

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Marcelo Valerio dos Santos

**PRINCIPAIS PROBLEMAS DOS MOTORES A BIOGÁS E
TECNOLOGIAS DE BIOMETANIZAÇÃO: estudo de caso**

Taubaté - SP
2016

Marcelo Valerio dos Santos

**PRINCIPAIS PROBLEMAS DOS MOTORES A BIOGÁS E
TECNOLOGIAS DE BIOMETANIZAÇÃO: estudo de caso**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

Taubaté - SP

2016

MARCELO VALERIO DOS SANTOS

**PRINCIPAIS PROBLEMAS DOS MOTORES A BIOGÁS E TECNOLOGIAS DE
BIOMETANIZAÇÃO: estudo de caso**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté,

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Valdeci Donizete Gonçalves

IFSP-Campus São José dos Campos

Assinatura _____

Dedico este trabalho a minha esposa Cristina e minha filha Marília, motivos pelos quais eu continuo na luta por dias melhores.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior, pela orientação precisa e objetiva.

A minha esposa Cristina e minha filha Marília, pela compreensão nos momentos de ausência e incentivo nos momentos decisivos.

As minhas cunhadas Tatiana e Alzira, pela ajuda na revisão ortográfica.

Ao meu cunhado José Luiz Camori, pela revisão técnica.

Ao meu amigo Igor Rubinsztein Greggi, pelas sugestões e auxílio neste trabalho.

Ao meu amigo José Eduardo Uliana, pelo esforço em obter contatos que pudessem me ajudar com informações pertinentes ao estudo.

Ao Sr. Ademar Rudge Filho, pelo material de apoio fornecido.

Ao CIBiogás/Itaipu Binacional e a UNITAU, pelo apoio logístico.

Aos amigos do Centro Tecnológico da Mahle Brasil.

Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.

Isaac Newton

RESUMO

O presente trabalho realizou o estudo dos principais problemas dos motores movidos a biogás e das principais tecnologias de purificação do biogás em biometano. Para tanto, foram avaliados vários tipos de motores movidos a biogás e estudadas possíveis modificações para aumentar, consideravelmente, sua vida útil. Na purificação do biogás para produção de biometano, foram estudadas as mais diversas tecnologias disponíveis no mercado e na literatura, além da realização de um estudo de caso para melhoria da tecnologia no processo de purificação de biogás, ou seja, a biometanização utilizada na Granja Haacke. A configuração atual de purificação de biogás ocorre via processo físico-químico, utilizando uma coluna de limalha de ferro oxidada, para remoção da fração grosseira, principalmente, do H_2S . A ocorrência de falhas ou manutenção desta fase do processo provoca a interrupção da operação. A segunda etapa de purificação consiste na utilização de duas colunas de adsorção tipo *Pressure Swing Adsorption* (PSA), cuja função é remover a fração resultante de CO_2 da composição do biogás. Pode-se concluir que, a melhor proposta de *upgrade* para o estudo de caso seria introduzir, no início do processo, uma torre de biodessulfurização de biogás *Thiobacillus ferroxidans*, seguida de duas colunas de limalha de ferro oxidado, montadas em paralelo, para remoção de H_2S e CO_2 , mantendo toda a configuração posterior para remoção da fração fina. Com isto, o sistema ficará, consideravelmente, ecoeficiente, pois reduzirá a produção de inservíveis, aumentando a vida útil dos filtros.

Palavras-chave: Biogás. Biometanização. Biometano. Motor de combustão interna a biogás. Tecnologias de purificação de biogás.

ABSTRACT

This investigation aimed to accomplish the study of the major problems of engines operating with biogas and the main purification technologies in biomethane. Therefore, was evaluated several types of engines operating with biogas and studied possible changes to improve significantly the lifetime. In the purification of biogas to produce biomethane, was studied several technologies available in the market and in literature, besides to accomplish a case study to improve the purification process, that is, the biomethanization used in Granja Haacke. The current configuration of biogas purification is via physical-chemical process using a rusty column iron for removal of the coarse fraction mainly H_2S . The occurrence of faults or maintenance of this stage of the process causes the stop operation. The second step purification use two *Pressure Swing Adsorption (PSA)* columns whose function is to remove the resulting fraction of CO_2 from biogas composition. We can conclude that the best proposal to case study *upgrade* would be introduced at the beginning of the process a biogas desulphurization tower of the *Thiobacillus ferroxidans* followed by two columns of rusty column iron mounted in parallel for removing H_2S and CO_2 , and thus keep all subsequent setting for the fine fraction removal. With this the system will be considerably ecofriendly because will be reduced the scrap production increasing the lifetime of the filters.

Keywords: Biogas. Biogas internal combustion engine. Biomethane. Biomethanization. Purification biogas technologies.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos principais combustíveis utilizados em motores de combustão interna	35
Tabela 2 - Velocidades das frentes de chamas em função das concentrações de metano	36
Tabela 3 - Comparativo entre sistemas de alimentação que utilizam biogás	43
Tabela 4 - Fontes típicas de elementos metálicos encontrados no óleo lubrificante	64
Tabela 5 - Porcentagem dos gases constituintes do biogás, em volume	65
Tabela 6 - Variação da densidade e poder calorífico, em função da composição do biogás	66
Tabela 7 – Comparação das tecnologias de dessulfurização do biogás	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do tratamento e principais utilizações do biogás atualmente	19
Figura 2 - Fluxograma da produção de metano	22
Figura 3 - Representação esquemática do biodigestor indiano intermitente	24
Figura 4 - Representação esquemática do biodigestor chinês intermitente	25
Figura 5 - Biodigestor de sistema contínuo	25
Figura 6 - Seção transversal do biodigestor de sistema contínuo	26
Figura 7 - Efeito da temperatura na manta de lodo sobre a produção de biogás	27
Figura 8 - Tanque de lodo que será utilizado como biofertilizante	28
Figura 9 - Modelo de instalação de um conjunto motogerador	29
Figura 10 - Geração de energia elétrica e calor	31
Figura 11 - Sistema de cogeração para aquecimento de ambientes	31
Figura 12 - Diagrama de pressão, volume e entropia do ciclo Otto	33
Figura 13 - Diagrama de pressão, volume e entropia do ciclo Diesel	33
Figura 14 - Motor ciclo Otto alimentado por biogás	37
Figura 15 - Exemplo de mapa de ignição	38
Figura 16 - Sistema <i>dual fuel</i> aplicado a motores de combustão interna	39
Figura 17 - Motor Wartsila, originalmente projetado para operação <i>dual fuel</i>	41
Figura 18 - Motor diesel com pré-câmara de combustão de injeção indireta e injeção direta de combustível	44
Figura 19 - Válvula Maxitrol de controle de pressão de abastecimento de biogás do Condomínio Ajuricaba	45
Figura 20 - Linha de abastecimento de biogás com motor aspirado adaptado da Granja Haake	46
Figura 21 - Linha de abastecimento de biogás com motor turbo comprimido adaptado do Condomínio Ajuricaba	46
Figura 22 - Fluxograma de controle da posição da válvula borboleta	47
Figura 23 - Sistema eletrônico de controle de ignição para motor ciclo Diesel, adaptado para operar com biogás do Condomínio Ajuricaba	48
Figura 24 - Motor ciclo Diesel, adaptado com velas e bobinas para operação com biogás do Condomínio Ajuricaba	48
Figura 25 - Vista esquemática de um motor diesel eletrônico, adaptado para operar com biogás	49
Figura 26 - Sistema de desaeração do cárter	51
Figura 27 - Mecanismo de passagem dos gases de <i>blow by</i> na região dos anéis	52
Figura 28 - Superfície dos cilindros comprometida pela presença de siloxanos	53
Figura 29 - Depósitos de siloxanos na câmara de combustão do cabeçote	53
Figura 30 - Incrustação de siloxano nas pás do compressor	53
Figura 31 - Localização das bronzinas em um motor de combustão interna	55
Figura 32 - Estrutura construtiva típica de bronzinas	55
Figura 33 - Aspecto de bronzina corroída com utilização de biogás	56
Figura 34 - Localização das buchas em um motor de combustão interna	57
Figura 35 - Bucha de biela aplicada a motores de combustão interna	58
Figura 36 - Aspecto de bucha de biela corroída com utilização de biogás	58
Figura 37 - Sistema de lubrificação forçada aplicada a motores de combustão interna	59

Figura 38 - Biela com furo interno de lubrificação	60
Figura 39 - Jato de óleo aplicado a motores de combustão interna	60
Figura 40 - Pistão com corrosão severa ocasionada por H ₂ S	61
Figura 41 - Pistão com primeiro canaleta anodizado	61
Figura 42 - Válvulas corroídas com utilização de biogás	62
Figura 43 - Válvulas de cabeçote atacadas por siloxanos	62
Figura 44 - Principais rotas de purificação do biogás	68
Figura 45 - Principais tecnologias de tratamento do biogás	69
Figura 46 - Fluxograma para remoção da umidade do biogás	70
Figura 47 - Processos de remoção dos siloxanos do biogás	71
Figura 48 - Processo de filtragem do biogás utilizando membranas	72
Figura 49 - Processo de separação seletiva de metano	73
Figura 50 - Saturação da limalha de ferro após tempo de uso	74
Figura 51 - Filtros de purificação do biogás por coluna de limalha de ferro em paralelo	76
Figura 52 - Filtros de purificação do biogás por coluna de palhas de aço, em paralelo com exemplo de saturação	77
Figura 53 - Filtros de purificação do biogás por coluna de palhas de aço, em paralelo com exemplo de reposição de palhas de aço	78
Figura 54 - Desenho esquemático do sistema de purificação Water Scrubbing	79
Figura 55 - Desenho esquemático do purificador Pressure Swing Adsorption	80
Figura 56 - Desenho esquemático das colunas de adsorção PSA	82
Figura 57 - Processo de purificação do biogás por tecnologia criogênica	83
Figura 58 – Desenho esquemático de um sistema de remoção de H ₂ S por absorção utilizando limoneno	84
Figura 59 – Desenho esquemático de um sistema de remoção de H ₂ S por absorção utilizando limoneno	85
Figura 60 – Sistema de biodessulfurização com múltiplas barreiras para a remoção da fração grosseira e fina do H ₂ S do biogás	86
Figura 61 - Vista aérea da Granja Haacke, localizada no estado do Paraná	88
Figura 62 - Fluxograma do processo atual da Granja Haacke	89
Figura 63 - Criadouro com esteira para coleta de dejetos	90
Figura 64 - Extrusora compacta de separação de sólidos grosseiros do efluente da Granja Haacke	90
Figura 65 - Esteira de transferência de dejetos e tanque de retenção da Granja Haacke	91
Figura 66 - Calha e biodigestor anaeróbico tipo lagoa coberta da Granja Haacke	91
Figura 67 - Coluna de limalha de ferro e compressor da Granja Haacke	92
Figura 68 - Secador elétrico de biogás	92
Figura 69 - Coluna dupla de adsorção tipo PSA da Granja Haacke	93
Figura 70 - Reservatório de equilíbrio de pressão da Granja Haacke	94
Figura 71 - Cilindros de armazenamento de biometano da Granja Haacke	94
Figura 72 - Vista panorâmica da sala de equipamentos da Granja Haacke	95
Figura 73 – Fluxograma da nova estrutura proposta com coluna de biodessulfurização e coluna dupla de limalha de ferro oxidada	97
Figura 74 - Representação esquemática da torre de biodessulfurização em ambiente anóxico	99
Figura 75 - Comparação entre a configuração atual e configuração proposta para a Granja Haacke	99

LISTA DE SIGLAS

EPA	Environmental Protection Agency
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNV	Gás Natural Veicular
Hz	Hertz
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
mbar	Milibar
MON	Motor Octane Number
Nm ³ /h	Normal metro cúbico por hora
°C	Temperatura Celsius
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLC	Power Line Communication
PME	Pressão Média Efetiva
PSA	Pressure Swing Adsorption
PVD	Physical Vapor Deposition
Rpm	Rotação por minuto
TAN	Total Acid Number
TBN	Total Base Number
WS	Water Scrubbing

LISTA DE SÍMBOLOS

C_4H_{10}	Butano
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
Cu_2S	Sulfeto de cobre
Fe_2O_3	Óxido de ferro
Fe_2S_3	Sulfeto de ferro
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
H_2S	Ácido sulfídrico
H_2SO_3	Ácido sulfuroso
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
N_2	Nitrogênio
NH_3	Amônia
NH_4OH	Hidróxido de amônio
NO_x	Óxido de nitrogênio
O_2	Oxigênio
S	Enxofre
SiO_2	Dióxido de silício
SO_2	Dióxido de enxofre
SO_3	Trióxido de enxofre
H_2CO_3	Ácido carbônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo	17
1.3 Estrutura do trabalho	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Estado da arte da geração do biogás	19
2.2 Geração de energia elétrica e cogeração utilizando motores de combustão interna movidos a biogás	28
3 METODOLOGIA	32
3.1 Grupos motogeradores movidos a biogás	32
3.1.1 Motores de combustão interna que operam com biogás	34
3.1.2 Motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás	36
3.1.3 Diesel <i>dual fuel</i> para operação com biogás	39
3.1.4 Motores de ciclo Diesel adaptados para operação com biogás	42
3.2 Efeitos do biogás nos motores de combustão interna	50
3.2.1 Bronzinas e buchas	54
3.2.2 Pistões e anéis de segmento	60
3.2.3 Válvulas e sede de válvulas	62
3.2.4 Avaliação do óleo lubrificante	63
3.3 Tecnologias utilizadas para tratamento de biogás	64
3.3.1 Abordagem inicial	64
3.3.2 Tecnologia para purificação por membrana	71
3.3.3 Purificação por coluna de limalha de ferro oxidada	73
3.3.4 Purificação utilizando o sistema Water Scrubbing (WS)	78
3.3.5 Purificação utilizando o sistema Pressure Swing Adsorption (PSA)	79
3.3.6 Purificação utilizando o sistema de Tecnologia Criogênica	82
3.3.7 Remoção do H ₂ S utilizando filtros de absorção do Terpene (Limoneno)	84
3.3.8 Purificação utilizando Torre de Biodessulfurização em ambiente anôxio	84
3.3.9 Sistema de múltiplas barreiras dessulfurizantes	85
4 ESTUDO DE CASO VISANDO PROPOR UMA NOVA TECNOLOGIA PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS NA GRANJA HAACKE	87

4.1 Apresentação da estrutura atual da Granja Haacke	88
4.2 Proposta de melhoria no processo de purificação de biogás utilizado na Granja Haacke	95
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
6 CONCLUSÃO	104
REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

A agroenergia, ou energia oriunda do meio rural, passou a ser um conceito em ascensão mundial, originando uma matriz energética limpa, em adição a sua especialização na produção de alimentos. Nota-se que, nos próximos anos, as fontes renováveis de energia terão participação cada vez mais relevante em relação à matriz energética global. Comparando-se a produção de biogás com outras fontes renováveis, como álcool de cana-de-açúcar, óleos de soja, milho e mamona, a primeira leva vantagem, sem competir por espaço com outras culturas e nem colocá-las em risco produtivo.

No entanto, a criação e grande concentração de suínos, bovinos e aves em sistemas de confinamento pode provocar uma rápida degradação ecológica nas localidades de suas instalações. De acordo com Konzen (2003), são produzidas, no Brasil, aproximadamente, 450.000.000 toneladas/ano de esterco em ambiente confinado.

O descarte deste material orgânico sem tratamento em rios e açudes provoca a proliferação de doenças associadas, além da contaminação do lençol freático de abastecimento de água potável.

Adicionalmente, sem tratamento, os dejetos liberam para a atmosfera gases que aumentam o efeito estufa, como dióxido de carbono e metano.

Assim, notou-se a possibilidade de aproveitamento destes resíduos, para minimização dos problemas ambientais oriundos do descarte de resíduos não tratados no meio ambiente, proporcionando, também, uma matriz energética alternativa.

A utilização de biomassa como combustível torna-se atrativa por ser uma fonte renovável, não originada de combustíveis fósseis e que não contribui para a fixação de dióxido de carbono na atmosfera terrestre. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a biomassa pode ser reposta na natureza em pouco tempo, sem dificuldades, enquanto que energias não renováveis levam milhares de anos, tratando-se do processo natural. Por conseguinte, a biomassa recebe o título de energia renovável.

A biodigestão anaeróbica tem sido aplicada em grande escala, visando o aproveitamento da energia contida na biomassa descartada. Sistemas de cogeração de energia e produção de energia elétrica são obtidos pela queima do metano, produzido através dos sistemas de biodigestão, utilizando sistemas motogeradores com motores de combustão interna.

Visto que o biogás em estado natural contém várias impurezas que diminuem a eficiência de queima e comprometem a durabilidade dos motores de combustão interna, é fundamental o conhecimento de seus métodos de purificação e limpeza.

A escolha do motor de combustão interna que apresente a melhor proposta custo/benefício e conhecimento dos mecanismos de desgaste é fator essencial para a viabilidade econômica de operação.

Além da biomassa oriunda de dejetos animais sem tratamento, outras fontes são responsáveis pela introdução do metano na atmosfera, destacando-se os aterros sanitários e efluentes industriais e urbanos.

1.1 Justificativa

Um dos grandes desafios da geração atual é a busca por fontes de energia limpa e renovável. A implantação de sistemas motogeradores que utilizam biometano está em ascensão em várias partes do mundo. No entanto, sistemas de limpeza e purificação de biogás, utilizados no exterior, precisam ser tropicalizados e ter seus custos reduzidos, para utilização ampla no Brasil e, conseqüentemente, aumentando a vida útil dos sistemas motogeradores. A questão levantada relaciona-se à definição do melhor modelo motogerador e aplicação da melhor tecnologia de sistemas de purificação de biogás técnica e economicamente viáveis.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os motores de combustão interna que operam com biogás/biometano e os principais problemas e tecnologias de biometanização no panorama nacional.

Na análise final, será apresentado um estudo de caso para aprimoramento do sistema de limpeza do biogás, utilizado na Granja Haacke, situada no município de Santa Helena, no estado do Paraná.

1.3 Estrutura do trabalho

A introdução deste trabalho destaca a preocupação mundial com o efeito estufa e suas consequências. Apresenta os principais gases responsáveis por este efeito e formas de introdução na atmosfera. Ressalta o papel dos dejetos não tratados na introdução do metano na atmosfera e os esforços da agroindústria para minimizar o efeito do descarte de dejetos não tratados.

O primeiro capítulo trata-se de uma revisão da literatura, apresentando o estado da arte na geração de biogás, constituição básica do metano e constituintes secundários da composição. Apresenta os métodos de biodigestão anaeróbica, com abordagem do funcionamento dos biodigestores intermitentes e contínuos, bem como as etapas envolvidas no processo. Evidencia os principais parâmetros a serem controlados, como pH, temperatura e tempo de retenção para obtenção de um biogás de boa qualidade. Além de apresentar o papel dos motores de combustão interna em sistemas motogeradores para produção de energia elétrica e sistemas de cogeração.

O segundo capítulo apresenta a metodologia utilizada na construção da dissertação, abordando o ciclo termodinâmico dos motores de combustão interna ciclo Otto e Diesel. Exibe os principais tipos de motores disponíveis no mercado para operação com biogás e as modificações necessárias em alguns motores. Apresenta o efeito do biogás nos motores de combustão interna, referindo-se à corrosão promovida por H_2S e os efeitos oriundos do biogás com presença de siloxanos. Aborda os processos de purificação e limpeza disponíveis no mercado, para obtenção de biometano de alta pureza. Ademais, apresenta vantagens e desvantagens de sua aplicação.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso proposto, com apresentação da estrutura atual de produção de biometano utilizado na Granja Haacke. Apresenta-se a proposta de uma nova estrutura, visando o aprimoramento da produção de biometano na Granja Haacke.

Os resultados e discussão apresentam a proposta realizada, indicando o melhor método de dessulfurização do ponto de vista técnico e operacional, exibindo a melhor proposta de motorização a ser aplicada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

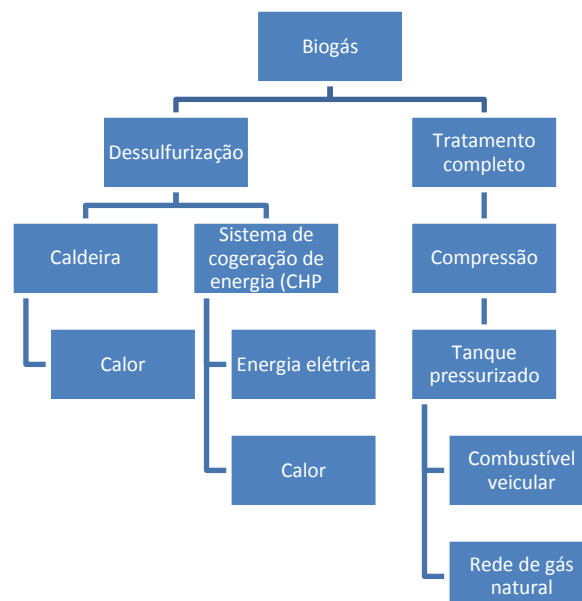
2.1 Estado da arte da geração do biogás

Estudos indicam que, 90% do CH₄ emitido para a atmosfera deriva-se da decomposição de biomassa, sendo o restante de origem fóssil como, por exemplo, de processos petroquímicos (ALVES, 2000).

O biogás é definido como o produto da fermentação de resíduos biológicos, oriundos de humanos ou animais em ambiente anaeróbico, ou seja, com ausência de O₂.

A Figura 1 ilustra o fluxograma das principais tecnologias de tratamento do biogás, destacando os sistemas de dessulfurização e tratamento completo. A aplicação é variada e sua versatilidade o manteve em destaque nos últimos anos. Além disso, tornam-se cada vez mais atrativas as possibilidades de produção de energia elétrica e aplicação de sistemas de cogeração de energia utilizando motores de combustão interna e a introdução de gás tratado para a rede de abastecimento. Em muitos locais da Europa, sua utilização como combustível veicular também tem chamado a atenção.

Figura 1 - Fluxograma do tratamento e principais utilizações do biogás atualmente



Fonte: adaptado de Monteiro (2011)

A biodigestão anaeróbica caracteriza-se pela degradação bioquímica da matéria orgânica complexa em compostos orgânicos simples e nutrientes dissolvidos, promovidos pela ação de bactérias que produzem CH_4 na ausência de O_2 . Compostos adicionais também são produzidos, como CO_2 , amônia, traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixa massa molecular. O tratamento anaeróbico é uma operação de baixo custo e gera subprodutos com grande aplicação e bom retorno econômico.

De acordo com Constant *et al* (1989), a biomassa como matéria-prima pode originar-se de quatro fontes diferentes:

- Resíduos agrícolas: estrume de animais e dejetos.
- Resíduos industriais: efluentes do processo agroalimentar ou de outras indústrias.
- Lamas de depuração de estações de tratamento de esgoto.
- Lixo doméstico proveniente de aterros, após remoção de componentes minerais e plásticos.

No meio rural, o aproveitamento de biomassa para fins energéticos pode ser um meio facilitador para a sustentabilidade de produção, em função de sua disponibilidade. Seu aproveitamento apresenta baixo custo de resíduos de produção, grande potencial de geração de energia, diminuição do potencial poluidor dos resíduos e economia de recursos energéticos. Neste sentido, o Brasil apresenta grande potencial de aproveitamento do biogás, em função dos grandes criadouros de aves, suínos e bovinos presentes, principalmente, na região Sul do país.

A digestão anaeróbica é uma tecnologia processada em equipamentos de ambiente controlado, denominados biodigestores, cuja função é fornecer condições propícias para que um grupo distinto de bactérias degrade o material orgânico, com consequente liberação do gás. É o processo mais utilizado para conversão da carga orgânica dos dejetos em biogás e biofertilizante de alta qualidade, o qual atua como substrato digerido. Em relação à produção de biofertilizante, pode-se afirmar que se trata de material isento de agentes causadores de doenças e pragas para a lavoura, pois é inodoro, não atraindo insetos e roedores. A constituição do biofertilizante resultante é composta por potássio, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, molibdênio e zinco, atuando, desta forma, como agente de melhores condições físicas e químicas do solo, além de contribuir para a atividade microbiana, podendo ser aplicado na forma líquida ou desidratada, dependendo da infraestrutura

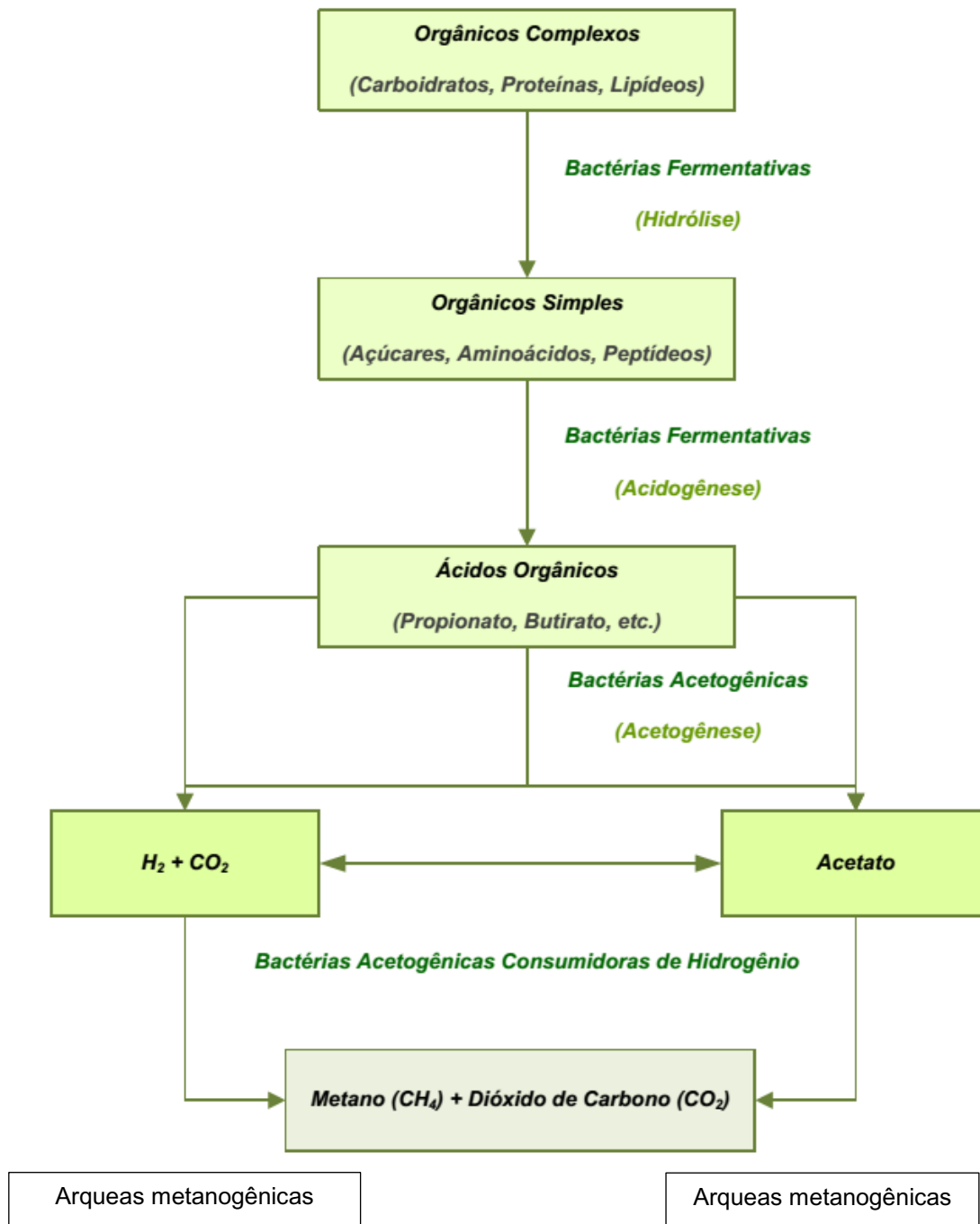
local. A produção de biofertilizante a partir do efluente disponível apresenta muitos benefícios, promovendo a economia de insumos, minimizando o impacto ambiental e apresentando bom desempenho (CERVI, 2009).

