *et al* (2017) é inserir um sistema de purificação biológica acoplado à torre anóxica, usando microorganismos específicos, como microalgas ou bactérias fixadoras de carbono.

O sistema de múltiplas barreiras garante um fornecimento seguro de biometano, uma extensão da vida útil dos elementos filtrantes físico-químicos e uma redução considerável na produção de passivos ambientais, no caso de elementos que não são reutilizáveis nem recicláveis existentes em sistemas convencionais de purificação de biogás.

3.4. Análise técnico-econômica de tecnologias e modelo de negócios

3.4.1. Análise técnica

Análises técnicas de projetos e tecnologias são feitas com base em metas relacionadas, em termos qualitativos e quantitativos, com funcionalidade, especificações técnicas, orçamento disponível, tempo de execução e impactos sociais, econômicos e ambientais (Liu e Walker, 1998).

Com relação a processos de purificação de biogás, as metas de avaliação das tecnologias, considerando o estado da arte, definido por Liu e Walker (1998) podem ser estabelecidas como:

- Funcionalidade: pureza do biometano (>96% de metano) (ANP, 2015);
- Especificações técnicas: disponibilidade da tecnologia em escala industrial;
- Orçamento disponível: menor necessidade de investimento;
- Tempo de execução: menor tempo para instalação e validação;
- Impactos sociais: menor impacto negativo aos *stakeholders*;
- Impactos econômicos: melhores indicadores para os parâmetros de viabilidade econômica;
- Impactos ambientais: menores impactos ambientais possíveis.

3.4.2. Análise econômica

De acordo com Abreu (2009), os melhores métodos de análise econômica para projetos com biogás são o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

O VPL é definido como somatório dos custos e das receitas líquidas do projeto (ou previstas) durante sua vida econômica, trazidos à data de atualização do fluxo de caixa, utilizando-se para isso a taxa de desconto apropriada: a taxa mínima de atratividade - TMA - do segmento de negócio. (Abreu, 2009).

Sua fórmula é definida pela equação 9, como:

$$VPL = \sum_{K=0}^n \frac{E(CF_k)}{(1+i)^{k+j}} \quad (9)$$

Onde:

E – Valor Esperado

CF – Valor genérico do fluxo e caixa líquido

i – Taxa de desconto = TMA

k – período no instante k do fluxo de caixa

j – posição do vetor no período – (início = 0)

A TIR é a taxa de retorno implícita no fluxo de caixa (equação 10), que só depende da relação entre os valores positivos e negativos, a qual iguala esses desembolsos aos embolsos com isso tornando o VPL=0.

$$0 = \sum_{K=0}^n \frac{E(CF_k)}{(1+TIR)^{k+j}} \quad (10)$$

Se a TIR for maior que o custo de capital, se aceita o projeto; se for menor, rejeita-se o projeto. Com esse critério garante-se que a empresa esteja obtendo, pelo menos, sua taxa devida de retorno. Mas apenas esse critério conceitual de decisão sobre a TIR não basta para a tomada de decisão do investidor. Por isso, o projeto para ser realizado deve ter uma TIR positiva e maior rentabilidade que outras opções de investimentos em projetos e/ou no mercado financeiro. (Abreu, 2009)

A TMA é definida como a taxa de desconto que exige o retorno mínimo do projeto em análise, em função do seu risco de mercado, de modo a assegurar a remuneração do capital próprio e do capital de terceiros. Essa taxa é o Custo Médio Ponderado de Capital – CMPC. (Abreu, 2009)

3.4.3. Modelo de Negócios

O raciocínio por trás da pesquisa do modelo de negócios não é a compreensão de um fenômeno, mas sim uma abordagem de uma descoberta para a solução de problemas (Osterwalder, 2004).

De acordo com Osterwalder e Pigneur (2010), um modelo de negócio descreve a lógica de criação, entrega e captura de valor por parte de uma organização ou empreendimento. A captura de valor foi organizada por Osterwalder e Pigneur (2010) no modelo de negócios denominado Canvas® que agrupou neste modelo inúmeros modelos de negócios existentes e oferece respostas referente ao planejamento estratégico do empreendimento conforme as perguntas feitas:

- O que será empreendido? Proposição de valor do negócio;
- Como será realizado? Atividades chave; Recursos-chave; Rede de parceiros;
- Para quem será feito? Clientes; Canais; Relacionamento com clientes;
- Quanto? Estrutura de custos; Fluxo de Receitas.

O modelo de negócios Canvas® é organizado visualmente, conforme Apêndice I deste trabalho.

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente estudo foi dividida em três etapas:

- Etapa 1: Definição técnica da melhor tecnologia para geração e purificação do biogás através de pesquisa teórica e revisão de literaturas disponíveis para definição do conceito inicial do projeto proposto, sem testar diversas tecnologias, pois já há estudos científicos suficientes que definem o melhor processo para obtenção e purificação de biogás;

- Etapa 2: Pesquisa experimental para o desenvolvimento adequado do sistema de geração e purificação de biogás a partir de resíduos industriais de uma fábrica de alimentos para avaliar o potencial total de geração de biometano e fazer sua avaliação de viabilidade, técnica e econômica, conforme previsto nos objetivos. Definiu-se esta etapa com o uso de pesquisa experimental, pois o efluente da indústria de alimentos objeto de estudos possui variáveis independentes que serão estudadas através de teste laboratorial e simulação em larga escala para definição do potencial de biometano gerado.

- Etapa 3: Avaliação estratégica do negócio de produção e uso do biometano, utilizando da ferramenta de Canvas.

A parte teórica do estudo envolve o levantamento das técnicas atuais e estudos mais recentes para a geração e purificação do biogás e a análise teórica destas, de modo a se concluir qual é a mais adequada para implementação real. Esta análise teórica consiste em avaliar comparativamente as tecnologias disponíveis para implementação para definição da mais adequada pontuando-as e classificando-as.

A parte experimental e laboratorial consiste na análise dos efluentes de uma indústria de alimentos e sucos e proposição de um sistema em ciclo fechado para geração e purificação do biogás, bem como sua análise técnico-econômica para que ocorra a instalação da mesma e para que o biometano gerado a partir do efluente seja utilizado em substituição parcial ao gás natural para ser usado na caldeira da empresa de modo a gerar energia na forma de vapor. Importante destacar que a avaliação laboratorial teve por objetivo apenas definir o potencial de geração de biometano e não otimizar seu processo de obtenção, pois o presente trabalho não abrange otimização em seu escopo.

