

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO “STRICTO SENSU” EM ENGENHARIA
QUÍMICA - NÍVEL DE MESTRADO

**TECNOLOGIA ALTERNATIVA PARA PURIFICAÇÃO DO
METANO CONTIDO NO BIOGÁS PROVENIENTE DA
DIGESTÃO ANAERÓBICA DE DEJETOS DE SUÍNOS**

ROSANGELA DALA POSSA

Toledo - PR - Brasil
Fevereiro de 2013

ROSANGELA DALA POSSA

**TECNOLOGIA ALTERNATIVA PARA PURIFICAÇÃO DO
METANO CONTIDO NO BIOGÁS PROVENIENTE DA
DIGESTÃO ANAERÓBICA DE DEJETOS DE SUÍNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Monitoramento e controle ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Freddy Mendoza Morejon

Toledo - PR - Brasil

Fevereiro de 2013

Aos meus pais, Santo e Clementina Dala Possa,
E ao meu namorado Evandro Naginski,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela força e proteção.

À minha família, e meu namorado Evandro Naginski pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Ao Professor Dr. Camilo Freddy Mendoza Morejon pela dedicação durante toda a orientação e pela confiança para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Reinaldo Bariccatti pela contribuição e apoio.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela oportunidade.

Aos colegas e amigos (acadêmicos, funcionários e professores), que contribuíram de tantas formas.

A empresa Biogás Motores pela parceria na montagem do equipamento e os seus funcionários, pelo comprometimento e disponibilidade para ajudar na montagem e manutenção do mesmo.

Ao Sr. Edimar Bombardelli pela concessão de espaço para realização dos testes necessários, em especial ao funcionário David Henrique Fianetti que esteve ao meu lado todos os dias trabalhando para dar certo.

A fazenda Iguaçu pela concessão de espaço para realização dos testes, em especial ao Sr. Marinho e o Sr. Emerson.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste sonho, os mais sinceros agradecimentos.

“Aquilo que persistimos em fazer torna-se mais fácil, não porque a natureza da coisa muda, mas porque a nossa capacidade de executá-la aumenta.”

(Harber J. Grant)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3. ESPECIFICAÇÃO DO ELEMENTO DE ESTUDO-ESCOPO	16
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. PRODUÇÃO DE SUÍNOS NO MUNDO E NO BRASIL	17
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS DEJETOS SUINOS	18
2.3. POTENCIAL POLUIDOR	20
2.3.1. Contaminação do solo	20
2.3.2. Contaminação da água	21
2.3.3. Contaminação do ar	21
2.4. SISTEMAS DE TRATAMENTOS DOS DEJETOS	22
2.4.1. Compostagem	22
2.4.2. Esterqueiras convencionais	22
2.4.3. Biodigestores anaeróbicos	23
2.4.3.1. Modelo chinês	24
2.4.3.2. Modelo indiano	25
2.4.3.3. Modelo canadense	26
2.5. PRODUTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA	27
2.5.1. Biofertilizante	27
2.5.2. Biogás	28
2.6. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DO BIOGÁS	28
2.6.1. Metano (CH ₄)	29
2.6.2. Dióxido de Carbono (CO ₂)	29
2.6.3. Gás sulfídrico (H ₂ S)	29
2.6.4. Amônia (NH ₃)	30
2.7. FORMAS DE USO DO BIOGÁS	30
2.7.1. Energia elétrica	30

2.7.2.	Combustível	33
2.7.3.	Créditos de carbono.....	33
2.8.	PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS.....	34
2.8.1.	Métodos de purificação/separação do metano contido no biogás	35
2.8.1.1.	Lavagem do biogás/Absorção	35
2.8.1.2.	Adsorção em alta pressão	36
2.8.1.3.	Separação por membrana	36
2.8.2.	Evolução das tecnologias nacionais para purificação do metano contido no biogás	36
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE RESÍDUOS	44
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE BIOGÁS.....	45
3.3.	CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS	45
3.3.1.	Análises realizadas no campo.....	46
3.3.1.1.	Determinação de amônia (NH ₃) no biogás.....	46
3.3.1.2.	Determinação de gás sulfídrico (H ₂ S) no biogás.....	47
3.3.1.3.	Determinação de metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂) no biogás	48
3.3.2.	Análises laboratoriais	48
3.4.	ANÁLISE DE MÉTODOS/PROCESSOS/TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS UTILIZADAS PARA TRATAMENTO DO BIOGÁS	49
3.5.	DESENVOLVIMENTO/PROPOSIÇÃO DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA.....	49
3.6.	TESTES OPERACIONAIS DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA.....	50
3.7.	ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE RESÍDUOS.....	52
4.2.	CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE BIOGÁS.....	53
4.3.	CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS	54
4.4.	ANÁLISE DE MÉTODOS/PROCESSOS/TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS UTILIZADAS PARA TRATAMENTO DO BIOGÁS	55
4.5.	DESENVOLVIMENTO/PROPOSIÇÃO DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA.....	57
4.6.	TESTES OPERACIONAIS DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA.....	58
4.7.	ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA.....	62
5.	CONCLUSÕES.....	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Biodigestor modelo Chinês.....	24
Figura 2. Biodigestor modelo Indiano.....	26
Figura 3. Biodigestor modelo Canadense.....	27
Figura 4. Microturbina e seus componentes.....	31
Figura 5. Motor de ciclo Otto com gerador.....	32
Figura 6. Funcionamento do motor de ciclo Otto.....	32
Figura 7. Vista aérea da granja onde se realizaram os experimentos.....	52
Figura 8. Dimensões do biodigestor 1.....	54
Figura 9. Dimensões do biodigestor 2.....	54
Figura 10. Coleta do biogás purificado na entrada do motor.....	56
Figura 11. Vista do equipamento desenvolvido.....	58
Figura 12. Instalação do protótipo na granja de gado leiteiro.....	59
Figura 13. Ajustes realizados no protótipo.....	59
Figura 14. Protótipo instalado na parte externa do abrigo do motor.....	60
Figura 15. Instalação do sistema de controle de entrada do biogás na tecnologia desenvolvida ou no filtro convencional.....	61
Figura 16. Versão final dos ajustes realizados na tecnologia proposta.....	61
Figura 17. Ponto de medição da pressão de entrada do biogás no sistema, temperatura do biogás e coleta do biogás “in-natura”.....	62
Figura 18. Variação da concentração do CH ₄ e CO ₂ no dia em que foi adicionada a solução A.....	64
Figura 19. Variação da concentração do H ₂ S e NH ₃ no dia em que foi adicionada a solução A.....	64
Figura 20. Espectro de absorção do azul de metileno obtido no dia em que se adicionou a solução A no equipamento.....	65
Figura 21. Variação da concentração do CH ₄ e CO ₂ no decorrer dos dias com a reação com a solução A.....	67
Figura 22. Variação da concentração do H ₂ S e NH ₃ no decorrer dos dias com a reação com a solução A.....	67
Figura 23. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução A.....	68

Figura 24. Variação da concentração do CH ₄ e CO ₂ no dia em que foi adicionada a solução B.	70
Figura 25. Variação da concentração do H ₂ S e NH ₃ no dia em que foi adicionada a solução B.	70
Figura 26. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução B.	71
Figura 27. Variação da concentração do CH ₄ e CO ₂ no decorrer dos dias com a reação com a solução B.	72
Figura 28. Variação da concentração do H ₂ S e NH ₃ no decorrer dos dias com a reação com a solução B.	73
Figura 29. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução B.	73
Figura 30. Cromatograma do ar e metano puro (A) e dióxido de carbono puro (B).	75
Figura 31. Cromatograma do biogás “in-natura”.	75
Figura 32. Cromatograma do biogás purificado com a solução B.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos. ...	18
Tabela 2. Composição química dos dejetos suínos.	19
Tabela 3. Composição físico-química do biofertilizante utilizado como adubo.	19
Tabela 4. Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais.....	28
Tabela 5. Caracterização qualitativa e quantitativa do biogás de suínos “in-natura”.	55
Tabela 6. Composição do biogás “in-natura”, e purificado com filtro de limalha de ferro.	56
Tabela 7. Variação da concentração dos componentes do biogás no dia em que foi adicionada a solução A.	63
Tabela 8. Variação das concentrações dos componentes presentes no biogás, após reação com a solução A.	66
Tabela 9. Variação da concentração dos componentes do biogás no dia em que foi adicionada a solução B.	69
Tabela 10. Variação das concentrações dos componentes presentes no biogás, após reação com a solução B.....	72
Tabela 11. Análises cromatográficas das amostras do biogás “in natura”.	75
Tabela 12. Análises cromatográficas das amostras do biogás purificado.	76
Tabela 13. Comparação da eficiência das soluções A e B.	77

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIPECS – Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO – Demanda Química de Oxigênio
EAA – Espectrometria de Absorção Atômica
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
GEE- Gases de Efeito Estufa
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPI - Instituto de Propriedade Industrial
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
pH – Potencial Hidrogeniônico
PI – Propriedade Intelectual
PSA – Adsorção em Alta Pressão
PVC – Policloreto de Polivinila
TECPAR – Instituto de Tecnologia do Paraná
UV-VIS – Ultravioleta e Visível

LISTA DE SÍMBOLOS

B – Boro

C/N – Relação Carbono/nitrogênio

Ca – Cálcio

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CaSO₄ – Sulfato de cálcio

CH₄ – Metano

Cl – Cloro

CO₂ – Dióxido de carbono

Cu – Cobre

Fe – Ferro

FeS – Sulfeto ferroso

H₂S – Gás sulfídrico

H₂SO₄ – Ácido sulfúrico

K – Potássio

Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

N – Nitrogênio

Na₂S – Sulfeto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

NH₃ – Amônia

P – Fósforo

S – Enxofre

SO₂ – Dióxido de enxofre

Zn – Zinco

POSSA, R. D. **Tecnologia alternativa para purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

RESUMO

Nos últimos anos, tem sido intensificado o uso de sistemas de biodigestão anaeróbica, para o tratamento dos dejetos das atividades agroindustriais. Os principais produtos da biodigestão são biogás e biofertilizante. O biogás é constituído, principalmente, de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S) e amônia (NH_3), o qual, na maioria dos casos é utilizado como combustível para acionamento de motores estacionários. Nesses casos, a presença de CO_2 , H_2S e NH_3 , comprometem a viabilidade do seu uso como combustível, pois reduz o potencial calorífico e a vida útil dos motores. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma tecnologia alternativa para purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos. Para tanto, a metodologia contemplou a prospecção tecnológica inerente ao assunto (remoção/purificação de biogás), a identificação de vantagens/desvantagens, o projeto/construção da tecnologia alternativa (protótipo) e a sua instalação numa propriedade rural para efeitos de testes operacionais. Os resultados, demonstram a viabilidade técnica e econômica para implementação na situação real. Especificamente foi alcançada uma redução para os componentes corrosivos (96% para o H_2S e 83,1% para a NH_3), além de 6% de redução do CO_2 . A consequência disso foi o aumento da concentração do metano que atingiu 75% viabilizando a utilização do biogás como combustível.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestão; Purificação do biogás; tecnologia alternativa; motores estacionários.

POSSA, R. D. **Alternative technology for purification of biogas obtained from swine manure**. 2013. Dissertation (Master's Degree in Chemical Engineering) – State University of the West of Paraná.

ABSTRACT

In recent years, the use of anaerobic bio-digestion systems for the treatment of wastes from agro-industrial activities has been intensified. The main products of bio-digestion are biogas and bio-fertilizer. Biogas is composed mainly of methane (CH_4), carbon dioxide (CO_2), hydrogen sulfide (H_2S) and ammonia (NH_3), which in most cases is used as fuel for powering stationary engines. In these cases, the presence of CO_2 , H_2S and NH_3 , undermines the viability of its use as fuel because it reduces the calorific potential and lifetime of engines. In this context, the study aimed to develop and evaluate an alternative technology for purification of the methane contained in biogas from anaerobic digestion of swine manure. Therefore, the methodology contemplated the technological foresight inherent in matter (removal / purification of biogas), identifying advantages / disadvantages, design / construction of alternative technology (prototype) and its installation on a rural property for the purpose of operational testing. The results demonstrate the technical and economical viability for implementation in a real situation. For the corrosive components the reduction of 96% for H_2S and of 83,1% for NH_3 was achieved, beyond 6% CO_2 reduction. The result was the increasing of methane concentration which reached 75% enabling the use of the biogas as a fuel.

KEY-WORDS: Bio-digestion; Purification of biogas; alternative technology; stationary engines.

1. INTRODUÇÃO

As atividades agroindustriais, nos últimos anos, têm apresentado elevados índices de crescimento, destacando-se a suinocultura, a bovinocultura e a avicultura. Porém, esse crescimento, devido ao elevado volume de dejetos gerados por essas atividades, trouxe consigo sérios problemas ao meio ambiente. Segundo a pesquisa agropecuária desenvolvida pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no ano de 2008, a suinocultura brasileira ocupava o 4º lugar no rebanho mundial, representado por um efetivo de suínos de 36,8 milhões de cabeças, dos quais 4,42% estão distribuídos na região Norte, 18,10% na região Nordeste, 11,65% na região Centro-Oeste, 17,48% na região sudeste e 48,33% na Região sul.

Na região Sul, o rebanho industrial é desenvolvido, e os sistemas de produção são organizados em torno da integração entre produtores e a indústria processadora (WILLERS *et al.*, 2012). De acordo com a ABIPECS (Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína) (2011), no ano de 2010 o maior produtor nacional de carne suína foi Santa Catarina com 746,9 mil toneladas, em segundo lugar o Rio Grande do Sul com 588,7 mil toneladas de carne suína, seguido pelo Paraná, com 478,4 mil toneladas produzidas. Segundo o TECPAR - Instituto de Tecnologia do Paraná (2012) no ano de 2010 o rebanho de suínos no Paraná foi representado por 4,3 milhões de cabeças, representando 13,5% do rebanho nacional, distribuído entre 135 mil produtores, sendo que 1,72 milhões de cabeças (40%) estão localizadas no município de Toledo. Considerando que cada suíno produz em média 4,9 kg de esterco e urina por dia, o volume total de efluente gerado no município de Toledo – PR é de aproximadamente 8.428.000 kg de dejetos por dia.