Os biodigestores são formados por uma câmara de fermentação, geralmente circular, construída abaixo do nível do solo, para proteção contra as variações climáticas. São sistemas que pretendem conter a biomassa residual que entrará em contato com os microrganismos em ambiente anaeróbico, onde ocorrerá a produção e armazenamento preliminar dos compostos gasosos.

A Figura 2 ilustra o processo de biodigestão anaeróbica desde a coleta da biomassa até a obtenção do biometano. O processo de geração de biogás em ambiente anaeróbico é caracterizado por quatro etapas distintas, a saber:

- Hidrólise: as bactérias liberam enzimas extracelulares, hidrolisando as partículas, reduzindo o tamanho destas e deixando-as solúveis ao meio.
- Acidogênese: as bactérias fermentativas acidogênicas convertem os compostos formados da hidrólise em compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e gás sulfídrico.
- Acetogênese: responsável pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato para as bactérias metanogênicas, gerando hidrogênio, dióxido de carbono e acetato.
- Metanogênese: é a etapa final do processo de degradação da matéria orgânica, convertendo em metano e dióxido de carbono, por ação das arqueas metanogênicas.

Figura 2 - Fluxograma da produção de metano



Fonte: adaptado de Chernicharo (2007)

Desta forma, um biodigestor é classificado como um reator químico, em que as reações químicas têm origem biológica.

Criadouros que alocam grande quantidade de animais em ambiente confinado, capazes de gerar uma grande quantidade de dejetos, são locais ideais para a instalação de biodigestores anaeróbicos para a produção de biogás e

biofertilizante, evitando-se, assim, a poluição do meio ambiente e contribuindo para a geração de uma fonte de energia renovável.

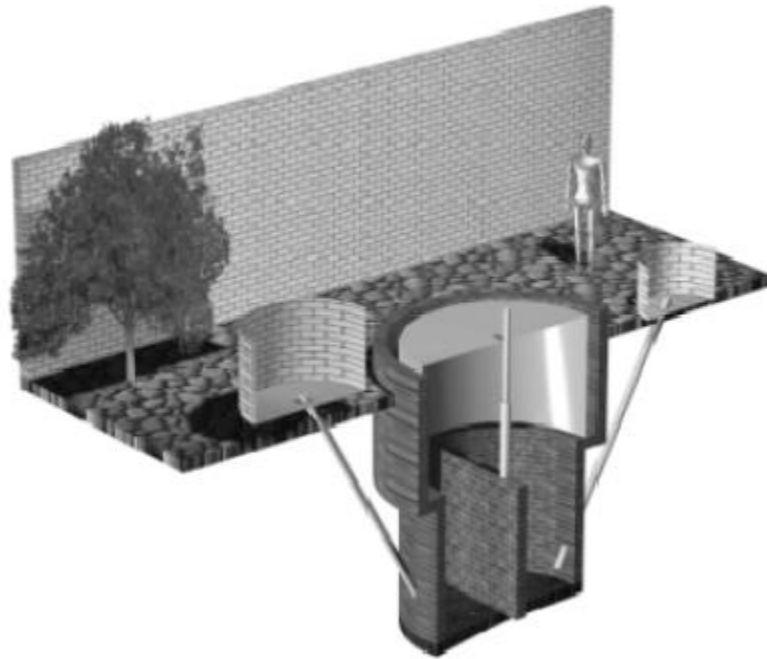
Os primeiros países que utilizaram o processo de biodigestão, intensivamente, como geração de energia foram a Índia e a China, a partir da década de 1950, sendo pioneiros no desenvolvimento deste equipamento. A China é o país que mais desenvolveu o uso do biogás em ambiente rural, provendo energia para cozimento e iluminação doméstica. De acordo com Seixas *et al* (1981), no Brasil, os estudos sobre os processos de biodigestão anaeróbica em ambiente rural cresceram a partir de 1976, no entanto, os resultados alcançados já asseguram um bom domínio da técnica no país.

Existem vários projetos de implantação de biodigestores em ambientes rurais, no entanto, os mais usuais são os sistemas intermitente e contínuo. A escolha do projeto a ser adotado dependerá do tipo de biomassa processada, forma de abastecimento da carga e localização de instalação do biodigestor.

De acordo com Fernandes (2012), no sistema intermitente, a alimentação de biomassa é realizada de uma única vez, sendo de vários dias o tempo de retenção composto. Assim, a biomassa introduzida é totalmente decomposta pelos microrganismos e a carga retirada quando a produção de gás acaba ou atinge níveis muito baixos, sendo reabastecida no decorrer do tempo. O tempo de retenção dependerá do volume de gás a ser produzido, o grau de digestão que se pretende e a temperatura de funcionamento. Dentre os modelos de biodigestores intermitentes, os modelos indiano e chinês são os mais conhecidos.

A Figura 3 ilustra a representação esquemática de um biodigestor indiano intermitente. Este modelo, muitas vezes, é escolhido por sua funcionalidade de operação. Apresenta o formato de um poço coberto por uma tampa cônica, equipada com uma campânula flutuante, normalmente moldada em ferro, que controlará a pressão do gás. A possibilidade de instalação da campânula flutuante mantém a pressão de escape estável, sem a necessidade de regulação constante dos aparelhos que serão abastecidos com biogás. O resíduo de alimentação para este biodigestor deverá apresentar uma concentração de sólidos totais inferior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo e minimizar a ocorrência de obstrução da tubulação de entrada e saída do biodigestor.

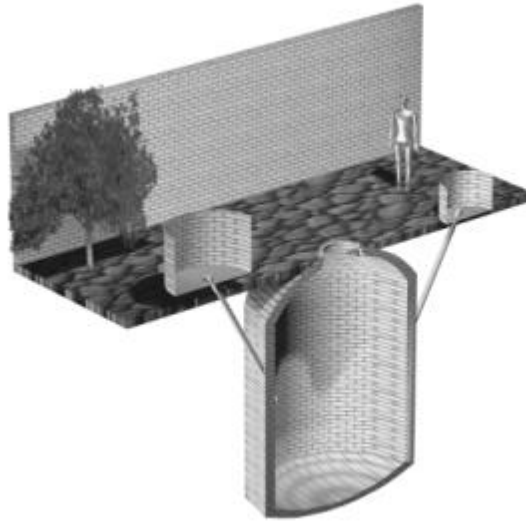
Figura 3 - Representação esquemática do biodigestor indiano intermitente



Fonte: Oliveira (2009)

A Figura 4 ilustra a representação esquemática de um biodigestor chinês intermitente. Este sistema caracteriza-se por uma construção mais rústica, normalmente de alvenaria e enterrado no chão. É submetido à alta pressão, a qual varia em função da produção e consumo do biogás. Apresenta formato de câmara cilíndrica, com teto abobadado e impermeável. Aumentos internos de pressão, resultantes da produção de biogás, deslocarão o efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída e em sentido contrário quando ocorre a decompressão. As mesmas recomendações destinadas ao modelo indiano são aplicadas ao modelo chinês, em relação aos sólidos totais.

Figura 4 - Representação esquemática do biodigestor chinês intermitente



Fonte: Oliveira (2009)

Segundo Fernandes (2012), no sistema contínuo, para cada quantidade que entra no biodigestor, sai a mesma quantidade tratada. A Figura 5 apresenta um biodigestor de sistema contínuo. Neste sistema, o volume de resíduo permanece constante ao longo do tempo, sendo o modelo mais adequado para o regime de confinamento de animais, devido à produção constante de biomassa e, conseqüentemente, a produção permanente de biogás. Normalmente, os biodigestores são longos, com elevada relação comprimento-largura, que auxilia na hidrodinâmica. As partículas permanecem no tanque pelo mesmo período de retenção hidráulica. Elevadas cargas não são recomendadas, pois podem prejudicar a geração de biogás, pela perda excessiva de sólidos, prejudicando a qualidade do efluente final.

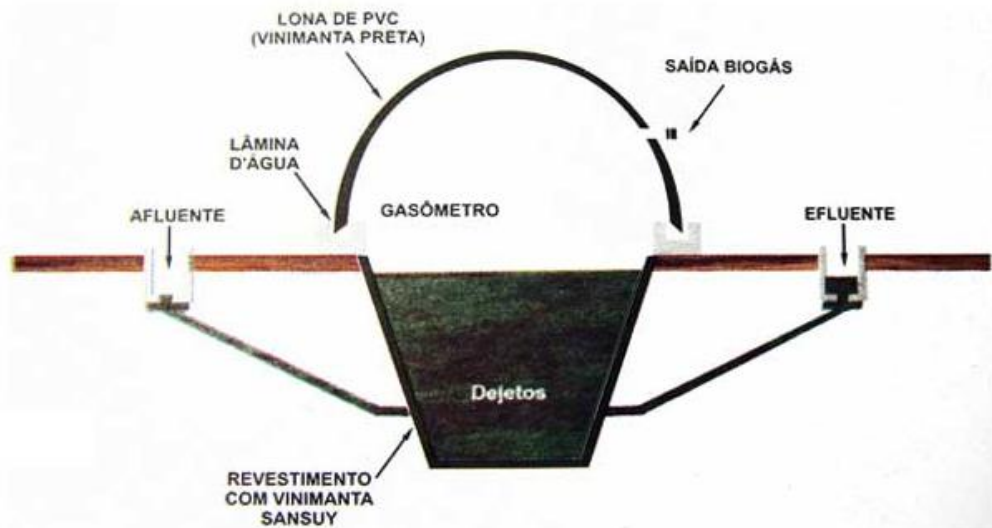
Figura 5 - Biodigestor de sistema contínuo



Fonte: Avesuy

A Figura 6 demonstra o desenho esquemático de um biodigestor de sistema contínuo, em seção transversal, localizando a entrada de afluentes, permanência da biomassa, gasômetro e saída de efluente.

Figura 6 - Seção transversal do biodigestor de sistema contínuo

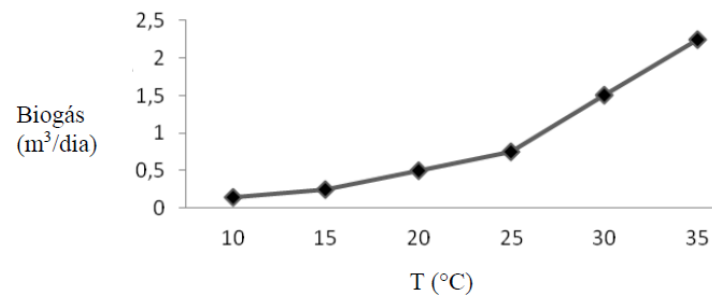


Fonte: UFRRJ

Dentre os principais fatores a serem considerados durante a operação do biodigestor, pode-se destacar a temperatura, o pH e o tempo de retenção.

Segundo Fernandes (2012), a temperatura é um fator decisivo no processo de fermentação do biodigestor, influenciando o processo de degradação biológica. Sendo este processo preponderantemente biológico, os microrganismos participantes devem estar adaptados ao meio, recomendando-se a manutenção da temperatura entre 10°C e 65°C, dependendo do tipo de bactéria. A Figura 7 apresenta o efeito da temperatura sobre o processo de produção do biogás. Estudos realizados mostram que temperaturas em torno de 37°C são as mais favoráveis (SAKUMA, 2013). Observou-se que, em temperaturas próximas da máxima recomendada, as reações biológicas são mais eficientes com menor tempo de retenção. Entretanto, temperaturas próximas da mínima recomendada reduzem a eficiência da carga orgânica, enquanto que variações bruscas de temperatura levam ao desequilíbrio e, conseqüentemente, morte das bactérias envolvidas no processo.

Figura 7 - Efeito da temperatura na manta de lodo sobre a produção de biogás



Fonte: Sakuma (2013)

As mudanças no pH do meio, com aumento ou diminuição de sua toxicidade, podem mudar as características originais das bactérias. Estudos indicam que, valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,0 cessam a produção de metano.

Segundo Teixeira (1998), o tempo de retenção hidráulica é um fator preponderante para controle do pH dentro do biodigestor. O tempo de retenção hidráulica pode variar de dias a horas. Este é o tempo utilizado para o tratamento do efluente no digestor, de acordo com o tipo de efluente e digestor utilizado. O tempo de retenção e a taxa de decomposição dos sólidos voláteis são responsáveis pela eficiência do digestor, tendo como objetivos a serem alcançados o menor tempo de retenção e maior decomposição.

O gás resultante do processo é, predominantemente, composto por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2). Segundo Silva (2009), o metano é um gás incolor, altamente combustível, com chama azul/lilás quando queimado, não produz fuligem e tem baixa capacidade poluidora. A composição do biogás pode variar de acordo com o tipo e a quantidade de biomassa utilizada, fatores climáticos e dimensões do biodigestor. Quando as premissas de obtenção de um biogás de alta qualidade são respeitadas, obtém-se uma mistura de gases com, cerca de, 50% a 80% de CH_4 , enquanto que os 30% a 50% restantes são compostos de gás carbônico e quantidades menores de outros gases. As impurezas e outros gases contaminantes geralmente encontrados são NH_3 , SO_2 , CO , N_2 , H_2S e vapor de água.

Após o tempo de retenção e a passagem pelo biodigestor, os resíduos remanescentes apresentam boa qualidade para utilização como biofertilizante agrícola, devido a fatores como:

- Redução do teor de carbono, eliminado na forma de CH_4 e CO_2 .

- Aumento do teor de N_2 , em função da redução do teor de carbono.
- Maior facilidade de imobilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo (o material já se encontra em estado avançado de decomposição, aumentando a eficiência do biofertilizante).
- Solubilização parcial de alguns nutrientes.

A Figura 8 apresenta um tanque de lodo com resíduos de processo anaeróbico, que serão utilizados como biofertilizante, localizado atrás do biodigestor instalado na Granja Haacke.

Figura 8 - Tanque de lodo que será utilizado como biofertilizante



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Desta forma, o desenvolvimento de biodigestores anaeróbicos em larga escala tem se tornado atrativo nos últimos anos, por vários motivos, entre eles destacam-se:

- Otimização do tratamento de dejetos originadores de resíduos orgânicos sólidos.
- Redução do odor causado por dejetos urbanos e rurais.
- Produção de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbica e utilização do biogás para movimentação de sistemas motogeradores.
- Produção de fertilizantes de alta qualidade.

2.2 Geração de energia elétrica e cogeração utilizando motores de combustão interna movidos a biogás

A Figura 9 apresenta a instalação típica de um sistema motogerador. Motores estacionários, movidos a biogás, conectados a um sistema gerador, são

frequentemente utilizados para geração de energia elétrica em vários segmentos. Sua aplicação pode ser direcionada para propriedades rurais e agroindustriais com disponibilidade de biomassa residual. A potência mecânica resultante da energia térmica, obtida com a queima do biogás, é utilizada para movimentação dos motogeradores.

Figura 9 - Modelo de instalação de um conjunto motogerador



Fonte: Trensurb

Normalmente, o projeto elétrico é estudado para usar uma frequência fixa. Como exemplo, Estados Unidos, Canadá e Brasil utilizam uma frequência de rede de 60 Hz, em contrapartida, Europa e Austrália utilizam frequência de saída de 50 Hz.

A frequência de utilização do motogerador determinará a rotação de operação do motor de combustão interna. Para produzir 60 Hz, a maioria dos motores operam a 1800 rpm ou 3600 rpm. Cada rotação de operação apresenta vantagens e desvantagens. A rotação de 1800 rpm demanda a instalação de motogeradores com quatro conjuntos de polos e são mais adequados para grandes conjuntos motogeradores, devido ao custo, eficiência, vida útil e ruído. A rotação de 3600 rpm necessita da instalação de motogeradores com dois conjuntos de polos, sendo os mais adequados para instalações portáteis e leves, em razão de seu tamanho. Além da utilização como geradores de reserva (MITZLAFF, 1988).

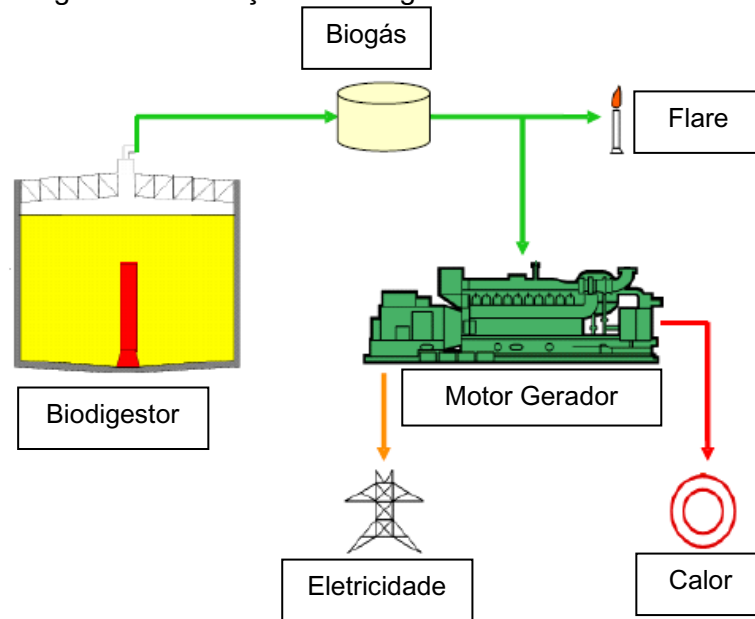
A eficiência de transformação da energia mecânica em energia elétrica é de 90% (MITZLAFF, 1988). E, dependendo das necessidades de utilização, o gerador e sistema de controle podem ser de dois tipos:

- Geração independente da rede elétrica: um gerador síncrono, cuja rotação é proporcional à frequência da rede a qual está conectado, será escolhido, e a frequência controlada pela rotação do motor. Para este tipo de instalação, serão necessários dispositivos para manter a rotação constante, independentemente da carga do motor. Nesta situação, a potência do motor dependerá da carga requerida a cada instante de operação e, recomenda-se que, caso a carga requerida diminua significativamente durante certo período, o desligamento do motor, para não operar em baixas temperaturas (MITZLAFF, 1988).
- Geração ligada à rede elétrica: pode-se utilizar um gerador assíncrono, cuja rotação não trabalha em sincronia com a frequência. Neste sistema, a frequência será sempre controlada pela frequência da rede, a potência de saída do motor relativamente constante e os períodos de parada do motor dependerão do tipo de contrato com a concessionária de energia elétrica. Para devolução de energia, a rede elétrica deve se atentar à quantidade de gás gerado e sua composição, pois a variação no funcionamento do motor pode causar oscilação na quantidade e qualidade da energia elétrica devolvida.

Uma alternativa utilizada em motores de combustão interna que operam com biogás é o sistema de cogeração. A cogeração é definida como o processo de transformação da energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. A energia térmica não utilizada pelos motores de combustão interna, através dos sistemas de escapamento e arrefecimento, é de 60% a 70%.

A Figura 10 apresenta a configuração típica de um sistema motogerador alimentado com biogás, oriundo do biodigestor, com um sistema gerador acoplado ao mesmo, para produção de energia elétrica e sistema de aproveitamento da energia térmica disponibilizada em forma de calor.

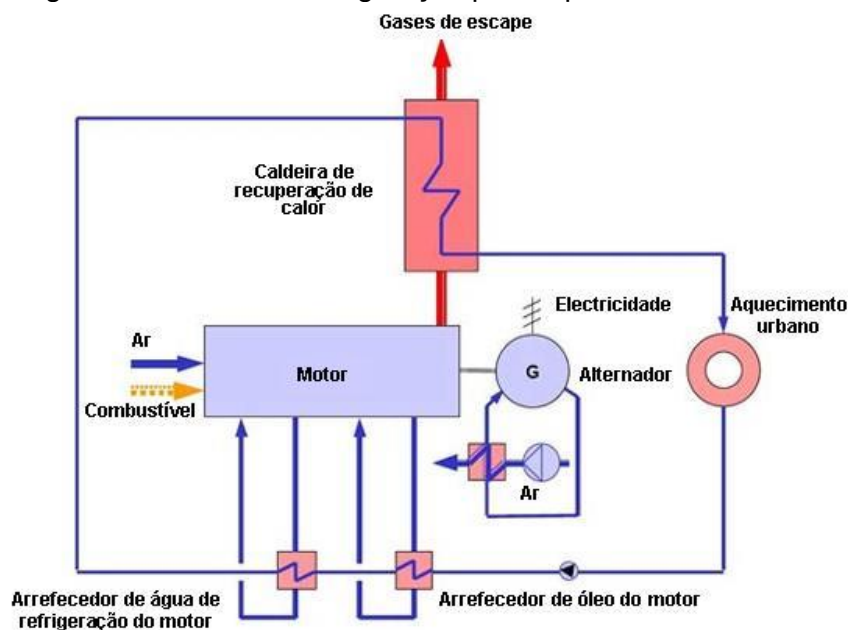
Figura 10 - Geração de energia elétrica e calor



Fonte: Projeto Geração Distribuída (2011)

A Figura 11 apresenta um sistema motogerador adaptado com sistema de resfriamento de água, onde a água quente oriunda do sistema de arrefecimento e os gases do sistema de exaustão são direcionados para trocadores de calor. Estes, por sua vez, podem ser utilizados para o aquecimento de efluentes do biodigestor, produção de água quente para o domicílio, cocção de alimentos, processo produtivo, aquecimento dos criadouros nos períodos de inverno, entre outras aplicações.

Figura 11 - Sistema de cogeração para aquecimento de ambientes



Fonte: Cogen Portugal

3 METODOLOGIA

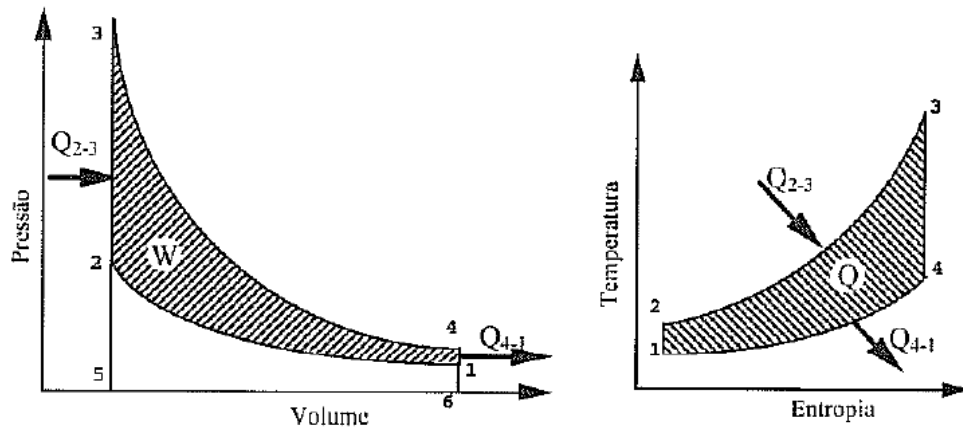
Para o desenvolvimento deste trabalho, realizou-se pesquisa bibliográfica nas áreas de tratamento de biogás mais utilizadas atualmente e sua viabilidade de aplicação. A abordagem dos motores de combustão interna sucedeu-se com o objetivo de identificar os tipos de motores movidos a biogás, os efeitos do biogás na durabilidade dos motores, as possíveis modificações necessárias para utilização com este combustível, bem como abordar as vantagens e desvantagens de cada aplicação.

3.1 Grupos motogeradores movidos a biogás

Os motores de combustão interna são muito utilizados em grupos motogeradores, por operarem com diversos tipos de combustíveis, tanto líquidos quanto gasosos. São consideradas máquinas térmicas, cuja função é transformar energia química em trabalho mecânico, tendo como fluido de trabalho a mistura ar-combustível. Destacam-se entre as máquinas térmicas, por sua simplicidade, robustez e ótima relação peso/potência, colocando-as como uma opção vantajosa de acionadores, para geração de eletricidade contínua.

Os motores são distinguidos pelos ciclos Otto e Diesel, sendo o ciclo termodinâmico a diferença fundamental em seu modo de funcionamento. A Figura 12 apresenta o ciclo termodinâmico de um motor ciclo Otto, com os gráficos de pressão, volume, temperatura e entropia, caracterizando os quatro tempos operacionais do motor.

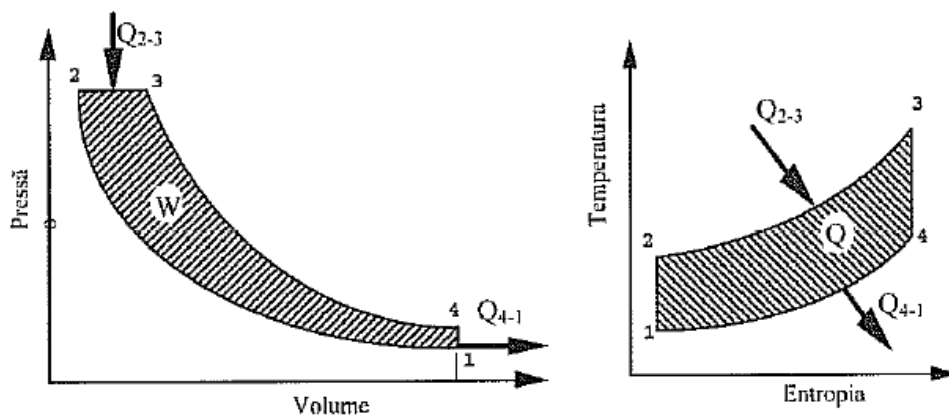
Figura 12 - Diagrama de pressão, volume e entropia do ciclo Otto



Fonte: Martins (2011)

A Figura 13 apresenta o ciclo termodinâmico de um motor ciclo Diesel, com os gráficos de pressão, volume, temperatura e entropia, caracterizando os quatro tempos operacionais do motor.

Figura 13 - Diagrama de pressão, volume e entropia do ciclo Diesel



Fonte: Martins (2011)

Nos motores ciclo Otto, a combustão é iniciada por uma vela que, invariavelmente, está instalada no cabeçote do motor. A combustão ocorre em alta velocidade e envolve um elevado aumento de pressão e, praticamente, em volume constante. Os motores de ignição por centelha geralmente utilizam como combustível compostos de hidrocarbonetos líquidos, como gasolina ou álcoois, submetidos a processos de evaporação e homogeneização com o ar antes do início da combustão.

Em motores ciclo Diesel, a combustão é iniciada espontaneamente, pelo aumento de temperatura, após o processo de compressão adiabática no interior do

cilindro, com conseqüente introdução de combustível em alta pressão e velocidade controlada. Geralmente são utilizados como combustíveis óleos pesados, como o óleo diesel. O objetivo é obter uma combustão a uma pressão, substancialmente, constante.

3.1.1 Motores de combustão interna que operam com biogás

Os motores de combustão interna movidos a gás são uma prática já estabelecida e muito comum em aplicações que utilizam propano e metano. Tais motores são aplicados em duas grandes áreas principais, na produção de potência para motores estacionários, usualmente destinados à produção de eletricidade e calor, ou motores automotivos, para substituição dos combustíveis usuais. O uso de biogás em motores de combustão interna é datado antes da Segunda Guerra Mundial, quando veículos na Europa passaram a utilizar o gás de esgoto como combustível. Já em 1955, a importância do biogás como combustível deixou de ser economicamente rentável, devido ao volume de derivados de petróleo disponível para utilização, com preços excessivamente baixos. Na década de 1980, após a crise de energia, o biogás novamente tornou-se importante para utilização nos motores de combustão interna, para produção de eletricidade.

O uso do biogás em motores de combustão interna é uma opção viável, visto ser o biometano, com 90% de CH_4 , um composto com características similares ao GNV e com potencial para ser utilizado como combustível alternativo. A alta octanagem dos alcanos, variando do metano ao butano, viabiliza sua utilização em motores de combustão interna de ignição por centelha e combustão por compressão.