A avaliação do modelo de negócios consiste no uso da ferramenta Canvas® para o planejamento estratégico da implementação da planta industrial de biometano.

4.1. Pesquisa teórica - Análise técnica das metodologias de geração e purificação existentes

Conforme revisão bibliográfica, sendo a mais importante e atual a de Awe *et al.* (2017) é indiscutível que para geração de biogás a partir de resíduos orgânicos líquidos o *UASB* é a tecnologia mais apropriada, empregada, amplamente disponível e com disponibilidade.

A decisão sobre os métodos para converter o biogás em biometano depende do objetivo da aplicação. Cada processo de purificação de biogás tem como principal objetivo a maximização do teor de CH_4 na mistura final de biometano.

Tecnicamente os melhores métodos devem garantir a pureza final do biometano e ser tecnologicamente disponível em larga escala.

Além do viés técnico, o processo deve apresentar bom viés econômico, dispendendo o menor capital possível, os menores custos operacionais e

apresentando viabilidade econômica, acrescentando ainda indicadores positivos quanto aos menores impactos sócio-ambientais possíveis.

Como metodologia se atribuiu pesos às classes de classificação técnica e pontuação de 1 a 5, sendo 1 para pior avaliação e 5 para melhor avaliação e multiplicou-se esta pontuação pelo peso ponderado relativo a ela, conforme quadro 3 abaixo:

- Funcionalidade: 20%
- Especificações técnicas: 15%
- Orçamento disponível: 20%
- Tempo de execução: 5%
- Impactos sociais: 5%
- Impactos econômicos: 20%
- Impactos ambientais: 15%

Os pesos ponderados foram escolhidos, classificando-os em três grupos, conforme Quadro 3.

Quadro 3. Critérios de avaliação técnica de tecnologias

Classificação técnica	Peso	Motivo
Funcionalidade	20%	Critério básico e fundamental para garantir a pureza
Orçamento disponível		Escassez de recursos para investimentos em novas tecnologias torna este critério essencial
Impactos econômicos		Menores custos operacionais e viabilidade para assegurar investimento
Especificações técnicas	15%	Existência de equipamentos disponíveis para aplicação é essencial, porém, em geral há disponibilidade
Impactos ambientais		Foco da tecnologia, mas não é diferencial entre elas devido a todas mitigarem impacto ambiental
Tempo de execução	5%	Causa menor impacto, pois não há diferenças significativas entre as tecnologias
Impactos sociais		Por ser focada em uma indústria, não há, <i>a priori</i> , impactos sociais

4.2. Pesquisa científica experimental - técnica

4.2.1. Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa experimental foram:

- Laudo de análise do efluente a ser tratado fornecido por laboratório externo à indústria de alimentos e disponibilizado para este trabalho;
- 3 Galões de polietileno de alta densidade com capacidade para 5 litros

conectados entre si por mangueiras flexíveis de silicone com 3 mm de diâmetro interno e 5 mm de diâmetro externo;

- Compressor para simulação de injeção de biogás;
- Filtro de dessulfurização, cuja especificação técnica está mantida sob segredo industrial.

Elaborou-se um processo para eliminação de contaminantes presentes no biogás e conversão em biometano e enxofre elementar conforme ilustrado na Figura 19. Tal processo foi elaborado tendo como base os resultados obtidos na pesquisa teórica que definiu as melhores tecnologias para o efluente objeto de estudo.

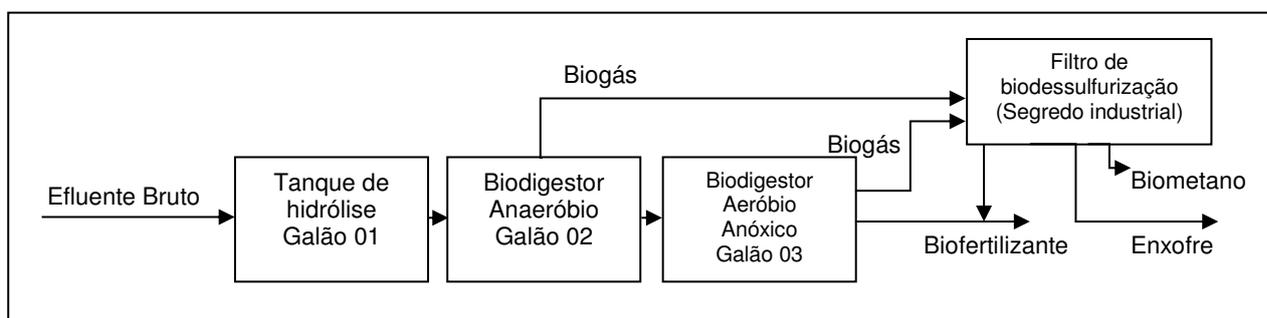


Figura 19. Fluxograma da veiculação dos efluentes líquidos e gasosos do estudo laboratorial

4.2.2. Método laboratorial

Realizou-se a injeção a taxa de $0,022 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ que é a capacidade máxima de injeção do instrumento laboratorial de efluente bruto com densidade de $1.003,37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ no primeiro biodigestor de bancada (simulando um tanque de hidrólise). A residência de tal efluente no primeiro biodigestor foi de 72 horas. Na sequência, o efluente foi injetado no segundo biodigestor (biodigestor anaeróbico) com a mesma taxa de injeção, tendo como tempo de residência 24 horas. O biodigestor anaeróbico gerou biogás que foi transferido para o filtro de biodessulfurização e o efluente digerido seguiu para o biodigestor aeróbico anóxico (terceiro biodigestor) que gerou biogás, transferido para o filtro de biodessulfurização e biofertilizante.

No filtro de biodessulfurização, tecnologia que está sendo proposta e testada, houve a purificação do biogás gerado, produzindo-se, com uso de microorganismos, o biometano, o enxofre elementar e o biofertilizante.

4.2.2. Método experimental – proposta técnica

Através da análise dos resultados do laudo relativo aos efluentes industriais e com base nos resultados obtidos em escala laboratorial, foi estudado o processo atual da estação de tratamento de efluentes, Figura 20, e foi proposto um novo

processo, com etapas adicionais, para aproveitamento energético dos resíduos da indústria de alimentos, descrito na Figura 21.