De acordo com Lovatto (2005), os dejetos de suínos possuem potencial poluidor 260 vezes maior que o esgoto doméstico. Segundo Mattias *et al.* (2010) a contaminação do solo pode ocorrer pelo contato direto com o dejetos, quando não tratado, ou pela saturação de nutrientes, em ambos os casos, comprometendo a produtividade do solo. No caso da contaminação da água, pode ocorrer de duas maneiras: pela infiltração dos dejetos no solo, até atingir os lençóis freáticos, e causar a contaminação das águas subterrâneas; e pelo escoamento superficial, dos dejetos, atingindo os rios, riachos e/ou lagos (GASPAR, 2003). A contaminação do ar ocorre pelo mau cheiro, exalados pela difusão dos compostos

voláteis presentes nos dejetos, e pela liberação de gases colaboradores do efeito estufa (STRAPAZZON, 2008).

Para minimizar os impactos negativos no meio ambiente, nos últimos anos tem-se intensificado o uso de biodigestores anaeróbicos como método de tratamento destes dejetos, nos quais ocorre a degradação/digestão da matéria orgânica com a produção de uma mistura gasosa chamada de biogás (LAUFER, 2008). Segundo o mesmo autor, estes sistemas quando dimensionados e operados corretamente minimizam o potencial poluidor dos dejetos e geram produtos de valor agregado, como o biogás e o biofertilizante. O biogás proveniente da biodigestão tem diversas aplicações: como combustível para a geração de energia térmica, mecânica e/ou elétrica; como matéria prima para a obtenção de outros produtos de valor agregado, pela queima direta para a obtenção de créditos de carbono, como matéria-prima para a indústria (produção de hidrogênio, metanol, etc.) entre outros. O material digerido, devido à existência dos nutrientes, pode ser utilizado como biofertilizante/adubo orgânico.

O biogás é composto, principalmente, por metano (CH_4) dióxido de carbono (CO_2), gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3) e vapor de água. A maior aplicação do biogás consiste no aproveitamento do metano contido nele, principalmente como combustível para acionamento de motores/geradores de energia elétrica. Neste caso, a presença dos outros componentes, presentes no biogás, compromete a eficiência do aproveitamento, da seguinte maneira: o dióxido de carbono e a presença de vapor de água diminuem seu poder calorífico; o gás sulfídrico, por ser altamente corrosivo, reduz a vida útil dos dispositivos eletromecânicos utilizados para o aproveitamento do mesmo; a amônia torna-se corrosiva na presença de umidade, diminuindo também a vida útil dos dispositivos eletromecânicos. Com isto, se faz necessário a purificação do metano contido no biogás, por meio da remoção dos componentes indesejáveis.

Os componentes do biogás, quando separados e corretamente armazenados, apresentam um valor econômico diferenciado: o metano pode ser utilizado como combustível e/ou como insumo na produção de amônia, hidrogênio e outros produtos de síntese; o dióxido de carbono pode ser utilizado em diversas atividades, seja na lavagem de polpa de papel e celulose, na agricultura, em extintores, gás de síntese, etc.; o gás sulfídrico pode ser utilizado na produção de diversos sulfetos inorgânicos, ácido sulfúrico, compostos orgânicos sulfurosos, entre outros; e a amônia pode ser utilizada tanto como agente refrigerante, em unidades de refrigeração industrial, ou como matéria-prima para a

fabricação de diversos fertilizantes nitrogenados. Estas aplicações tornam-se uma nova opção de uso do biogás.

Várias foram as tentativas de produção de tecnologias para a separação dos componentes do biogás, porém os resultados não foram satisfatórios, tendo em vista que não conseguiram atender a expectativa de separação por componentes. Em outros casos, as tecnologias limitam-se a purificação do metano contido no biogás por meio da retenção/reação com outros produtos, como limalha de ferro, zeólitas, metais quelados entre outros. De modo geral, essas tecnologias (cadastradas no banco de patentes – INPI) ainda apresentam muitas limitações (a necessidade de grandes áreas para instalação dos sistemas, grandes pressões no fluxo do biogás para vencer a perda de carga nos equipamentos e condições críticas para a regeneração do material filtrante) dificultando a popularização destas tecnologias.

Diante desta realidade, surge a necessidade de estudar novas rotas tecnológicas para propor novas tecnologias e novos processos, em todos os casos visando eliminar os gargalos encontrados nos sistemas existentes, bem como para viabilizar a inserção da tecnologia alternativa no mercado.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho foi o desenvolvimento de uma tecnologia alternativa para purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Caracterizar a fonte geradora de biogás;
- b) Caracterizar qualitativa e quantitativamente o biogás;

- c) Analisar os métodos/processos/tecnologias convencionais disponíveis na literatura para a purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos;
- d) Desenvolver uma tecnologia alternativa para a purificação do metano contido no biogás;
- e) Realizar testes operacionais da tecnologia alternativa; e
- f) Analisar o desempenho da tecnologia desenvolvida.

1.3. ESPECIFICAÇÃO DO ELEMENTO DE ESTUDO-ESCOPO

Os elementos envolvidos nesse trabalho englobaram uma granja com produção de suínos (fase inicial), os quais produzem uma grande quantidade de dejetos. Estes dejetos são armazenados em um tanque e encaminhados para o biodigestor anaeróbico, onde por meio da degradação da matéria orgânica é produzido o biogás. O biogás é transportado por meio de um gasoduto até o sistema de purificação onde é reduzida a quantidade de CO₂, NH₃ e H₂S do biogás, na sequência o metano purificado é utilizado em um motor gerador de energia elétrica, que é utilizada em toda a granja.

Dentre os elementos citados, o objeto principal do estudo foi à avaliação de uma tecnologia desenvolvida na Unioeste para a purificação do metano contido no biogás proveniente da digestão anaeróbica de dejetos de suínos. Com essa tecnologia pretendeu-se a redução/eliminação dos componentes indesejáveis no biogás (H₂S, NH₃ e CO₂), a fim de aumentar a vida útil dos dispositivos eletromecânicos utilizados no aproveitamento do metano contido no biogás.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da literatura contemplou os seguintes assuntos: a produção mundial e nacional de suínos para identificar o potencial econômico dessa atividade; pesquisas relacionadas com a caracterização dos dejetos de suínos e o potencial poluidor dos mesmos, seja em relação ao solo, água e ar; na sequência destacam-se os sistemas existentes para o tratamento dos dejetos, detalhando em cada um deles as vantagens e desvantagens dos mesmos e destacando o biodigestor anaeróbico como o mais utilizado no tratamento dos dejetos de suínos, por possibilitar a geração de produtos de valor agregado como o biofertilizante e o biogás; em seguida estudaram-se as características dos produtos gerados pela biodigestão anaeróbica, e as formas de uso dos mesmos. Com relação ao biogás, foi identificada a necessidade da purificação do metano contido no mesmo e, em função disso foi também assunto de revisão, principalmente para a explicitação do estado da arte e a fronteira do avanço tecnológico. Essas informações/conhecimentos serviram de base para realização do trabalho.

2.1. PRODUÇÃO DE SUÍNOS NO MUNDO E NO BRASIL

Segundo Strapazon (2008) a China é o maior produtor mundial de carne suína, produzindo cerca de 53 milhões de toneladas/ano. O Brasil é o único país da América Latina, incluído na lista dos 10 maiores produtores mundiais de carne suína. Segundo o mesmo autor, enquanto os países desenvolvidos têm apresentado redução no índice de produção de carne suína, o Brasil vem apresentando contínuo crescimento.

O Brasil ocupa a 4ª posição dos principais países produtores de carne suína, ficando atrás somente da China, União Européia e Estados Unidos (IBGE, 2008). De acordo com o mesmo autor o crescimento desta atividade tornou-se visível com o sistema de integração entre produtores e frigoríficos, o que exigiu a modernização dos locais de produção, alimentação controlada, ambientes higiênicos e avanços no setor de genética.

Segundo a EMBRAPA (2010) a região sul é responsável por 48,33% da produção nacional de suínos, com aproximadamente 17,3 milhões de cabeças abatidas em 2008, o

que representa 90% da exportação de carne suína brasileira e corresponde a 1% do PIB, gerando emprego e renda para mais de dois milhões de propriedades rurais.

De acordo com análises desenvolvidas pela instituição financeira Rabobank (2004), o consumo per capita de carne suína aumentou três vezes mais nos países em desenvolvimento que nos países desenvolvidos.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS DEJETOS SUINOS

Os dejetos de suínos são constituídos por urina, fezes, resíduos de ração, água desperdiçada pelos bebedouros e na higienização, poeira e outros. O esterco de suínos é composto por fezes (sólidos) (STRAPAZZON, 2008).

Segundo Angonese *et al.* (2006) a quantidade de dejetos gerado por dia pode variar de 8 a 10% da massa do animal. Conforme Tabela 1, a quantidade de dejetos de suínos varia de acordo com as fases produtivas e os volumes são relativamente elevados.

Tabela 1. Produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos.

Categoria de suínos	Esterco (Kg/animal/dia)	Esterco+urina (Kg/animal/dia)	Dejetos líquidos (água+urina) (L/animal/dia)
Suínos de 25-100 Kg	2,30	4,90	7,00
Porcas em gestação	3,60	11,00	16,00
Porcas em lactação	6,40	18,00	27,00
Machos	3,00	6,00	9,00
Leitões desmamados	0,35	0,95	1,40
Média	2,35	5,80	8,60

Fonte: Angonese *et al.*, 2006.

Segundo Chastain (2003), os dejetos de suínos possuem vários nutrientes, essenciais para o desenvolvimento das plantas, sendo os principais: o Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Zinco (Zn), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Manganês (Mn), Cobre (Cu), Cloro (Cl), Boro (B), Ferro (Fe), e Molibdênio (Mo). A quantidade de nutrientes nos dejetos varia de acordo com a alimentação dos suínos. De acordo com Silva (1996), os valores dos componentes químicos apresentam variações, as quais são representados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química dos dejetos suínos.

Variável	Mínimo	Máximo	Média
Sólidos Totais (mg.L ⁻¹)	12.697,0	49.432,0	22.399,0
Sólidos voláteis (mg.L ⁻¹)	8.429,0	39.024,0	16.388,8
Sólidos Fixos (mg.L ⁻¹)	4.268,0	10.408,0	6.010,2
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹)	220,0	850,0	428,9
Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹)	1.660,0	3.710,0	2.374,3
Fósforo Total (mg.L ⁻¹)	320,0	1.180,0	577,8
Potássio Total (mg.L ⁻¹)	260,0	1.140,0	535,7

Fonte: Silva, 1996.

Segundo Strapazzon (2008) o lodo usualmente utilizado como adubo em lavouras, deve ser constantemente monitorado para não causar contaminação do solo. Suas características físico-químicas estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3. Composição físico-química do biofertilizante utilizado como adubo.

Componentes	Concentração
pH	7,8
DQO (mg.L ⁻¹ O ₂)	25.542,9
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	12.500,0
Matéria seca (kg.m ⁻³)	44,50
Nitrogênio Total (kg.m ⁻³)	3,18
Fósforo (kg.m ⁻³)	5,40
Potássio (kg.m ⁻³)	1,38
Cálcio (kg.m ⁻³)	3,30
Magnésio (kg.m ⁻³)	1,17
Ferro (g.m ⁻³)	108,30
Manganês (g.m ⁻³)	64,70
Zinco (g.m ⁻³)	78,80
Cobre (g.m ⁻³)	69,40
Enxofre (g.m ⁻³)	580,00
Boro (g.m ⁻³)	45,60
Sódio (g.m ⁻³)	107,40

Fonte: Strapazzon, 2008.

O que define as características físico-químicas e o grau de diluição dos dejetos são os tipos de sistemas de produção utilizados em cada granja. Por isso, antes da instalação da granja, deve-se avaliar a forma de alimentação, os tipos de bebedouros que serão utilizados e o sistema de limpeza e manejo dos dejetos. Estes parâmetros definem as características e o volume de dejetos produzidos (DARTORA, *et al.*, 2008).

2.3. POTENCIAL POLUIDOR

Segundo a EMBRAPA (2010), os dejetos suínos não representavam um problema ambiental até a década de 70, porém, após esta data, com o início da suinocultura industrial, o aumento da produção de suínos propiciou o aumento na quantidade de dejetos gerados.

O sistema de produção em confinamento (nascimento, engorda e abate) na região sul do Brasil, tem apresentado resultados positivos tanto na quantidade quanto na qualidade dos suínos produzidos. Porém, este sistema representa um dos maiores potenciais poluidores e de impacto ambiental na atualidade (LOVATTO, 2005).

De acordo com Catelo (2004), os dejetos de suínos quando não tratados de forma correta, podem causar diversos problemas ambientais, entre eles a contaminação do solo, da água e do ar, além de representar uma ameaça à saúde humana.

No Brasil a partir de 1992, o advento do RIO-92, o IBAMA e as fundações ambientais estaduais, iniciaram uma fiscalização mais rígida referente à poluição da suinocultura, com isto surgiram espaços interinstitucionais para definir maneiras de reduzir a poluição e aproveitar os dejetos (LOVATTO, 2005).

2.3.1. Contaminação do solo

Os dejetos de suínos são ricos em nutrientes, principalmente nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) que são conhecidos como um ótimo condicionador do solo. No entanto, quando a quantidade destes nutrientes é aplicada em excesso no solo, causam o acúmulo destes nutrientes nos alimentos produzidos e comprometem a produtividade do solo (CROMWELL, 2001).

Dentre os nutrientes presentes nos dejetos, estão alguns metais (cobre, zinco e manganês), que são essenciais para a produtividade do solo, porém o excesso de dejetos aplicados pode causar o acúmulo destes metais no solo. De acordo com Mattias *et al.*, (2010), os metais aplicados no solo, podem ser absorvidos pelos microrganismos ou vegetais, e causar riscos à saúde humana.