De qualquer forma, a utilização do biogás com elevado teor de CH_4 é desejável, pela obtenção de biogás com elevado poder calorífico e alta octanagem. A obtenção de biogás com elevada octanagem adquire características de resistência à detonação, imprescindíveis para o bom funcionamento do motor. Como base de comparação, fabricantes de motores dedicados à operação com biogás determinam uma octanagem mínima para operação segura de seus produtos. John Deere e Detroit recomendam uma octanagem mínima de 115 a 118 octanas, conforme método MON (MITZLAFF, 1988).

A Tabela 1 apresenta um comparativo das principais características dos combustíveis usuais, comparando o biogás com metano, álcool e gasolina. Quanto ao biogás, sua característica de boa estabilidade na ocorrência de detonação, possibilita a adequação da taxa de compressão a valores superiores aos, usualmente, utilizados para motores de ciclo Otto.

Tabela 1 - Características dos principais combustíveis utilizados em motores de combustão interna

Combustível	Biogás*	Metano	Álcool	Gasolina
Quantidade	1m ³	1m ³	1 litro	1 litro
Calor liberado (kJ)	23400	36000	19812	32486
Massa específica (kg/m ³)	1,2	0,72	809	739
PCI (kJ/kg)	19500	50000	24490	43960
Isoctanas	130	100	99	85
Razão de compressão	15-20	10-18	6-12	6-10
Temperatura de autoignição (°C)	650	650	-	220

Fonte: adaptado de Taylor (1971)

De acordo com a Tabela 1, o CH₄ apresenta alta octanagem e, portanto, alta resistência à detonação e autoignição. Desta forma, as condições de pressão e temperatura alcançadas na câmara de combustão de motores Diesel e Otto não são suficientes para proporcionar a ignição da mistura ar-biogás. Adicionalmente, a presença de CO₂ no biogás incrementa a resistência à autoignição.

A Tabela 2 apresenta a velocidade da frente de chama em função da concentração de CH₄. Devido à baixa velocidade de chama, de 0,20 m/s a 0,38 m/s, dependendo da concentração de CH₄, o biogás é mais adequado para uma combustão isobárica e, conseqüentemente, para operação com motores originalmente destinados à operação no ciclo Diesel de baixa velocidade.

No que tange a velocidade de combustão, a mesma é função do percentual inflamável do combustível. A velocidade de combustão mais adequada para obtenção do melhor desempenho está associada à manutenção da relação estequiométrica requerida.

Tabela 2 - Velocidades das frentes de chamas em função das concentrações de metano

Velocidade da frente de chama	Concentração de CH ₄
0,20 m/s	7%
0,38 m/s	10%
0,20 m/s	13%

Fonte: adaptado de Mitzlaff (1988)

As adaptações usualmente utilizadas para viabilização da utilização de biogás em motores de combustão interna estão classificadas da seguinte forma:

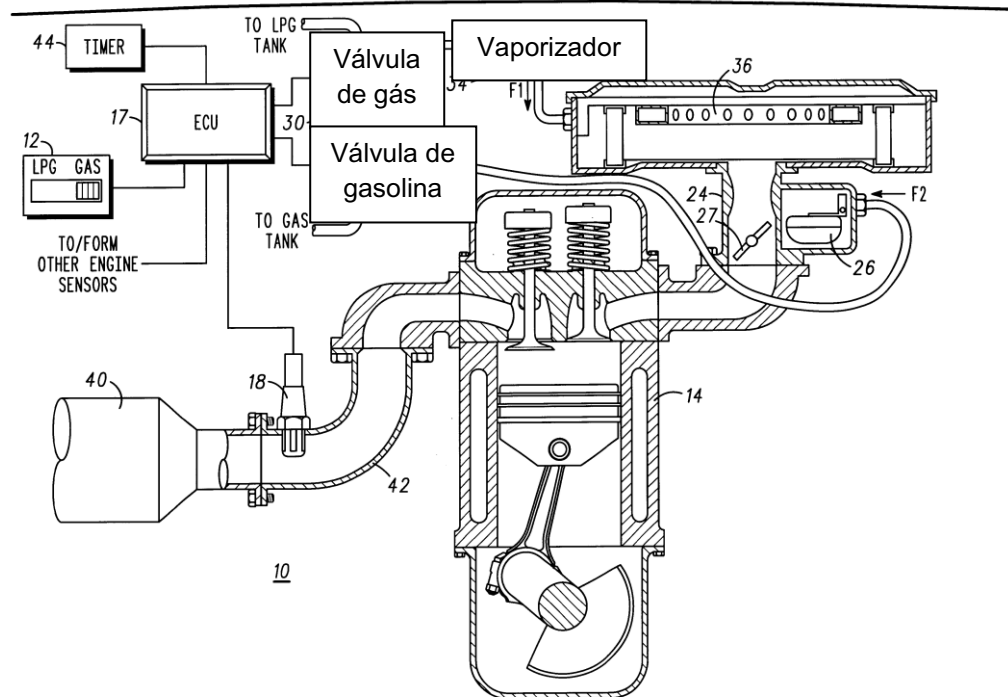
- Motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás.
- Diesel *dual fuel* para operação com biogás.
- Motores de ciclo Diesel adaptados para operação com biogás.

3.1.2 Motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás

As modificações realizadas em um motor ciclo Otto alimentado por combustível líquido são, relativamente, simples para conversão em alimentação a biogás. A modificação básica é a adaptação de um dispositivo ar-biogás, em substituição ao carburador ou sistema de injeção eletrônica, que tem como finalidade abastecer o motor com biogás no volume e pressão apropriados. Um motor ciclo Otto movido a biogás requer um biogás com, no mínimo, 45% de CH₄.

A Figura 14 apresenta a composição típica de um motor movido a biogás. A potência e velocidade destes motores são controladas pelo fluxo da mistura ar-biogás ofertadas ao motor, obtido pela variação da posição de uma válvula borboleta, posicionada entre o dispositivo de mistura ar-biogás e a entrada do motor. Qualquer mudança de posição desta válvula, no sentido de estrangular a entrada de ar-biogás para o motor, reduzirá a oferta de combustível, com conseqüente redução de rendimento.

Figura 14 - Motor ciclo Otto alimentado por biogás



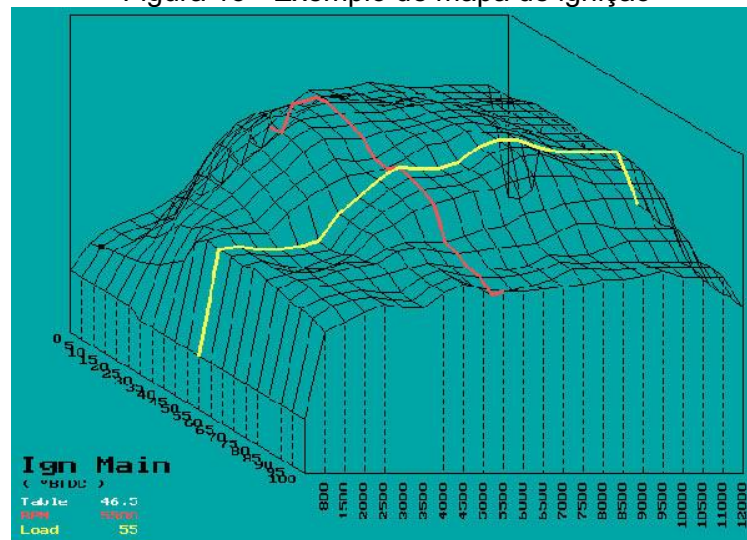
Fonte: adaptado de Patente *Dual fuel method and system* (2003)

Caso o motor em questão seja permanentemente convertido para operação com biogás, uma adequação na taxa de compressão pode ser providenciada. Um aumento do valor da taxa de compressão promoverá melhor aproveitamento térmico, com conseqüente redução do consumo específico e aumento do valor da pressão média efetiva. Isto ocorre pelo fato do biogás apresentar altas temperaturas de autoignição, aumentando seu poder antidetonante e permitindo o aumento da taxa de compressão. A desvantagem desta ação é a impossibilidade de operação com o combustível original.

A Figura 15 apresenta um mapa de avanço de ignição, considerando-se a rotação e o valor do ponto de ignição. O ajuste do ponto de ignição torna-se necessário pela baixa velocidade de chama obtida na combustão do biogás. O processo preliminar de oxidação deve iniciar antes do pistão atingir o PMS e para o correto aproveitamento energético da mistura é necessário um adiantamento do momento de geração da centelha, para obtenção do pico de pressão de combustão, ligeiramente após o PMS. A não adaptação do ponto de ignição para o novo combustível provocará uma queda de desempenho e aumento da temperatura de combustão, podendo causar riscos à durabilidade do motor. Tal ajuste deverá ser realizado em função da rotação e carga para cada ponto de operação do motor.

Logicamente, para sistemas motogeradores, não é necessária a calibração de todo mapa de ignição, devido à limitação do tempo de funcionamento do motor.

Figura 15 - Exemplo de mapa de ignição



Fonte: Motonline

Nos motores de ciclo Otto, a mistura ar-combustível introduzida no cilindro é comprimida e tem sua frente de chama iniciada por uma centelha elétrica, produzida pelo sistema de ignição. Devido às características do metano, é apropriada a introdução de uma vela de ignição de maior grau térmico, pela alta temperatura de combustão deste combustível.

Invariavelmente, motores de ciclo Otto adaptados para operação com biogás apresentam menor rendimento do que aqueles obtidos com o combustível de origem. Tal fato ocorre pela diminuição da eficiência volumétrica obtida e observada, principalmente, em motores aspirados. O biogás, por estar em estado gasoso, tem como vantagem não precisar do processo de vaporização, necessário para combustíveis líquidos. No entanto, ocupa uma maior porção em volume de mistura admitida do que ocuparia um combustível líquido, provocando uma limitação em volume na quantidade de ar admitido durante o processo. Neste sentido, torna-se necessária a utilização de biogás com elevado grau de pureza, pois grandes porções de CO₂, contidos em uma porção de biogás não purificado, também reduzirão o rendimento volumétrico. Outro fato adicional que corrobora rendimentos maiores com combustíveis líquidos associa-se ao calor específico destes combustíveis. Esta característica provoca uma redução de temperatura no coletor de

admissão, aumentando a densidade do ar e, conseqüentemente, o rendimento volumétrico.

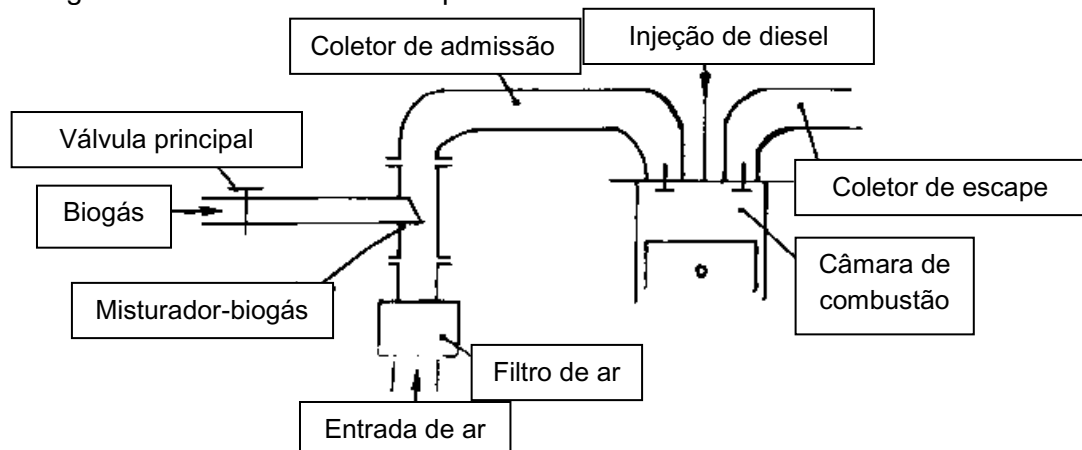
3.1.3 Diesel *dual fuel* para operação com biogás

Como descrito anteriormente, os motores de ciclo Diesel são caracterizados pela introdução do combustível no final do tempo de compressão, na câmara de combustão com pressões de até 1200 bar em motores ciclo Diesel atuais. O combustível, ao entrar em contato com o ar, em temperatura elevada, entra em combustão imediatamente.

O sistema *dual fuel* é caracterizado por uma mistura ar-biogás, introduzida em condições abaixo da temperatura de autoignição. O sistema original de injeção de combustível é mantido para prover certa quantidade de diesel ao sistema. No entanto, paralelamente, o motor admite e comprime uma mistura de ar-biogás, previamente preparada em um dispositivo externo de homogeneização, conforme demonstrada na Figura 16. Este equipamento possibilita a entrada independente de ar e biogás e garante uma mistura estequiométrica compatível para obtenção de combustão.

Desta forma, a ignição é iniciada no final do processo de compressão da mistura ar-biogás, pela introdução de um pequeno volume de diesel injetado, o qual provocará um incremento de energia necessária para a combustão da mistura ar-biogás. O volume de diesel necessário para a ignição é de 10% a 20% do volume necessário para a ignição com diesel puro.

Figura 16 - Sistema *dual fuel* aplicado a motores de combustão interna



Fonte: adaptado de Fao

O funcionamento do motor em cargas parciais requer uma redução no fornecimento de biogás por meio de uma válvula de controle. Esta válvula pode ser operada manualmente ou automaticamente, utilizando sistemas de controle eletrônicos ou mecânicos. A redução da oferta de ar diminui a sucção de ar, reduzindo a pressão de compressão e PME. Condições, como a mencionada anteriormente, podem comprometer a manutenção da autoignição necessária. Para a manutenção de altas pressões de compressão, os motores *dual fuel* não devem utilizar válvulas borboletas para controle de fluxo de ar.

A razão ar-combustível necessária sofrerá variação em função do volume de ar-biogás ofertado. Todos os outros parâmetros, como taxa de compressão e ponto de injeção, permanecem inalterados em motores *dual fuel*.

As modificações aplicadas em um motor ciclo Diesel para operação com o sistema *dual fuel* apresentam as seguintes vantagens:

- Operação unicamente com diesel em caso de indisponibilidade de biogás.
- Qualquer adição de biogás com variação de 0% a 85% pode substituir o volume de diesel necessário para combustão, sem alteração de desempenho.

As limitações do sistema estão associadas aos seguintes fatores:

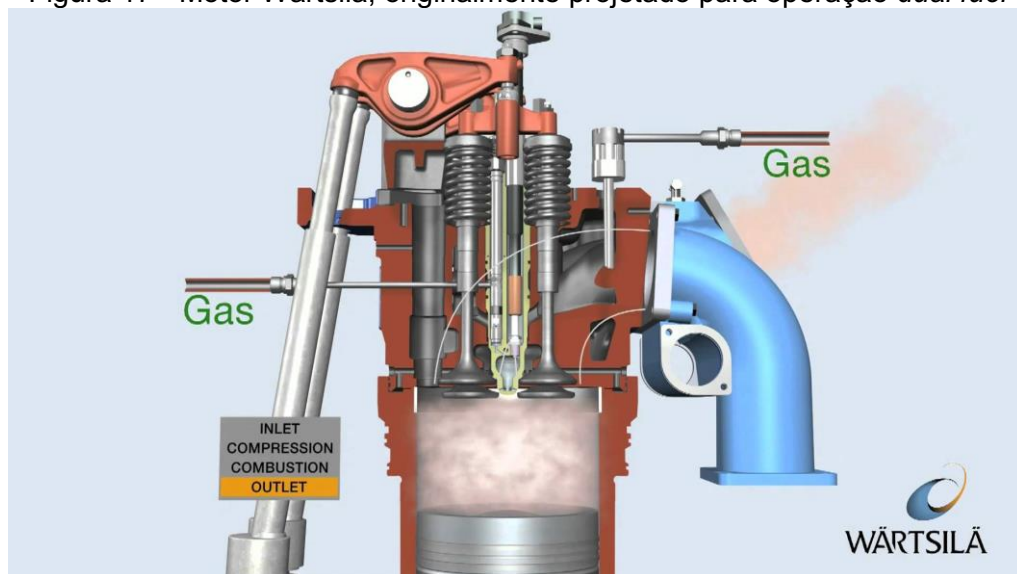
- O sistema *dual fuel* não pode operar sem suprimento de diesel para desencadeamento da ignição.
- Quando a injeção de diesel decresce a valores menores que 15% pode ocorrer superaquecimento dos jatos injetados. Motores de grande capacidade volumétrica possuem circulação interna de combustível nos bicos injetores para o seu resfriamento.

Frequentemente, os motores modificados para operação com sistema *dual fuel* são preparados para operar com vazões de diesel maiores do que o necessário, a fim de garantir o arrefecimento do jato de injeção. Estudos demonstram que, o biogás submetido à purificação com valores de CH₄ em torno de 95% resulta em temperaturas de combustão maiores que os obtidos para o biogás não submetido a processos de purificação, devido ao aumento de seu poder calorífico.

A Figura 17 apresenta um motor Wartsila, originalmente projetado para operação com biogás. Motores deste tipo, concebidos por projeto, para operação

dual fuel, dispõem de métodos de controle apurados para obtenção de economia de combustível e queima eficiente, no entanto, apresentam alto custo de operação. Para estes sistemas, a injeção piloto de diesel é realizada de forma temporizada, com abertura e fechamento gerenciados pelo eixo de cames do motor. Os momentos de abertura e fechamento estão associados à posição da árvore de manivelas, ocorridos no tempo adequado de funcionamento do motor. A entrada de gás é adaptada em uma entrada extra, próxima à localização da válvula de admissão do motor. A vantagem adicional deste sistema é a possibilidade de gerenciar a introdução de biogás durante o período de abertura da válvula de admissão, mas evitando-se os períodos de abertura da válvula de escape durante o cruzamento de válvulas, minimizando o desperdício de combustível não queimado.

Figura 17 - Motor Wartsila, originalmente projetado para operação *dual fuel*



Fonte: Wartsila

Para todas as aplicações com sistema *dual fuel*, a distância entre a posição de introdução do biogás no coletor de admissão e a válvula de admissão devem ter distância compatível, para possibilidade de homogeneização do biogás com o ar admitido. Esta consideração torna-se essencial para motores multicilíndricos, que tendem à admissão de ar desigual entre cilindros. De acordo com Mitzlaff (1988), considera-se suficiente uma distância equivalente a duas vezes o diâmetro do duto de admissão.

3.1.4 Motores de ciclo Diesel adaptados para operação com biogás

Quando necessário, inviabiliza-se a obtenção de altas potências de saída e utilização de motores já desenvolvidos para operação com biogás e pode-se considerar a transformação de motores ciclo Diesel para operação com biogás.

Em teoria, um motor de ciclo Otto deveria ser mais eficiente que um motor de ciclo Diesel, devido ao poder calorífico dos combustíveis líquidos utilizados normalmente. No entanto, devido à taxa de compressão inibir a eficiência dos motores ciclo Otto, é mais eficiente, na prática, um motor de ciclo Diesel operando com este combustível.

As principais modificações em motores de ciclo Diesel para viabilização da utilização com biogás consistem em:

- Remoção dos bicos injetores.
- Introdução de válvula borboleta para controle do fluxo de ar inserido no motor.
- Redução da taxa de compressão para valores em torno de 13:1.
- Adaptação de velas de ignição, sistema de ignição e alternador.
- Adaptação de um dispositivo de controle de pressão antes da introdução de ar no motor.

A transformação de um motor ciclo Diesel em um motor adaptado para operação com biogás é uma conversão complexa, no entanto, parece ser a mais adequada, do ponto de vista técnico e econômico. Os projetos aplicados a motores ciclo Diesel, na maioria, já preveem baixas velocidades de rotação e altas taxas de compressão. Desta forma, o aproveitamento termodinâmico destes motores, operando com biogás, mostra-se mais vantajoso do que motores ciclo Otto que operam com biogás.

Segundo Stefan (2004), devem ser respeitados, para esta aplicação, alguns parâmetros técnicos associados à relação estequiométrica. A inflamabilidade do CH_4 , quando misturado ao ar, deve ter uma concentração de 5% a 15% em volume, enquanto que a concentração de ar deve estar entre 85% e 95% em volume. Relações estequiométricas com concentração de CH_4 menor que 5% e maior que 15% não apresentam boa inflamabilidade. A Tabela 3 apresenta um comparativo

entre sistemas de alimentação que utilizam biogás, possibilitando a comparação sobre a complexidade de transformação e tempo de vida útil.

Tabela 3 - Comparativo entre sistemas de alimentação que utilizam biogás

Característica	Ciclo Otto adaptado para operar com biogás	<i>Dual Fuel</i>	Ciclo Diesel adaptado para operar com biogás
Transformação	Simplex	Intermediária	Complexa
Taxa de compressão	8-9	12,5-17	9-16
Modificação da taxa de compressão	Sem modificação	Sujeito à modificação	Redução da taxa de compressão
Tempo de vida útil	+/- 2-4 anos	+/- 4-8 anos	+/- 4-8 anos

Fonte: adaptado de Mitzlaff (1988)

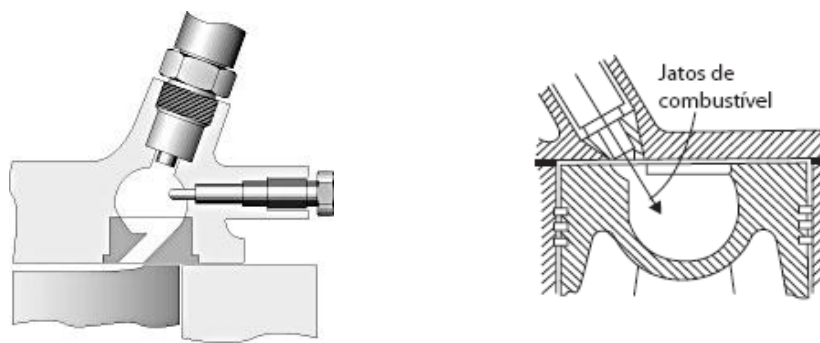
Em relação à escolha da taxa de compressão, deve-se considerar a variedade de gases que se pretende utilizar como combustível. O GNV, com uma quantidade considerável de C_4H_{10} , exige uma taxa de compressão relativamente baixa, assim como os combustíveis oriundos do GLP. Para estas aplicações, são propícias taxas de compressão em torno de 10,5:1. A mudança na taxa de compressão consiste, essencialmente, da alteração do volume da câmara de combustão. Este efeito pode ser obtido pelas seguintes modificações:

- Mudança dos pistões por amostras com maior volume de topo.
- Usinagem do topo do pistão para aumento do volume da câmara de combustão. Esta modificação deve ser considerada com critério e atenção especial para a alteração da robustez do componente.
- Usinagem do cabeçote para adequação de nova câmara de combustão compatível com a taxa de compressão pretendida.
- Adaptação de nova junta do cabeçote, com espessura aumentada para diminuição da taxa de compressão.

A Figura 18 apresenta as principais diferenças entre as câmaras de combustão utilizadas em motores de injeção direta e indireta. A forma da câmara de combustão tem um papel importante, pois deve facilitar a propagação da chama,

com aumento uniforme de pressão no interior do cilindro. Visto que, alguns motores a diesel convertidos para operação com biogás migraram de motores com pré-câmara de combustão, a eliminação da pré-câmara deve ser considerada, para facilitação do efeito mencionado anteriormente. Motores de ciclo Diesel de injeção direta são as melhores opções para conversão de motores diesel em motores adaptados para operação com biogás.

Figura 18 - Motor diesel com pré-câmara de combustão de injeção indireta e injeção direta de combustível



Fonte: Brunetti (2012)

Tecnicamente, a opção mais apropriada é a obtenção de um novo pistão ou novo cabeçote, para adequação da taxa de compressão. No entanto, esta opção só é viável quando se dispõem de peças de reposição com as características desejadas para esta ação. Como mencionado anteriormente, a possibilidade de usinagem do topo do pistão ou usinagem da câmara de combustão deve ser considerada com atenção, sob risco de perda de robustez dos componentes envolvidos e possibilidade de falhas prematuras.

Os motores de ciclo Diesel adaptados para operação com biogás em sistemas motogeradores devem operar com controle do fluxo de ar, por não serem mais sujeitos à ignição por compressão, como definido no projeto original. Desta forma, a introdução de um sistema de válvula borboleta deve ser providenciado. A Figura 19 apresenta uma válvula Maxitrol de controle de pressão do gás. O controle da pressão de abastecimento do biogás ao motor deve ser controlado, para otimização e homogeneização do fluxo de entrada da mistura ar-combustível ao motor. Esta válvula está instalada entre a biodigestor e a válvula borboleta.

Figura 19 - Válvula Maxitrol de controle de pressão de abastecimento de biogás do Condomínio Ajuricaba



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Os motores movidos a biogás de aplicação veicular apresentam um reservatório de gás em alta pressão, que viabiliza a introdução de biogás em pressão elevada, mesmo em motores turbo comprimidos em posição após *booster* do compressor. Para aplicação em sistemas motogeradores, a pressão oriunda do biodigestor é baixa e não permite a introdução de biogás em localizações do sistema de admissão que já dispõem de pressão elevada. Assim, deve-se providenciar uma conexão para abastecimento de biogás em localização de baixa pressão.

A pressão de abastecimento será controlada em função das características da instalação. As pressões de saída do digestor podem variar de 20 mbar a 1 bar, em função da presença de soprador na linha de abastecimento do biogás. A válvula de controle de pressão terá a responsabilidade de otimizar a pressão de entrada no motor. Variações de vazão entre 50 Nm³/h e 120 Nm³/h são as mais usuais. A Figura 20 apresenta o ponto de abastecimento do biogás vindo do biodigestor, com passagem pela válvula de controle de pressão e entrada no corpo de borboletas do motor.

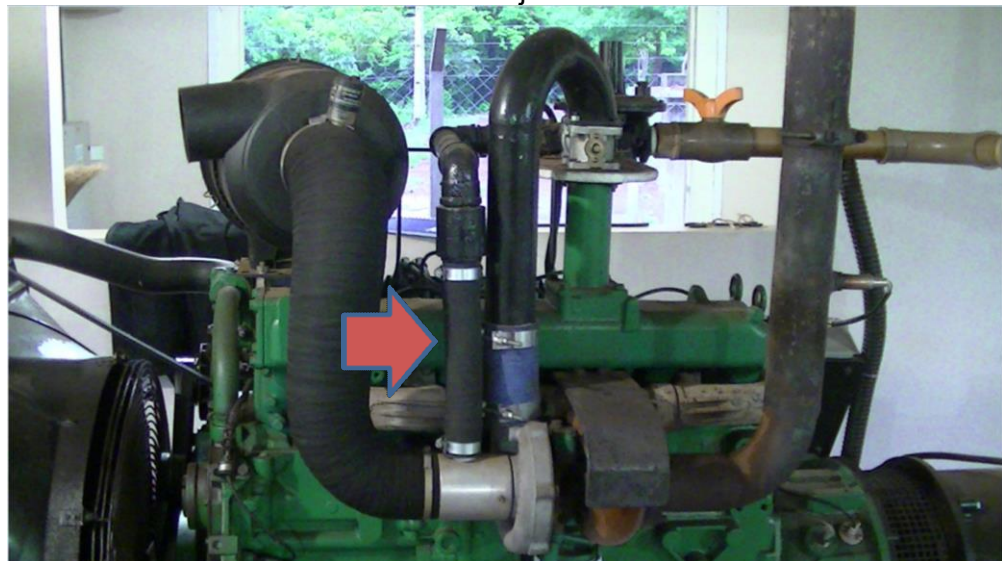
Figura 20 - Linha de abastecimento de biogás com motor aspirado adaptado da Granja Haake



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 21 apresenta o ponto de abastecimento do biogás em um motor turbocomprimido. O fato relevante desta instalação é a introdução do ponto de abastecimento do biogás na região de baixa pressão do compressor. A observação deste detalhe é fundamental, pois a pressão do biogás vindo do biodigestor não apresenta potencial para introdução na região de alta pressão do compressor.