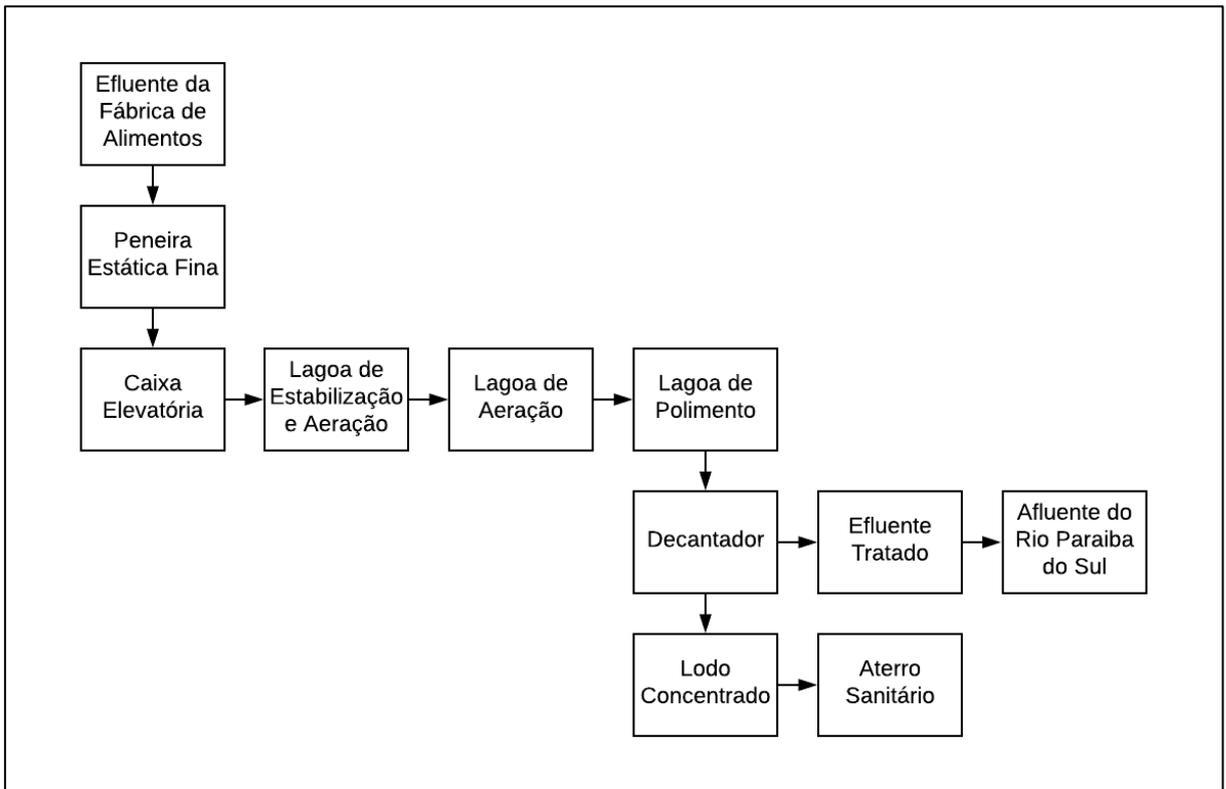


Figura 20. Fluxograma atual do tratamento de efluentes

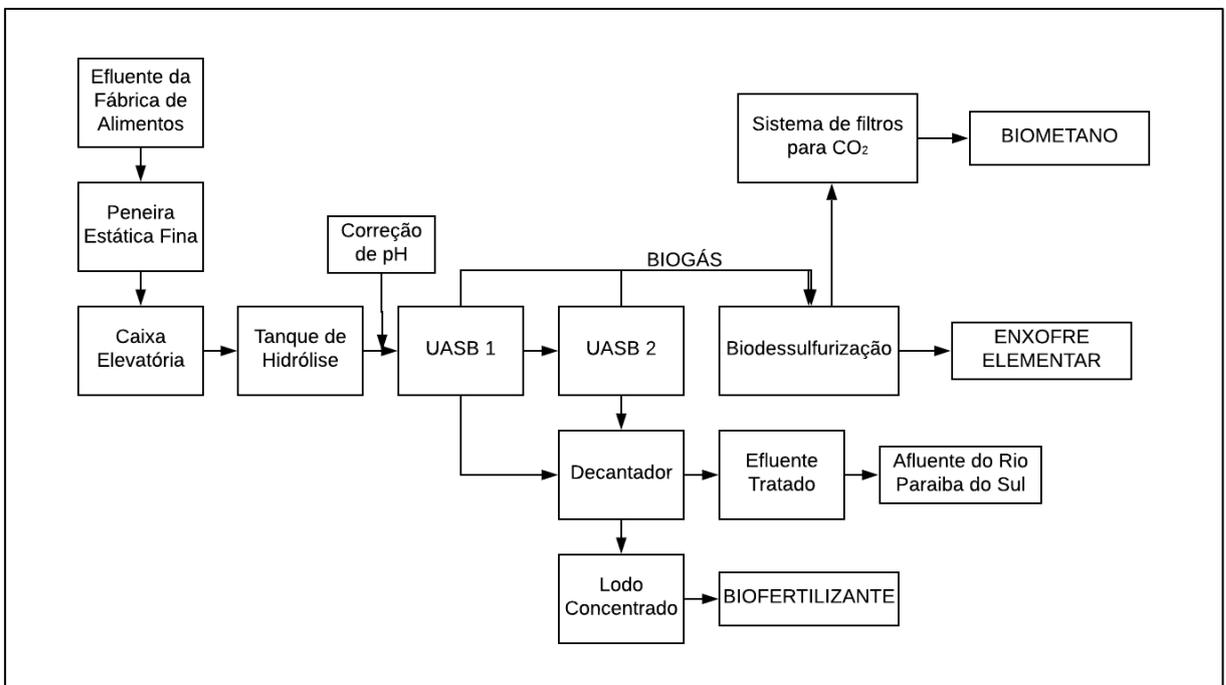


Figura 21. Fluxograma proposto para instalação em indústria de sucos e alimentos

Na proposta apresentada, o tanque de estabilização e aeração foi mantido,

porém, substituído por um sistema de hidrólise com correção de pH, para possibilitar a conversão de compostos orgânicos complexos em compostos orgânicos simples, para viabilizar as etapas posteriores.

As lagoas de aeração e polimento foram substituídos por dois biodigestores anaeróbios em série do tipo *UASB* para geração do biogás. Na saída destes biodigestores foi posposto um sistema de biodessulfurização, obtendo-se como produto o enxofre elementar e posteriormente um sistema com tecnologia de membranas para eliminação do dióxido de carbono, obtendo-se biometano.