2.3.2. Contaminação da água

A contaminação das águas por dejetos de suínos ocorre, principalmente, pela infiltração dos dejetos no solo, estes alcançam os lençóis freáticos, causando a contaminação das águas subterrâneas. Outra forma de contaminação ocorre pelo escoamento superficial dos dejetos, que juntamente com a água da chuva, seguem diretamente para os rios, causando a contaminação das águas superficiais (LARSEN *et al.*, 1994).

De acordo com o artigo 54 da Lei nº 9605/98, o despejo, lançamento ou disposição de excrementos de suíno “in natura” em cursos de água ou mananciais receptores, configura, em tese, o crime de poluição hídrica. Depois da implantação desta Lei, a fiscalização está exigindo a adequação dos produtores, caso contrário receberão multas e possíveis interdições das granjas (BRASIL, 1998).

2.3.3. Contaminação do ar

A contaminação do ar também é causada pela geração de gases resultantes da digestão dos dejetos, sendo percebida por meio do odor desagradável desses gases, principalmente do H₂S. O odor se torna perceptível devido à difusão de compostos voláteis, que segundo Zahn (2000) comprometem a qualidade do ar local, regional e global, além de causar mal estar aos humanos e aos animais. Os principais contaminantes do ar que estão presentes nos dejetos são o metano, o dióxido de carbono, a amônia e óxido nitroso (STRAPAZZON, 2008).

A difusão destes gases ocorre principalmente em granjas onde é utilizado o sistema de lagoas abertas (LOVATO, 2005) onde o biogás é formado e liberado para a atmosfera. A emissão do biogás causa danos às vias respiratórias do homem e dos animais, causa a formação da chuva ácida, além de contribuir para o efeito estufa.

2.4. SISTEMAS DE TRATAMENTOS DOS DEJETOS

Considerando a crescente produção de suínos, e devido ao grande volume de dejetos gerados, com alto poder de contaminação, tornou-se necessário a implantação de sistemas de tratamentos dos mesmos. Na sequência são apresentados alguns dos sistemas mais utilizados no Brasil, citando-se suas vantagens e desvantagens.

2.4.1. Compostagem

A compostagem é um tratamento bioquímico, no qual é possível se obter como produto final, biofertilizante de boa qualidade. Segundo Diesel (2002) os requisitos para uma eficiente compostagem dos resíduos orgânicos são: o tamanho das partículas, as quais devem ser de 1 a 5 cm, a relação C/N (em média de 30/1), a umidade (aproximadamente de 60%), a temperatura (de 60 a 70°C) e o pH que deve variar de 6,5 a 8,0. A decomposição da matéria orgânica ocorre pelo processo aeróbico gerando como produto final água, gás carbônico e amônia.

A vantagem desse processo é: a obtenção de um adubo orgânico de boa qualidade, a qual fornece nutrientes para as plantas e provoca a melhoria nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. As principais desvantagens são: o processo necessita de monitoramento rígido para obter um bom composto orgânico e não é possível a obtenção de outros produtos de valor agregado (LOVATO, 2008).

2.4.2. Esterqueiras convencionais

As esterqueiras convencionais são valas escavadas no solo. Algumas possuem revestimento e podem ser construídas em alvenaria, lonas de PVC, pedras, com ou sem revestimento. Estas valas recebem continuamente os dejetos produzidos em sistema de confinamento, os quais permanecem por um período de aproximadamente 4 a 6 meses, para que ocorra a digestão (diminuindo a carga orgânica dos dejetos). Podem ser

construídas em formato retangular ou circular, sendo que o circular apresenta melhor distribuição das cargas nas paredes laterais. Estes sistemas devem conter nas laterais e no fundo drenagem das águas da chuva (DIESEL, 2002). As vantagens deste sistema são a facilidade de construção e o baixo custo de implantação. Como desvantagem prevalece à necessidade de maior tempo de retenção hidráulica que nem sempre é possível de conseguir nas condições de operação nas granjas. Outro problema comum neste tipo de sistemas é a contaminação do ar (por ser uma lagoa aberta), bem como a contaminação do solo e da água, causado pela infiltração devido à ausência do revestimento (em alguns casos).

2.4.3. Biodigestores anaeróbicos

Com a crise do petróleo na década de 70, foi trazida para o Brasil a tecnologia dos biodigestores. O biodigestor é o recipiente, tanque, caixa, ou uma vala revestida e coberta por um material impermeável onde ocorre a digestão anaeróbica da matéria orgânica. O biodigestor é totalmente vedado, criando um ambiente anaeróbio (sem a presença de oxigênio) onde os micro-organismos degradam o material orgânico, transformando-o em biogás e biofertilizante.

A transformação da matéria orgânica em gás é possível pela sua digestão anaeróbia e, este processo pode ser dividido em três estágios, com três distintos grupos de microrganismos. O primeiro estágio envolve bactérias fermentativas, compreendendo microrganismos anaeróbios e facultativos. Neste estágio, materiais orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) são hidrolisados e fermentados em ácidos graxos, álcool, dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e sulfetos. As bactérias acetogênicas participam do segundo estágio, consumindo os produtos primários e produzindo hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético. Na sequência, dois grupos distintos de bactérias metanogênicas participam do terceiro estágio, o primeiro grupo reduz o dióxido de carbono a metano e o segundo descarboxiliza o ácido acético, produzindo metano e dióxido de carbono (LAUFER, 2008).

A produção do biogás possibilita a geração de energia em substituição a fontes de origem fóssil. Outras vantagens são a possibilidade da utilização do biogás como combustível para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica, além de, por meio da

queima do metano, diminuir as emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, que normalmente seriam emitidos para a atmosfera (ALVES, 2000).

Segundo Orrico *et al.* (2007) a execução do projeto, as estruturas necessárias para produzir energia do esterco e os biodigestores anaeróbios tem elevados custos, apresentando-se como uma desvantagem do sistema. Porém, dependendo dos materiais e tecnologias utilizadas, os mesmos podem viabilizar o retorno dos investimentos.

Existem vários modelos de biodigestores. Os mais conhecidos são o modelo Chinês, o Indiano e o Canadense. Este último é o mais utilizado atualmente no Brasil (ALVES, 2000). A seguir apresentam-se as características dos três modelos de biodigestores e suas correspondentes condições operacionais.

2.4.3.1. Modelo chinês

Segundo Baranceli (2007) este modelo é composto por uma câmara em formato cilíndrico construída em alvenaria e tem como teto um material impermeável e flexível destinado ao armazenamento do biogás gerado. Neste modelo, uma parte do gás gerado é liberada na atmosfera, para reduzir a pressão interna.

Para funcionar corretamente, sem causar entupimento, é necessário que o resíduo utilizado esteja com concentração de sólidos totais em torno de 8%, para facilitar a circulação do mesmo no interior do biodigestor (ORTOLANI, 1991). A Figura 1 apresenta a vista tridimensional do biodigestor modelo Chinês, possibilitando identificar os elementos que constituem este modelo.

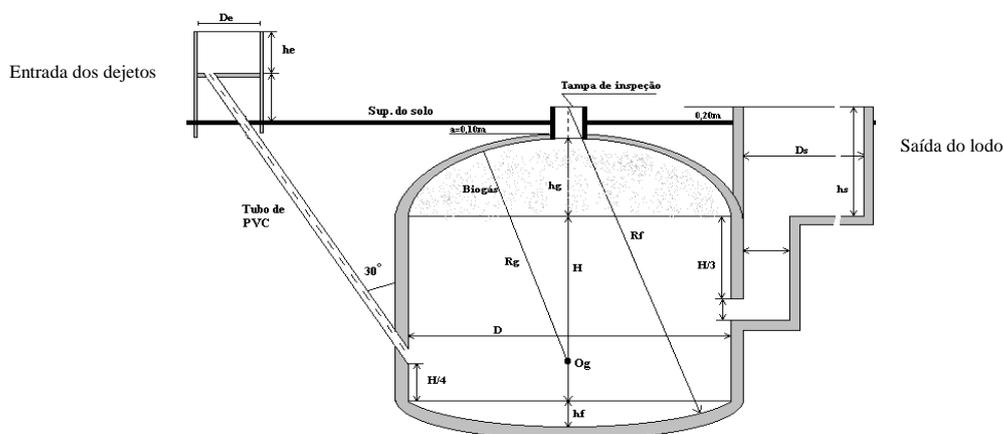


Figura 1. Biodigestor modelo Chinês.

Fonte: ORTOLANI, 1991.

A partir da Figura 1 pode-se definir cada elemento deste modelo, como sendo:

- D - Diâmetro do corpo cilíndrico;
- H - Altura do corpo cilíndrico;
- h_g - Altura da calota do gasômetro;
- h_f - Altura da calota do fundo;
- O_f - Centro da calota esférica do fundo;
- O_g - Centro da calota esférica do gasômetro;
- h_e - Altura da caixa de entrada;
- D_e - Diâmetro da caixa de entrada;
- h_s - Altura da caixa de saída;
- D_s - Diâmetro da caixa de saída;
- A - Afundamento do gasômetro;
- R_g - Raio da calota do gasômetro;
- R_f - Raio da calota do fundo.

2.4.3.2. Modelo indiano

O modelo Indiano caracteriza-se por possuir uma campânula que funciona como gasômetro. Esta campânula pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo. Este modelo possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, mantendo assim a pressão no interior deste constante (ORTOLANI, 1991).

Também possui uma parede central, a qual divide o tanque de fermentação em duas câmaras. Esta divisão tem a função de fazer todo o material circular no interior da câmara de fermentação (TURDERA, 2006). A alimentação deve ser contínua e a concentração de sólidos totais deve ser inferior a 8% (para facilitar a circulação e evitar entupimentos dos canais de entrada e saída). O modelo é de fácil construção, porém o gasômetro de metal pode encarecer o custo final (BARANCELI, 2007). A Figura 2 apresenta a vista frontal em corte do biodigestor, realçando os elementos fundamentais para sua construção e a vista tridimensional deste modelo.

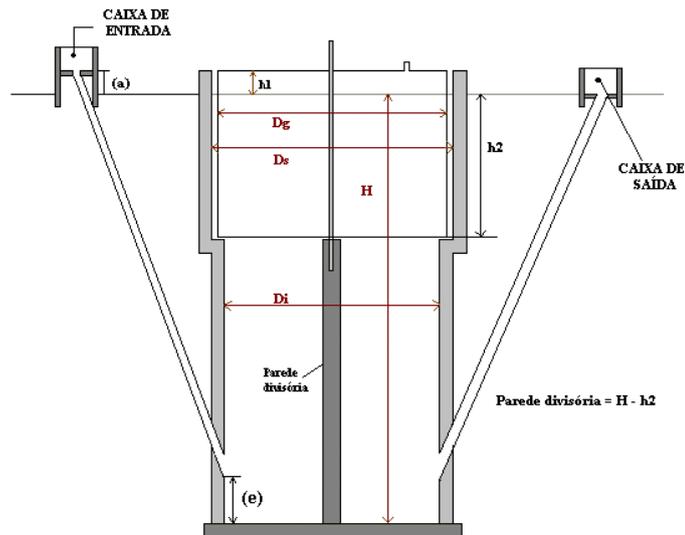


Figura 2. Biodigestor modelo Indiano.
Fonte: ORTOLANI, 1991

A partir da Figura 2 pode-se definir cada elemento deste modelo, como sendo:

- H - Altura do nível do substrato;
- D_i - Diâmetro interno do biodigestor;
- D_g - Diâmetro do gasômetro;
- D_s - Diâmetro interno da parede superior;
- h_1 - Altura ociosa (reservatório do biogás);
- h_2 - Altura útil do gasômetro;
- a - Altura da caixa de entrada;
- e - Altura de entrada do cano com o efluente.

2.4.3.3. Modelo canadense

Este modelo de biodigestor é o mais utilizado no Brasil, e tem como principal característica a facilidade de construção. O mesmo é formado por uma vala escavada no solo revestida por manta plástica e um gasômetro inflável de material flexível (lona de PVC). As bordas laterais da manta são presas ao solo, ou são dotadas de canaletas, as quais são preenchidas com água para evitar vazamento de gás. À medida que o volume de gás

produzido não é consumido, o gasômetro tende a inflar-se. A alimentação do sistema deve ser contínua (BARANCELI, 2007). A Figura 3 apresenta o modelo Canadense.

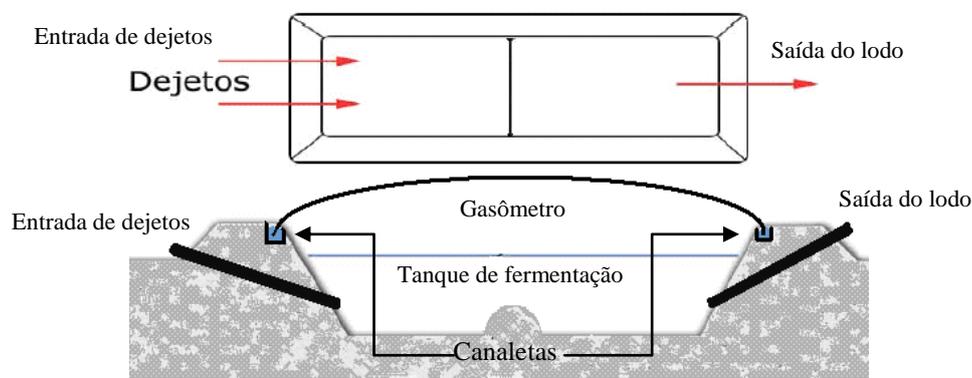


Figura 3. Biodigestor modelo Canadense.
Fonte: BARANCELI, 2007.

2.5. PRODUTOS DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA

Segundo House (2007) os biodigestores anaeróbicos geram produtos de valor agregado como o biofertilizante e o biogás, os quais possuem diversas formas de aproveitamento.

2.5.1. Biofertilizante

O biofertilizante contém elementos químicos e quando adicionados ao solo, ajudam no desenvolvimento das plantas. Muitos nutrientes estão presentes nos lodos provenientes da biodigestão e, estes mesmos nutrientes são encontrados nos fertilizantes químicos. Por este motivo esses lodos são chamados de biofertilizante atuando como ótimos condicionadores do solo. Para utilização do biofertilizante, é necessário avaliar alguns parâmetros como: as características do solo (como é formado); a planta que será cultivada na área; e a quantidade necessária de aplicação (GASPAR, 2003).