Figura 21 - Linha de abastecimento de biogás com motor turbo comprimido adaptado do Condomínio Ajuricaba

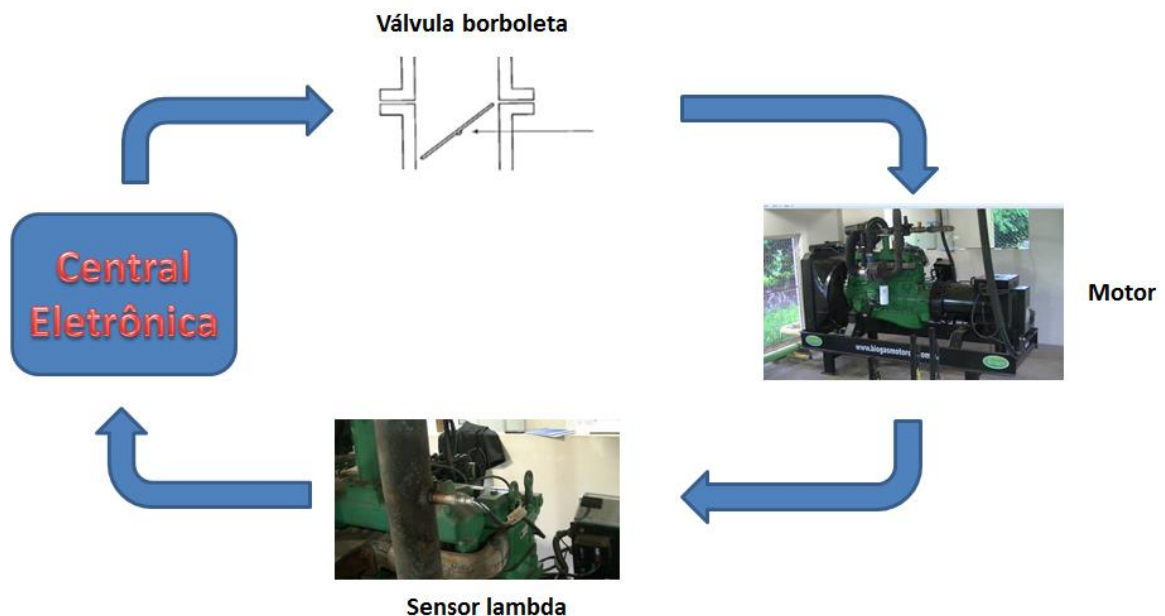


Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Um dos desafios enfrentados na aplicação de sistemas motogeradores é a manutenção da rotação de saída, caracterizada pela qualidade do biogás e pressão

disponível no sistema. Visando minimizar esta ocorrência, sistemas atuais de controle eletrônico são instalados em motores de ciclo Diesel sem recursos eletrônicos avançados, para modificação do ângulo de abertura da borboleta e garantia da manutenção de rotação desejada. A Figura 22 apresenta o fluxograma de funcionamento deste sistema. O princípio de funcionamento baseia-se na aquisição da qualidade da mistura queimada, presente no sistema de escape via sensor lambda. As modificações no teor de O_2 são captadas pelo sensor lambda e enviadas à central eletrônica, que providenciará a adequação da posição da válvula borboleta, garantindo a manutenção da rotação desejada.

Figura 22 - Fluxograma de controle da posição da válvula borboleta



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 23 apresenta um sistema eletrônico de controle de ignição para motor Diesel adaptado para operar com biogás. Vários fabricantes independentes já possuem este sistema, que possibilita o controle do mapa de ignição, controle de posição da válvula borboleta, temperatura do motor, entre outros parâmetros.

Figura 23 - Sistema eletrônico de controle de ignição para motor ciclo Diesel, adaptado para operar com biogás do Condomínio Ajuricaba



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 24 apresenta um cabeçote de motor ciclo Diesel com adaptação de velas de ignição. Para esta adaptação, sugere-se o aproveitamento do orifício de instalação do bico injetor, com adaptação de rosca, para acomodação deste componente. Critérios em relação à geometria do cabeçote e espaço disponível devem ser considerados para evitar danificação do componente.

Figura 24 - Motor ciclo Diesel, adaptado com velas e bobinas para operação com biogás do Condomínio Ajuricaba



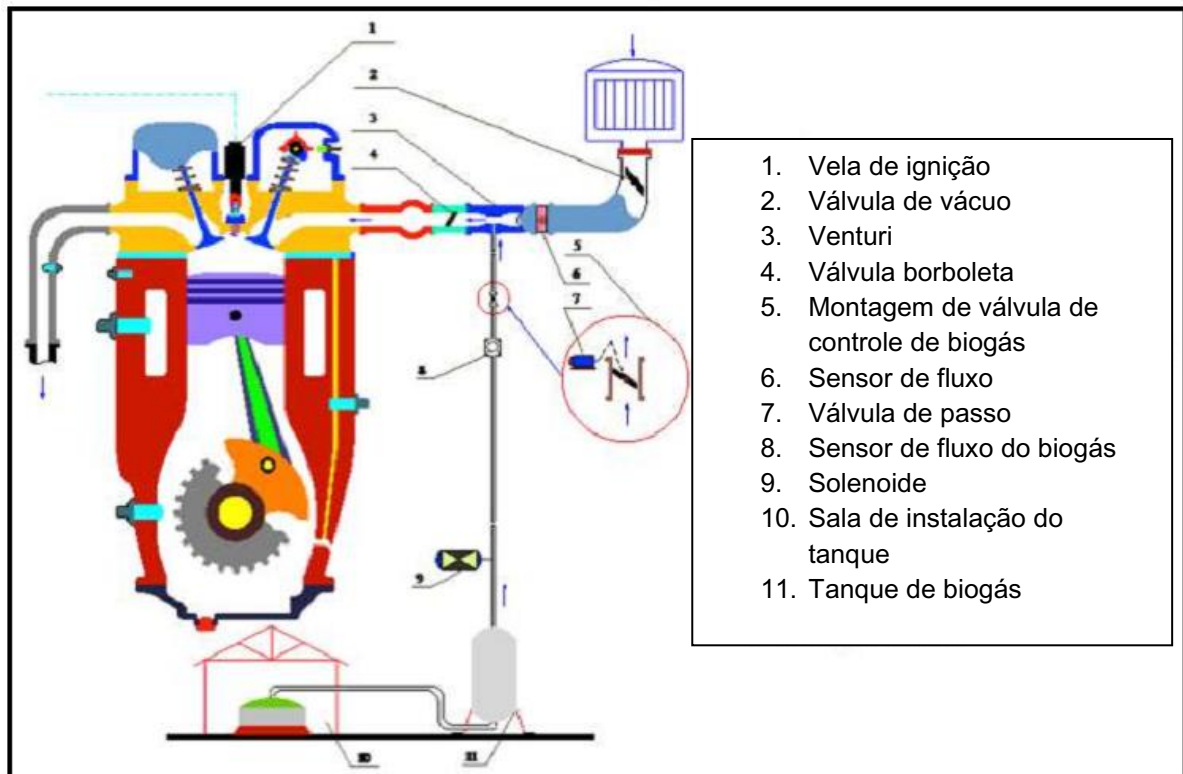
Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Os motores de ciclo Diesel atuais, com recursos eletrônicos avançados, possibilitam um controle ainda mais apurado do sistema de gerenciamento do motor, conforme demonstrado na Figura 25. Os sensores de identificação da posição da

árvore de manivelas e comando de válvulas são utilizados para determinação da rotação e avanço de ignição. Um sistema de controle eletrônico assegurará o correto fornecimento de biogás ao motor. Estes sistemas utilizam um sistema *venturi*, com furos calibrados com auxílio de *software* CFD, para controle do fluxo de biogás. A taxa de ar admitido e a taxa de fluxo do biogás são determinadas pelo diferencial de pressão requisitada pelo sensor de pressão absoluta, posicionado no coletor de admissão (MAP). As variações de temperatura do ar de admissão são requisitadas pelo sensor NTC de temperatura do ar, para o correto fornecimento de biogás ao sistema de admissão. Em adição, estes motores dispõem de três *steps* de controle para fluxo do biogás e controle da relação ar-combustível:

- Sistema válvula borboleta para controle de fluxo de ar e estabilização do motor.
- Válvula de fluxo para controle de vazão do biogás e manutenção da relação ar-combustível necessário.
- Válvula de vácuo para controle e incremento do fluxo de biogás em condições pós-partida e situações de baixa pressão do biogás.

Figura 25 - Vista esquemática de um motor diesel eletrônico, adaptado para operar com biogás



Fonte: adaptado de Dung (2012)

3.2 Efeitos do biogás nos motores de combustão interna

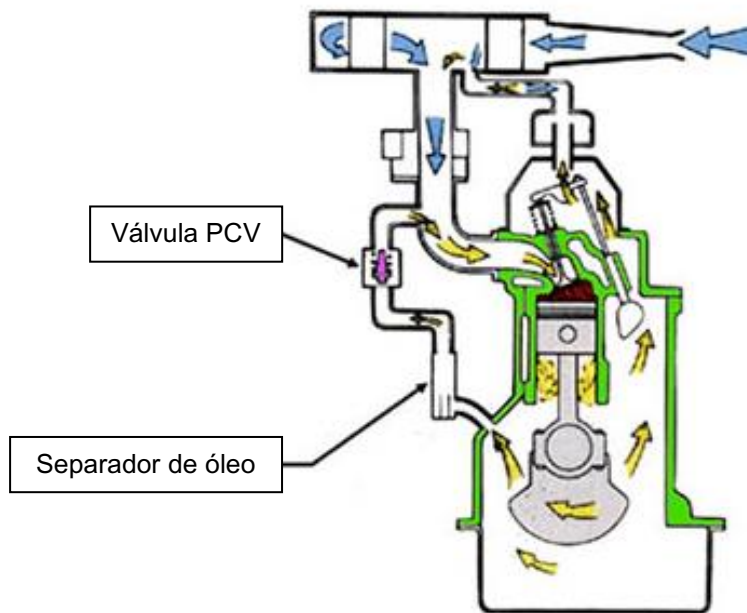
Visto que a composição do biogás *in natura* é constituída de vapor de água, gás carbônico e gases corrosivos, sua utilização compromete a durabilidade dos motores de combustão interna, devido à degradação prematura a que o motor é submetido. A remoção ou minimização das porções de H_2O , CO_2 , S, H_2S e outros elementos, através de filtros e dispositivos de resfriamento, condensação e lavagem, são imprescindíveis para a confiabilidade e emprego do biogás em motores de combustão interna (OLIVEIRA, 2004).

O estudo das reações químicas indica que, durante a combustão, o H_2S sofrerá reação e formará SO_2 e H_2O . Como consequência, o SO_2 reagirá com o H_2O , resultando em H_2SO_3 . O SO_2 pode também reagir com o O_2 , formando SO_3 e, então, com o H_2O , para formação de H_2SO_4 . A amônia é outro componente corrosivo do biogás. Normalmente, o NH_3 reage com o H_2O , formando NH_4OH , o qual apresenta potencial corrosivo aos componentes que contém alumínio e cobre.

Desta forma, bronzinas e buchas que, usualmente, são produzidas com estes metais, são suscetíveis à corrosão.

A formação destes gases corrosivos segue três caminhos distintos no processo de degradação do motor. O primeiro associa-se à formação de películas de recobrimento dentro da câmara de combustão e ataque corrosivo aos componentes expostos na frente de chama da combustão e, eventualmente, a gases não queimados. O segundo relaciona-se à vazão de gases pelos anéis de segmento, conhecido como *blow by*, o qual provocará acidez no óleo lubrificante oriundo deste efeito. Desta forma, todas as peças metálicas em contato com este óleo lubrificante sofrerão corrosão. O terceiro vincula-se ao sistema de desaeração do cárter, o qual provocará uma retroalimentação dos gases oriundos do *blow by* novamente para a câmara de combustão. A Figura 26 apresenta o circuito de circulação dos gases do *blow-by*, da admissão do ar pelo sistema de filtragem, passagem dos gases pelos anéis de segmento, devido ao efeito de compressão e combustão, resultando no acesso dos gases queimados ao cárter de óleo.

Figura 26 - Sistema de desaeração do cárter

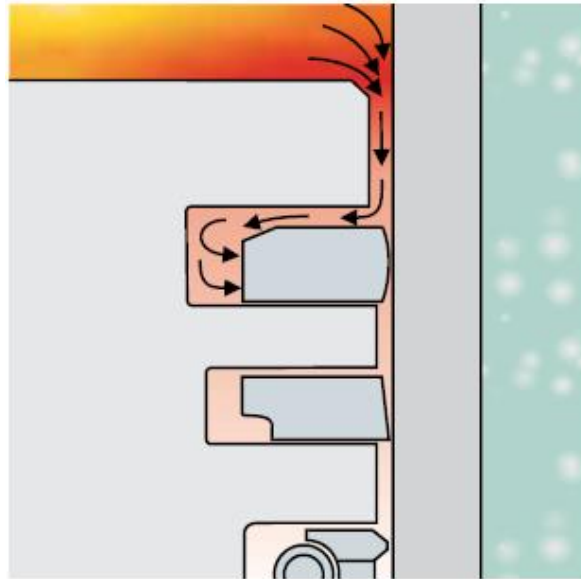


Fonte: adaptado de aficionados a la mecánica

O *blow by* é o resultado de forças físicas geradas dentro da câmara de combustão, cilindros e bloco do motor, sendo função da inter-relação da posição do pistão, pressão na câmara de combustão e velocidade de progressão da chama durante o ciclo de trabalho. O fluxo do *blow by* é observado independentemente do combustível utilizado e os produtos da combustão são direcionados à região do cárter, em função da diferença de pressão entre a região superior e inferior do pistão.

A Figura 27 apresenta o mecanismo de passagem dos gases de combustão pela região dos anéis de pistão, devido à pressão gerada na câmara de combustão. A composição dos gases que acessam o cárter do motor pode ser composta de gases não queimados, não atingidos pela frente de chama, bem como gases residuais queimados que participaram do processo de combustão, mas não foram retidos pelos anéis de segmento. O desgaste progressivo do sistema pistão/anéis e cilindros tende a aumentar a vazão dos gases de *blow by* pelos anéis de segmento, tendo em vista o processo natural de envelhecimento do equipamento. Não são recomendadas ações de manutenção envolvendo somente a troca de anéis sem a intervenção nos pistões e cilindros, pelo desgaste associado a esta peça.

Figura 27 - Mecanismo de passagem dos gases de *blow by* na região dos anéis



Fonte: adaptado de Manual KS (2011)

De acordo com Garcia (2015), o biogás proveniente de instalações industriais e esgoto apresenta significativa proporção de siloxanos. Este componente, oriundo da família dos silícios, está normalmente associado ao óleo base utilizado na produção de xampus, cremes e desodorantes. Também são observados em inibidores de espuma utilizados em detergentes.

A combustão do biogás contendo siloxanos promove a formação de óxidos, precipitados na forma de partículas sólidas dentro da câmara de combustão. Estas partículas, por sua vez, têm uma característica altamente abrasiva, acarretando em redução significativa da vida útil do equipamento utilizado. O processo de formação ocorre da combinação dos siloxanos em condições específicas de temperatura e pressão e na presença de componentes que favoreçam a polimerização, os quais são depositados sob a forma de uma película sobre a superfície dos cilindros, velas e válvulas de admissão e escape, resultando em incremento de temperatura e atrito (GARCIA, 2015).

A Figura 28 apresenta o comprometimento da superfície do cilindro, ocasionado pela interposição de partículas abrasivas de siloxano na região de contato dos anéis de segmento. O aspecto observado é de contato abrasivo.

Figura 28 - Superfície dos cilindros comprometida pela presença de siloxanos



Fonte: Guidance on gas treatment (2010)

A Figura 29 apresenta a deposição de película de cor clara e espessa na câmara de combustão, devido à presença de siloxanos na composição do biogás. Este fenômeno causará o desgaste acentuado da sede de válvulas, devido à abrasividade do ambiente.

Figura 29 - Depósitos de siloxanos na câmara de combustão do cabeçote



Fonte: International journal of waste resources

A Figura 30 apresenta a incrustação de película clara de siloxano nas pás de acionamento de um turbocompressor. O composto causará o desgaste acentuado deste componente, pelo contato abrasivo com a carcaça do turbocompressor.

Figura 30 - Incrustação de siloxano nas pás do compressor



Fonte: International journal of waste resources

Estudos realizados afirmam que a manutenção da temperatura da água do sistema de arrefecimento em valores elevados, mas dentro do limite de operação do motor, minimizam a formação da película de recobrimento por siloxanos (MITZLAFF, 1988).

Dentre os componentes que sofrem desgaste severo em motores de combustão interna que operam com biogás, destacam-se:

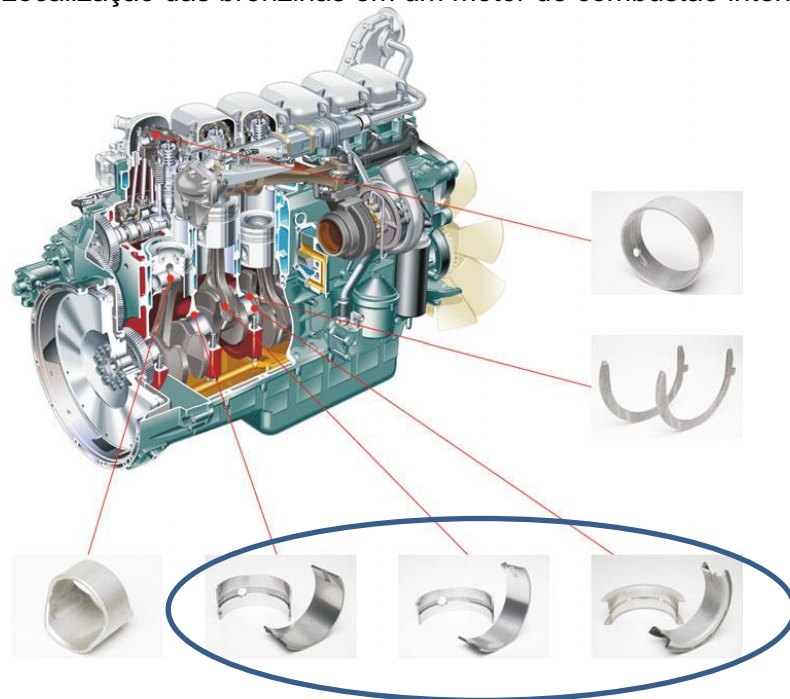
- Componentes que possuem cobre em sua composição, como bronzinas e buchas.
- Pistões, anéis e cilindros.
- Válvulas de admissão e escape.
- Sistema de escapamento.

Algumas ações preventivas podem ser tomadas, para minimizar as intervenções de reparação por desgaste prematuro de componentes.

3.2.1 Bronzinas e buchas

A Figura 31 apresenta a localização das bronzinas e buchas de biela em um motor de combustão interna. As bronzinas são componentes utilizados para reduzir o atrito e atuar como apoio de componentes giratórios e deslizantes. Nos motores de combustão interna, são largamente utilizados como apoio da árvore de manivelas e bielas. Sua construção é composta por um metal base, sendo, normalmente, aço, com cobertura suplementar de uma liga antifricção, com baixo coeficiente de atrito depositado sobre este.

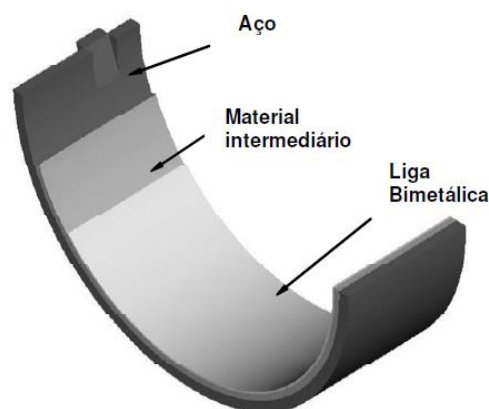
Figura 31 - Localização das bronzinas em um motor de combustão interna



Fonte: adaptado de Mahle Cylinder Components (2010)

A Figura 32 apresenta a composição estrutural de uma bronzina, com identificação do aço base e as deposições das ligas antifricção. Esta liga poderá ter uma variedade de composições, no entanto, sua variação sempre está associada à utilização de ligas contendo alumínio, bronze, estanho, cobre e níquel.

Figura 32 - Estrutura construtiva típica de bronzinas



Fonte: adaptado de Mahle Cylinder Components (2010)

As ligas cobre-bronze são extremamente suscetíveis ao processo de corrosão por H_2S em motores de combustão interna. A reação entre cobre e H_2S é muito rápida, mostrada na Equação 1:



Esta reação é reforçada pela presença de oxigênio atmosférico e água. Com excesso de H_2S , pode ser formado o sulfeto de cobre, severizando o processo de corrosão, conforme demonstrado na Equação 2:



Conforme apresentado na Figura 33, em peças corroídas por H_2S , observa-se a presença de largas áreas enegrecidas, com aspecto de severa abrasão no sentido radial, com remoção da superfície antifricção da bronzina.

Figura 33 - Aspecto de bronzina corroída com utilização de biogás



Fonte: Mahle Cylinder Components (2010)

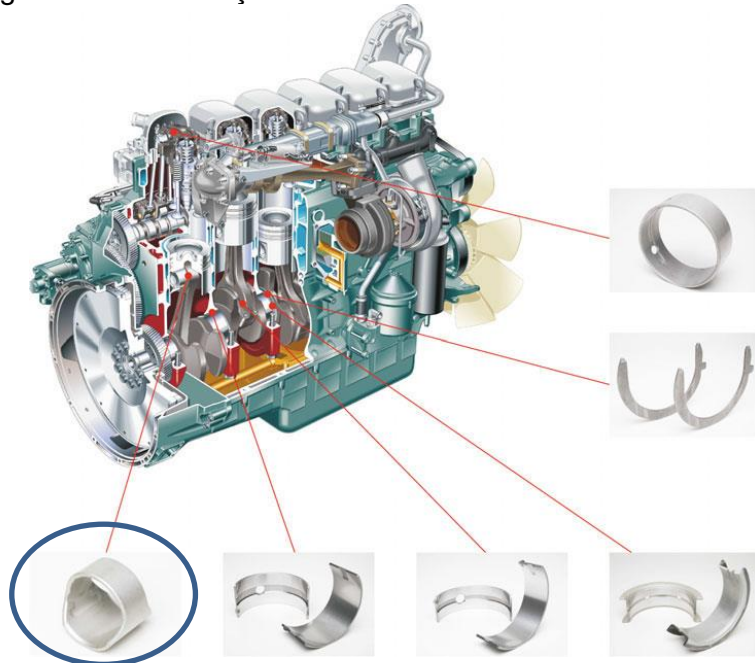
A instalação de bronzinas alternativas com cobertura de ligas de alumínio-estanho, conhecidas como *Sputter bearings*, são utilizadas para estas aplicações. O processo de produção com deposição da liga antifricção, utilizando o método de Deposição Física de Vapor (PVD), garante ao componente elevada resistência ao desgaste, combinada com a alta capacidade de carga. Como vantagem adicional, o método de deposição por PVD utilizado garante uma distribuição homogênea da liga antifricção e obtenção de dureza três vezes superior ao obtido pelo método tradicional.

Como segunda opção, pode-se considerar a aplicação de bronzinas com recobrimento polimérico. A aplicação de polímeros na superfície de contato das bronzinas tem como objetivo inicial reduzir o atrito da interação com a árvore de manivelas, no entanto, a cobertura polimérica utilizada atua como uma barreira

eletroquímica, visto que os polímeros não conduzem elétrons. Desta forma, há um ganho considerável na resistência à corrosão, uma vez que não há troca de elétrons entre a superfície da bronzina e o lubrificante contaminado por H_2S .

A Figura 34 apresenta a localização das buchas de biela. As buchas de biela são componentes mecânicos de forma cilíndrica, normalmente inseridas no olhal menor da biela, quando aplicadas em sistemas com pino de pistão flutuante. Esta liga poderá ter uma variedade de composições, no entanto, sua variação sempre está associada à utilização de ligas contendo alumínio, estanho, cobre, níquel, manganês e silício.

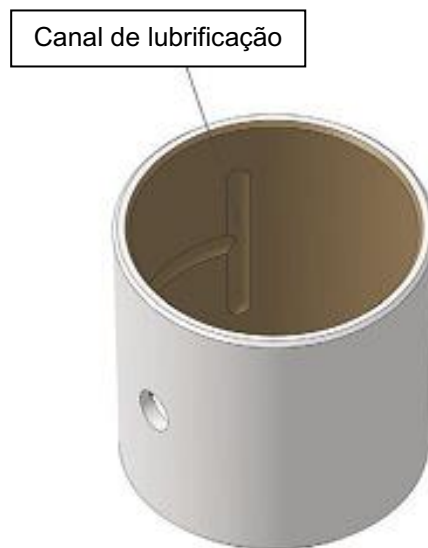
Figura 34 - Localização das buchas em um motor de combustão interna



Fonte: adaptado de Mahle Cylinder Components (2010)

A Figura 35 apresenta a superfície interna de uma bucha de biela com canal de lubrificação para inserção de óleo na área de contato do pino de pistão.

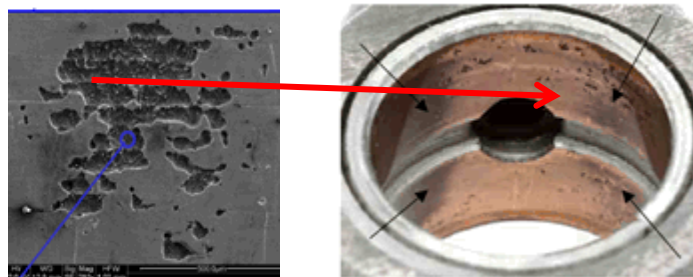
Figura 35 - Bucha de biela aplicada a motores de combustão interna



Fonte: adaptado de Mahle Cylinder Components (2010)

Como mencionado anteriormente, componentes que utilizam bronze e cobre como composição são suscetíveis a processos de corrosão, iniciados pela presença de H_2S . O modo de falha deste componente ocorre pelo ataque a pontos fracos da estrutura do *layer*, originando a presença de *pittings*, com conseqüente produção de superfície irregular. A Figura 36 destaca o material da superfície de contato do pino de pistão. O movimento semi-rotacional do pino de pistão, em relação à bucha de biela, promove o destaque da superfície enfraquecida. A superfície, exposta abaixo, do *layer*, é corroída por H_2S . A combinação de altas temperaturas, alta pressão localizada e movimentação de óleo, causada pelo movimento cíclico do componente, promove a rápida corrosão de ligas de cobre.