Na saída do decantador, devido à troca do sistema aeróbio por anaeróbio, obteve-se biofertilizante, produto comercial, em detrimento ao lodo concentrado que seria destinado a aterro sanitário.

4.3. Pesquisa científica experimental - econômica

Para análise da viabilidade de instalação na unidade industrial acima, tomou-se como base os resultados obtidos em escala laboratorial e extrapolou-se para a dimensão industrial, usando-se como referência os dados do efluente bruto da empresa, com cerca de $1.400 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de efluente bruto e seu potencial de geração dos produtos biometano, enxofre elementar e biofertilizante e seus respectivos preços, foi utilizada como ferramenta de avaliação da viabilidade econômica, os fluxos de caixas gerados e confrontados tais recursos com os investimentos necessários, usando como indicadores de tomada de decisão o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e tendo como base a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 50% acima da Taxa Básica de Juros (SELIC).

4.4. Planejamento estratégico – CANVAS®

Para definição de aspectos do modelo de negócio relacionados à proposição de valor, recursos necessários, expectativas de clientes e planejamento financeiro, baseados na metodologia CANVAS®.

Esta é uma ferramenta que permite visualizar, de forma intuitiva, todos os aspectos fundamentais do seu negócio, construindo diferenciais competitivos por meio de brainstormings e ideias compartilhadas e, por isso, foram realizadas pesquisas com 12 potenciais clientes da tecnologia, 3 possíveis parceiros, 3 possíveis investidores e 3 mentores do projeto, através de entrevistas realizadas com o escopo de questões descrito no Quadro 4.

Quadro 4. Questionário para elaboração do plano estratégico de negócios

Tópico	Questão
Proposição de Valor	Quais seus resíduos orgânicos (líquidos e sólidos)?
	Quais os seus problemas relacionados a eles?
Segmento de Clientes	O que gostaria de receber como solução dos problemas?
Canais	Como acredita que seja a forma de aplicação das soluções?
Relacionamento com clientes	Qual o tipo de atendimento que deseja para a solução do problema?
Parcerias-chave	Qual relacionamento deseja com os fornecedores da solução?

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Revisão de trabalhos existentes

A revisão dos trabalhos existentes demonstrou que para a geração do biogás devem ser utilizados reatores anaeróbicos do tipo *UASB* (Awe *et al*, 2017) e que os processos mais promissores e sustentáveis, pelos baixos custos e pelo uso de recursos renováveis são os biológicos, sendo o aplicado no trabalho proposto o uso de um conjunto de biodigestor anaeróbio de baixa aeração, biodigestor anóxico e biorreator de dessulfurização, utilizando como microorganismo deste último processo o *Thiobacillus sp*, para a remoção grosseira e média de H₂S, seguido de sistemas físico-químicos para a remoção de CO₂ e da fração fina das impurezas do biometano.

Estas conclusões foram tomadas e descritas na Figura 21 e estão resumidas no Quadro 5.

Quadro 5. Comparativo técnico entre tecnologias de purificação de biogás

Etapa	Tecnologia	Requisito	Pontuação	Peso (%)	Total
Eliminação de CO ₂	Absorção em água (<i>Water Scrubbing</i>)	Funcionalidade	5	20	35,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	2	20	
		Tempo	3	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	3	20	
		Impacto ambiental	4	15	
	Absorção (solvente orgânico polietilenoglicol)	Funcionalidade	4	20	29,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	1	20	
		Tempo	3	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	2	20	
		Impacto ambiental	4	15	

Quadro 5. Comparativo técnico entre tecnologias de purificação de biogás (continuação)

Etapa	Tecnologia	Requisito	Pontuação	Peso (%)	Total
Eliminação de CO ₂	Absorção química (aminas)	Funcionalidade	4	20	26,5
		Especificações	3	15	
		Orçamento	1	20	
		Tempo	3	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	2	20	
	PSA (<i>Pressure Swing Adsorption</i>)	Funcionalidade	4	20	37,0
		Especificações	5	15	
		Orçamento	3	20	
		Tempo	3	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	3	20	
	Tecnologia com membranas	Funcionalidade	4	20	39,5
		Especificações	5	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	3	20	
	Separação criogênica	Funcionalidade	4	20	24,0
		Especificações	2	15	
		Orçamento	1	20	
		Tempo	2	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	1	20	
Remoção biológica	Funcionalidade	5	20	37,5	
	Especificações	4	15		
	Orçamento	3	20		
	Tempo	3	5		
	Impacto social	4	5		
	Impacto econômico	3	20		
Eliminação de H ₂ S	Absorção em água (<i>Water Scrubbing</i>)	Funcionalidade	3	20	37,5
		Especificações	5	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	3	20	
	Adição de cloretos de ferro no biodigestor (FeCl ₃ , FeCl ₂ /FeSO ₄)	Funcionalidade	2	20	22,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	1	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	1	20	
	Óxido e hidróxido de ferro (Fe(OH) ₃ /Fe ₂ O ₃) Lã de ou pellets de aço	Funcionalidade	3	20	34,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	3	20	
		Impacto ambiental	3	15	

Quadro 5. Comparativo técnico entre tecnologias de purificação de biogás (continuação)

Etapa	Tecnologia	Requisito	Pontuação	Peso (%)	Total
Eliminação de H ₂ S	Absorção química Fe(OH) ₃ ou Fe-EDTA	Funcionalidade	3	20	32,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	2	20	
		Impacto ambiental	3	15	
	Absorção química FeCl ₃ /NaOH	Funcionalidade	3	20	32,5
		Especificações	4	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	2	20	
		Impacto ambiental	3	15	
	Remoção biológica	Funcionalidade	5	20	42,0
		Especificações	4	15	
		Orçamento	4	20	
		Tempo	4	5	
		Impacto social	4	5	
		Impacto econômico	4	20	
		Impacto ambiental	4	15	
	Tecnologia com membranas	Funcionalidade	4	20	39,5
		Especificações	5	15	
		Orçamento	4	20	
Tempo		4	5		
Impacto social		4	5		
Impacto econômico		3	20		
Impacto ambiental		4	15		
Absorção com carvão ativado (Impregnado com KI 1-5%)	Funcionalidade	3	20	32,5	
	Especificações	4	15		
	Orçamento	4	20		
	Tempo	4	5		
	Impacto social	4	5		
	Impacto econômico	2	20		
	Impacto ambiental	3	15		

A classificação demonstrou que as tecnologias mais viáveis tecnicamente para remoção de CO₂ e H₂S são tecnologia com membranas e remoção biológica, respectivamente, justificando, desta forma, os procedimentos experimentais adotados nos itens 4.2.2 e 4.2.3 do presente trabalho.