Massé *et al.* (2009) estudaram o rendimento de culturas de forragem com aplicação de dejetos de suínos “in-natura” e dejetos digeridos pela biodigestão anaeróbica. Os autores concluíram que a produção de forragem, utilizando biofertilizante digerido em biodigestor anaeróbico, teve maior rendimento que aquele que usou dejetos sem tratamento.

2.5.2. Biogás

O biogás é considerado uma valiosa fonte de energia renovável. Pode ser transformado em energia útil (calor, eletricidade, combustível, créditos de carbono) e pode contribuir para reduzir as emissões de gases colaboradores do efeito de estufa. A Tabela 4 apresenta valores de produção de biogás em m³ por kg de dejetos de várias espécies.

Tabela 4. Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais.

Espécie	m ³ de biogás/ kg de esterco
Poedeiras	0,1
Frangos de corte	0,09
Suínos	0,075
Caprinos	0,065
Bovinos de corte	0,04
Bovinos de leite	0,049
Codornas	0,049

Fonte: GUO, 2010.

O biogás é constituído, principalmente, por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), gás amônia (NH₃) e sulfeto de hidrogênio (H₂S). O único gás de valor econômico e que pode ser usado como combustível produzido em um biodigestor anaeróbio é o metano.

O metano é um gás natural inflamável, inodoro e de queima limpa. Nas condições normais de temperatura e pressão, possui poder calorífico de aproximadamente 33.980 kJ.m⁻³. O biogás, com 65% de metano, tem poder calorífico de aproximadamente 22.353 kJ.m⁻³ (SOUZA, 2008).

O biogás, por ser extremamente inflamável, pode ser simplesmente queimado para reduzir o efeito estufa ou aproveitado para uso doméstico, motores de combustão interna, sistemas de geração de energia elétrica ou térmica. A presença de vapor d' água, NH₃, CO₂ e H₂S no biogás "in natura", constitui-se no principal problema para a viabilização do seu armazenamento e do seu uso. Neste último caso podendo comprometer a vida útil dos equipamentos que utilizam o biogás como combustível (motores à combustão, geradores, bombas e compressores).

2.6. CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DO BIOGÁS

2.6.1. Metano (CH₄)

O metano é um gás incolor, não tem cheiro, cor ou sabor, é mais leve que o ar, possui baixa toxicidade, é produzido principalmente em processos de fermentação de dejetos e oferece mais risco de explosão do que danos à saúde. Porém, acima de 500.000 ppm pode ser asfixiante e a sua presença na atmosfera afeta a temperatura e o sistema climático da Terra e, desta forma, contribui para o efeito estufa (SAMPAIO, 2006).

Para o seu uso como combustível deve-se estabelecer uma relação entre o biogás e o ar. Segundo Heywood (1988), a falta de oxigênio provoca a queima incompleta, e o excesso de ar na câmara de combustão provoca a combustão completa. Entretanto, o excesso de ar diminui a temperatura na câmara de combustão e provoca a diminuição do rendimento térmico do motor.

2.6.2. Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) é um gás ligeiramente tóxico, inodoro, incolor e de sabor ácido. O CO₂ não é combustível nem alimenta a combustão. É 1,4 vezes mais pesado que o ar, e pode interagir de forma violenta com bases fortes, especialmente em altas temperaturas. O dióxido de carbono é obtido como subproduto de algumas combustões (LINDE, 2009).

Segundo o Instituto Carbono Brasil 2013, o dióxido de carbono (CO₂), é considerado um dos principais causadores do efeito estufa, sendo o gás mais emitido (aproximadamente 77%) pelas atividades humanas. Somente o Brasil emitiu em 2008, 2,1 toneladas de CO₂ per capita.

2.6.3. Gás sulfídrico (H₂S)

O H₂S é um gás incolor, mais pesado do que o ar, com odor desagradável de ovos podres. O gás sulfídrico é um gás altamente tóxico e irritante, que atua sobre o sistema

nervoso, os olhos e as vias respiratórias. A intoxicação pela substância pode ser aguda, subaguda e crônica, dependendo da concentração do gás no ar, da duração, da frequência da exposição e da suscetibilidade individual. O H₂S inibe enzimas que contêm metais essenciais como ferro (Fe) e cobre (Cu). É um gás volátil, e a principal via de penetração é a respiratória. Em concentração de 0,0005 – 0,13 ppm durante 1 minuto é possível a percepção do odor e com concentração de 1800 – 3700 ppm, durante instantes o gás é fatal (CAMPOS, 2003).

2.6.4. Amônia (NH₃)

A amônia, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, é um gás tóxico, inflamável, incolor, com odor muito irritante, corrosivo na presença de umidade e altamente solúvel em água. A amônia age principalmente no sistema respiratório, exercendo uma ação corrosiva e causando grande irritação. Sua inalação causa tosse, dificuldades respiratórias, inflamação aguda do sistema respiratório, edema pulmonar, formação de catarro, secreção de saliva e retenção de urina. Sua presença no ar causa irritação nos olhos imediatamente (GAMA GASES, 2005).

2.7. FORMAS DE USO DO BIOGÁS

As principais possibilidades de aproveitamento do biogás são: Energia elétrica, combustível e créditos de carbono, conforme detalhamento.

2.7.1. Energia elétrica

O biogás pode ser transformado em energia elétrica, pois a energia química contida em suas moléculas, por meio da combustão num motor, pode ser convertida em energia

mecânica e esta, por sua vez, ativa um gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Estão disponíveis no mercado alguns modelos de motores e microturbinas para a geração de energia elétrica a partir do biogás. Na microturbina representada na Figura 4, o ar é aspirado para dentro da turbina com alta velocidade, pressão e temperatura. O ar é misturado ao combustível e queimado na câmara de combustão onde a queima é controlada e obtida sua máxima eficiência (PECORA, 2006).

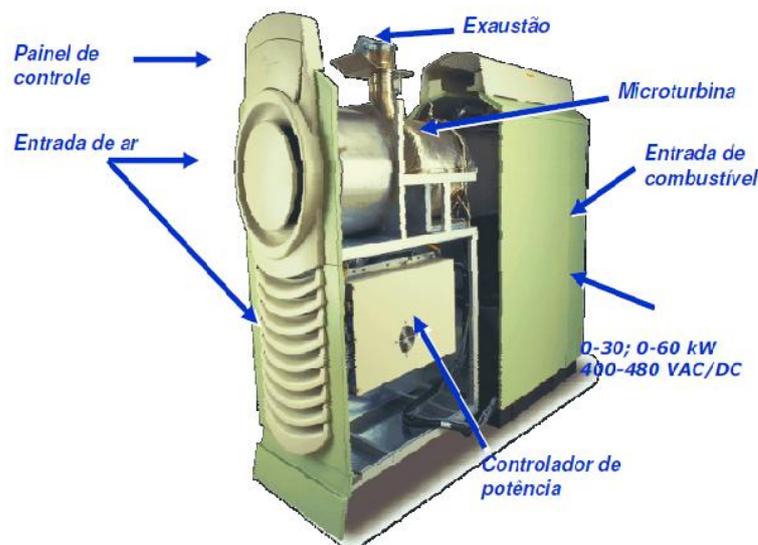


Figura 4. Microturbina e seus componentes.

Fonte: PECORA, 2006.

Outro modelo utilizado é o motor de ciclo Otto, utilizado para geração de energia elétrica, através do acoplamento de um gerador ao motor (Figura 5). No ciclo Otto, a válvula de entrada de ar abre no tempo preciso para permitir a entrada de ar (misturado ao combustível) no cilindro. A vela dá a ignição da mistura no cilindro, o que cria a explosão. A força da explosão é transferida ao pistão, o pistão desce e sobe em um movimento periódico. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão (PECORA, 2006). O funcionamento do motor de ciclo Otto está representado na Figura 6.

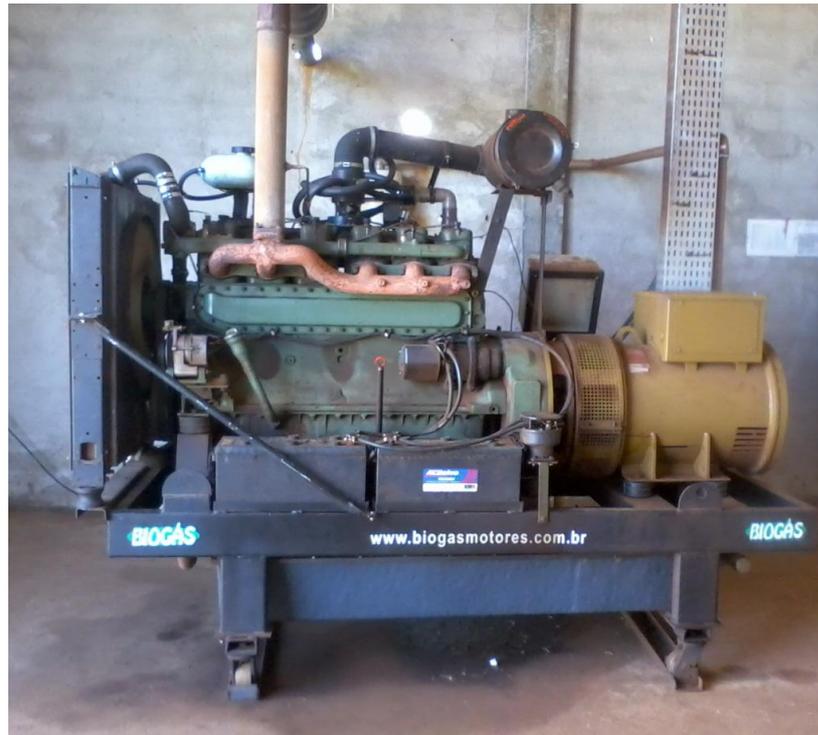


Figura 5. Motor de ciclo Otto com gerador.

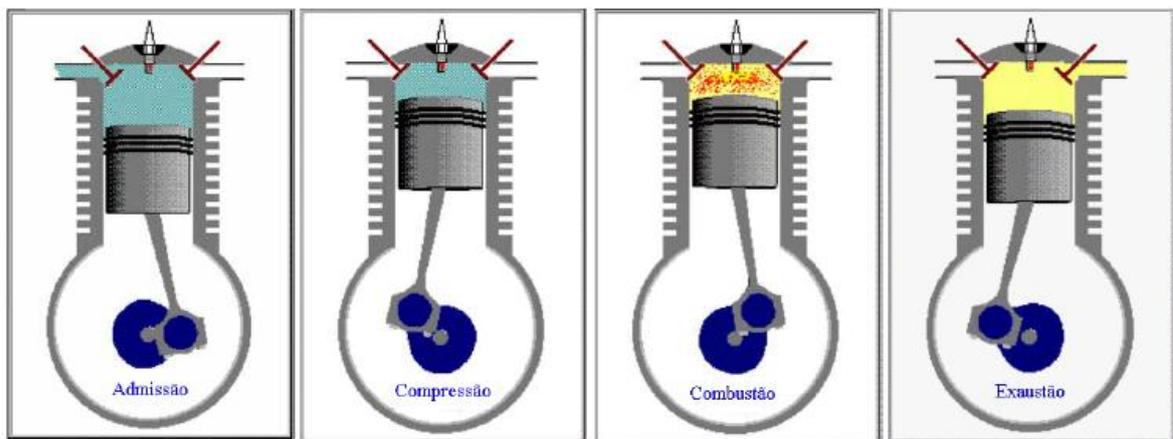


Figura 6. Funcionamento do motor de ciclo Otto.

Fonte: PECORA, 2006.

Segundo Kossmann *et al* (1999), os tipos de motores que tem boa operação com o biogás são os motores diesel convertidos e os motores de ignição por centelhas convertidos. O motor quatro tempos diesel convertido admite ar e o comprime a uma taxa de 17:1 sob uma pressão de aproximadamente 30-40 bar (3-4 MPa) e a uma temperatura de cerca de 700°C, que provoca a ignição da carga de combustível injetada. A potência é

controlada variando-se a quantidade de combustível injetado, sendo que a entrada de ar permanece constante, (controle de mistura).

O motor quatro tempos de ignição por centelha convertido, admite a mistura de combustível (biogás) e comburente (ar). A carga entra em combustão pela ação de uma faísca de vela a uma taxa de compressão relativamente baixa entre 8:1 e 12:1. O controle da potência é efetuado pela variação do volume de mistura de entrada (chamado de controle de carga).

2.7.2. Combustível

Segundo Landahl (2003) em alguns países como a Suécia, França, Suíça, Islândia e Itália, a utilização do biogás como combustível veicular é uma realidade desde a década de 90. Atualmente destaca-se a Suécia como a líder mundial de veículos movidos a biogás, cerca de 1500 veículos e 22 estações de abastecimento de biogás, a Suíça está em segundo lugar com aproximadamente 600 veículos rodando com uma mistura de biogás e gás natural.

2.7.3. Créditos de carbono

Segundo Humbad (2009), crédito de carbono é um regime de autorização negociável. Este sistema surgiu através do Protocolo de Quioto, assinado no Japão em 2007, e estabelece uma meta de redução de emissão de gases do efeito estufa para os países desenvolvidos.

O mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) permite o desenvolvimento de projetos localizados em países em desenvolvimento que resultem em reduções de emissão (SCHMID, 2010).

O biogás é um importante colaborador do MDL, pois diminui a emissão de metano e dióxido de carbono. Porém, para a implantação do sistema para venda dos créditos de carbono é necessário um grande investimento, limitando o acesso a este sistema.

2.8. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é uma atraente fonte de energia devido ao seu elevado conteúdo de metano. No entanto, a presença de H_2S , NH_3 , CO_2 e do vapor de água reduzem consideravelmente o poder calorífico do biogás. A remoção destes e outros elementos são imprescindíveis para a viabilidade de seu uso como combustível em longo prazo (DUPONT, 2006).