Figura 36 - Aspecto de bucha de biela corroída com utilização de biogás

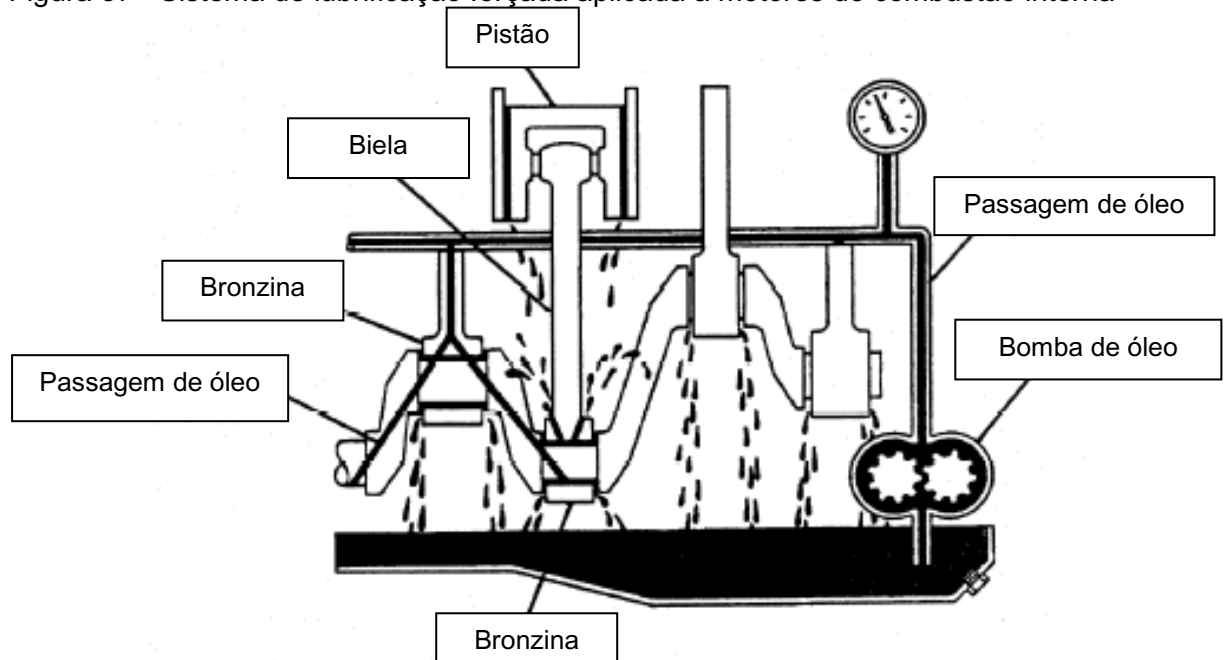


Fonte: adaptado de Mahle Cylinder Components (2010)

De acordo com Graham (1986), as bronzinas de biela não são atacadas com tanta severidade quanto as bronzinas principais e buchas. Motores de grande porte

movidos a biogás, dotados de sistema de lubrificação forçada, apresentam este comportamento. A Figura 37 apresenta o funcionamento de um sistema de lubrificação forçada, aplicado a um motor de combustão interna. Um estudo do sistema mostra que as buchas de biela não recebem fluxo permanente de óleo, devido à arquitetura do sistema. Esta diferença sugere que a corrosão é promovida pelo H_2S presente na superfície da bucha e não pelo H_2S dissolvido no óleo. Desta forma, observa-se a necessidade de proporcionar fluxo contínuo de óleo, evitando-se a estagnação do filme de óleo na região.

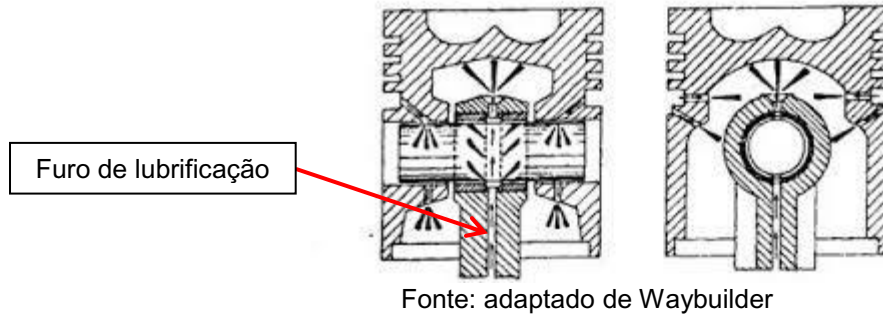
Figura 37 - Sistema de lubrificação forçada aplicada a motores de combustão interna



Fonte: adaptado de Waybuilder

Levando-se em conta a exposição acima, o desgaste observado em buchas de biela em motores de grande porte poderia ser minimizado, optando-se pela tecnologia utilizada em motores de pequeno porte em longa data. A Figura 38 apresenta uma biela com furo de lubrificação interno no corpo da biela. Esta ação proporciona o fluxo contínuo de óleo nesta região, evitando-se sua estagnação.

Figura 38 - Biela com furo interno de lubrificação



A Figura 39 apresenta o processo de refrigeração dos pistões por jato de óleo. Esta tecnologia foi introduzida em motores de pequeno porte, para redução da temperatura de trabalho dos pistões, no entanto, proporciona a lubrificação adicional do pino de pistão e movimentação contínua de fluxo. Logicamente, devem ser considerados estudos associados ao aumento de pressão de óleo no sistema e custo de projeto.

Figura 39 - Jato de óleo aplicado a motores de combustão interna



3.2.2 Pistões e anéis de segmento

A combinação de altas temperaturas de combustão e pressão são ideais para o desencadeamento de processos de corrosão no sistema cilindro, anéis e pistão. A baixa velocidade do pistão próximo ao ponto superior de inversão, associada à pressão e temperatura elevadas durante o ciclo de combustão e baixa lubricidade do biogás, quando comparado com combustíveis obtidos por derivação direta do petróleo, levam a uma criticidade de operação dos pistões, anéis e cilindro nas regiões próximas do PMS.

A Figura 40 apresenta um pistão com corrosão severa, ocasionada por H_2S , com prendimento dos anéis de segmento na região dos canaletes. Motores submetidos à operação com biogás não tratado apresentam tendência de ocorrência deste fenômeno.

Figura 40 - Pistão com corrosão severa ocasionada por H_2S



Fonte: Waybuilder

Fabricantes de motores que operam com biogás utilizam processos de anodização no primeiro e segundo canaletes dos pistões, conforme apresentado na Figura 41. Esta ação minimiza o processo de prendimento dos anéis, pela introdução de um material de baixo coeficiente de atrito e, adicionalmente, minimiza o desgaste dos canaletes, pelo aumento da resistência mecânica do flanco inferior.

Figura 41 - Pistão com primeiro canaleta anodizado



Fonte: Wind Energy Business Review

3.2.3 Válvulas e sede de válvulas

A Figura 42 apresenta o desgaste de válvulas, corroídas pela utilização de biogás não purificado. As válvulas de admissão e escape são responsáveis pela troca de gases ocorrida durante o processo termodinâmico em motores de combustão interna. O desgaste observado nestes componentes, quando operam com biogás, apresentam dois caminhos distintos. O primeiro associa-se à exposição das válvulas a altas temperaturas de combustão com presença de H_2S , que desencadeiam processos corrosivos severos nestes componentes.

Figura 42 - Válvulas corroídas com utilização de biogás



Fonte: Gas turbines power

O segundo está associado ao processo abrasivo, ocasionado pela presença de siloxanos no biogás. A Figura 43 apresenta uma câmara de combustão com incrustação de película abrasiva, ocasionada pela presença de siloxanos. Este fenômeno causará o contato abrasivo entre a válvula e a sede de válvulas, potencializando o efeito de desgaste.

Figura 43 - Válvulas de cabeçote atacadas por siloxanos



Fonte: Desotec

Uma possibilidade encontrada para minimização deste efeito em motores movidos a biogás é a nitretação deste componente. A nitretação é um tratamento térmico que proporciona uma camada externa protetiva, com espessura de até 0,020 mm, aplicada por difusão. Este procedimento aumenta, substancialmente, as propriedades termodinâmicas das válvulas, aumentando sua dureza, na ordem de 1200 Vickers.

3.2.4 Avaliação do óleo lubrificante

Recentemente, tem-se destacado o interesse no desenvolvimento de óleos lubrificantes para inibição do processo de corrosão em motores movidos a biogás. Embora estes óleos sejam ideais para neutralização de ácidos fortes formados a partir dos produtos de combustão, não são, especificamente, formulados para combater o ataque por H₂S. Como exemplo, a fabricante de motores Waukesha Engines especifica um range de óleo, em relação ao *Total Base Number* (TBN), dependendo da concentração de H₂S no biogás utilizado. Adicionalmente, este fabricante recomenda a análise regular do *Total Base Number* (TBN) e do *Total Acid Number* (TAN), para especificação de critérios de aceitação.

Visto que a acidez gerada no óleo lubrificante com a queima do biogás é uma via significativa para a ocorrência de corrosão de componentes, o aumento do valor do TBN do óleo pode ser providenciado para minimizar a acidez provocada pelos produtos de combustão do biogás e seu potencial corrosivo. No entanto, o aumento do TBN incide em aumento de cinzas durante o processo de combustão, devido aos aditivos usados. Uma estratégia viável para evitar este fenômeno é a manutenção de elevadas temperaturas de óleo, visando minimizar a condensação de água durante o tempo de operação.

A Tabela 4 apresenta a correlação entre o elemento encontrado no óleo lubrificante e as possíveis fontes. O grau de contaminação do óleo lubrificante é determinado pela presença de partículas de desgaste. O estado em que o óleo sofre determinada degradação é aquele em que perde a capacidade de lubrificar, devido a uma variação das propriedades físicas e químicas de seus aditivos.

A correta avaliação do óleo lubrificante é fundamental para a determinação do intervalo de troca e identificação antecipada dos componentes que sofrem degradação prematura. O óleo lubrificante é um condutor natural de informações do

meio onde circula e, com sua correta avaliação, é possível determinar o grau e a natureza dos metais de desgaste e contaminantes. O acompanhamento das condições do óleo lubrificante é uma ferramenta eficaz na prevenção de falhas prematuras do funcionamento do motor.

Tabela 4 - Fontes típicas de elementos metálicos encontrados no óleo lubrificante

Elemento	Fontes típicas
Alumínio	Pistões, Mancais
Antimônio	Mancais
Cromo	Cilindros, anéis, refrigerante, virabrequim
Cobre	Mancais, buchas e peças de bronze
Ferro	Cilindros, camisas e virabrequim
Chumbo	Mancais, graxas
Níquel	Eixos, anéis e válvulas
Silício	Poeira e antiespumantes
Estanho	Solda e mancais
Titânio	Molas, válvulas e componentes de turbina
Zinco	Aditivos, mancais

Fonte: adaptado de Gasparini (1983)

3.3 Tecnologias utilizadas para tratamento de biogás

3.3.1 Abordagem inicial

O uso de biogás como combustível ainda é observado com desconfiança, especialmente pelos custos acrescidos com limpeza e purificação. Os sistemas de limpeza de gases são desenvolvidos para corrigir as propriedades naturais do biogás, para que atenda às especificações técnicas dos equipamentos que serão utilizados. O biogás não é obtido em estado puro, podendo conter inúmeros contaminantes gasosos e partículas sólidas.

A Tabela 5 demonstra que a porcentagem de gases constituintes do biogás pode variar dependendo da biomassa utilizada na decomposição e eficiência do biodigestor. Desta forma, o processo de purificação e limpeza do biogás consiste em isolar o CH₄ dos outros constituintes.

Tabela 5 - Porcentagem dos gases constituintes do biogás, em volume

Composto	Resíduos agrícolas	Lodo de esgoto	Resíduos industriais	Aterro
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
Amônia	Traços	Traços	Traços	Traços
CO	0%-1%	0%-1%	0%-1%	Traços
N ₂	0%-1%	0%-3%	0%-1%	0%-20%
O ₂	0%-1%	0%-1%	0%-1%	0%-5%
Siloxanos	n.d	n.d	n.d.	50 mg m ⁻³

Fonte: adaptado de Allegue e Allè (2012)

As características do biogás aplicado em motores de combustão interna têm influência direta em seu desempenho. O biogás, por apresentar uma mistura de diferentes gases, apresenta propriedades de acordo com a concentração relativa de cada constituinte. Como dito anteriormente, sendo o poder calorífico o potencial teórico de energia contida no combustível, é fundamental sua manutenção. Por definição, o poder calorífico representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do mesmo.

A maioria dos combustíveis constitui-se por carbono, hidrogênio e oxigênio, com presença de água após o processo de combustão, devido à combinação de oxigênio e hidrogênio. Esta água pode estar em estado líquido, gasoso ou em combinação das duas fases. Caso a água formada na combustão se condense é obtido um poder calorífico de maior valor, denominado poder calorífico superior. No entanto, caso a água esteja no estado gasoso, o poder calorífico será menor e receberá a denominação de poder calorífico inferior. Quanto maior a concentração de metano, maior será o valor do poder calorífico e, por conseguinte, mais energia por unidade de massa.

Quando originado em aterros, a proporção de CH₄ é de 50%, sendo de 65% quando produzido em processos anaeróbicos. Entretanto, a quantidade de CH₄ produzido não é comparável ao GNV oriundo de fonte fóssil, com proporção de 85% a 95% de metano.

A Tabela 6 mostra a variação do poder calorífico e densidade, em função da concentração de metano e dióxido de carbono. Levando em consideração o exposto abaixo, a utilização de métodos de purificação e limpeza que maximizem a concentração de metano é desejável para utilização em motores de combustão interna, pelo aumento do poder calorífico.

Tabela 6 - Variação da densidade e poder calorífico, em função da composição do biogás

Composição química do biogás	Densidade Massa Específica (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)
10% de CH ₄ e 90% CO ₂	1,839	465
40% de CH ₄ e 60% CO ₂	1,460	2333
60% de CH ₄ e 40% CO ₂	1,214	4229
65% de CH ₄ e 35% CO ₂	1,151	4831
75% de CH ₄ e 25% CO ₂	1,026	6253
95% de CH ₄ e 5% CO ₂	0,776	10469
99% de CH ₄ e 1% CO ₂	0,726	11661

Fonte: adaptado de Avellar (2001)

Basicamente, os objetivos finais do tratamento de biogás são: a obtenção de um biogás em baixa pressão, com concentrações de H₂S abaixo de 100 ppm, para evitar a corrosão em grupos motogeradores estacionários, ou a obtenção de um gás com características similares ao GNV, que receberá, após sua purificação e limpeza, a denominação biometano. Como base de comparação, pode-se afirmar que, 1 m³ de biometano equivale a 0,6 dm³ de gasolina.

Essencialmente, existem duas aplicações básicas para o biometano – (1) chama aberta para aquecimento e (2) motores de combustão interna.

Para as aplicações em chama aberta existem diversas aplicações simples. Uma aplicação que tem sido praticada há anos é a minimização do volume de CH₄ liberado para atmosfera por meio de sua queima. A princípio, esta queima não está associada à geração de calor ou energia, mas pela simples eliminação do gás. Esta ação, além de minimizar o risco de explosão acidental, quando em altas concentrações, também minimiza os riscos à saúde, sendo o CH₄ um gás inodoro e mortal. Além disso, pela combustão do CH₄ são originados CO₂ e água, sendo uma vantagem significativa, pois o CH₄ é 21 vezes mais potente como gás de efeito

estufa do que o CO_2 , considerando o mesmo peso concentrado. Criou-se, nos Estados Unidos, um sistema de créditos de carbono pela queima voluntária do CH_4 , para minimização das implicações ambientais.

Outra aplicação ao uso da queima de CH_4 associa-se ao aquecimento de ambientes industriais, como produção de laticínios e aquecimento de ambientes frios, como criadouro de animais e escritórios. Devido às altas concentrações de CO_2 e H_2S após a queima, recomenda-se que o metano não seja queimado em ambientes fechados. No entanto, o destino do biogás durante o verão e os problemas associados à corrosão do sistema aumentam o custo de manutenção a estas aplicações.

Métodos de filtragem, limpeza e purificação do biogás foram desenvolvidos e são utilizados pelas principais empresas que comercializam motores alimentados por biogás, visto que a utilização do biogás *in natura* torna-se inviável, devido a problemas resultantes que serão abordados posteriormente. No entanto, embora os métodos de limpeza e purificação do biogás tenham avançado, significativamente, nos últimos anos, não se obtém a completa filtragem do gás, necessitando verificar e quantificar as substâncias contaminantes remanescentes.

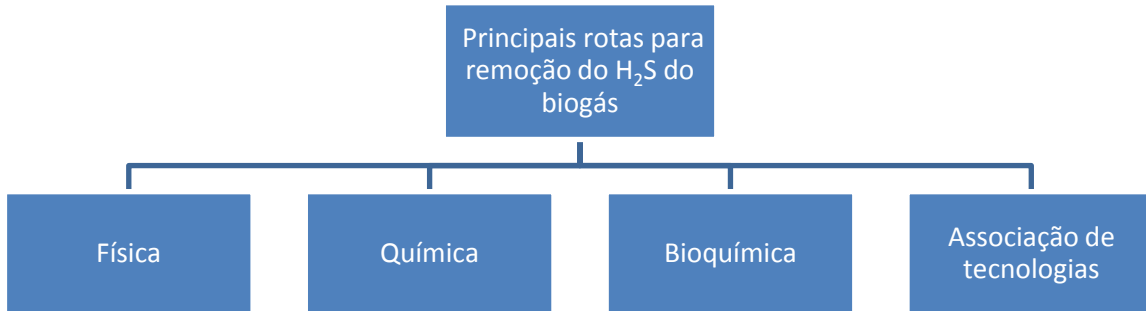
De acordo com Souza e Schaeffer (2010), o biogás submetido à filtragem, contendo 90% de metano, adquire características similares ao GNV, com a vantagem de ser um “gás verde” e de fonte renovável. Pode-se separar o tratamento do biogás em duas fases distintas: limpeza para remoção dos condensados e umidade; e remoção de H_2S e CO_2 .

A Figura 44 ilustra as principais rotas de purificação do biogás, com ênfase na remoção de H_2S . O H_2S é tóxico e altamente corrosivo em contato com metais, particularmente Cu, Fe e aço. Geralmente, apresenta-se de forma incolor e com mau odor, característico de ovo podre. Devido à natureza corrosiva, recomenda-se sua remoção no estado inicial de purificação do biogás. Como segundo ponto, pode-se destacar a necessidade de remoção de H_2S , pela possibilidade de obtenção de SO_2 como resultado do processo de combustão.

A escolha de um método para remoção do H_2S depende de vários fatores, como: concentrações do gás, custo do tratamento, teor de H_2S presente e qualidade absoluta de H_2S que pode ser removida. Usualmente, sua remoção pode acontecer por processos biológicos, durante a digestão, e a remoção por processos não

biológicos, como adsorção, absorção ou oxidação a seco, após o processo de digestão.

Figura 44 - Principais rotas de purificação do biogás

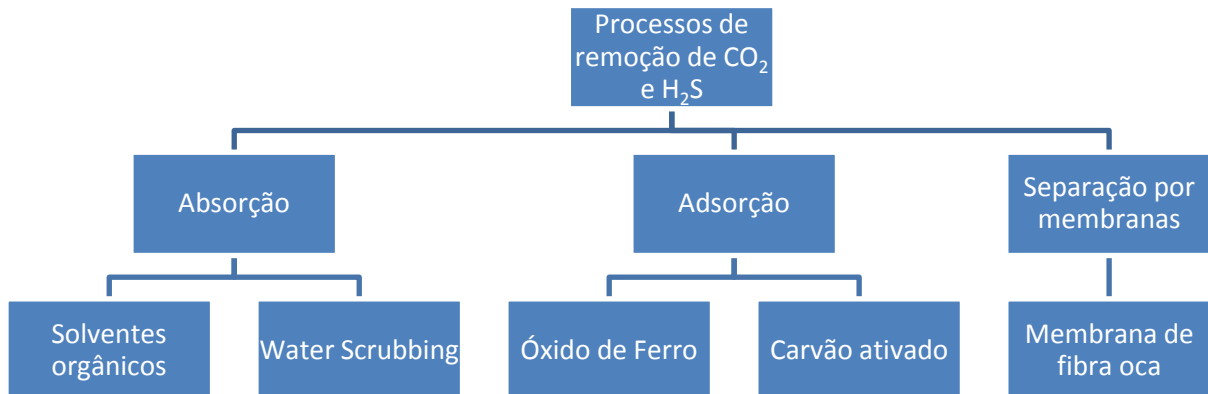


Fonte: Godoy Junior & Santos (2016)

A remoção de CO₂ torna-se necessária devido ao desperdício de volume durante o processo de armazenamento, ao baixo poder energético e sua capacidade de diluição do CH₄, tornando a mistura antidetonante. Adicionalmente, o CO₂ é um importante agente corrosivo quando submetido à alta pressão em presença de água, pela formação de H₂SO₃.

No que tange a mistura admitida pelo motor, sabe-se que o CO₂ admitido juntamente com o biogás atua como elemento de absorção de calor no período pré-combustão. Isto significa que a temperatura de combustão é, significativamente, reduzida em função da presença de CO₂. Desta forma, a utilização de biogás com elevada porcentagem de CO₂ diminui muito o desempenho dos motores de combustão interna, pela redução do poder calorífico do combustível. A Figura 45 apresenta as tecnologias de absorção, adsorção e separação por membranas no tratamento do biogás para a remoção do H₂S e com conseqüente remoção conjunta de CO₂.

Figura 45 - Principais tecnologias de tratamento do biogás



Fonte: Godoy Junior & Santos (2015 e 2016)

A remoção da amônia do biogás está, unicamente, associada à formação de NO durante o processo de combustão, o qual pode reagir e formar NO_x na atmosfera. Sua formação ocorre durante a degradação de proteínas e depende da composição do substrato e pH do meio onde ocorreu a digestão anaeróbica (MONTEIRO, 2011).

A concentração de amônia é mais frequente quando o substrato se origina na indústria alimentícia, sendo normalmente separada quando o gás é seco ou enriquecido com CH₄.

No processo de saída do digestor, o biogás encontra-se saturado com vapor de água. Em primeira análise, a presença de umidade no biogás causa grande prejuízo, pois a água tende a condensar quando comprimida, ocupando espaço nos processos de armazenamento do biogás.

Para aplicação em sistemas motogeradores, o uso de biogás com elevado teor de umidade pode ocasionar condensação de água no sistema de abastecimento de combustível do motor e formação de partículas de gelo em operações com baixa temperatura e alta pressão, comprometendo a eficiência da combustão.

No entanto, o fator principal da necessidade de remoção da umidade do biogás é a possibilidade de aceleração da taxa de corrosão em componentes metálicos e a reação da água com o H₂S durante o processo de combustão, promovendo a criação de ácidos corrosivos, como SO₂ e SO₃. O grau de umidade aceitável do biogás associa-se ao seu uso posterior.

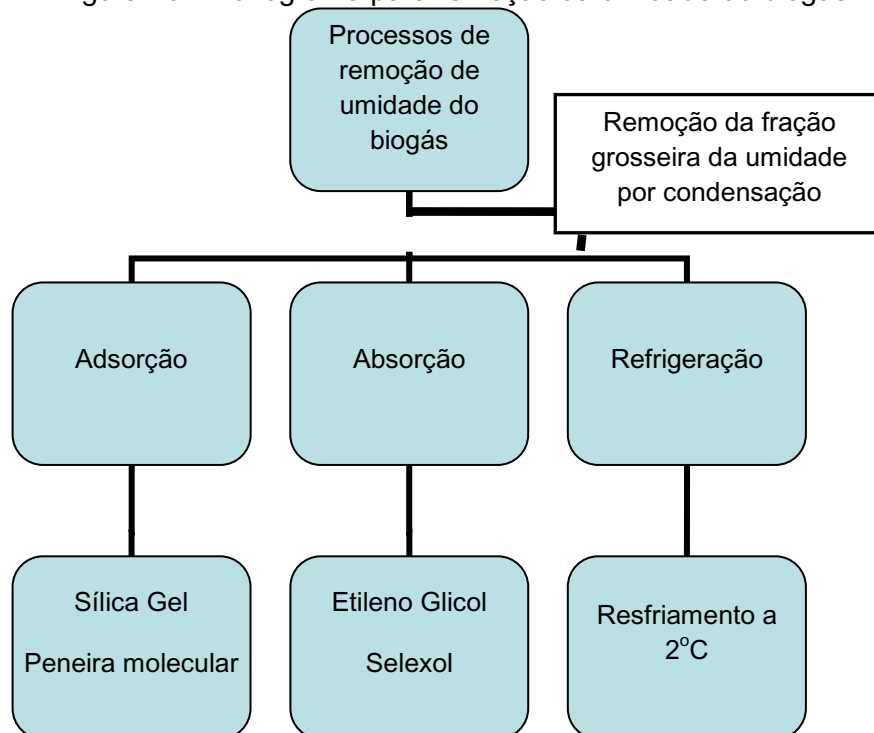
Para a queima sanitária em um *flare*, basta a utilização de condensadores de impacto, com drenos, para a purga da água condensada, pois caso contrário os eventuais espirros de água que se acumulam na tubulação podem danificar e/ou apagar a chama. A remoção da umidade pode ser realizada de várias formas, sendo, usualmente, por arrefecimento, compressão, absorção ou adsorção.

Sistemas de aumento de pressão com redução da temperatura combinada promovem a condensação da água, podendo ser removida com facilidade. A redução da temperatura do biogás pode ser obtida pelo enterramento dos tubos que transportam o produto, desde que a localização tenha o ambiente adequado e mecanismos apropriados para recuperação do condensado.

Outras alternativas utilizadas para remoção de toda umidade consistem na adsorção em SiO_2 e carvão ativado, sendo possível a regeneração destes materiais, por aumento de temperatura e redução de pressão.

A Figura 46 ilustra o fluxograma para remoção da umidade do biogás, utilizando os sistemas de adsorção, absorção e refrigeração. Estas tecnologias podem ser utilizadas para remoção da umidade do biogás, fazendo uso do efeito de absorção em soluções de etilenoglicol e sais higroscópicos.

Figura 46 - Fluxograma para remoção da umidade do biogás



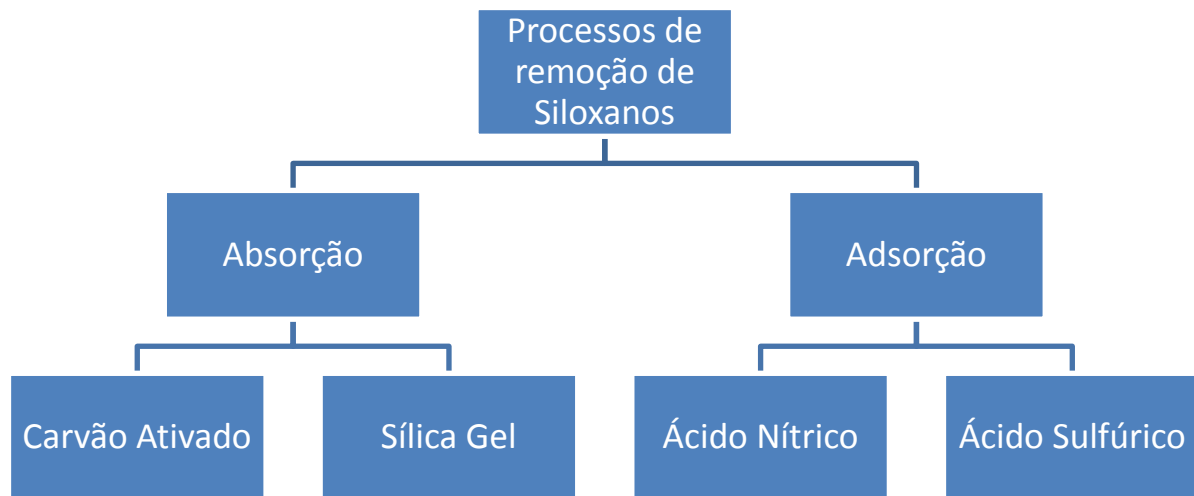
Fonte: Godoy Junior & Santos (2015)

A Figura 47 ilustra os principais tipos de processos para a remoção dos siloxanos do biogás. Como mencionado anteriormente, os siloxanos são compostos que contém sílica e estão, comumente, agregados a compostos como desodorantes e xampus, sendo, desta forma, mais comuns em biogás captado de estações de tratamento de água de reuso e aterros.

Após sua queima, os siloxanos formam SiO_2 , que se depositam na forma de micro cristais de quartzo na câmara de combustão, velas e válvulas dos motores de combustão interna, provocando desgaste por abrasão. Os fabricantes recomendam valores máximos de siloxanos de 28 mg/m^3 .