5.2. Resultados de laboratório

O sistema instalado em laboratório apresentou resultados satisfatórios quanto à purificação de biogás e recuperação de biometano, bem como a obtenção de enxofre elementar e biofertilizante.

Os resultados obtidos, através de análise dos dados confidenciais do laudo de análise do efluente da empresa e simulação do sistema montado em laboratório estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados do ensaio de laboratório

Entrada de Efluente Bruto ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)	Saída de Biometano Purificado ($\text{Nm}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)	Saída de Enxofre Elementar ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$)	Saída de Biofertilizante ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)
$2,20 \times 10^{-2}$	$0,125 \times 10^{-1}$	$3,89 \times 10^{-3}$	$2,20 \times 10^{-2}$

Como base nos resultados acima é possível estimar os volumes de produção de biometano, enxofre elementar e biofertilizante tendo como base a alimentação de efluente bruto, definindo-se os coeficientes de conversão de um metro cúbico de efluente para cada um destes, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes de produção de produtos de interesse a cada metro cúbico de efluente bruto

Coeficiente de produção de Biometano ($\text{Nm}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Coeficiente de produção de Enxofre Elementar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Coeficiente de produção de Biofertilizante ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)
0,568	0,177	1,00

É importante ressaltar que os dados obtidos acima são referentes ao efluente usado como base de referência de teste laboratorial e que haverá variação conforme a carga orgânica de cada efluente e sua composição química. Outro ponto a observar é que em escala industrial, o biofertilizante será concentrado em decantador, conforme proposto por meio da Figura 21, propiciando a obtenção de concentração de nutrientes do fertilizante e disponibilização de efluente tratado para devolução à natureza, conforme origem.

5.3 Resultados da tecnologia em planta industrial

Usando-se os coeficientes determinados na Tabela 5 e obtendo-se informações de uma empresa produtora de alimentos de Caçapava/SP, foi possível determinar-se o potencial de uso da tecnologia em estudo e a capacidade de sustentabilidade do sistema e da geração de receita e redução de custos para a empresa que irá adotar a tecnologia.

Considerando que a empresa produza cerca de 1.400 m^3 de efluente bruto biodegradável por dia, estimou-se como potencial gerador de produto os seguintes dados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Estimativa de uso da tecnologia de purificação de biogás

Entrada de Efluente Bruto (m³.dia⁻¹)	Saída de Biometano Purificado (Nm³.dia⁻¹)	Saída de Enxofre Elementar (kg.dia⁻¹)	Saída de Biofertilizante (m³.dia⁻¹)
1.400	795	248	1.400

5.4. Análise econômica da tecnologia em planta industrial

Considerando-se os valores atuais de biometano, na base de gás natural em US\$ 0,695.m⁻³ (Comgás, 31.05.2019), o enxofre elementar em US\$ 0,06908.kg⁻¹ (ICIS, 2019) e o biofertilizante em US\$ 0,0051.m⁻³ (ICIS, 2019) tem-se que o potencial de geração de caixa para a empresa é de US\$ 552,53.dia⁻¹ oriundos do biometano, de US\$ 17,13 oriundos do enxofre elementar e de US\$ 7,14 do biofertilizante. Adotando-se uma operação anual de 300, tem-se uma receita estimada de US\$ 173.040,00 por ano. A empresa de alimentos estudada possui gastos anuais de US\$ 50.600,00 para destinação do lodo residual para aterro sanitário.

Neste cenário, considerando-se a receita estimada somada com a redução de despesas com aterro sanitário, a nova tecnologia gera um fluxo de caixa anual positivo de US\$ 223.640,00.

Com base em orçamentos confidenciais para instalação de um tanque de hidrólise, dois biodigestores anaeróbios do tipo *UASB*, um sistema de biodessulfurização, um sistema de filtros para dióxido de carbono, inclusos nos orçamentos todos os periféricos, instalação, comissionamento e validação, estimou-se o investimento necessário para alteração da planta de tratamento de efluentes em US\$ 400.000,00 e seu custo anual operacional, inclusa depreciação em 10 anos, de US\$ 40.000,00 e manutenção de US\$ 10.000,00, em US\$ 50.000,00.

A tabela 7 mostra o comparativo entre os fluxos de caixa anuais do sistema atual e do novo sistema proposto em dólares.

Vale ressaltar que na etapa de avaliação técnica, já havia critérios de orçamento disponível (investimento inicial) e de impacto econômico e, por isso, não se analisou economicamente outras tecnologias disponíveis, mas apenas as selecionadas para aplicação real na indústria de alimentos estudada.

Tabela 7. Comparativo de fluxos de caixa atual e com nova tecnologia proposta em US\$.ano⁻¹

Item	Atual ^a	Novo	Diferença
Mão-de-Obra	-55.000	-55.000 ^b	0
Depreciação	0	-40.000	-40.000
Manutenção	-7.700	-10.000 ^c	-2.300
Aterro Sanitário	-50.600	0	+50.600
Produtos	0	173.040	+173.040
TOTAL	-113.300	68.040	+181.340

^a – Dados fornecidos pela empresa

^b – Não há alterações no quadro de colaboradores

^c – Troca de elementos filtrantes

De acordo com a Tabela 7, o fluxo de caixa positivo gerado pelo projeto da nova tecnologia é de US\$ 181.340,00 ao ano.

5.4.1. VPL, TIR e TMA

Conforme definido no item 4.3, a TMA adotada foi de 50% acima do valor da taxa Selic (BCB, 2019), isto é, 9,75%.