A presença do H_2S torna o biogás altamente corrosivo, comprometendo a vida útil dos dispositivos eletromecânicos utilizados para o aproveitamento energético. De acordo com a FAO (2012) o gás sulfídrico corrói diversas partes do motor, como a câmara de combustão (bucha da biela), sistema de escape e vários rolamentos. A corrosão se intensifica por partidas frequentes, curtos tempos de funcionamento e em temperaturas baixas. O sistema de arrefecimento à água também possibilita a corrosão, pois o gás sulfídrico em contato com água forma o ácido sulfúrico.

A utilização direta do biogás como combustível sem remoção do H_2S leva para a formação de dióxido de enxofre (SO_2), que é um poluente tóxico e grande colaborador das chuvas ácidas na atmosfera (HORIKAWA, 2004). A chuva ácida causa a corrosão de veículos, compromete as estruturas dos edifícios e casas, entre outros.

A purificação tem por objetivo eliminar ou reduzir a concentração destes compostos indesejáveis e conseqüentemente aumentar o teor de metano no biogás, aumentando assim o poder calorífico do mesmo e melhorando seu desempenho energético.

Segundo Zhao *et al.* (2010), a purificação do biogás possibilita seu uso em diversos sistemas, como combustível para a geração de calor e eletricidade. Os autores ressaltam que o biogás purificado proporciona reduções de emissões de gases colaboradores do efeito estufa, e quando utilizado como combustível veicular emite menos nitrogênio, hidrocarbonetos, óxido e monóxido de carbono do que outros combustíveis como a gasolina ou diesel.

Bajracharya *et al.* (2001) apresentou os principais problemas encontrados na comercialização do biogás, como sendo: baixo conteúdo energético por unidade de volume; dificuldade de se liquefazer; a quantidade de produção não é constante em um mesmo local e; a comercialização é limitada por não ser portátil. Para ampliar sua

comercialização é necessário aumentar o potencial calorífico do biogás, por meio da remoção de componentes não combustíveis como o CO₂. Também é necessária a remoção dos componentes corrosivos (H₂S e NH₃), para possibilitar o envase e transporte do mesmo.

2.8.1. Métodos de purificação/separação do metano contido no biogás

Várias são as tecnologias disponíveis para a purificação do metano contido no biogás. De acordo com Zhao (2010), os métodos mais utilizados são: lavagem do biogás/absorção, adsorção com pressão e separação por membrana. A eficiência destes processos depende do componente que deseja ser removido, e da afinidade do material utilizado para a remoção deste.

2.8.1.1. Lavagem do biogás/Absorção

Segundo Frare (2009) o princípio da absorção baseia-se na transferência de um componente de uma mistura gasosa para um líquido absorvente, trata-se de fazer o gás passar ou ter contato com um líquido no qual seja solúvel. Geralmente, em um processo de absorção ocorre uma reação química entre o gás absorvido e o solvente. Atualmente, existem alternativas de absorção química estabelecidas na forma de processos industriais capazes de separar o H₂S de uma corrente gasosa pelo uso de metais quelatos.

A lavagem do biogás é utilizada para remover CO₂ e H₂S, uma vez que estes gases são mais solúveis em água do que o metano. Neste sistema o processo de absorção é puramente físico. Geralmente, o biogás é pressurizado e alimentado pelo fundo de uma coluna empacotada, e a água é injetada em contracorrente (RASI, 2009).

Este tipo de lavagem pode ser usado para a remoção parcial de H₂S, pois este é mais solúvel do que o dióxido de carbono em água. A água saturada com H₂S que sai da coluna pode ser regenerada e utilizada novamente na coluna de absorção.

Para remoção simultânea de CO₂ e H₂S, utiliza-se uma solução que apresente afinidade com os dois compostos. Outra maneira é realizar a absorção em série (duas ou mais colunas), onde a primeira coluna absorve H₂S e a segunda CO₂.

2.8.1.2. Adsorção em alta pressão

A adsorção em alta pressão (AAP) é uma tecnologia usada para separar algumas espécies de gases, a partir de uma mistura de gases sob pressão de acordo com as características moleculares e afinidade com o material adsorvente. De acordo com Cavenati, 2005, o adsorvente pode desenvolver seletividade com um ou mais gases a ser separado. A diferença relacionada com a seletividade pode depender de uma diferença no equilíbrio da adsorção ou da diferença de difusividades, ou seja, uma seletividade cinética. Geralmente utiliza-se uma coluna (recheada com material compatível) para cada componente a ser removido. A temperatura de operação é baixa (próxima à temperatura ambiente). Os materiais adsorventes mais utilizados nestes sistemas são as zeólitas e o carvão ativado.

O processo AAP baseia-se no fato de que, sob pressão, os gases tendem a ser atraídos para as superfícies sólidas, ou adsorvidos. Quanto maior for a pressão, maior a quantidade de gás adsorvido (CAVENATI, 2005).

2.8.1.3. Separação por membrana

O princípio de separação por membrana é que alguns componentes do gás bruto são transportados através de uma fina membrana, enquanto outros são retidos. A permeabilidade é uma função direta da solubilidade química do componente de destino na membrana, assim como o tamanho, a seletividade, o formato, o tempo de duração e a morfologia da própria membrana. O tipo de membrana a ser utilizada depende do tipo de produto que se quer recuperar e da qualidade que se quer obter (VIJAY *et al.*, 2004).

2.8.2. Evolução das tecnologias nacionais para purificação do metano contido no biogás

No Brasil, existem diversos produtos cadastrados no banco de patentes (INPI), os quais se apresentam como alternativa para a purificação do metano contido no biogás.

Estas tecnologias apresentam-se como alternativa para ampliar o uso do biogás. Alguns modelos são apresentados a seguir visando explicitar a evolução dessas tecnologias.

Brito (1983), desenvolveu o equipamento intitulado de “Aperfeiçoamento no processo e equipamento de obtenção de metano puro a partir de biogás ou gás natural com alta concentração de dióxido de carbono”, o qual gerou o pedido de patente PI: 8302548. Este equipamento é uma das primeiras invenções deste segmento, e é constituído de pré-filtros de óxido de ferro (para remoção do H_2S), um equipamento de purificação de gases com regeneração por decréscimo de pressão chamado de PSA (Pressure Swing Adsorption). O equipamento pode ser montado com dois ou mais leitos com carvão ativado, para permitir a contínua operação. O fluxo gasoso deixa o equipamento com 99,9% de metano (CH_4), já isento de umidade. O processo é totalmente automatizado, apresentando baixa perda de CH_4 , é compacto e apresenta baixos custos de manutenção, pois o carvão ativado opera em temperatura ambiente. O consumo energético é baixo, pois a energia elétrica é utilizada apenas na compressão. A invenção apresenta-se como alternativa econômica, contudo se torna inviável diante da rápida saturação do filtro de óxido de ferro, sendo necessária uma substituição do mesmo em um pequeno espaço de tempo.

Mercando (1985), desenvolveu um “Sistema para beneficiamento do biogás e processo para lavagem, separação e o aproveitamento do gás metano nele contido”, gerando a patente PI: 8400579, publicada em 29/01/1985. Esta invenção é composta por torre de lavagem do biogás que é constituída por um cilindro metálico ou de outro material adequado, uma torre de liberação do CO_2 , também constituída de um cilindro metálico ou de outro material adequado com montagem vertical semelhante à torre de lavagem, um trocador de calor que permite a redução da temperatura do gás circulante e purgadores que permitem a retirada da água periodicamente. A torre de lavagem do biogás possui em seu interior divisões horizontais perfuradas e regularmente espaçadas entre si, que tem a finalidade de servir de sustentação aos conjuntos de “rashings” (anéis cilíndricos de pequeno diâmetro ou de outra forma geométrica) destinados a auxiliar e facilitar o fenômeno de adsorção do CO_2 com água de circulação permitindo a retenção e arraste de CO_2 , contido no biogás. A torre de liberação do CO_2 é semelhante à torre de lavagem. O trocador de calor permite a redução da temperatura do gás circulante. Purgadores estrategicamente instalados permitem a retirada da água (condensada) periodicamente, manualmente ou automaticamente. Esta invenção necessita de uma grande área para a

instalação do equipamento, custo elevado e manutenção a cada 15 dias, também necessita de outras fontes de energia para o funcionamento do trocador de calor. Apresenta-se eficiente por não utilizar produtos químicos no sistema e pode ser monitorado por pessoas apenas com conhecimento básico, porém o custo de implantação e manutenção é elevado.

Curioni (1987) desenvolveu o "Processo de purificação de biogás e correspondente equipamento" (Patente PI: 8503745), semelhante à invenção anterior este equipamento é constituído de duas colunas de aço hermeticamente fechadas e de um conjunto de válvulas atuando automaticamente. Cada coluna é preenchida com um produto quimicamente inerte (alumino-silicatos) de formato granulado, caracterizado por possuir elevada superfície específica, que funcionam como uma peneira molecular, captando na passagem do gás, as moléculas de água e CO₂, e deixando passar as moléculas de metano de tamanho menor.

Esta invenção apresenta custo elevado de implantação, pois são 4 torres de aço, uma para lavagem do gás, outra para dessorção do CO₂, e outras duas para retirada da umidade e gás sulfídrico respectivamente, difere-se da anterior por utilizar produtos químicos e necessitar de profissional capacitado para o monitoramento e manutenção do equipamento. A instalação necessita de grande área e altos investimentos iniciais, e de manutenção.

Ortigão *et al.* (1996) desenvolveram o "Sistema de dessulfurização de biogás", cadastrado como PI: 9601138-6 A. Esta invenção propõe um sistema de dessulfurização de biogás que eliminará a presença do gás sulfídrico (H₂S), o sistema é formado por gasômetros, tubulações, ventilador, câmara de reação/pré-lavagem, provida internamente de bico nebulizador, lavador de torre, bombas de pressão, tanque de operação e tanque de armazenamento. Na sequencia os gases são aspirados por um ventilador, ingressando na câmara de reação/pré-lavagem, provida internamente de um bico nebulizador onde é feita a aspersão por intermédio do hidróxido de sódio (NaOH) no sistema. Na sequência, os gases são conduzidos a um lavador de torre onde ocorre a absorção do gás sulfídrico (H₂S) remanescente, com a própria solução que recircula é injetado na corrente de gás através de árvores de aspersão posicionada uma na câmara de reação e pré-lavagem e outra no lavador de torre, promovendo dessa forma um perfeito contato entre a solução e os gases. As bombas são responsáveis pela recirculação da solução, alimentando a câmara de reação/pré-lavagem e o lavador de torre, e também pelo esvaziamento do tanque de operação para o tanque de armazenamento.

O sistema baseia-se no princípio da reação de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) na faixa de concentração de 5% a 20%, com gás sulfídrico. O controle do teor de enxofre (S) que sai da tubulação é realizado através de um sensor, posicionado anteriormente aos queimadores, definindo o grau de saturação do tanque que está sendo utilizado, determinando qual dos tanques deve ser utilizado. Após atingir uma faixa de densidade de 1,02 a 1,21 (a temperatura ambiente), a solução de sulfeto de sódio (Na₂S) é descarregada continuamente do lavador de torre e enviada ao tanque de armazenamento.

O presente sistema segue o mesmo princípio dos sistemas anteriores, portanto utiliza equipamentos automatizados para separação da solução saturada, tornando o sistema mais eficiente, contudo necessita de outra fonte de energia para funcionamento do sensor e ventilador, também utiliza reações químicas que devem ser acompanhadas por profissional da área, seu custo de instalação e manutenção é elevado.

Filho (2005) desenvolveu uma “Unidade de limpeza de gás metano proveniente do biogás de aterros sanitários, de estações de tratamento de esgoto sanitário e biodigestores, através de processo de coleta, retenção de poluentes por meio de filtragens, torre de lavagem, com finalidade de aproveitamento energético” com pedido de patente (PI 0400658-5 A). A unidade de limpeza de gás metano é composta por rede coletora do gás, tanque pulmão, pressurizador, torre de lavagem, torre de aeração, bomba centrífuga, caixa de recebimento, torre de resfriamento e pHmetro. Esta unidade consiste em captar o biogás e direcioná-lo através de rede coletora ao tanque pulmão, que por pressurização o conduz ao retentor de H₂S. Em seguida o gás é impelido a uma torre de lavagem, onde se dá a retenção do dióxido de carbono e de outros gases. A água utilizada, na torre de lavagem, passa por um processo de degaseificação através de uma torre de aeração, equipada com bombas centrífugas, caixa de recebimento, torre de resfriamento e pHmetro.

Ao sair da torre de lavagem, o gás metano é direcionado por um processo de exaustão ao tanque pulmão com a finalidade de equalizar sua vazão na entrada do compressor, que irá comprimí-lo e que através de pressão controlada, o fará passar pelo sistema de fluxo e contra-fluxo onde o gás perde água para ser acondicionado no gasômetro e ser envasado.

Neste sistema, semelhante aos anteriores, utiliza torres de lavagem, o qual necessita de um espaço grande para instalação, diferencia-se por utilizar apenas processos físicos, também obtém uma torre de aeração onde a água passa por um processo de degaseificação

e é reutilizado no sistema, o sistema necessita de outras fontes de energia para poder operar. O custo de implantação e de manutenção é elevado.

Curioni (2007) propôs um novo modelo intitulado “processo de depuração de biogás e correspondente equipamento utilizado para depuração de biogás” gerando a patente nº PI: 0504929-6 A. O presente equipamento é constituído por um filtro e torre de lavagem, turbina hidráulica, tanque de armazenamento, soprador e torre de secagem. Tem por objetivo proporcionar um sistema de depuração e concentração de biogás, para obtenção de gás apto a ser utilizado para fins automotivos ou outros onde se requeira elevada pureza do gás, e ao mesmo tempo assegurar dispersão nula de poluentes na atmosfera.