Sua redução é obtida arrefecendo o gás a baixa temperatura, por absorção em carvão ativado ou em sílica gel ou, ainda, por processo de adsorção utilizando ácido nítrico e ácido sulfúrico.

Figura 47 - Processos de remoção dos siloxanos do biogás



Fonte: Godoy Junior & Santos (2015)

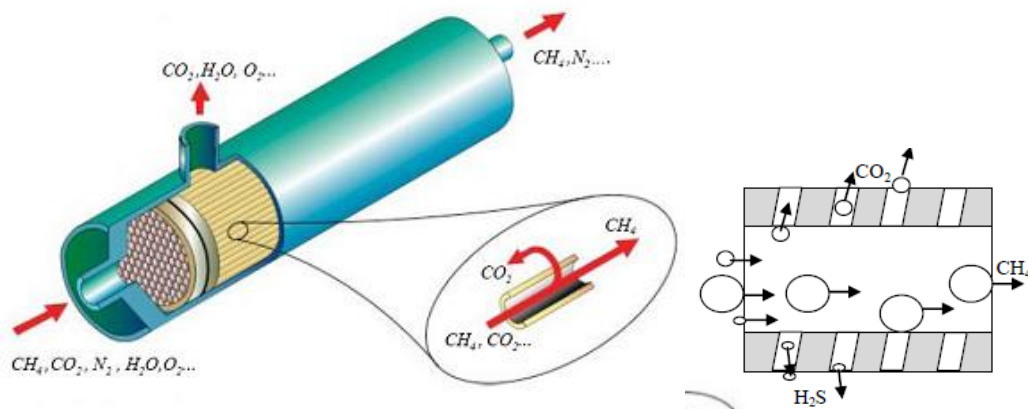
3.3.2 Tecnologia para purificação por membrana

A Figura 48 ilustra o processo de filtragem do biogás utilizando membranas. Este processo de purificação consiste na aplicação de membranas para purificação e enriquecimento do biogás. Embora seu estudo não seja recente, apenas nos últimos anos sua aplicação mostrou vantagem econômica, devido à redução dos investimentos de capital, facilidade de operação, baixo impacto ambiental, capacidade de desidratação do gás e alta confiabilidade.

O sistema consiste no transporte do biogás através de uma membrana fina (<1 mm), na qual alguns componentes do biogás ficam retidos. O transporte de cada componente acontece por diferença de pressão parcial e dependência do componente em relação à permeabilidade do material da membrana.

Desta forma, existem duas características básicas que ditam o desempenho da membrana: a permeabilidade associada ao fluxo de um gás específico através da membrana e a seletividade que ditará a preferência da membrana em permitir a passagem de um gás e retenção de outro.

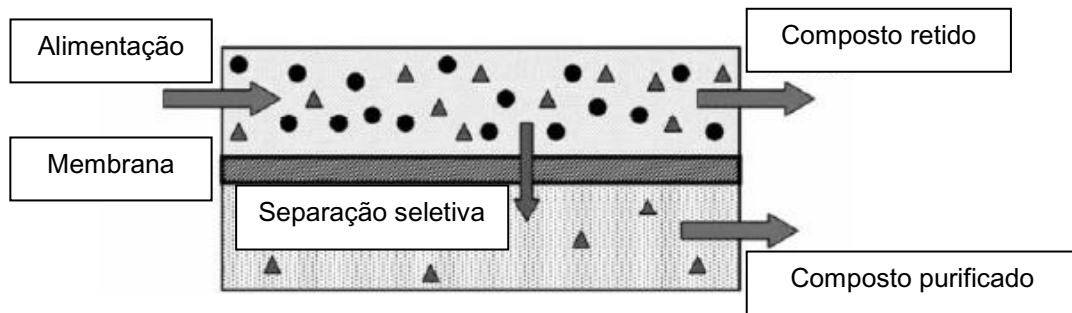
Figura 48 - Processo de filtragem do biogás utilizando membranas



Fonte: Godoy Junior (2015)

A Figura 49 apresenta o processo de separação seletiva do biogás. Para utilização do sistema com CH_4 , exige-se alta permeabilidade, devido à pureza do gás. Uma membrana sólida constituída de polímeros de acetato-celulose é de 20 a 60 vezes mais permeável para CO_2 e H_2S , respectivamente, do que para CH_4 . Adicionalmente, as membranas devem ser de materiais permeáveis à água e amoníaco. Utilizam-se pressões entre 25 e 40 bar para a operação do sistema.

Figura 49 - Processo de separação seletiva de metano



Fonte: adaptado de Scholes *et al* (2008)

O H_2S e oxigênio conseguem passar razoavelmente através das membranas, mas CH_4 e N_2 não ultrapassam a barreira da membrana.

Invariavelmente, antes da entrada do biogás nas membranas, providencia-se a passagem do biogás por um filtro, para retenção de água e gotas de óleo e, caso não sejam eliminados, comprometerão o funcionamento da membrana.

Uma planta piloto projetada para separação de CO_2 na década de 1980, utilizando a técnica de separação por membranas em acetato-celulose, mostrou-se eficiente em relação à permeabilidade de CO_2 , O_2 e H_2S , a uma temperatura de 25°C e pressão de 5,5 bar, comprovando a teoria de bom desempenho deste sistema.

A diferença de pressão parcial do sistema aumenta o fluxo de gás que atravessa a membrana de forma proporcional, assim, quanto maior a diferença de pressão, menor a área requerida da membrana. Entretanto, a pressão máxima que a membrana pode suportar deve ser considerada, pois pressões membranares de alta pressão levam a grandes perdas de CH_4 , sendo as baixas pressões as mais utilizadas atualmente. A duração das membranas pode chegar a três anos, com perda gradual da permeabilidade, devido à compactação.

3.3.3 Purificação por coluna de limalha de ferro oxidada

Estudos demonstram que este processo é um dos métodos mais antigos para a remoção do H_2S . A técnica foi introduzida na Europa há mais de um século e ainda é largamente utilizada na purificação do biogás. Normalmente, esta aplicação é destinada a instalações de menor porte, com vazões de até $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

De acordo com Bui *et al* (2008), o processo de limpeza pode ocorrer a seco, através da injeção do biogás por uma coluna de limalha de ferro oxidada (Fe_2O_3), de cor alaranjada, onde ocorrerá a redução do ferro e a purificação do biogás, pela redução do H_2S , que ficará retido ao reagir com o óxido de ferro, conforme a reação da Equação 3.



A Figura 50 apresenta o aspecto da limalha de ferro saturada após tempo de uso. Como a limalha sofrerá saturação, sendo reduzida toda a superfície, de cor preta, uma regeneração é providenciada pela passagem de oxigênio, de forma controlada, através do filtro. Este processo deve ser lento, devido à reação exotérmica, evitando-se, assim, a queima da limalha, conforme a reação da Equação 4, de regeneração. Como medida de segurança, para evitar a combustão espontânea do Fe_2S_3 , recomenda-se a umidificação do filtro, neste momento, por meio de sprays de água.



Após a obtenção desta condição, a regeneração do sistema deve ser providenciada.

Figura 50 - Saturação da limalha de ferro após tempo de uso



Fonte: Bui *et al* (2008)

Este processo tem como vantagem o baixo custo, simplicidade de instalação e possibilidade de completa remoção de H_2S , que reage com óxido de ferro, gerando sulfeto, dependendo da vazão, concentração e tempo de exposição ao óxido de

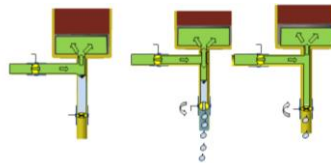
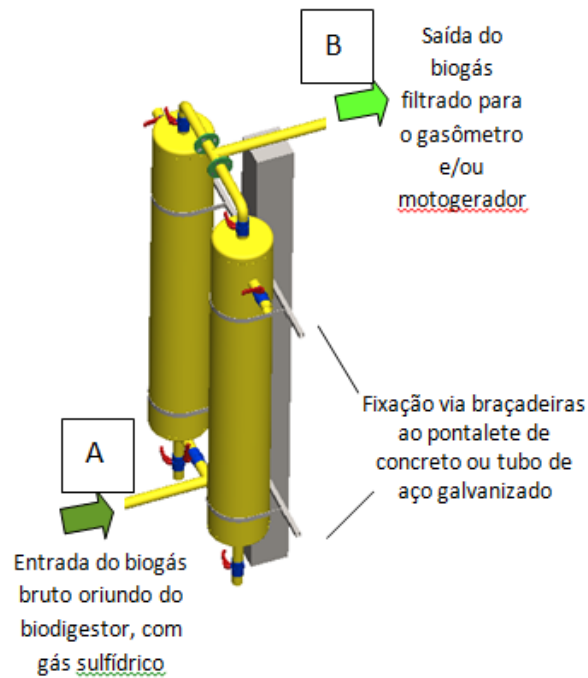
ferro. O Fe_2O_3 pode ser utilizado em diferentes formas, ou seja, na forma de palha de aço, cavacos de usinagem, limalha de ferro e lama ferruginosa, lembrando-se que, para que haja o tratamento, o filtro deve apresentar a cor alaranjada de ferro oxidado.

O óxido de ferro é conhecido como “esponja de ferro” e pode ser encontrado em diferentes materiais, como palhas de aço, cavacos e limalhas de ferro. Invariavelmente, é utilizado com lascas de madeira impregnadas com óxido de ferro, atuando como leito suporte, aumentando a porosidade no processo e diminuindo a queda de pressão do gás.

Pode-se utilizar o pinho como madeira, sendo, quando impregnada com óxido de ferro, mais vantajosa que a limalha de ferro, devido a sua boa relação superfície-volume. Como exemplo, 20 gramas de H_2S podem ser removidos utilizando 100 gramas de lascas de madeira impregnadas com óxido de ferro.

A Figura 51 ilustra o sistema de filtros em paralelo, utilizando como elemento filtrante palhas de aço e/ou cavacos de aço oxidados. Este sistema apresenta a vantagem do controle individual, com possibilidade de regeneração individualizada.

Figura 51 - Filtros de purificação do biogás por coluna de limalha de ferro em paralelo



Devido às condições climáticas e o metabolismo bacteriano, o fluxo de biogás ocasiona o arraste de vapor de água saturado que acaba se condensando. Essa água retida e armazenada na parte inferior do filtro, de tempo em tempo, deve ser purgada.

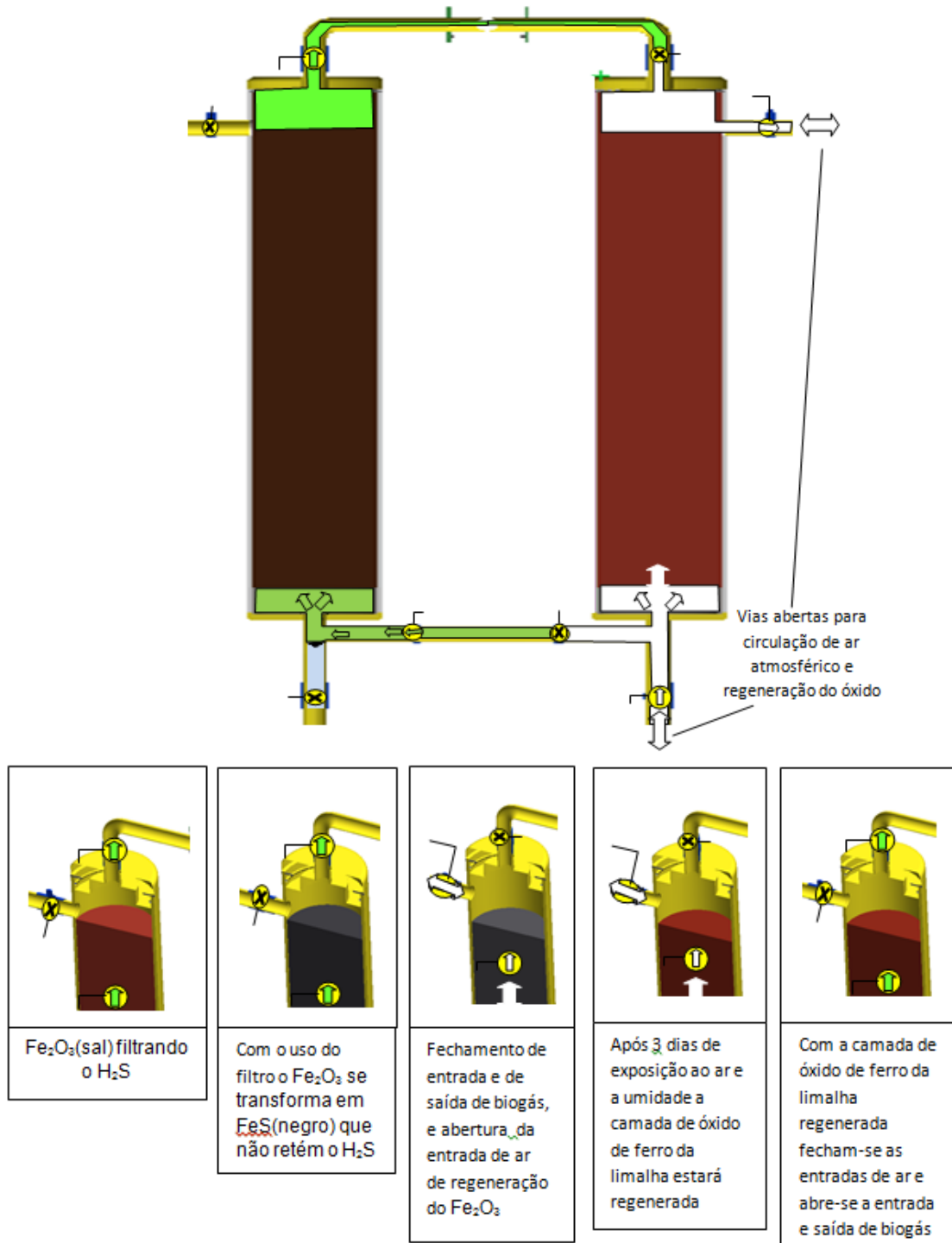
Para purgar a água deve-se mudar a posição do registro da posição de fechado para a posição de aberto até deixar sair toda água do reservatório.

Após a completa purga do condensado deve-se fechar o registro completamente para estar pronto para novo ciclo de purga.

Fonte: Godoy Junior (2010)

A Figura 52 ilustra a configuração do filtro em paralelo, com um lado saturado e outro oxidado, pronto para uso.

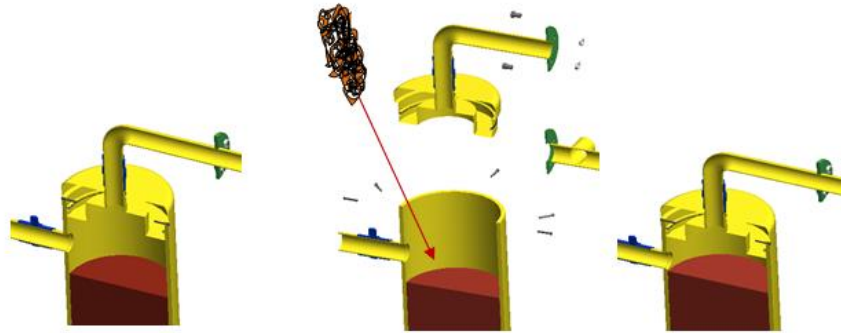
Figura 52 - Filtros de purificação do biogás por coluna de palhas de aço, em paralelo com exemplo de saturação



Fonte: Godoy Junior (2010)

A Figura 53 ilustra o processo de abastecimento da coluna com limalha de ferro. Com o constante uso e regeneração, a massa do elemento filtrante sofre diminuição do volume, com necessidade de reposição.

Figura 53 - Filtros de purificação do biogás por coluna de palhas de aço, em paralelo com exemplo de reposição de palhas de aço



Fonte: Godoy Junior (2010)

3.3.4 Purificação utilizando o sistema Water Scrubbing (WS)

O sistema Water Scrubbing é um dos sistemas mais utilizados e eficientes na lavagem do biogás, mesmo quando utilizado em baixas produções. O desenho esquemático do purificador *Water Scrubbing* é ilustrado na Figura 54. O processo consiste na utilização de duas colunas, sendo uma de absorção e outra de dessorção. O sistema WS requer pouca estrutura e demanda baixo custo. Utiliza água pressurizada como absorvente, sendo pressurizada e pulverizada em pequenas gotículas, para facilitação da absorção de CO_2 em sentido contrário ao do fluxo de biogás que está comprimido e alimentado no sentido ascendente. Desta forma, o processo de absorção ocorre em contracorrente com o CO_2 , sendo absorvido pela água, devido a sua maior solubilidade, quando comparado com o CH_4 .

Assim, o CO_2 será dissolvido na água, gerando H_2CO_3 e H_2S , sendo recolhidos no fundo da torre de absorção, gerando um gás mais rico em CH_4 . A água que sai da coluna de absorção vai para um tanque onde o gás dissolvido (grande parte CO_2) é liberado para a atmosfera e a água isenta de CO_2 pode ser realimentada de volta ao sistema. A água pode ser reciclada, quando colocada em sentido oposto a uma corrente de ar, e usada para a primeira lavagem do biogás na torre.

Figura 54 - Desenho esquemático do sistema de purificação Water Scrubbing



Fonte: adaptado de Flotech

Para este sistema de lavagem do gás, existe a possibilidade de obtenção de CH_4 puro, desde que sejam controlados fatores como dimensão da torre de lavagem, pressão do gás, composição do biogás, controle de vazamento e pureza da água utilizada.

Países como Suécia, França e Estados Unidos têm utilizado, com muita frequência, este processo de remoção de CO_2 e H_2S . Estudos demonstram que, de 5% a 10% de CO_2 permanecem associados ao biogás após a lavagem.

A principal vantagem na utilização deste sistema é a dispensabilidade de calor, devido à utilização de apenas água como solvente, além de não utilizar solventes químicos.

As desvantagens deste processo estão associadas à dissolução de O_2 e N_2 na água durante a regeneração, sendo, também, transportados para o fluxo purificado. Desta forma, o CH_4 produzido com esta tecnologia sempre conterá O_2 e N_2 em sua composição.

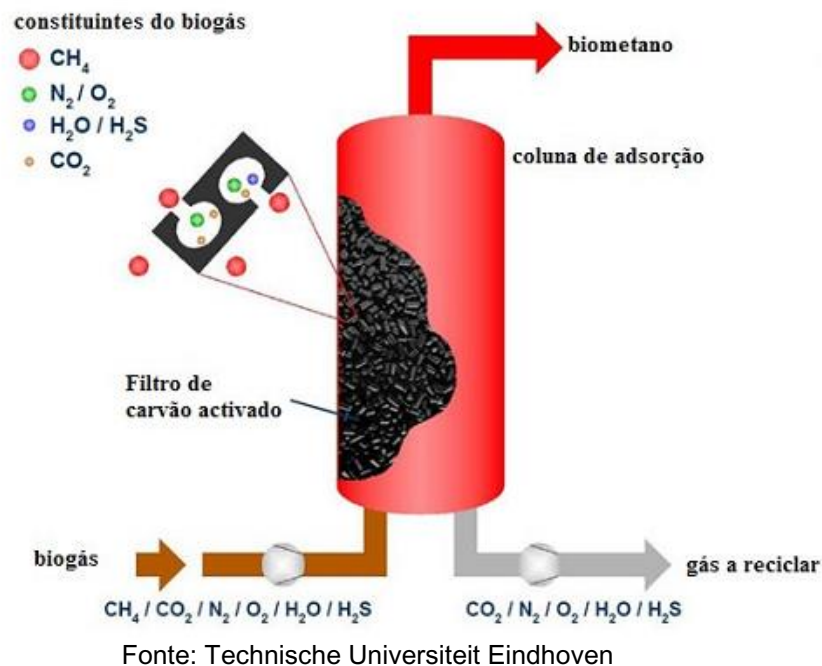
Adicionalmente, o H_2S não é totalmente removido da água durante o processo de regeneração e a seletividade de absorção de CO_2 e CH_4 é limitada, da qual resultam perdas significativas de CH_4 .

3.3.5 Purificação utilizando o sistema Pressure Swing Adsorption (PSA)

O sistema PSA é, frequentemente, utilizado para separação de componentes de uma mistura de gases sob pressão, considerando as características moleculares e a capacidade de serem captadas pelos materiais de adsorção.

O PSA apresenta grande versatilidade, sendo considerado um sistema de adsorção com modulação de pressão. A Figura 55 mostra que os materiais de adsorção selecionam apenas algumas moléculas do gás, sendo o carvão ativado, sílica gel e alumina os materiais de adsorção selecionados, comumente, como filtros moleculares de alta pressão.

Figura 55 - Desenho esquemático do purificador Pressure Swing Adsorption



O processo de adsorção, neste sistema, realiza-se mediante a injeção do biogás na base das colunas de adsorção, onde CO₂, N₂ e O₂ são retidos, contendo, na saída do topo da coluna, alta concentração de CH₄, sendo o composto menos adsorvido.

De acordo com Monteiro (2011), através de um sistema PSA é possível separar o CO₂ de forma eficaz, no entanto, são necessários cuidados redobrados com a remoção do H₂S da corrente de alimentação, uma vez que atua como um “veneno” adsorvido irreversivelmente. A água também é um elemento prejudicial ao processo, necessitando de remoção prévia do composto.

O sistema é composto por quatro colunas de adsorção, que operam pelo sistema de regeneração. Antes da primeira coluna estar completamente saturada

com impurezas, a fase de adsorção é interrompida e passada para outra coluna de adsorção, já regenerada neste momento, assegurando um funcionamento contínuo.

O processo de regeneração é realizado através da despressurização das colunas, de forma sequencial, até a pressão atmosférica e, posteriormente, até muito próximo de uma condição de vácuo. O gás liberado das colunas de adsorção, nesta fase, contém grandes quantidades de CH_4 , que será reciclado, passando novamente para o biogás que será purificado.

A regeneração é auxiliada por uma purga, contendo uma pequena quantidade do produto purificado.

Antes de passar novamente a fase de adsorção, cada coluna é novamente pressurizada, até a condição de adsorção com gás proveniente da igualização, pelo topo, com uma mistura de produto purificado e pela base, com a corrente de alimentação.

O ciclo é repetido e, desta forma, consegue-se o regime contínuo, recorrendo-se a múltiplos leitos de adsorção, que operam de modo defasado, mas tirando-se proveito da multiplicidade de equipamentos.

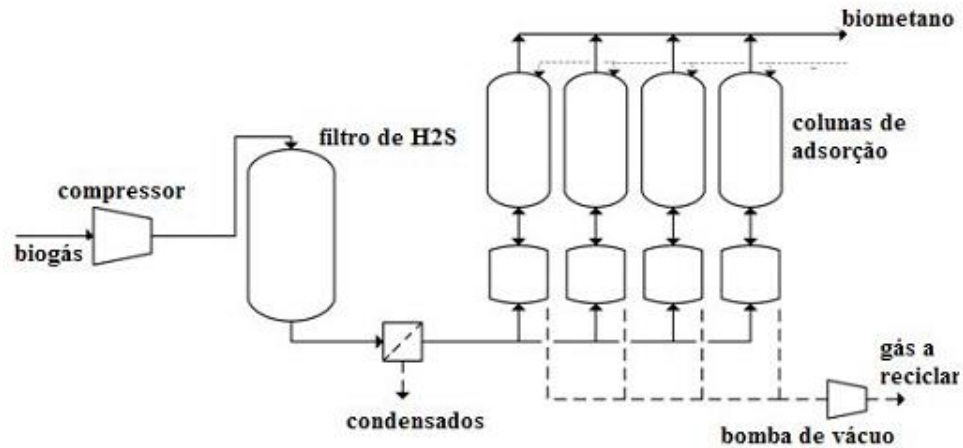
A utilização de válvulas programáveis, via PLC, apresenta grande vantagem para utilização deste sistema, sem necessidade de intervenção humana contínua. No entanto, incrementa a complexidade de projeto e aumenta a necessidade de manutenção contínua.

As vantagens técnicas deste sistema estão atreladas à minimização do consumo energético, preservação do meio ambiente e obtenção de um produto com teor de CH_4 de 98%.

As desvantagens estão associadas à perda significativa de CH_4 adsorvida pela superfície sólida.

A Figura 56 apresenta a configuração de instalação das colunas de adsorção PSA, montadas em paralelo. Alguns fornecedores desta tecnologia aperfeiçoaram o sistema utilizando até seis unidades de adsorção e com recuperação de 98% de CH_4 , juntamente com o processo de produção, utilizando até seis colunas de adsorção, obtendo uma recuperação de metano maior que 98%. Estes sistemas necessitam de controle e manutenção constantes, pela complexidade.

Figura 56 - Desenho esquemático das colunas de adsorção PSA



Fonte: Technische Universiteit Eindhoven

3.3.6 Purificação utilizando o sistema de Tecnologia Criogênica

A purificação criogênica do biogás é promovida pela separação individual dos constituintes do gás, por condensação e destilação fracionária a baixas temperaturas.

Este processo tem como desvantagem o alto custo de investimento, equipamentos de dimensões elevadas, utilização de grandes quantidades de energia, pela necessidade de redução severa de temperatura de operação e baixa eficiência térmica.

No entanto, apresenta a vantagem de obtenção de gases com alta pureza na forma líquida, facilitando seu transporte.

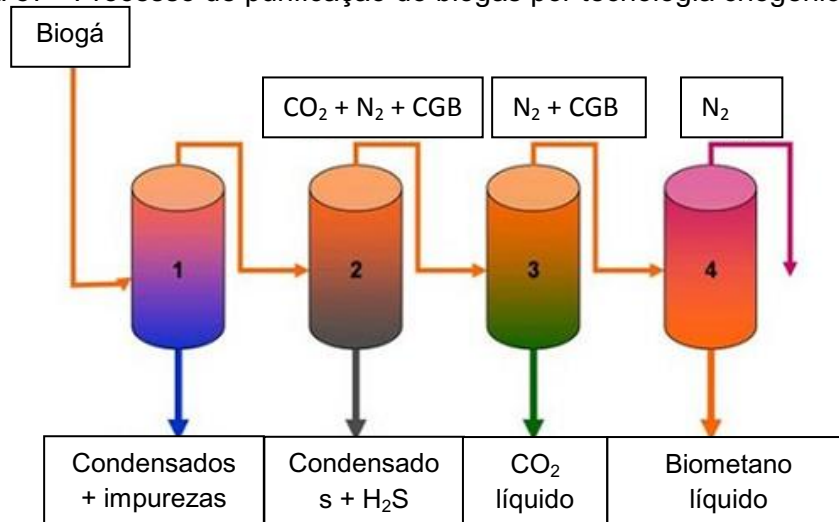
Neste processo, o biogás é submetido à compressão de, aproximadamente, 80 bar, por um compressor de múltiplos estágios com *intercooling*. O biogás é refrigerado por *chillers* e permutadores de calor a, aproximadamente, -45°C, condensando o CO₂, sendo removido e separado.

Na sequência, o CO₂ é processado, para recuperação do CH₄, reciclado para a entrada de gás, obtendo-se até 97% de CH₄ puro.

O processo criogênico desenvolvido pela empresa Scandinavian GTS é composto por quatro fases distintas. A Figura 57 ilustra o processo criogênico em série, com entrada de biogás em uma extremidade do processo e passagem

sequencial nas colunas de separação dos compostos, com saída do biometano na outra extremidade.

Figura 57 - Processo de purificação do biogás por tecnologia criogênica



Na primeira fase, a mistura é arrefecida até 6°C, condensando alguns dos constituintes da mistura, juntamente com todos contaminantes que, posteriormente, serão removidos.

Na segunda fase, a mistura é arrefecida até, aproximadamente, -25°C, congelando a água presente na mistura e, caso presente, condensando o siloxano. Desta forma, possibilita-se a remoção do siloxano e H₂S. O siloxano e H₂S são removidos, usando filtros apropriados para esta função.