Utilizando a TMA de 9,75% tem-se o cálculo de VPL conforme equação 11, considerando-se 10 anos de período do projeto:

$$VPL = \sum_{K=0}^n \frac{E(CF_k)}{(1+i)^{k+j}} = \sum_{K=0}^{10} \frac{181.340}{(1+0,0975)^{10}} - 400.000 = 726.323,80 \quad (11)$$

Pelo VPL o investimento é altamente viável, pois, de acordo com avaliações de projetos, sempre que o VPL é maior do que zero, há viabilidade e a presente tecnologia gera um valor de estimado, em 10 anos, de US\$ 726.323,80

Conforme o conceito de TIR ela é calculada, conforme equação 12, assumindo-se o valor de VPL igual a zero.

$$0 = \sum_{K=0}^n \frac{E(CF_k)}{(1+TIR)^{k+j}} \rightarrow \sum_{K=0}^{10} \frac{181.340}{(1+TIR)^{10}} - 400.000 = 0 \rightarrow TIR = 44,2\% \quad (12)$$

A TIR demonstra que a nova tecnologia oferece um retorno sobre o investimento, já com desconto da TMA de 9,75%, de 44,2%, sendo o projeto bastante atrativo para investidores, com seu retorno sendo de quase 7 vezes superior a taxa básica de juros, SELIC, e quase 5 vezes superior a TMA.

5.5. Análise estratégica - CANVAS

Com base nos estudos técnico-econômicos realizados e nos questionários aplicados aos potenciais clientes e parceiros, estabeleceu-se um planejamento estratégico, utilizando como base a ferramenta CANVAS®, conforme Apêndice II onde se definiu o modelo de negócios com os seguintes tópicos:

- 1) Proposição de Valor: Transformar o problema de geração e tratamento de resíduos em um negócio de aproveitamento energético, agregando valor aos clientes e evitando danos e passivos ambientais. O aproveitamento energético como agente de redução de custos, geração de subprodutos de valor agregado e mitigação de impactos ambientais;
- 2) Clientes: indústrias de alimentos, agroindústrias, empresas de saneamento, usinas de cana-de-açúcar, cervejarias, companhias de papel e outras empresas que gerem resíduos orgânicos biodegradáveis. Por não ser o *core business* destas empresas, em entrevistas realizadas com clientes, eles não demonstraram interesse em investir na estação de geração de biometano e estariam dispostos a terceirizar a atividade e arcar com as despesas do serviço.
- 3) Canais: modelo de fornecimento de serviço completo (*full service*) com instalação, operação e manutenção do sistema e venda do serviço de tratamento dos resíduos e venda dos produtos obtidos.
- 4) Relacionamento com clientes: prestação de serviço completo para que o cliente não se preocupe com o tratamento de seus resíduos.
- 5) Fontes de receita: prestação de serviço de tratamento de efluentes e resíduos, venda de biometano, enxofre elementar e biofertilizante por meio de empresa terceirizada que instala, opera e mantém a planta de biometanização de resíduos orgânicos biodegradáveis.
- 6) Parceiros-chave: fornecedores de tanques, filtros, periféricos e sistemas de automação de plantas de biometano; investidores com foco em *start ups* e novas tecnologias; empresas produtoras de resíduos orgânicos biodegradáveis;
- 7) Atividades-chave: desenvolvimento de parcerias e de equipamentos; fornecimento de serviços e soluções completos para biometanização de resíduos orgânicos;
- 8) Recursos-chave: principal é o resíduo orgânico biodegradável e

secundariamente investimento para produção de equipamentos, processos e instalação em plantas de clientes.

- 9) Estrutura de custos: depreciação dos investimentos, consumíveis, manutenção e utilidades.

O plano de negócios elaborado com base no Canvas® para implantação das tecnologias propostas na indústria de alimentos estudada foi premiado no Global Biobased Business competition (G-Bib) que foi um evento no qual mestrandos e doutorandos de universidades brasileiras, alemãs e holandesas apresentaram soluções biotecnológicas, com aplicação prática, na forma de uma competição que assegurava premiação à melhor solução apresentada. (G-Bib, 2017).

6. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o objetivo geral do trabalho foi atingido porque foi definida e proposta uma solução tecnológica para ser implementada em indústria de alimentos.

Conclui-se que tal tecnologia proposta apresenta ótimos resultados de sustentabilidade em termos de associação de saneamento ambiental de resíduos com sua bioenergização, possibilitando a redução do consumo de energia pelo aproveitamento do biometano purificado a partir do biogás gerado em tratamento anaeróbico de efluente biodegradável e da geração de subprodutos com alto valor agregado.

Conclui-se também que a tecnologia proposta apresenta excelentes resultados financeiros, através da geração de valor ao negócio, conforme os indicadores financeiros de valor presente líquido e taxa interna de retorno.

Conclui-se que os objetivos específicos foram alcançados, com a definição conceito global do projeto, do fluxo de processo e que os equipamentos para geração de biogás é através do sistema *UASB* e a melhor tecnologia para sua purificação é o sistema de múltiplas barreiras que dependerá do efluente a ser tratado, porém, a tecnologia mais viável para eliminação de gás sulfídrico é a que utiliza de sistema biológico de remoção com uso de torre em ambiente anóxico e a melhor tecnologia para eliminação do gás carbônico é o sistema de membranas.

Outro objetivo específico foi alcançado com a construção do plano de negócios premiado, gerando alto retorno de investimento às companhias e sustentabilidade ecológica de seus negócios.

Como próximos estudos, propõe-se a instalação de plantas industriais, num modelo de negócios *full service*, para confirmação dos resultados esperados, detalhamento técnico de todos os equipamentos e investimentos necessários para instalação e operação da tecnologia e o desenvolvimento e aplicação da tecnologia em outras empresas do setor industrial, bem como em companhias concessionárias de tratamento de esgoto e outras de interesse na redução de seu impacto ambiental, com geração de fluxo de caixa positivo aos seus negócios.

7. SUGESTÃO DE PRÓXIMOS ESTUDOS

Sugere-se aprofundar estudos para desenvolvimento de tecnologias emergentes para purificação de biogás, como o uso de microalgas, tecnologias catalíticas e outras para o aproveitamento energético de dióxido de carbono, mitigando ainda mais os efeitos de gases do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2015

ABREU, Fábio Viana. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Geração da Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ALLEGUE, L; HINGE, J; ALLE, K. **Biogas and bio-syngas upgrading**, 2012.

ANALISTA DE NEGÓCIOS. **Canvas em PPT para preencher**. Disponível em: <<https://analistamodelosdenegocios.com.br/downloads/canvas-em-ppt/>>. Acesso em 01 jun. 2019.

ANP N° 8 de 30/01/2015, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis Superintendência de Biocombustíveis e de Qualidade de Produtos Coordenação de Regulação da Qualidade de Produtos, Brasília, 2015.