O sistema divide-se em quatro partes:

1ª parte: Beneficiamento preliminar obtido por filtração para eliminação de poluentes, e por lavagem em contra-corrente com água para eliminação do gás sulfídrico;

2ª parte: Na despressurização da água de lavagem que deixa a coluna de lavagem sob pressão, é recuperada a energia mediante uma turbina hidráulica;

3ª parte: Na despressurização que acontece na turbina hidráulica, a água e os gases que se desprendem dela, são recolhidos em um ambiente confinado, mantido sob leve depressão mediante um soprador que aspira o dióxido de carbono (CO_2) e o gás sulfídrico (H_2S) que se desprendem da água pela diminuição da pressão e fazendo-os borbulhar numa solução de leite de cal (óxido de cálcio) que reagem com o CO_2 e o H_2S , formando respectivamente carbonato de cálcio (CaCO_3) e sulfato de cálcio (CaSO_4); e

4ª parte: Concentração em metano e contemporânea secagem a baixo conteúdo de umidade obtendo-se gás metano com pureza acima de 99% e perfeitamente seco. Este sistema utiliza equipamentos grandes que necessitam de grande área para sua instalação, utiliza outras fontes de energia para funcionamento do pressurizador e do soprador e produtos químicos que requerem preparação e monitoramento por profissionais preparados para este fim, tornando-se inviável.

Rodrigues (2008) inventou o “Processo e equipamento para filtragem do biogás”, sendo registrado com o nº PI: 0804787- A2. O equipamento é constituído por uma câmara de combustão, e longitudinalmente, em torno da parede externa da câmara de combustão, há uma câmara de filtragem por onde circula o biogás. A câmara de combustão transfere o calor à câmara de filtragem através das suas paredes, que por sua vez aquece o biogás que

circula pelo interior da câmara de filtração. A câmara de filtração possui entrada do biogás pela região inferior da câmara e saída do biogás pela região superior da câmara. Possui um reservatório localizado na região inferior da câmara para o armazenamento de produtos em excesso da reação do gás sulfídrico no interior da câmara de filtração do equipamento.

O processo então se caracteriza em fazer passar o biogás por uma câmara de filtração, constituída em chapa de aço; o biogás ao passar pela câmara de filtração com vazão e temperatura controlada, possibilita que o seu componente, o gás sulfídrico reaja principalmente com o O_2 e também com o ferro da superfície interna da câmara de filtração, formando compostos como H_2SO_4 , SO_2 , FeS . O biogás isento de gás sulfídrico, é encaminhado para os queimadores de máquinas térmicas.

Este sistema é mais compacto que os modelos anteriores, porém requer elevado investimento inicial e é necessário manter a temperatura em torno de 200 a 300°C, a qual utiliza energia de outras fontes, é necessário trocar a câmara de filtração, pois as paredes da mesma se oxidam, necessita de produtos químicos, por isso requer um profissional capacitado para o monitoramento, aumentando o custo do sistema.

Calles (2009) desenvolveu um novo equipamento intitulado de “Filtro para retenção de gás sulfídrico e retirada de umidade de biogás”, o qual gerou a patente nº PI: 0703011-8 A2. Nesta invenção o filtro é constituído por um vaso inoxidável preenchido por zeólitas ou crespinas que podem ser naturais ou sintéticos. No sistema está incluída resistência interna para recuperação do agente filtrante.

O biogás é forçado a passar de baixo para cima e os gases indesejáveis são retidos pelas zeólitas ou crespinas, deixando o biogás livre dos agentes corrosivos. Os agentes corrosivos podem ser retirados através de uma purga colocado na parte inferior e, de tempos em tempos, pode-se lavar os elementos filtrantes através da injeção de água por cima, e por aquecimento de resistências internas a 180°C, uma vez que as crespinas têm uma resistência ao calor de 180 a 200°C, tornando-o novamente apto para o trabalho de filtração. A regeneração pode também ser feita por uso de ácido clorídrico. As zeólitas devem ter granulometria de 0.3 a 1.0 mm e tem uma vida útil de 5 a 6 anos.

Este sistema de filtração difere de todos os citados anteriormente, apresenta-se como um investimento inicial alto, por ser feito de aço inoxidável e o recheio composto de zeólitas e crespinas que são de custo elevado. O tanque necessita de resistências, pois quando os elementos filtrantes estiverem saturados, é necessário realizar a lavagem dos

mesmos, os quais requerem temperaturas elevadas, de 180°C a 200°C, necessitando de energia externa, e o uso de ácido clorídrico que deve ser manipulado por profissional capacitado. A troca do agente filtrante pode ser feita a cada 5 anos, porém a lavagem e ativação depende do fluxo e qualidade do gás, representando um investimento inicial e de manutenção inapropriados ao suinocultor.

Costa e Andrade (2009) desenvolveram um modelo totalmente diferente dos outros citados anteriormente, o modelo é intitulado de “Produção e purificação de biogás utilizando biomassa de microalgas e/ou cianobactérias”, gerou a patente nº PI: 0703245-5 A2. O processo consiste na produção de microalgas e/ou cianobactérias em biorreatores abertos ou fechados, operando com temperatura variando de 10 a 60°C, com ou sem a adição de nutrientes orgânicos onde CO₂ gasoso pode ser suprido da atmosfera, de gases de combustão ou de biogás, a biomassa de microalgas e/ou cianobactérias produzida pode passar por uma etapa de pré-tratamento operacional como correção do pH, hidrólise, remoção de água por filtração, prensagem ou centrifugação, antes de ser conduzida a um ou mais biorreatores anaeróbios dispostos em série ou paralelo, onde é produzido biogás bruto através da digestão anaeróbia da biomassa de microalgas e/ou cianobactérias.

O biogás bruto produzido é injetado em um cultivo de microalgas e/ou cianobactérias que pode ser o mesmo anteriormente descrito, ou em outro biorreator fechado ou aberto, onde é originada biomassa de microalgas e/ou cianobactérias e biogás purificado. A utilização de reatores abertos para o cultivo de microalgas traz a vantagem de menores custos de instalação e operação comparados aos reatores fechados. A utilização de biorreatores fechados para o cultivo de microalgas alimentícias traz as vantagens de fácil coleta do gás purificado no topo do reator e a proteção de contaminantes externos, apresentando também a vantagem de facilidade de controle de temperatura.

As microalgas e/ou cianobactérias com potencial para a produção e purificação de biogás através da digestão anaeróbica de sua biomassa incluem: *Spirulina sp*, *Skeletonema sp*, *Chaetoceros sp*, *Scenedesmus sp*, *Anacystis sp*, *Chlorella sp*, bem como outros gêneros e espécies de microalgas e/ou cianobactérias. O biogás purificado é considerado o biogás que após a passagem pelo cultivo de microalgas e/ou cianobactérias tem seu conteúdo de CH₄ aumentado devido à remoção de qualquer outro gás contaminante. O biogás purificado pode conter teor de CH₄ variando entre 10,1 e 100%.

Camilotti *et al.* (2010) desenvolveram o “Processo e equipamento para separação e depuração do biogás”, o qual gerou a patente nº PI: 0804416-3 A2. Esta invenção é dotada

de três fases consecutivas, sendo: Separação e filtração do biogás, purificação do gás obtido e compressão do gás purificado. Os componentes utilizados são: tubulação para transporte do biogás, turbina de fluxo, filtros coalescentes, secador por refrigeração, filtro secador, filtro de carvão ativado e compressor de alta pressão.

Na primeira fase ocorre a captação do biogás, que é transportado por meio de uma tubulação até um dessulfurizador para a retirada do gás sulfídrico. Com o auxílio de uma turbina de fluxo faz-se a alimentação do biogás em uma tubulação de sucção de água de uma bomba que através de uma tubulação faz o recalque em um depurador. Nos depuradores dá-se a lavagem do biogás, que entra por sua porção inferior em contra-fluxo fazendo a sua lavagem.

Na segunda fase o gás proveniente da primeira fase do processo, é filtrado em filtros coalescentes, onde se retira a umidade. O gás segue para ser secado e resfriado em um secador por refrigeração, para seguir em direção aos filtros coalescentes onde sofre nova filtração e retirada da umidade. Antes de ser envasado em um reservatório, o gás passa por uma etapa de secagem por adsorção em um filtro secador e tem seu odor retirado em filtros de carvão ativado.

A compressão do gás purificado é feita por meio de um compressor de alta pressão, o gás é resfriado por meio de uma câmara fria, de forma a facilitar seu embalse em cilindros, para ser utilizado como combustível de veículos.

Este equipamento inicialmente trabalha a baixa pressão, tornando o processo mais econômico, o secador por refrigeração necessita de energia de outras fontes, o último filtro de carvão ativado deve ser recuperado periodicamente. Após a purificação, o gás segue por meio de uma tubulação que está embutida em câmara fria e após é envasado em cilindros em alta pressão. Apesar de ser uma boa proposta, possui elevado valor de implantação e manutenção.

Contudo, estas tecnologias apresentam diversas limitações, necessitando o estudo de novas tecnologias e processos com o intuito de eliminar os problemas encontrados nos sistemas convencionais (regeneração dos adsorventes, altas pressões no fluxo do biogás e necessidade de grandes áreas para implantação), e incluir os mesmos no mercado, na forma de tecnologia alternativa e financeiramente viável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia contemplou a execução de sete etapas: Etapa 1, caracterização da fonte geradora de resíduos; Etapa 2, caracterização da fonte geradora de biogás; Etapa 3, caracterização qualitativa e quantitativa do biogás; Etapa 4, análise de métodos/processos/tecnologias convencionais utilizadas para tratamento do biogás; Etapa 5, desenvolvimento/proposição da tecnologia alternativa; Etapa 6, testes operacionais da tecnologia alternativa; e Etapa 7, análise do desempenho da tecnologia alternativa. A seguir apresenta-se o detalhamento da metodologia inerente a cada uma das etapas:

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE RESÍDUOS

Inicialmente realizou-se uma pesquisa, juntamente com a empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, para identificar as granjas de suínos ou bovinos localizadas no município de Toledo – PR, ou em municípios próximos, que possuíam biodigestor anaeróbico em funcionamento, juntamente com sistema de aproveitamento de biogás. Após identificação das granjas, entrou-se em contato com os proprietários para solicitar autorização para a realização dos experimentos.

Duas granjas disponibilizaram o espaço para instalação da tecnologia proposta e para a realização dos testes necessários. Sendo uma granja de gado leiteiro, localizada no município de Céu Azul-PR e a outra, granja de suínos localizada no município de Toledo-PR.

Optou-se primeiramente pela granja de bovinos, por oferecer estrutura física, e acesso ao biodigestor e ao motor, além de alimentação e alojamento a qualquer dia e horário. No início dos experimentos verificou-se que o biodigestor não estava produzindo biogás. Verificou-se que estava sendo encaminhada para o biodigestor uma solução de sulfato de cobre, utilizada na lavagem das patas das vacas (pé de luva) antes da entrada na sala de ordenha, a qual inibiu o desenvolvimento das bactérias geradoras de biogás.

Após a identificação do motivo pelo qual não estava sendo produzido biogás, a solução de sulfato de cobre passou a ser enviada a outro tanque de armazenamento e

tratada separadamente. Porém, para o biodigestor voltar a produzir biogás, foi necessária sua abertura e retirada de todo o lodo contaminado. Este procedimento demorou em média três meses, fazendo-se necessário a mudança de local para a realização dos experimentos. Com isto, transferiram-se os equipamentos para a granja de suínos localizada no município de Toledo – PR, onde todos os experimentos foram realizados.

Para a caracterização da fonte geradora de dejetos, coletou-se informação referente à quantidade de suínos (matrizes) presentes na granja, quantas vezes reproduzem por ano, a quantidade de leitões que nascem em cada procriação e com quantos dias os leitões são desmamados e vendidos.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE BIOGÁS

Nesta etapa foi caracterizado o biodigestor anaeróbico, local onde ocorre degradação da matéria orgânica e produção de biogás. O processo de caracterização consistiu na análise e coleta de informações inerentes a dimensões, tipos de materiais utilizados na sua construção, características operacionais, capacidade de processamento/produção e avaliação qualitativa e quantitativa do potencial de geração de dejetos de suínos e biogás.

3.3. CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS

A caracterização do biogás foi realizada por meio de análises da composição do mesmo. As amostras de biogás foram coletadas em dois locais: na saída do biodigestor (biogás “in-natura”); e na entrada do motor (biogás purificado). Na coleta utilizou-se uma bomba de sucção, por meio da qual foi aspirado o biogás do biodigestor e armazenado em um amostrador flexível, construído em PEAD (polietileno de alta densidade), o qual possui válvulas para controle de entrada e saída de biogás.

As amostras foram analisadas em equipamento portátil desenvolvido pela Embrapa e Alfa kit[®] e, para padronização dos resultados, foram realizadas análises da concentração de CH₄ e CO₂ em cromatógrafo gasoso. Para a padronização da concentração de H₂S

foram realizadas análises em espectrofotômetro molecular (Shimadzu UV-1601 PC), utilizando para tal os métodos descritos a seguir:

3.3.1. Análises realizadas no campo

As análises no campo foram realizadas por meio de um kit portátil KBA0137 desenvolvido pela Embrapa e alfa kit[®]. Este mesmo método foi utilizado por CATAPAN et al, 2011 e Zilotti, 2012. As análises tiveram como base o método colorimétrico para quantificação da amônia (NH₃) e gás sulfídrico (H₂S). Sendo a determinação da amônia pelo método “azul de indofenol” e a determinação do gás sulfídrico pelo método “azul de metileno” seguido de leitura em fotocolorímetro. Para a determinação de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) foi utilizado o método de Orsat, realizado em um analisador por diferença de volume, seguido de análise em cromatografia gasosa.

3.1.1.1. Determinação de amônia (NH₃) no biogás

Para se obter a concentração de amônia presente na amostra de biogás, transferiu-se 10 mL de água destilada para cubeta plástica, adicionou-se 2 gotas de solução pré-tratamento 1 (parte do kit) e agitou-se até completa homogeneização. Com a seringa identificada para a solução pré-tratamento 1, transferiu-se 5 mL da solução preparada para um tubo de ensaio e separou-se como prova em branco. Transferiu-se 5 mL da mesma solução para a seringa identificada para coleta de amônia, na sequência conectou-se a seringa no saco coletor de biogás e aspirou-se o biogás até atingir 50 mL na seringa. Agitou-se a seringa contendo o biogás e a solução preparada durante 2 minutos para que toda a amônia fosse absorvida pela solução, transferiu-se a solução para um tubo de ensaio.