Este filtro é um catalisador que absorve siloxano ao mesmo tempo em que converte o H₂S em enxofre puro, através de uma reação química regenerativa, utilizando óxido de ferro.

Na terceira fase, a mistura continua em processo de resfriamento, até -78°C, promovendo a condensação do CO₂. Posteriormente, o CO₂ líquido é retirado da mistura e armazenado, para utilização como refrigerante da mistura. O gás originado, nesta fase, é considerado um gás livre de impurezas.

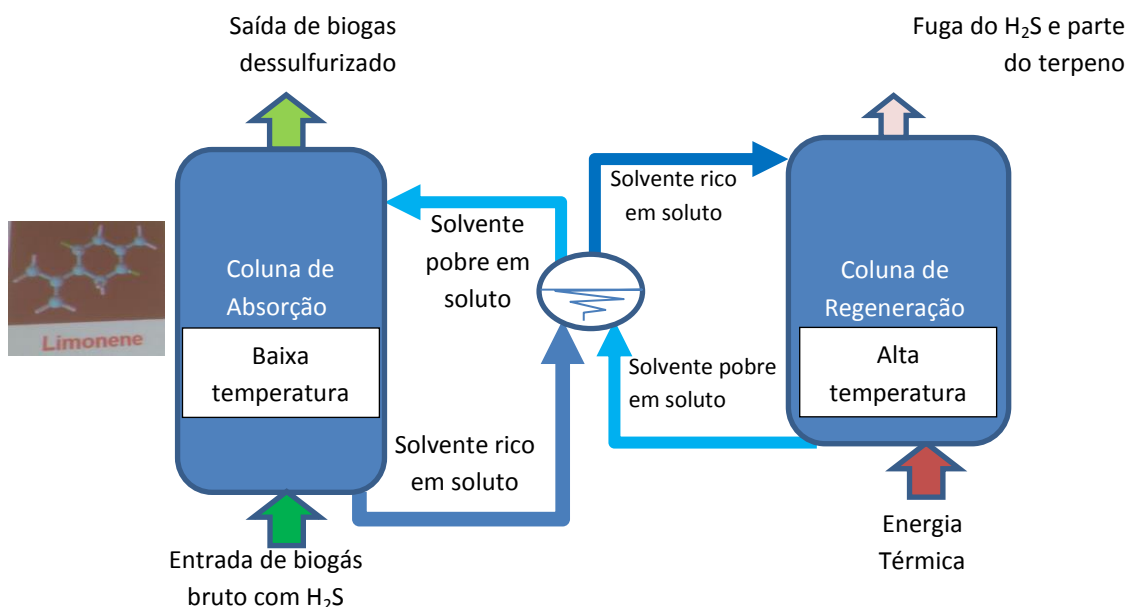
Na quarta e última fase, a temperatura é reduzida até -190°C, condensando e separando o CH₄ do nitrogênio. Nesta fase, o biogás apresenta condições adequadas para utilização em motores de combustão interna.

3.3.7 Remoção do H₂S utilizando filtros de absorção do Terpene (Limoneno)

O limoneno é um terpene e por absorção ele pode remover concentrações de H₂S quando em temperaturas frias e ser regenerado liberando o H₂S para queima ou posterior aproveitamento quando em temperaturas quentes.

A Figura 58 ilustra uma configuração de remoção de H₂S do biogás via a utilização de limoneno.

Figura 58 – Desenho esquemático de um sistema de remoção de H₂S por absorção utilizando limoneno



Fonte: Montebelo (2012)

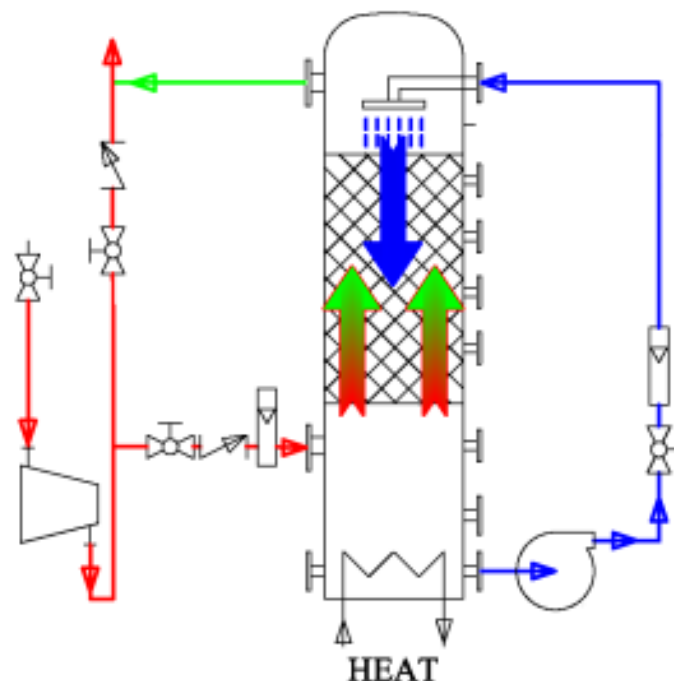
3.3.8 Purificação utilizando Torre de Biodessulfurização em ambiente anóxico

Internamente, a torre reatora de biodessulfurização é preenchida com elementos filtrantes em termoplástico, na forma cilindros perfurados e aletados internamente, denominados *Pall ring*.

A partida do sistema de biodessulfurização se dá com a inoculação de lodo de reator anóxico ou de área anóxica de estações de tratamento aeróbio de efluentes nas torres de biodessulfurização. Após a partida do sistema e com a recirculação do efluente anóxico em contra corrente ao fluxo de biogás, um biofilme rico em *Thiobacillus ferroxidans*, cresce e recobre os elementos filtrantes e promove a

conversão do H_2S em enxofre elementar. A fixação de enxofre elementar no biofilme, ou a sua precipitação no fundo da torre, permitindo a sua recuperação, mostra-se como uma vantagem econômica significativa, pois esse subproduto da biometanização possui um elevado valor agregado no mercado. Maiores detalhes desta tecnologia serão abordados no estudo de caso deste trabalho. A Figura 59 ilustra o funcionamento de uma torre de biodessulfurização em ambiente anóxico.

Figura 59 – Desenho esquemático de um sistema de remoção de H_2S por absorção utilizando limoneno



Fonte: Almenglo *et al* (2013)

3.3.9 Sistema de múltiplas barreiras dessulfurizantes

Basicamente o sistema de múltiplas barreiras consiste na remoção da fração grosseira de H_2S de forma bioquímica, seguida da remoção da fração fina de forma físico-química.

A fração grosseira de H_2S pode ser removida de forma bioquímica por meio do uso individual ou em conjunto das seguintes tecnologias: torres anóxicas, utilizando o nitrato como aceptor de elétrons; fotorreatores, onde algas promovem a oxidação do H_2S ; e a micro aeração na campânula dos biodigestores anaeróbios.

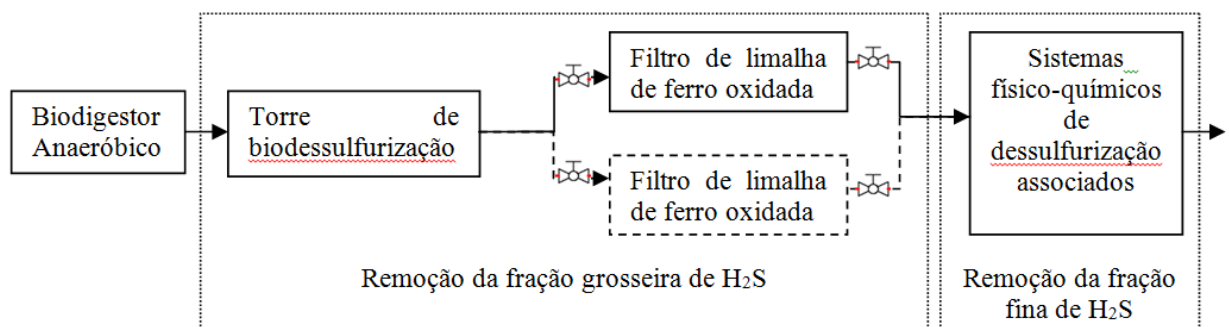
A fração grosseira de H_2S também pode ser removida quimicamente com o uso de filtros de limalha de ferro oxidada, que quando instalados em paralelo em redundância, permite a realização de manobras de regeneração da camada de óxido de ferro da limalha sem o comprometimento da eficiência do sistema e da saturação do elemento filtrante.

A remoção da fração fina de H_2S também pode ser removida de forma exclusiva bioquimicamente, porém a associação de tecnologias bioquímicas com físico-químicas permite maior segurança operacional no tocante a garantir a qualidade do biometano final.

Um exemplo de sistema de múltiplas barreiras é ilustrado por meio da Figura 60 e consiste na instalação de uma torre de biodessulfurização, preenchida com *Pall rings* revestidos com biofilme de bactérias *Thiobacillus ferroxidans*, por onde circula o biogás em contra corrente ao efluente nutritivo, seguido de sistema em paralelo e com redundância de filtros de limalha de ferro oxidada.

O sistema de múltiplas barreiras garante um fornecimento seguro de biometano, um prolongamento da vida útil de elementos filtrantes físico-químicos e uma redução considerável na produção de passivo ambiental, no caso dos elementos que não são reaproveitáveis e nem recicláveis dos sistemas convencionais de purificação fina do biogás.

Figura 60 – Sistema de biodessulfurização com múltiplas barreiras para a remoção da fração grosseira e fina do H_2S do biogás



Fonte: Santos (2016)

4 ESTUDO DE CASO VISANDO PROPOR UMA NOVA TECNOLOGIA PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS NA GRANJA HAACKE

Para o desenvolvimento deste trabalho, realizaram-se pesquisas em dissertações e estudos de caso que abordam os métodos de limpeza e purificação do biogás mais utilizado atualmente. Adicionalmente, pesquisou-se a aplicação de biogás em motores de combustão interna, bem como a identificação do comportamento do motor quando aplicado este combustível.

Foram realizadas visitas técnicas ao Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBiogás, localizado no estado do Paraná, na cidade de Foz do Iguaçu, com o objetivo de conhecer as aplicações em desenvolvimento de energia renovável.

Realizou-se visita técnica no Condomínio Ajuricaba de Agroenergia para Agricultura Familiar, localizado na cidade de Marechal Rondon, no estado do Paraná. O objetivo da visita foi conhecer o sistema de abastecimento de gás em baixa pressão, sistema de geração de energia e cogeração.

Realizou-se visita técnica na Granja Haacke, localizada na cidade de Santa Helena, no estado do Paraná. O objetivo foi conhecer as instalações de conversão de biomassa em biogás e a produção de biometano para consumo na Usina de Itaipu.

O presente estudo de caso visa abordar a instalação atual de geração de biogás e biometano utilizada na Granja Haacke, localizada no estado do Paraná, na cidade de Santa Helena, a 513 km da capital Curitiba. A Figura 61 apresenta a vista aérea da Granja Haacke.

Figura 61 - Vista aérea da Granja Haacke, localizada no estado do Paraná



Fonte: CIBiogás

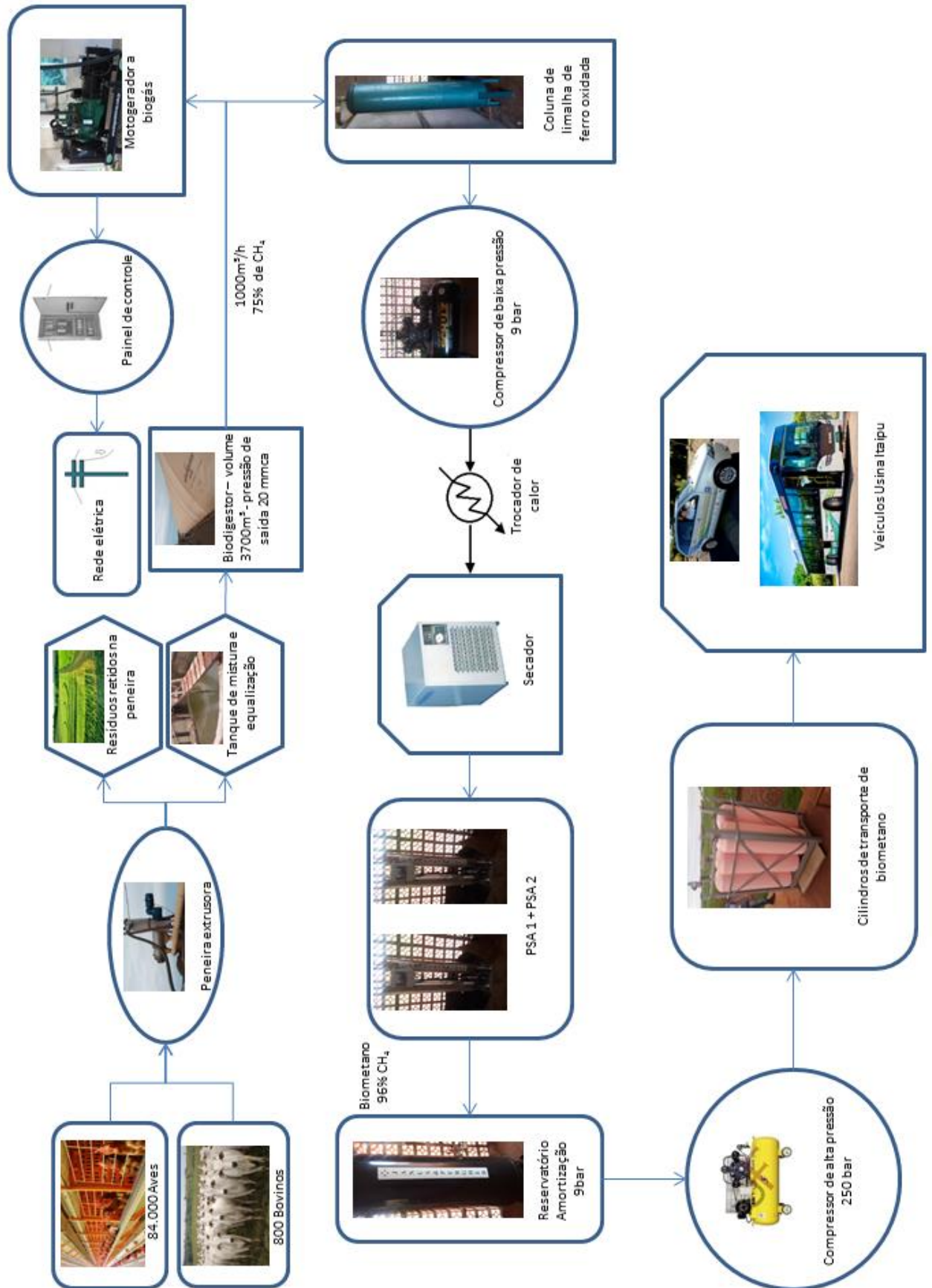
A estrutura de propriedade do senhor Nilson Haacke acomoda a criação confinada de, aproximadamente, 84.000 aves poedeiras e 800 bovinos de corte. Após as adaptações coordenadas pela CIBiogás Itaipu, todo o dejetos que, anteriormente, era descartado de forma inadequada passou a ser encaminhado a um biodigestor modelo lagoa aberta com capacidade de acomodar 3700 m³ de efluentes, para obtenção de biofertilizante, geração de energia elétrica local e produção de biometano. O processo realiza a digestão anaeróbica de 100 m³ diários de efluentes líquidos, com capacidade de produção de, aproximadamente, 1000 m³/h de biogás. O custo de instalação da estrutura atual foi de aproximadamente R\$ 700.000,00 com aporte parcial garantido pelo Centro Internacional de Energias Renováveis CIBiogás Itaipú.

O estudo tem como objetivo a avaliação atual do processo de produção de biogás e biometano e propor alterações que possibilitem a otimização e aumento de eficiência do processo.

4.1 Apresentação da estrutura atual da Granja Haacke

A Figura 62 apresenta o fluxograma da estrutura atual da Granja Haacke, com todos os processos envolvidos. O detalhamento de cada passo do processo é descrito na sequência do capítulo.

Figura 62 - Fluxograma do processo atual da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

O processo é iniciado com a coleta de dejetos produzidos pelos animais confinados. A Figura 63 demonstra a configuração do criadouro de aves com coleta do efluente líquido, realizado dentro do ambiente interno da Granja Haacke, por meio de esteira móvel que se locomove abaixo dos criadouros.

Figura 63 - Criadouro com esteira para coleta de dejetos



Fonte: CI Biogás

A Figura 64 ilustra a chegada do efluente líquido ao ambiente externo da granja, com passagem por uma extrusora, cujo objetivo é a separação da parte líquida do efluente do composto sólido grosseiro. Esta ação permite a obtenção de biofertilizante dessecado, como parte sólida para utilização na lavoura.

Figura 64 - Extrusora compacta de separação de sólidos grosseiros do efluente da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 65 apresenta a chegada do efluente líquido, isento de componentes sólidos, ao tanque de mistura e onde será proporcionada a equalização química, com inserção de água.

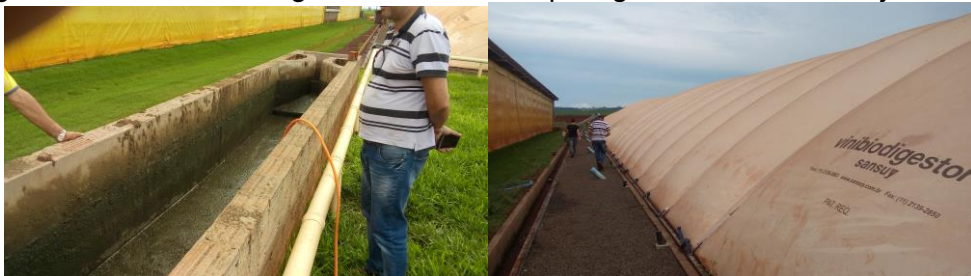
Figura 65 - Esteira de transferência de dejetos e tanque de retenção da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Após a saída do tanque de equalização, o efluente líquido é encaminhado via calha de alvenaria ao biodigestor, para realização do processo de biodigestão anaeróbica, conforme demonstrado na Figura 66. O biodigestor utilizado é do tipo lagoa coberta com retenção de efluentes planejada para aproximadamente 30 dias. A pressão de saída dos gases do biodigestor é de aproximadamente 20 mmca.

Figura 66 - Calha e biodigestor anaeróbico tipo lagoa coberta da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Após a saída do biodigestor, o biogás é encaminhado à sala de equipamentos, para realização do processo de limpeza e purificação. A Figura 67 demonstra a coluna de limalha de ferro oxidada, abastecida com palhas de aço, que atuará como limalha de ferro e oxidada, para reação com o H_2S . O resultado final será a dessulfurização do gás. A utilização de palhas de aço como elementos a serem oxidado atende às necessidades da aplicação, devido ao volume de biogás para tratamento. Atualmente a concentração de H_2S no biogás produzido é da ordem de 400ppm. Nesta concentração e com uma vazão de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ a saturação do filtro se dá em dois dias de operação.

Figura 67 - Coluna de limalha de ferro e compressor da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

Após a saída da coluna de limalha de ferro, o biogás é conduzido a um compressor, submetido a uma pressão de, aproximadamente, 9 bar, com conseqüente passagem por um trocador de calor, para diminuição da temperatura do gás.

A Figura 68 demonstra um secador de ar por refrigeração, modelo FARGON, cujo objetivo é remover a umidade presente no biogás, após a saída do trocador de calor.

Figura 68 - Secador elétrico de biogás



Fonte: Fargon

A próxima operação é destinada à purificação do biogás, utilizando o sistema *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Para esta função, são utilizadas duas colunas paralelas de fabricação JUNUS&PERGHER, apresentadas na Figura 69. Conforme mencionado anteriormente, o processo ocorre por adsorção, com retenção das moléculas de CO_2 na região externa da peneira interna da coluna. A eliminação do CO_2 acontece por um sistema de purga temporizado. Após a purga, uma válvula interna providencia o deslocamento do CH_4 para a segunda coluna, repetindo novamente o processo realizado na primeira coluna. Para o primeiro estágio do processo, obtém-se biometano com, aproximadamente, 80% de purificação. Para o segundo estágio do processo, adquire-se biometano com 96% de purificação.

Figura 69 - Coluna dupla de adsorção tipo PSA da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 70 apresenta um reservatório de amortização e equilíbrio de pressão de fabricação JUNUS&PERGHER. Devido à intermitência do processo após a saída das colunas PSA, a amortização da pressão é necessária para modulação da pressão na entrada do compressor.

Figura 70 - Reservatório de equilíbrio de pressão da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

O próximo estágio é destinado à passagem do biometano por um compressor de alta pressão, para elevação da pressão ao valor de 250 bar. A Figura 71 apresenta os cilindros de envasamento e armazenamento do biometano. Após envasado o produto, transporta-se até a cidade de Foz do Iguaçu, onde será utilizado como combustível veicular na Usina de Itaipu.

Figura 71 - Cilindros de armazenamento de biometano da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

A Figura 72 apresenta a vista panorâmica da sala de equipamentos da Granja Haacke.

Figura 72 - Vista panorâmica da sala de equipamentos da Granja Haacke



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

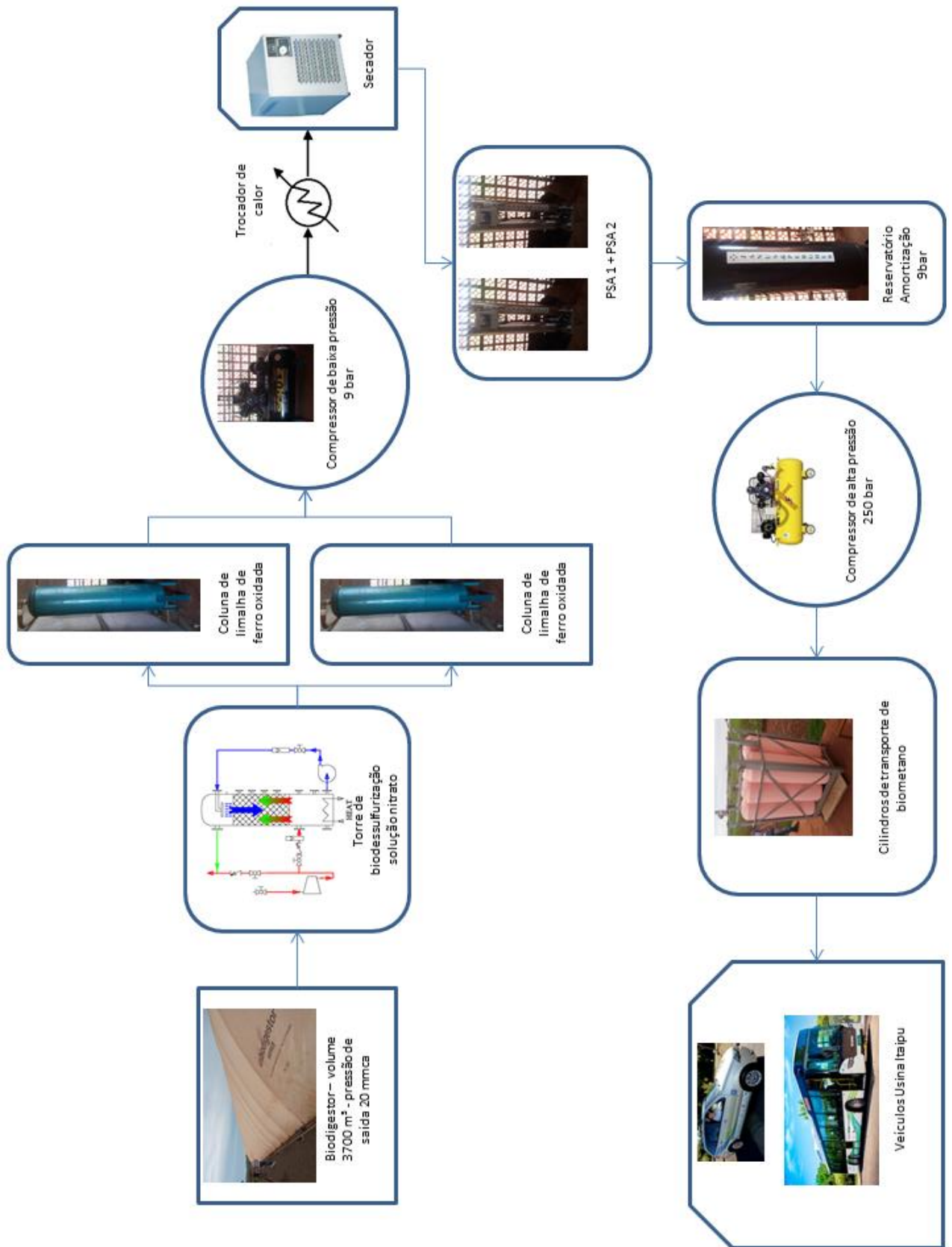
4.2 Proposta de melhoria no processo de purificação de biogás utilizado na Granja Haacke

Como *upgrade* no processo de purificação de biogás da Granja Haacke o mestrando Marcelo Valerio dos Santos e o Prof. Dr. Ederaldo Godoy Junior sugerem a utilização da tecnologia de múltiplas barreiras, adicionando-se à montante uma torre de biodessulfurização, com *Thiobacillus ferroxidans*, seguida de sistema de filtro de limalha de ferro oxidada, montada em paralelo. A jusante manteve-se na configuração original.

A nova proposta de estrutura para Granja Haacke prevê manutenção dos estágios de coleta de dejetos e separação dos sólidos grosseiros do efluente, bem como o processo de condução ao biodigestor e alimentação do motor de combustão interna. Conforme a Figura 73, a principal modificação associa-se à introdução de múltiplas barreiras para purificação do biogás. Consiste na introdução de torres de biodessulfurização de solução de nitrato em ambiente anóxico após a saída do biodigestor e duas colunas de limalha de ferro oxidada, montadas em paralelo. Basicamente o sistema de múltiplas barreiras consiste na remoção da fração grosseira de H₂S de forma bioquímica, seguida da remoção da fração fina de forma físico-química.

A fração grosseira de H₂S pode ser removida de forma bioquímica por meio do uso individual ou em conjunto das seguintes tecnologias: torres anóxicas, utilizando o nitrato como aceptor de elétrons; fotorreatores, onde algas promovem a oxidação do H₂S; e a microaeração na campânula dos biodigestores anaeróbios.