AQUINO S.F., CHERNICHARO C.A.L. **Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbicos sob estresse: Causas e estratégias de controle**. Engenharia Sanitária Ambiental Volume 10 - N° 2 – abr-jun – 2005.

AWE, O. W., ZHAO Y., NZIHOU A., MINH D. P., LYCZO, N. **A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies**. Waste and Biomass Valorization, 2017, pp.1-17.

BCB. **Taxa Selic**. Banco Central do Brasil. Disponível em < <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>>. Acesso em 31 mai. 2019.

BORSCHIVER S., DA SILVA A.L.R. **Mapeamento Tecnológico para Purificação de Biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis/ SC, 2015.

BUI, V. G.; NHAN, H. Q.; TRUONG, L. B. T. **Small power engine fueled with biogas**. **Annual Report of FY 2007**, the Core University Program between Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) and Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST). P.265-P.271, 2007.

BUSTILLO-LECOMPTE C. F., MEHRVAR M. **Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: an optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry** Cleaner Products, doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.060, 2016.

CAMILOTI P. R., MOCKAITIS G., RODRIGUES J. A. D., DAMIANOVIC M. H. R. Z., FORESTI E., ZAIAT M. **Innovative anaerobic bioreactor with fixed-structured**

bed (ABFSB) for simultaneous sulfate reduction and organic matter removal. J. Chem Technol Biotechnol, 89:1044-1050, 2014

CAÑOTE, Susan Johana Benites. **Caracterização da Biodigestão de Lodos UASB e de Lodos Ativado e ACV do Aproveitamento Energético do Biogás Resultante.** 2018. 239 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

COLTURATO L. F. D. B. **Desulfurização de Biogás da Metanização da Vinhaça: Uma Nova Abordagem para Remoção de Altas Concentrações de H₂S.** Tese de Doutorado, UFMG, 2015.

COMGÁS. **Tarifas Industriais.** Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/tarifas/industrial>>. Acesso em 30 mai 2019

DALY, H. E. **Toward Some Operational Principles of Sustainable Development.** Ecological Economics 2, 1990

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R.; DOS SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada.** Disponível em <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf> Acesso em 15 de Maio de 2019.

DIAS M. F. **Análise da Comunidade Microbiana em Sistema de Tratamento de Biogás com Elevadas Concentrações de Sulfeto.** Tese de Mestrado, UFMG, 2015.

G-Bib. **G-BIB Competition.** Disponível em: <<http://bbest.org.br/2017/index.php/conference-info/g-bib-competition>>. Acesso em 04 jun. 2019

GODOY JUNIOR E. **Desenvolvimento e Avaliação de Uma Miniestação Ecoeficiente de Tratamento de Esgoto e Reuso de Águas, com Sistema Registrador Queimador, para Baixas Vazões de Biogás e Cogeração de Energia.** Tese de Doutorado, Unesp, Guaratinguetá-SP, 2010.

ICIS. **Commodities Proce.** Independent Chemical Information Service. Disponível em: <<https://www.icis.com/explore/commodities/?intcmp=mega-menu-explore-commodities>>. Acesso em 02 de junho de 2019.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change.** World Meteorological Organization/United Nations Environment Program, 2013.

LIU, A. M. M., WALKER, A. (1998). **Evaluation of project outcomes.** *Construction Management and Economics*, 16(2), 209–219.

RUBIO, J.C. R., Arjona, R. J., LÓPEZ, A. (2013). **Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills,** *Journal of Cleaner Production*, 1-8

LORA E. E. S., VENTURINI O. J. **Biocombustíveis – Volumes 1 e 2**. Editoria Interciência, Rio de Janeiro, 2012.

MARÍN D., POSADAS E., CANO P., PÉREZ V., BLANCO S., LEBRERO R., MUÑOZ R., **Seasonal variation of biogas upgrading coupled with digestate treatment in an outdoors pilot scale algal-bacterial photobioreactor**, *Bioresource Technology*, Volume 263, 2018, Pages 58-66.

MEDAL, **Medal Membrane System for Biogas/Landfill gas/Air Liquid**. Disponível em <<http://www.medal.airliquide.com/file/otherelement/pj/24/d7/ad/4a/air%20liquid%20biogas%20brochure6580101416814898982.pdf?contentOnly=true>>. Acesso 03 Mar 2018.

MILTNER, M.; MAKARUK, A.; HARASEK, M. **Review on Available Biogas Upgrading Technologies and Innovations Towards Advanced Solutions**. *Journal of Cleaner Production*, 2017.

MONTEBELO A. M., FERNÁNDEZ M., ALMENGLO F., RAMÍREZ M., CANTERO D., BAEZA M., GABRIEL D. **Simultaneous methylmercaptan and hydrogen sulfide removal in the desulfurization of biogas in aerobic and anoxic bio trickling filters**, 2012.

MONTEIRO, S. D. S. C. **Produção de biometano: Análise de mercado e estudo da separação por PSA**, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal. 2011

OSTERWALDER, A. **The business model ontology: a proposition in a design science approach**. Tese de Doutorado. Université de Lausanne, França. 2004.

OSTERWALDER, A., PIGNEUR, Y. **Business model generation**. Wiley. 2010.

PAUDEL S. R., BANJARA S. P., CHOI O. K., PARK K. Y., KIM Y. M., LEE J. W. **Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges**. *Bioresources Technology*, 245, p 1194-1205, 2017.

RODERO M.R., ÁNGELEZ R., MARÍN D., DÍAZ I., COLZI A., POSADAS E., LEBRERO R., MUÑOZ R. **Biogas Purification and Upgrading Technologies**. In: **Tabatabaei M., Ghanavati H. (eds) Biogas**. *Biofuel and Biorefinery Technologies*, vol 6. Springer, Cham, 2018

SANTOS M. V., **Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização: estudo de caso**. Tese de Mestrado, Universidade de Taubaté, Taubaté-SP, 2016.

SANTOS, D.F., GUIMARÃES, W.F.F., GONÇALVES, C.U. **Biodigestores como alternativa à sustentabilidade ambiental no campo brasileiro: um balanço bibliográfico acerca dos modelos indiano, chinês e batelada**. *Revista Ciência Agrícola*, v. 15, p. 35 – 39, 2017.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e purificação de biogás**, 2009.

SINGHAL S., AGARWAL S., ARORA S., SHARMA P, SINGHAL N. **Upgrading techniques for transformation of biogas to bio-CNG: a review.** International Journal of Energy Research, 2017.