Para análise colorimétrica, adicionou-se 3 gotas de reagente amônia Indotest 1 no tubo de ensaio que continha a amostra e também no tubo com a prova em branco, os quais foram agitados. Na sequência foram adicionadas 3 gotas do reagente amônia Indotest 2 em ambos os tubos de ensaio e agitou-se, e por último adicionou-se 3 gotas do reagente Indotest 3 na amostra e na prova em branco. Deixou-se reagir por 10 minutos.

Ligou-se o fotocolorímetro. Selecionou-se a curva de amônia, e realizou-se a calibração do equipamento, na sequência fez-se a leitura da amostra. O resultado refere-se

à concentração de amônia em ppmV que corresponde a (mL.m^{-3}). Existem duas curvas para leitura de amônia, a faixa 50 (utilizando-se 50 mL de biogás) e faixa 20 (utilizando-se 20 mL de biogás). Conforme a concentração de amônia no biogás, utilizando 50 mL de amostra, o resultado pode apresentar-se fora de escala, sendo assim inicia-se novamente a análise e coleta-se uma amostra de 20 mL. Ao final da leitura, as soluções foram armazenadas individualmente em tubos de ensaio plásticos e posteriormente analisadas em espectrofotômetro UV-VIS.

3.1.1.2. Determinação de gás sulfídrico (H_2S) no biogás

Para se obter a concentração do gás sulfídrico presente na amostra de biogás, transferiu-se 10 mL de água destilada para cubeta plástica, adicionou-se 2 gotas de solução pré-tratamento 1 (parte do kit) e agitou-se para completa homogeneização. Com a seringa identificada para a solução pré-tratamento 1, transferiu-se 5 mL da solução preparada para um tubo de ensaio o qual foi separado como prova em branco. Com a seringa identificada para coleta de gás sulfídrico, coletou-se 5 mL da mesma solução, conectou-se a mesma no saco coletor de biogás e aspirou-se até atingir 10 mL na seringa. Na sequência foi agitada a seringa (contendo o biogás e a solução preparada) durante 2 minutos para que todo o sulfeto fosse absorvido pela solução, logo foi transferida a solução para um tubo de ensaio.

Para análise colorimétrica, adicionou-se 5 gotas de reagente sulfeto 1 no tubo de ensaio com a amostra e no tubo com a prova em branco e agitou-se em seguida. Adicionou-se 2 gotas do reagente sulfeto 2 em ambos os tubos de ensaio e agitou-se. Deixou-se reagir por 10 minutos.

Ligou-se o fotocolorímetro, selecionou-se a curva de sulfeto no equipamento, e realizou-se a sua calibração, na sequência fez-se a leitura da amostra. O resultado refere-se à concentração de gás sulfídrico em ppmV que corresponde a (mL.m^{-3}). Existem quatro curvas para leitura de sulfeto, a faixa 5 (utilizando-se 5mL de biogás), a faixa 3 (utilizando-se 3 mL de biogás), a faixa 2 (utilizando-se 2 mL de biogás) e a faixa 1 (utilizando-se 1 mL de biogás). Conforme a concentração de gás sulfídrico no biogás o resultado pode apresentar-se como fora de escala, caso isto ocorra pode-se coletar um volume menor de biogás e iniciar a determinação novamente, utilizando a faixa de acordo com a quantidade de amostra coletada. Ao final da leitura, as soluções foram armazenadas

individualmente em tubos de ensaio plásticos e posteriormente analisadas em espectrofotômetro UV-VISÍVEL.

3.1.1.3. Determinação de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) no biogás

A determinação do metano e dióxido de carbono foi realizada utilizando o método de ORSAT o qual se baseia na absorção de gases por reagentes químicos. Foi possível analisar CO₂ por absorção química e CH₄ por diferença. Este kit utiliza hidróxido de potássio (a 30%) para absorção do CO₂ e por diferença identifica-se a quantidade de CH₄ na amostra. O suporte possui duas seringas: uma de plástico e outra de vidro.

Utilizando a seringa identificada para a solução pré-tratamento 2 transferiu-se 5 mL desta solução para a seringa plástica de CO₂ no suporte. Na sequência coletou-se o biogás do saco amostrador e transferiu-o para a seringa de vidro do suporte até a marca máxima de biogás. Na sequência foi transferido o biogás da seringa de vidro para a seringa plástica e, ao término da transferência, manteve-se pressionada a seringa de vidro, ocorrendo nessa condição à agitação do conjunto, durante dois minutos para que o CO₂ fosse completamente absorvido. Com o suporte na posição vertical foi transferido todo o gás presente na seringa plástica para a seringa de vidro, cuidando para não transferir a solução juntamente com o gás. A leitura foi realizada diretamente na escala do suporte, que indica a porcentagem em volume de CO₂ absorvido e de CH₄ na amostra.

3.1.2. Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas no laboratório de análise instrumental localizado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná *campus* Toledo, onde foi utilizado o espectrofotômetro UV-VISÍVEL para análise do H₂S e o cromatógrafo gasoso para análise de CH₄ e CO₂. O espectrofotômetro UV-VISÍVEL utilizado para identificação do H₂S é da marca Shimadzu (UV-1601 PC). O corante utilizado para quantificação do H₂S foi o azul de metileno que apresenta alta absorção de luz na região do visível (400-800nm). O corante reage com o H₂S, indicando através da coloração a quantidade de H₂S presente na amostra, quanto mais escura à solução, maior à concentração do componente na amostra. A análise da amônia não foi realizada, pois a quantidade deste componente no biogás é muito inferior, em relação à concentração do gás sulfídrico. O cromatógrafo

gasoso utilizado possui coluna empacotada (Hayesep D) com detetor FID (condutividade térmica), este foi configurado para realizar leitura do gás metano e dióxido de carbono. O detetor foi programado para operar na temperatura máxima 60°C, a temperatura ambiente em 30°C. O gás de arraste utilizado foi o Hidrogênio, com vazão de 30 mL.min⁻¹. A amostra foi injetada com seringa de insulina, em cada injeção, eram coletados 20 µL de amostra, e a injetados apenas 5µL no cromatógrafo.

3.4. ANÁLISE DE MÉTODOS/PROCESSOS/TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS UTILIZADAS PARA TRATAMENTO DO BIOGÁS

A análise dos métodos, processo, tecnologias convencionais disponíveis na literatura foram realizadas com base de informações obtidas de artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e, principalmente com base de dados do banco de patentes (INPI). O resultado desses estudos foi à explicitação das vantagens e desvantagens encontradas nos sistemas convencionais de purificação/separação.

3.5. DESENVOLVIMENTO/PROPOSIÇÃO DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA

Após a identificação dos gargalos/limitações das tecnologias convencionais, foi realizada uma avaliação destes gargalos e, dessa forma surgiram alternativas de melhorias destas tecnologias. Inicialmente realizaram-se diversos experimentos em escala laboratorial, como: testes de pressão normal em um biodigestor, vazão do biogás, resistência dos materiais utilizados na construção do equipamento, praticidade de carga e descarga dos fluídos absorventes, bem como elementos relacionados com o comportamento operacional. Estes testes permitiram avaliar a viabilidade de implementação dessas alternativas, em todos os casos visando à melhoria dos sistemas convencionais. A próxima etapa consistiu na implementação dessas melhorias num protótipo, para o qual foram elaborados desenhos técnicos com vistas tridimensionais, frontais e laterais.

Após a conclusão do projeto, foi construído um primeiro protótipo em parceria com a empresa Biogás Motores Estacionários LTDA.

3.6. TESTES OPERACIONAIS DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA

Após a montagem do protótipo, o mesmo foi levado para a granja onde foi instalado entre a fonte geradora do biogás e o grupo motor/gerador. Para realizar o enriquecimento em biometano. Foram testadas duas soluções aquosas, chamadas de solução A e solução B. Estas têm por objetivo remover e/ou minimizar as concentrações de gás sulfídrico, amônia e dióxido de carbono presente no biogás por meio da absorção destes. As soluções utilizadas são compostas por produtos alcalinos.

Iniciaram-se os testes adicionando ao equipamento desenvolvido para a filtração, a solução A, e em intervalos de 30 minutos foram monitoradas a concentração dos componentes do biogás (CH_4 , CO_2 , H_2S e NH_3) até não ocorrer variações significativas em suas concentrações. Em seguida passou-se a monitorar uma vez ao dia e por fim em dias alternados, até identificar o ponto de saturação da solução. Identificado o ponto de saturação, continuou-se o monitoramento até se atingir uma redução mínima de 60% de gás sulfídrico (este valor foi estipulado considerando que o biogás utilizado como combustível chegue ao grupo motor/gerador com no máximo 40% da concentração inicial de H_2S).

Após a saturação da solução A, retirou-se a mesma do filtro, e realizaram-se algumas análises. O pH da solução saturada apresentou-se alcalino. O resultado dos outros parâmetros analisados não pode ser revelado, devido ao segredo industrial, porém foi contatado a Vigilância Sanitária, a qual liberou a comercialização do produto, e seu descarte após a neutralização da mesma. Na sequência adicionou-se a solução B, na qual se realizou o mesmo procedimento.

As coletas de amostras e as análises da composição do biogás “in natura” e do biogás purificado (após passagem pelo filtro) foram realizadas conforme metodologia citada na etapa 3.3.

3.7. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA

A análise do desempenho da tecnologia foi realizada por meio das análises da composição do biogás, conforme etapa 3.3, as quais possibilitaram a comparação das concentrações do biogás “in-natura” e do biogás purificado (após a purificação realizada na tecnologia desenvolvida utilizando as soluções A e B).

Com os resultados obtidos nas análises, foi possível calcular o potencial de purificação do metano, por meio da redução do CO_2 , H_2S e NH_3 . Outro fator de grande importância utilizado para avaliar o desempenho da tecnologia alternativa, foi à avaliação do funcionamento do motor, realizado pelo operador do equipamento.

Esta avaliação foi qualitativa e realizada durante todo o período de testes. Apenas observando (ouvindo) se o motor apresentava picos (variações da concentração do biogás), os quais impossibilitam o uso da energia gerada, para algumas atividades (soldagem, uso de computadores, etc.) que necessitam de uma corrente elétrica estável.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE RESÍDUOS

A granja onde se realizaram os experimentos (Figura 7) está localizada na Linha da Usina – Toledo-PR. Suas instalações estão próximo ao rio São Francisco Verdadeiro. A granja possui 1500 matrizes de suínos, cuja reprodução média é de 2,5 vezes ao ano, e em cada reprodução nascem, em média, 12 leitões. Conforme informações repassadas pelo funcionário da granja, o sistema de reprodução das 1500 matrizes é rotativo, enquanto 500 matrizes estão amamentando, as outras 500 são gestantes e as outras 500 estão aguardando para ser inseminadas, gerando um ciclo constante e mantendo em média 6000 leitões na creche. Os leitões são vendidos, em média, com 65 dias, o que corresponde a 25 kg per capita aproximadamente.



Figura 7. Vista aérea da granja onde se realizaram os experimentos.

A quantificação dos dejetos produzidos se obteve pela produção média diária de dejetos nas diferentes fases produtivas dos suínos apresentada por Angonese *et al.* (2006). Segundo estes autores, porcas em gestação produzem em média 3,6 kg de esterco por dia, e porcas em lactação, em média 6,4 kg, as porcas que estão aguardando para serem inseminadas, em média 2,3 kg por dia e os leitões desmamados em média 0,35 kg. Com

esta correlação identificou-se o potencial de geração de resíduos como sendo aproximadamente 8.250 kg de esterco produzidos diariamente na granja. O sistema de limpeza consiste na raspagem dos dejetos, os quais são enviados para calhas, que transportam os dejetos para o tanque de armazenamento. A maternidade e a creche são lavadas toda semana com água. A granja utiliza em média 70.000 litros de água por dia.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE GERADORA DE BIOGÁS

A granja possui dois biodigestores anaeróbicos, cujas dimensões estão representadas nas Figuras 8 e 9 respectivamente. Os biodigestores foram construídos com base no modelo Canadense, foram revestidos com material impermeável e cobertos com material flexível (lonas de PVC) da marca Sansuy. O biodigestor 2 possui 4 divisões internas, confeccionadas com a própria lona de revestimento do fundo do biodigestor. Estas divisões promovem fluxos descendentes e ascendentes do fluxo de biomassa dentro do biodigestor, possibilitando o maior contato entre o microrganismo e substrato, causando maior tempo de retenção hidráulica e diminuindo a perda dos microrganismos por arraste, além de diminuir a carga orgânica dos dejetos. Os dois biodigestores possuem sistema de agitação, que são realizadas uma vez por semana.

Os biodigestores trabalham em série. Os dejetos “in-natura” (armazenados em um tanque construído de alvenaria) são alimentados no biodigestor 1, onde ocorre a produção de biogás pela digestão da matéria orgânica. O lodo que sai do biodigestor 1 é enviado para o biodigestor 2, onde novamente ocorre a digestão da matéria orgânica presente, produzindo novamente biogás. O lodo que sai do biodigestor 2 é utilizado como biofertilizante, sendo (na forma líquida) aspergido na lavoura de milho. O biogás é utilizado na geração de energia elétrica e o excedente é queimado para a obtenção de créditos de carbono. Do ponto de vista quantitativo cada biodigestor produz aproximadamente 300 m³ de biogás por dia.

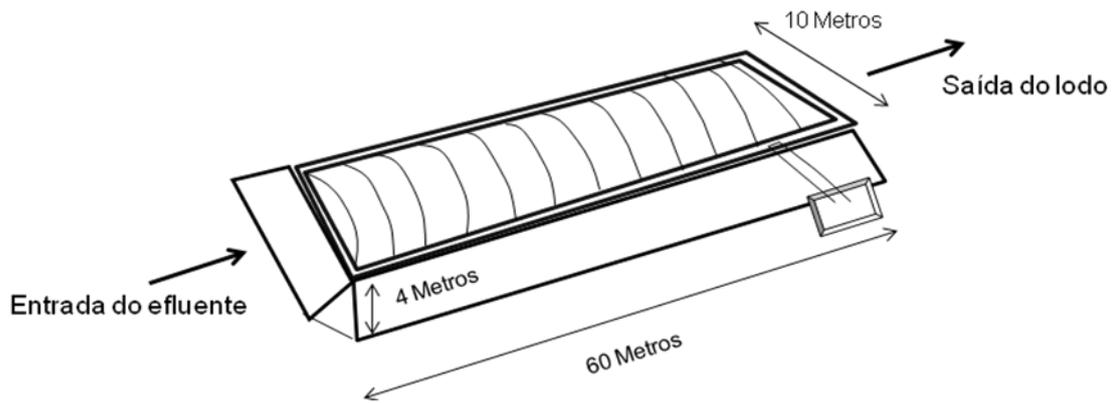


Figura 8. Dimensões do biodigestor 1.