Figura 73 – Fluxograma da nova estrutura proposta com coluna de biodessulfurização e coluna dupla de limalha de ferro oxidada



Fonte: elaborado pelo autor (2015)

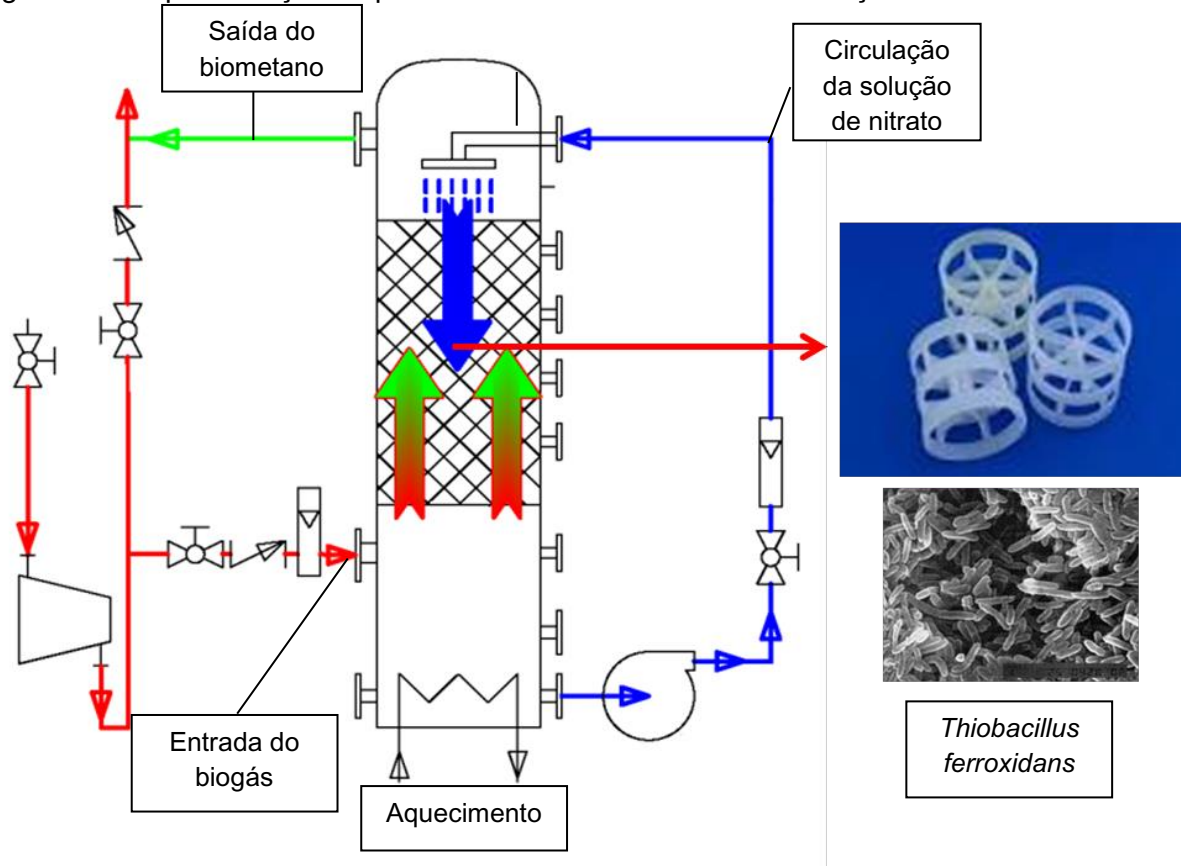
O funcionamento da torre de biodessulfurização em ambiente anóxico está em concordância com os sistemas ecoeficientes de purificação do biogás conforme apresentado na Figura 74. É caracterizado como um sistema que converte o H_2S em enxofre elementar, que é demandado pela indústria química e pela agricultura.

Seu funcionamento baseia-se na introdução e posterior circulação do fluxo de biogás bruto, rico em H_2S , em ambiente anóxico, ou seja, um ambiente sem ar, porém na presença de solução de nitrato e de microrganismos dessulfurantes. A solução de nitrato pode ser obtida sinteticamente ou por meio do tratamento aeróbico de resíduos orgânicos como no caso o esgoto sanitário e/ou outro efluente líquido que anteriormente ao tratamento aeróbio possua nitrogênio amoniacal. A entrada do biogás é realizada pela parte inferior da coluna e a saída do biometano pela parte superior da coluna.

Internamente, a torre reatora de biodessulfurização é preenchida com elementos filtrantes em termoplástico, na forma cilindros perfurados e aletados internamente, denominados *Pall ring*.

A partida do sistema de biodessulfurização se dá com a inoculação de lodo de reator anóxico ou de área anóxia de estações de tratamento aeróbio de efluentes nas torres de biodessulfurização. Após a partida do sistema e com a recirculação do efluente anóxico em contra corrente ao fluxo de biogás, um biofilme rico em *Thiobacillus Ferroxidans*, cresce e recobre os elementos filtrantes e promove a conversão do H_2S em enxofre elementar. A fixação de enxofre elementar no biofilme, ou a sua precipitação no fundo da torre, permitindo a sua recuperação, mostra-se como uma vantagem econômica significativa, pois esse subproduto da biometanização possui um elevado valor agregado no mercado.

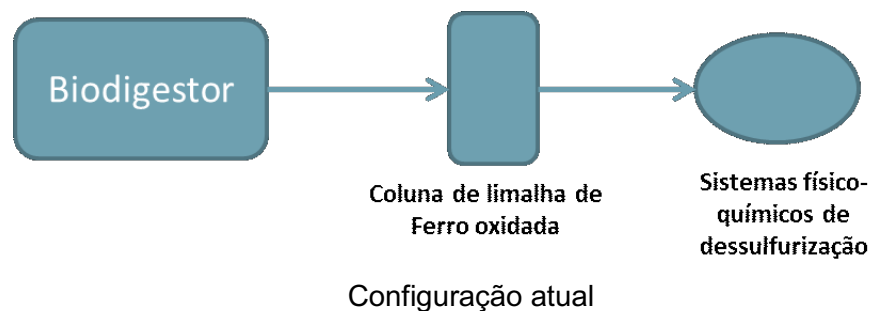
Figura 74 - Representação esquemática da torre de biodessulfurização em ambiente anóxico

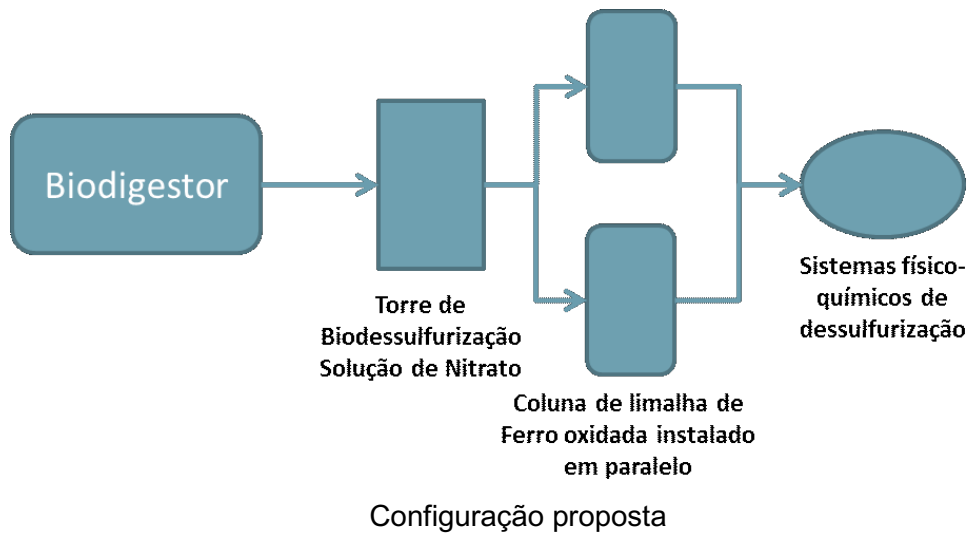


Fonte: adaptado de Almenglo *et al* (2013)

Após a saída das torres de biodessulfurização, providencia-se a passagem do biogás por uma coluna dupla de limalha de ferro oxidada, montada em paralelo, para acondicionamento do meio filtrante do processo. A Figura 75 demonstra a comparação entre a configuração atual e configuração proposta para a Granja Haacke, com introdução da torre de biodessulfurização e coluna dupla de limalha de ferro oxidada, montada em paralelo.

Figura 75 - Comparação entre a configuração atual e configuração proposta para a Granja Haacke





Fonte: Godoy Jr. & Santos (2016)

A introdução de duas colunas de limalha de ferro oxidada, montadas em paralelo, possibilita a utilização seletiva das colunas, conforme a necessidade. A principal vantagem desta modificação associa-se, unicamente, à minimização do processo de saturação, com prolongamento do tempo de vida útil e manutenção do processo de remoção do H_2S , mesmo com a falha de uma coluna ou necessidade de manutenção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A decisão de conversão do biogás em biometano depende da finalidade da aplicação. Estudos demonstram que para os sistemas de cogeração (produção combinada de energia elétrica e calor) a utilização do biogás "*in natura*" deve ser considerada tendo em conta o tempo de degradação de cada equipamento instalado e o custo associado a elevação do teor de metano na mistura. Para usos relacionados à injeção de gás na rede, aplicação de alta pressão visando facilitar a condução e a aplicação veicular, é fundamental purificar e pressurizar o biogás devido aos contaminantes contidos no gás, o que irá acelerar os processos de corrosão das tubulações e equipamentos.

Vários métodos de purificação e limpeza do biogás utilizados atualmente demandam grande consumo de energia, utilização de aporte químico e geração de inservíveis.

A Tabela 7 mostra a comparação entre as diferentes tecnologias de dessulfurização do biogás.

Os sistemas que utilizam tecnologias químicas, em sua grande maioria, apresentam a desvantagem de geração de passivo ambiental. Os sistemas que utilizam torres de limalha de ferro oxidada apresentam a vantagem de baixo custo de operação, no entanto tem baixa eficiência.

Os sistemas que utilizam tecnologias físicas apresentam bom desempenho e alta eficiência, no entanto apresenta à desvantagem de resultarem em alto custo de operação e em alguns casos a geração de passivos ambientais.

Os sistemas que utilizam tecnologias biológicas apresentam a vantagem de não gerar passivos ambientais e tem como benefício a operação de forma ecoeficiente, com reduzido aporte de energia e de produtos químicos e, ainda a possibilidade de se aproveitar o enxofre elementar. No entanto podem necessitar de tempo prolongado para aclimatação dos microrganismos e início da operação.

Os sistemas de múltiplas barreiras apresentam a vantagem de remoção eficiente da fração grosseira do efluente garantindo o bom desempenho das fases subsequentes, no entanto apresenta a necessidade de instalações mais sofisticadas.

Tabela 7 – Comparação das tecnologias de dessulfurização do biogás

Tecnologia	Tipo	Detalhe	Vantagem	Desvantagem
Químicas	Dessulfurização torre de limalha de ferro oxidada	Cavacos e limalha de ferro oxidada	Baixo custo; Remove fração grosseira de H ₂ S	Baixa eficiência na remoção da fração fina
	Filtros cerâmicos dopados quimicamente	Dopados com substâncias que reagem e retém o H ₂ S	Alta eficiência	Alto custo, não é recuperável, não é reciclável, gera passivo ambiental.
Físicas	Filtros de membranas	Membranas filtrantes para gases	Alta eficiência	Alto custo, satura rapidamente, não é recuperável, não é reciclável, gera passivo ambiental
	Filtros coalescentes	Elementos filtrantes	Alta eficiência, Remoção da fração fina	Alto custo, satura rapidamente, não é recuperável, não é reciclável, gera passivo ambiental
	Filtros de adsorção	Elemento filtrante trançado com carvão ativado	Alta eficiência, Remoção da fração fina	Alto custo, satura rapidamente, não é recuperável, não é reciclável, gera passivo ambiental
	Filtros de adsorção	Vaso preenchido com diferentes granulometrias de carvão ativado	Média eficiência; Remove fração fina	Alto custo, dificuldade de regeneração do elemento absorvente
	Filtros de absorção com terpene	Em baixa temperatura o terpene absorve o H ₂ S e em alta temperatura o terpene é exaurido	Média eficiência; Remove fração fina	Alto custo do limoneno
	Tecnologia Criogênica	Destilação de condensação fracionada a baixas temperaturas	Alta eficiência;	Alto custo, equipamentos de dimensão elevada, grande consumo de energia
Biológicas	Bioscrubber – filtragem em ambiente anóxico	Anóxico (UCA - Thiobacillus Ferroxidans)	Ecoeficiente, baixo custo operacional, “desde que se utilize efluente líquido sanitário de tratamento aeróbio”. Produz enxofre elementar que possui valor agregado e pode ser aproveitado	Depende de microrganismos, o processo pode demandar tempo de operação
	Fotorreator	Utiliza algas dessulfurizantes	Baixo custo	Instável e está em desenvolvimento laboratorial
Múltiplas Barreiras	Sistemas biológicos associados a sistemas físico-químicos	Associação das tecnologias descritas acima	Possibilidade de aproveitamento do enxofre elementar e garantia da remoção do H ₂ S. Não gera passivo ambiental. Utiliza sistema biológico para remoção de fração grosseira de H ₂ S e sistema físico-químico para remoção fina de H ₂ S	Custo médio, mais complexo e sofisticado. Pode gerar passivo ambiental, dependendo da tecnologia empregada, porém em um volume consideravelmente menor.

Fonte: Godoy Jr. & Santos (2016)

O estudo realizado visa incentivar o desenvolvimento de sistemas ecoeficientes de purificação do biogás, para minimização do impacto ambiental, com

produção de uma fonte alternativa de energia. Os benefícios da nova configuração, proposta para a Granja Haacke, estão associados à remoção da fração grosseira do H_2S , através da passagem do biogás pelas torres de biodessulfurização e dupla coluna de limalha de ferro oxidada.

Desta forma, a nova configuração pode ser considerada um processo de múltiplas barreiras, sendo a jusante do sistema propensa a maior vida útil, devido ao *upgrade* realizado na limpeza do biogás. O sistema de jusante posterior será, então, responsável pela remoção da fração mais fina do H_2S .

A remoção da fração fina de H_2S também pode ser removida de forma exclusivamente bioquímica, porém a associação de tecnologias bioquímicas com físico-químicas permite maior segurança operacional no tocante a garantir a qualidade do biometano final.

A introdução das modificações expostas permite o aumento de vida útil dos filtros do sistema e biometano de melhor qualidade.

6 CONCLUSÃO

Cada processo de purificação do biogás visa maximizar a concentração de CH_4 na mistura a ser processada de modo que ele atinja a máxima purificação. Em relação à eficiência energética, alguns processos de limpeza e purificação são menos vantajosas devido ao alto consumo de energia. Assim, a escolha do processo mais adequado deve ter em conta o grau de limpeza conseguido, eficiência no nível de energia, redução dos custos de produção e da produção de produtos químicos. Do ponto de vista econômico, o sistema de absorção usando água como solvente mostra ser o mais vantajoso, no entanto, o processo de limpeza do biogás usando a tecnologia criogénica tem mostrado bons resultados nesta direção, com uma perda de biogás na ordem de 0,5% em volume. No entanto, o sistema de adsorção com modulação de pressão (PSA) tem vantagens significativas na purificação do biogás devido à sua versatilidade, eficiência e custo. Ele se adapta facilmente a fontes de biogás com diferentes composições podendo produzir CH_4 de alta pureza. Os sistemas físicos, químicos e físico-químicos produzem um excelente resultado operacional de limpeza do biogás, e remoção de sulfeto de hidrogênio (H_2S), mas o custo é alto, e gera resíduos e passivos ambientais. Já os processos biológicos, tal como os adaptados a efluentes líquidos e gasosos provenientes de processos da agroindústria, indústria alimentar e esgoto municipal, podem ter um alto grau de eco eficiência.

A eficiência ecológica é devido ao baixo custo e o fato de o fornecimento de produto químico poder ser realizado com o próprio efluente tratado anaerobicamente e aeróticamente, isto é, sem a necessidade de compra de nitrato para a nutrição do meio bacteriano de biodessulfurização. Também se pode concluir que é consenso entre os especialistas que o método mais seguro para garantir dessulfurização do biogás e proteção de equipamentos e periféricos contra a corrosão por gás sulfúrico é utilizar a tecnologia das múltiplas barreiras para o H_2S , começando pela remoção da fração grossa de formas biológicas, seguido pela utilização de tecnologias físico-químicas.

Em relação à biodessulfurização, pode-se concluir que, a melhor proposta de *upgrade* para o estudo de caso seria introduzir no início do processo uma torre de

biodessulfurização de biogás *Thiobacillus ferroxidans*, seguida de duas colunas de limalha de ferro oxidado, montadas em paralelo, para remoção de H₂S e CO₂ e, desta forma, manteria toda a configuração posterior para remoção da fração fina.

O sistema de múltiplas barreiras garante um fornecimento seguro de biometano, um prolongamento da vida útil de elementos filtrantes físico-químicos e uma redução considerável na produção de passivo ambiental, no caso dos elementos que não são reaproveitáveis e nem recicláveis dos sistemas convencionais de purificação fina do biogás.

Adicionalmente pode-se concluir que a proposta estudada pode proporcionar uma economia considerável no custo de produção do biometano.

No tocante a durabilidade dos motores de combustão interna, observa-se que a introdução de bronzinas com recobrimento polimérico apresenta benefícios significativos. A minimização da troca de elétrons entre o óleo contaminado com H₂S e a camada antifricção, devido ao recobrimento polimérico, pode reduzir, significativamente, o processo de corrosão associado a este componente.

A degradação prematura dos motores de combustão interna que utilizam biogás é um fator limitante ao seu emprego em larga escala. Desta forma sugere-se para trabalhos futuros o aprofundamento na pesquisa de motores equipados com componentes capazes de suportar o ataque químico proporcionado pelas substâncias presentes no biogás.

Adicionalmente sugere-se o aprofundamento nas pesquisas de biodessulfurização, visando minimizar o impacto ambiental que os sistemas tradicionais provocam no meio ambiente. Visto o sistema proposto ainda manter as colunas de limalha de ferro oxidada com a possibilidade de seleção de utilização, um estudo relacionado ao tempo de vida útil e forma de descarte da limalha de ferro é necessário.

Aspectos associados à economia e custo/benefício proporcionada pela utilização da torre de biodessulfurização em ambiente anóxico com dupla coluna de limalha de ferro oxidada quando comparado ao sistema atualmente utilizado devem ser explorados.

REFERÊNCIAS

AFICIONADOS A LA MECÁNICA. **Sistema de desaeração do cárter**. Disponível em: <<http://www.aficionadosalamecanica.net/>>. Acesso em 15 out. 2015.

ALLEGUE, L. B.; ALLÈ, J. H. K. **Biogas and bio-syngas upgrading**. Danish Technological Institute, 2012. Disponível em: <<http://docplayer.net/4307808-Report-biogas-and-bio-syngas-upgrading.html>>. Acesso em 2 abr. 2015.

Almenglo, F. *et al.* **H₂S removal from biogas by a pilot anoxic biotrickling filter: a comparison between co-current and counter-current flow operation mode increasing the loading rate**, 5 th IWA Conference on Odors and Air Emissions, 2013.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 164 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-09032012-090952/pt-br.php>>. Acesso em 13 mai. 2015.

AVELLAR, L. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. 2001. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – UNESP, Guaratinguetá. 2001. Disponível em: <<http://www.bv.fapesp.br/pt/bolsas/95345/valorizacao-dos-subprodutos-da-agroindustria-visando-a-cogerao-e-a-reducao-da-poluicao-ambiental/>>. Acesso em 30 jun. 2014.

AVESUY. Biodigestor de sistema contínuo. Disponível em: <www.avesuy.com.br>. Acesso em 24 nov. 2014.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blusher, 2012.

BUI, V. G. *et al.* **Small power engine fueled with biogas**. The University of Danang, 2008. Disponível em: <http://ir.library.osaka-u.ac.jp/dspace/bitstream/11094/12943/1/arfyjsps2007_265.pdf>. Acesso em 18 set. 2014.

CERVI, R. G. **Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeróbica: estudo de caso em unidade biointegrada**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de

Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu. 2009. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0412.pdf>>. Acesso em 7 mar. 2015.

CIBIOGÁS. Energias renováveis. Disponível em: <<https://www.cibiogas.org/>>. Acesso em 20 nov. 2015.

_____. Galeria de imagens do CIH e do CIBiogásER. Disponível em: <<http://www.galeria.hidroinformatica.org/>>. Acesso em 20 nov. 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007.

COGEN PORTUGAL. Sistema de cogeração para aquecimento de ambientes. Disponível em: <www.cogenportugal.com>. Acesso em 15 fev. 2015.

CONSTANT, M. *et al.* **Biogas end use in the European Community**. Commission of the European Communities 1989. Disponível em: <<http://bookshop.europa.eu/en/biogas-end-use-in-the-european-community-pbEUNA12034/?CatalogCategoryID=7QwKABstDHwAAAEjK5EY4e5L>>. Acesso em 25 ago. 2014.

DESOTEC. Válvulas de cabeçote atacadas por siloxanos. Disponível em: <www.desotec.com>. Acesso em 22 jul. 2015.

DUNG, N. N. A study of conversion diesel engine to fully biogas engine with electronically controlled. **International Journal of Earth Sciences and Engineering**, Ho Chi Minh, v. 5, n. 6, p. 1745-1749, dez. 2012. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/305913315/Biogas-Engines>>. Acesso em 20 mai. 2015.

ENERGY BUSINESS REVIEW. Pistão com primeiro canaleta anodizado. Disponível em: <<http://wind.energy-business-review.com/>>. Acesso em 27 set. 2014.

FAO. Sistema *dual fuel* aplicado a motores de combustão interna. Disponível em: <www.fao.org>. Acesso em 13 nov. 2014.

FARGON. Secador elétrico de biogás. Disponível em: <www.fargon.com.br>. Acesso em 30 ago. 2014.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás na suinocultura**. 2012. 211 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 2012. Disponível em: <

2012-10-29T174046Z-816/Publico/Dangela%20Maria%20Fernandes.pdf>. Acesso em 14 fev. 2015.

FLOTECH. Desenho esquemático do sistema de purificação Water Scrubbing. Disponível em: <www.flotech.com/biogás>. Acesso em 11 mar. 2015.

GARCIA, M. *et al.* Presence of siloxanes in the biogas of a wastewater treatment plant separation in condensates and influence of the dose of iron chloride on its elimination. **International Journal of Waste Resources**, v. 6, p. 1-6, 2015. Disponível em: <<http://www.omicsonline.com/open-access/presence-of-siloxanes-in-the-biogás-of-a-wastewater-treatment-plant-separation-in-condensates-and-influence-of-the-dose-of-iron-chl-2252-5211-1000192.pdf>>. Acesso em 28 mai. 2015.

GAS TURBINES POWER. Válvulas submetidas à corrosão com utilização de biogás. Disponível em: <<http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/journal.aspx>>. Acesso em 6 nov. 2015.

GODOY JUNIOR, E. **Estado da arte dos sistemas de dessulfurização, desumidificação e descarbonatação do biogás**: panorama nacional e internacional. SANergya: 2015.

GODOY JUNIOR, E; SANTOS, M, V; OLIVEIRA, J, Y; CAMARGO, J, R. **Estado da arte da dessulfurização do biogás em projetos de bioenergia**. Acesso em 2016.

GOOGLE PATENTS. Dual fuel method and system. 2003. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US6591817>>. Acesso em 10 set. 2015.

GRAHAM, P. **An investigation into piston ring blow by and its effect on biogas engines**. 1986. 192 f. Tesis (Doctor of Philosophy of the Council for National Academic Awards) - School of Mechanical and production Engineering School, Leicester. 1986. Disponível em: <https://www.dora.dmu.ac.uk/xmlui/bitstream/handle/2086/10683/An_investigation_into_piston_ring_blowby_and_its_effect_on_biogás_engines.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Acesso em 15 jun. 2014.

Guidance on gas treatment. **Environment Agency**, v. 10, Bristol, 2010. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/321612/LFTGN06.pdf>. Acesso em 22 set. 2015.

International journal of waste resources. <https://scholar.google.com/citations?user=51MN5fkAAAAJ&hl=en>. Acesso em 15 out. 2015.

KONZEN, E. A. Fertilização de lavoura e pastagem com dejetos de suínos e cama de aves. In: Seminário Técnico da Cultura de Milho, V, 2003, Videira. **EMBRAPA**. 2003. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/destaques/dejetos/InformeTecnicoDejetos.PDF>>. Acesso em 25 ago. 2015.

MAHLE. Drive by performance. Disponível em: <<http://www.br.mahle.com/pt/>>. Acesso em 25 out. 2015.

MAHLE CYLINDER COMPONENTS. Disponível em: <<http://www.mahle.com/mahle/en/products-and-services/commercial-vehicles/cylinder-components/>>. Acesso em 3 set. 2014.

Manual KS. Anéis de segmento, 2011. Disponível em: <<http://www.ms-motorservice.com.br/produtos-catalogos/produtos/jogos-de-aneis-de-segmen-to/>>. Acesso em 18 nov. 2015.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. Publindústria: São Paulo, 2011.

MIST ELIMINATOR DEMISTER. Inseto de plástico *Pall Ring*. Disponível em: <www.mist-eliminator-demister.com>. Acesso em 20 jan. 2015.

MITZLAFF, K. V. **Engines for biogas**: theory, modification, economic operation. Braunschweig: Vieweg, 1988.

MONTEIRO, S. D. S. C. **Produção de Biometano**: análise de mercado e estudo da separação por PSA. 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Porto. 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69219/1/000150475.pdf>>. Acesso em 23 abr. 2015.

MOTONLINE. Exemplo de mapa de ignição. Disponível em: <www.motonline.com.br>. Acesso em 27 jun. 2014.

OLIVEIRA, P. A. V. de. Produção e aproveitamento do biogás. In: OLIVEIRA, P. A. V. de. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos**: manual de boas práticas. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2004. Cap. 4, p.43-55.

Disponível em: <
http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/publicacao_n3r85f3h.pdf>.
Acesso em 30 nov. 2015.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos de abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009. Disponível em: <
<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-26042010-091847/?&lang=br>>. Acesso em 24 ago. 2015.

PROJETO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. **Relatório técnico parcial I: projeto geração distribuída de energia elétrica com saneamento ambiental**. Foz do Iguaçu: FINEP – ITAU, 2011.

SAKUMA, A. C. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013. Disponível em: <
<http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/33950/R%20-%20D%20-%20ANDERSON%20CARDOSO%20SAKUMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
Acesso em 15 jul. 2015.

SCANDINAVIA GTS. Disponível em: <www.scandinaviangts.com>. Acesso em 10 set. 2015.

SCHOLES, C. A. *et al.* 2008. Carbon dioxide separation through polymeric membrane system for fuel gas applications. **Recent Patents on Chemical Engineering**, v. 1, n. 1, p. 52-66, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Sandra_Kentish/publication/228676182_Carbon_dioxide_separation_through_polymeric_membrane_systems_for_flue_gas_applications/links/0912f5101177b9e6c4000000.pdf. Acesso em 5 dez. 2015.

SEIXAS, J. *et al.* Construção e funcionamento de biodigestores. In: Circular Técnica, n. 4, 1981, Brasília. **EMBRAPA**. 1981. Disponível em: <
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/360894>>. Acesso em 23 mai. 2015.

SILVA, C. A. B. V. **Limpeza e purificação de Biogás**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Trás-os-Montes e Alto Douro. 2009. Disponível em: <
https://repositorio.utad.pt/bitstream/10348/263/1/msc_cabvsilva.pdf>. Acesso em 18 mai. 2015.

SOUZA, J.; SCHAEFFER, L. Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano. 2010. **Revista Liberato**, Nova Hamburgo, v. 11, n. 15, p. 1-88, jan./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/cilindros%20para%20biometano.pdf>>. Acesso em 8 nov. 2015.

STEFAN, M. Biogas fuel for internal combustion engines. In: ANNALS OF THE FACULTY of ENGINEERING HUNEDOARA, tome II, fascicule 3, 2004. **Resumos...** Serbia & Montenegro: University of Novi Sad, 2004. 12 p. Disponível em: <<http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2004/ANNALS-2004-3-24.pdf>>. Acesso em 16 set. 2015.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. Edgard Blucher: São Paulo, 1971.

Technische Universiteit Eindhoven. Disponível em: <<https://www.tue.nl/>>. Acesso em 13 nov. 2015.

TEIXEIRA, V. H. **Biogás**: fontes alternativas de energia. Minas Gerais: Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, 1998.

TRENSURB. Modelo de instalação de um conjunto motogerador. Disponível em: <www.trensurb.gov.br>. Acesso em 13 nov. 2015.

UFRRJ. Seção transversal do biodigestor de sistema contínuo. Disponível em: <<http://portal.ufrj.br/>>. Acesso em 13 nov. 2015.

WARTSILA. Motor Wartsila originalmente projetado para operação *dual fuel*. Disponível em: <www.wartsila.com>. Acesso em 20 nov. 2015.

WAYBUILDER. Sistema de lubrificação forçada aplicada a motores de combustão interna. Disponível em: <www.waybuilder.net/>. Acesso em 20 nov. 2015.

YOUTUBE. Jato de óleo aplicado a motores de combustão interna. 2010. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=uMnFbsy0Hgg>>. Acesso em 18 nov. 2015.