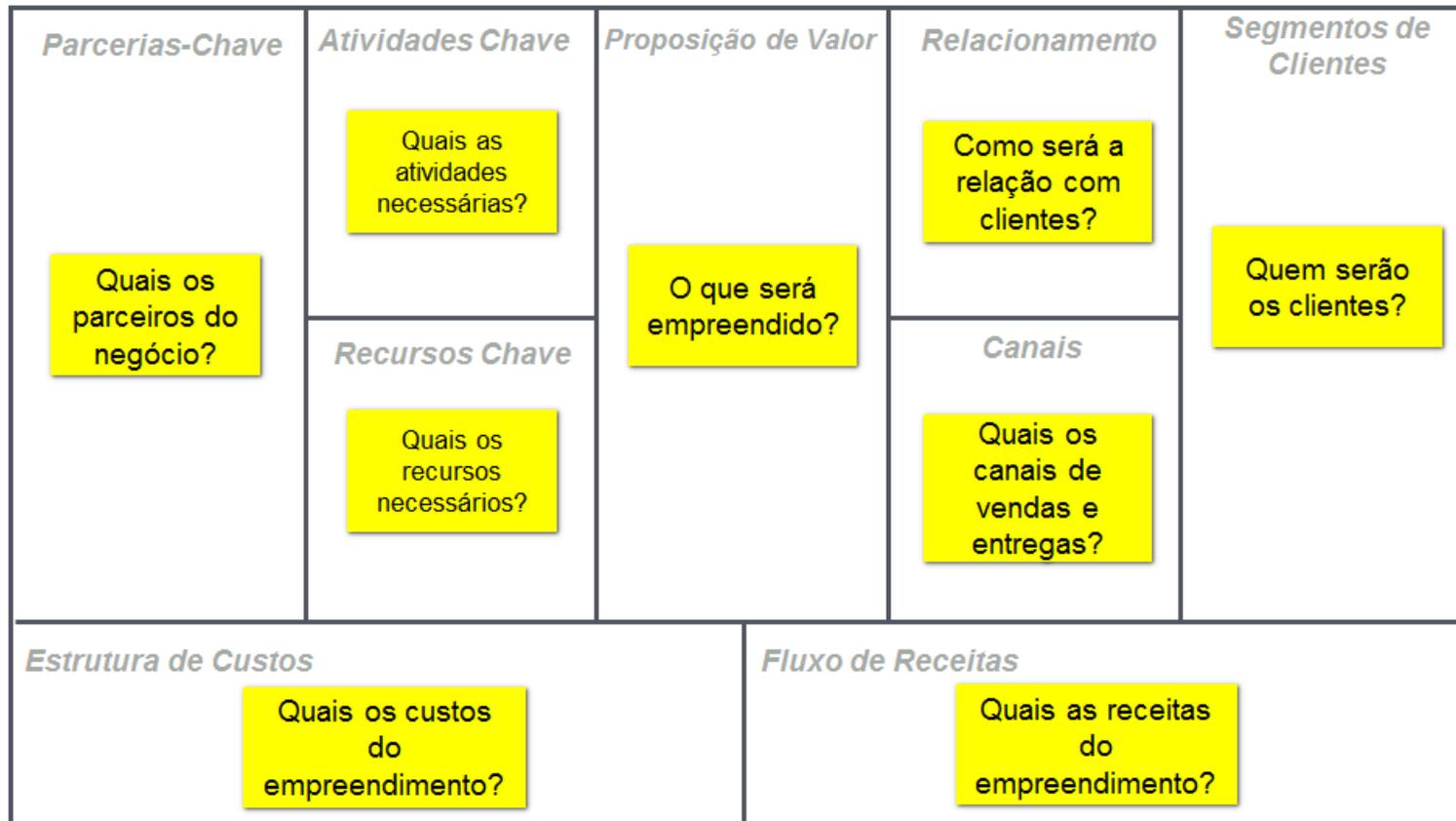
SUN Q., LI H., YAN J., LIU L., YU Z., YU X. **Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 2015. pp. 521-532.

VEIGA A.P.B, MERCEDES S.S. **Biometano de gás de aterros no Brasil: Potencial e Perspectivas.** 10^o Congresso sobre geração distribuída e energia no meio rural. USP, 2015.

VUT, Vienna University of Technology, **Biogas to Biomethane Technology Review, 2012 Disponível em** <[bio.methan.at/sites/default/files/Biogas UpgradingTechnologyReview_ENGLISH.pdf](http://bio.methan.at/sites/default/files/Biogas%20UpgradingTechnologyReview_ENGLISH.pdf)> Acesso 08 jul 2018.

WALSH, J. ROSS C., SMITH M. S., HARPER S. R., WILKINS W. A. **Biogas Utilization Handbook.** United States Department of Energy, 1996.

APÊNDICE I – Modelo de Plano de Negócios CANVAS® (Fonte: Analista de Negócios, 2019)



APÊNDICE II – CANVAS® Preenchido (Fonte: Analista de Negócios, 2019)

<i>Parcerias-Chave</i>	<i>Atividades Chave</i>	<i>Proposição de Valor</i>	<i>Relacionamento</i>	<i>Segmentos de Clientes</i>
Fornecedores de tanques, filtros, periféricos e sistemas de automação de plantas de <u>biometano</u> ; investidores com foco em <u>start ups</u> e novas tecnologias; empresas produtoras de resíduos orgânicos biodegradáveis.	Desenvolvimento de parcerias e de equipamentos; fornecimento de serviços e soluções completos para <u>biometanização</u> de resíduos orgânicos	Aproveitamento energético de resíduos. Agregar valor aos clientes e evitando danos e passivos ambientais. Agente de redução de custos, geração de subprodutos de valor agregado e mitigação de impactos ambientais	Prestação de serviço completo para que o cliente não se preocupe com o tratamento de seus resíduos.	Indústrias de alimentos, agroindústrias, empresas de saneamento, usinas de cana-de-açúcar, cervejarias, companhias de papel e outras empresas que gerem resíduos orgânicos biodegradáveis.
	<i>Recursos Chave</i>		<i>Canais</i>	
	Resíduo orgânico biodegradável e investimento para produção de equipamentos, processos e instalação em plantas de clientes.		Modelo de fornecimento de serviço completo (<u>full service</u>)	
<i>Estrutura de Custos</i>		<i>Fluxo de Receitas</i>		
US\$ 50.000.ano ⁻¹		US\$ 223.640.ano ⁻¹		