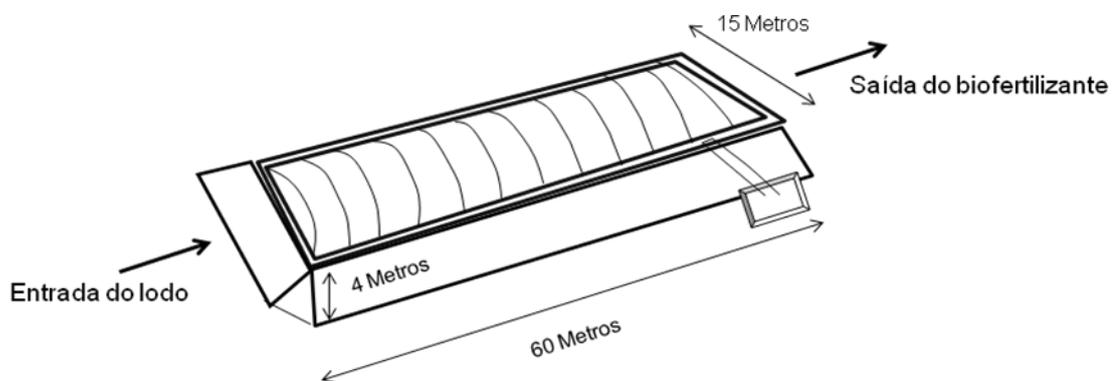


Figura 9. Dimensões do biodigestor 2.

4.3. CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS

O biogás produzido na granja é utilizado como combustível para acionar motores estacionários, principalmente para a geração de energia elétrica. Com a finalidade de identificar a sua composição e a quantidade de cada um dos componentes, foram coletadas amostras do biogás “in-natura” na saída do biodigestor.

Segundo Mercado (2010) o biogás é composto por: metano (50-70%), dióxido de carbono (19-38%), nitrogênio (0-5%), oxigênio (0-1%), água (6% a 40°C), gás sulfídrico (100 – 10000 ppm) e amônia (50-100 ppm). Dos componentes do biogás, os que estão presentes em maior quantidade são o CH₄ e o CO₂. O H₂S e a NH₃ representam apenas traços na sua composição, porém ambos são extremamente corrosivos, tornando-se necessário a remoção/redução da concentração dos mesmos.

As análises de CH₄, CO₂, H₂S e NH₃, foram realizadas utilizando o kit da Embrapa®. Também foram realizadas análises de H₂S em espectrofotômetro UV-VISIVEL, para a confirmação dos resultados e análises de CH₄ e CO₂ em cromatógrafo gasoso.

O resultado da análise do biogás “in-natura” produzido na granja, juntamente com outros resultados encontrados na literatura, para o mesmo dejetos, estão representado na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização qualitativa e quantitativa do biogás de suínos “in-natura”.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Granja estudada	69%	31%	344,13 ppmV	48,31 ppmV
Fernandes (2012)	60%	40%	3258 ppm	-
Mercado (2010)	50-70%	19-38%	100–10000 ppm	50-100 ppm
Oliveira (2002)	55 a 70%	27 a 45%	traços	-
Alves et al (1980)	54 a 70%	27 a 45%	traços	-

Conforme apresentado na Tabela 5, a concentração de gás sulfídrico no biogás “in-natura” é elevada comparando com a concentração de amônia. A presença do gás sulfídrico é o principal responsável pela corrosão dos motores, o que reduz a vida útil dos mesmos de 60.000 horas para aproximadamente 10.000 horas, tornando-se necessária a sua redução/eliminação para viabilizar o uso do biogás como combustível.

A granja possui um filtro convencional de limalha de ferro para a purificação do biogás. O qual foi avaliado na etapa 4.4.

4.4. ANÁLISE DE MÉTODOS/PROCESSOS/TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS UTILIZADAS PARA TRATAMENTO DO BIOGÁS

Na literatura foram encontradas diversas tecnologias, utilizadas para a remoção do gás sulfídrico do biogás. Inicialmente analisou-se a eficiência do equipamento existente na granja (filtro de limalha de ferro). A composição do biogás purificado com o respectivo equipamento está na Tabela 6, e o sistema de coleta é mostrado na Figura 10.



Figura 10. Coleta do biogás purificado na entrada do motor.

Tabela 6. Composição do biogás “in-natura”, e purificado com filtro de limalha de ferro.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Biogás “in-natura”	69%	31%	344,13 ppmV	48,31 ppmV
Biogás purificado	69%	31%	213,44 ppmV	13,57 ppmV

Com os resultados obtidos, identificou-se que o sistema convencional utilizado na granja apresenta baixa eficiência e curto período de saturação, pois o ideal é a remoção de 100% do gás sulfídrico do biogás. As vantagens destes sistemas são os baixos custos e fácil instalação, e as desvantagens, a rápida saturação e a dificuldade de tratamento do adsorvente, tornando-se um sistema limitado.

Visando a complementação de dados foi realizado um estudo das tecnologias disponíveis na literatura para a purificação e/ou separação dos componentes do biogás.

Foram analisadas principalmente as tecnologias que são registradas no banco de patentes brasileiro (INPI), as quais foram citadas na revisão de literatura.

O resultado da análise apontou que as tecnologias convencionais ainda apresentam limitações/gargalos tecnológicos conforme descrito a seguir:

- a) Necessidade de altas pressões no fluxo do biogás (para vencer a perda de carga dos equipamentos);
- b) No caso dos equipamentos que utilizam zeólitas como material filtrante necessita de altas temperaturas para a regeneração dos mesmos;
- c) Alguns equipamentos necessitam de vários dias para realizar a manutenção dos mesmos, interrompendo o aproveitamento do biogás; e
- d) Alguns equipamentos que utilizam reações com produtos químicos devem ser operados por profissional capacitado.

Devido às limitações/gargalos tecnológicos apresentados, verifica-se a necessidade da proposição de novas tecnologias, a fim de contornar os gargalos encontrados nos sistemas convencionais, proporcionando a redução parcial ou total dos componentes indesejáveis do biogás ou a separação dos componentes.

4.5. DESENVOLVIMENTO/PROPOSIÇÃO DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA

Após identificação dos gargalos tecnológicos realizou-se uma análise dos mesmos. Em cada caso foi identificado e avaliado algumas propostas para contornar essas limitações. Essa etapa foi realizada por meio de diversos experimentos em escala laboratorial, visando testar a viabilidade da sua implantação.

O resultado foi um conjunto de ideias os quais foram incorporados num equipamento denominado “SISTEMA PARA REMOÇÃO DO GÁS SULFÍDRICO E DO GÁS CARBÔNICO CONTIDO NO BIOGÁS RESULTANTE DA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUSO ORGÂNICOS” DVP-SK 463815325, o qual se encontra na fase de sigilo junto ao INPI. A Figura 11 apresenta uma vista do equipamento. Os atributos do mesmo são: a) não requer de elevadas pressões; b) consegue uma melhor purificação do metano contido no biogás; c) é de fácil operação/manutenção; d) é modular, compacto (ocupa pouco espaço); e) a solução absorvedora utilizada no sistema não compromete o meio ambiente; f) quando comparado com os similares, requer maior tempo

para saturação; e g) apresenta custos relativamente menores que as tecnologias convencionais.

Após o interesse manifestado por uma empresa do município de Toledo-PR, foi viabilizado a sua construção em escala piloto para efeitos de testes operacionais. Para tanto foi desenvolvido os respectivos desenhos técnicos e projeto para a construção/montagem.



Figura 11. Vista do equipamento desenvolvido.

4.6. TESTES OPERACIONAIS DA TECNOLOGIA ALTERNATIVA

Após a sua construção, com base dos desenhos/projeto técnico, o equipamento foi instalado numa granja (gado leiteiro) localizada no Município de Céu Azul - PR. Nessa granja, conforme ilustra a Figura 12, o protótipo foi instalado embaixo do motor, a fim de embarcar esse equipamento como sendo peça complementar do motor.



Figura 12. Instalação do protótipo na granja de gado leiteiro.

No decorrer dos testes experimentais, foram identificados alguns problemas técnicos, pois o equipamento não tinha sido construído de acordo com as especificações do projeto. Diante disso, foi desmontado e realizado os respectivos ajustes (Figura 13). Na etapa de testes, foi constatada a influência da temperatura do motor no equipamento (o mesmo sofreu algumas deformações), descartando-se desta forma a instalação do mesmo em baixo do motor.



Figura 13. Ajustes realizados no protótipo.

O equipamento foi levado para a oficina da empresa Biogás Motores Estacionários Ltda., onde foram realizados alguns testes de pressão de operação. Os testes foram

realizados inserindo-se ar comprimido no equipamento. Variou-se a pressão de entrada de ar de 5 kgf/m² a 18 kgf/m². Com esta variação de pressão foi possível identificar o comportamento da solução absorvedora, diante da pressão aplicada, verificando se em baixas pressões (5 kgf/m²), o biogás conseguiria vencer a perda de carga do equipamento.

Conseguiu-se com estes testes identificar que mesmo em baixas pressões (5 kgf/m²), o ar conseguiu vencer a perda de carga do equipamento. Na situação real a pressão de entrada do biogás varia de 5 kgf/m² a 18 kgf/m², sendo suficiente para vencer esta perda de carga. Este parâmetro é uma vantagem do sistema, pois não necessita de outros equipamentos para aumentar a pressão no fluxo do biogás, reduzindo assim o custo do sistema.

Após todos os ajustes e testes, o equipamento foi instalado na segunda granja. Nesta a instalação do protótipo foi realizada distante do motor, (devido à interferência da temperatura no equipamento), conforme apresenta a Figura 14. O mesmo foi instalado ao lado do filtro convencional (limalha de ferro) existente na granja. A instalação permitiu utilizar o filtro convencional ou a tecnologia desenvolvida, para não necessitar interromper o uso do biogás caso necessite realizar a manutenção do equipamento. A Figura 15 mostra o sistema de entrada do biogás que pode ser direcionado para o filtro convencional (azul) ou para a tecnologia alternativa (Modelo Unioeste). A versão final dos ajustes realizados no equipamento é apresentada na Figura 16.



Figura 14. Protótipo instalado na parte externa do abrigo do motor.



Figura 15. Instalação do sistema de controle de entrada do biogás na tecnologia desenvolvida ou no filtro convencional.



Figura 16. Versão final dos ajustes realizados na tecnologia proposta.

O principal fator operacional testado na tecnologia foi a pressão de trabalho. O ponto de medição da pressão é representado na Figura 17, juntamente com o ponto de coleta do biogás “in-natura” e a medida da temperatura do biogás.

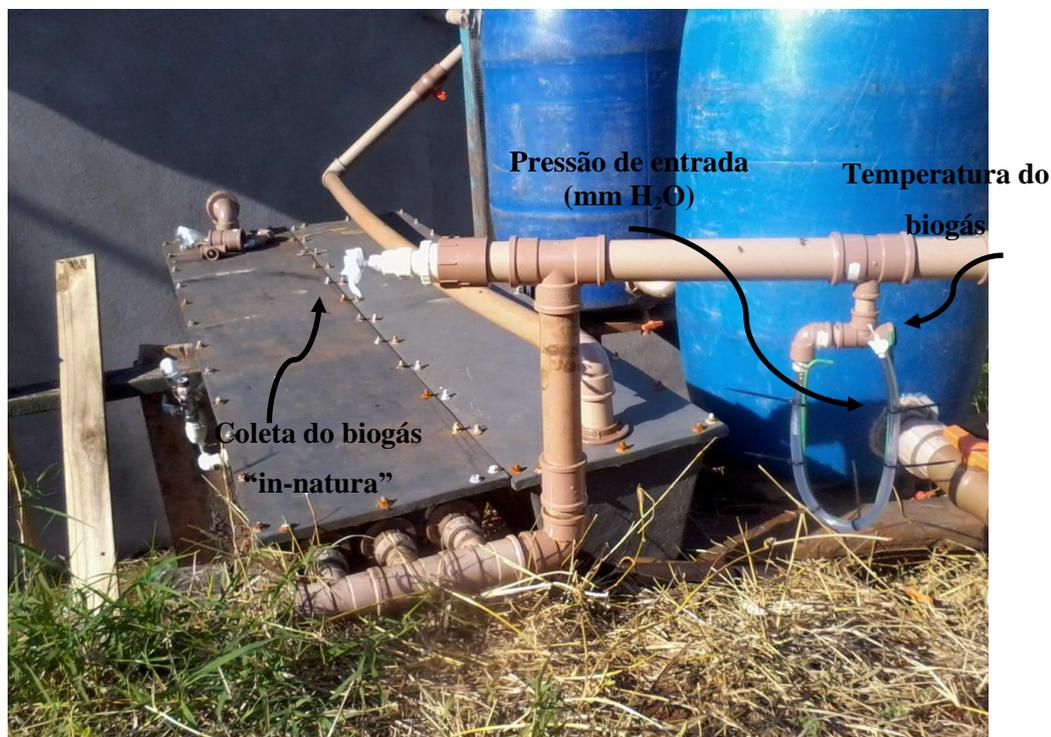


Figura 17. Ponto de medição da pressão de entrada do biogás no sistema, temperatura do biogás e coleta do biogás “in-natura”.

Este equipamento foi desenvolvido a fim de eliminar um dos principais gargalos encontrados nos sistemas convencionais, que é a necessidade de grandes pressões no fluxo do biogás para vencer a perda de carga nos equipamentos.

4.7. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA TECNOLOGIA DESENVOLVIDA

O desempenho da tecnologia foi avaliado de acordo com a porcentagem de redução do gás sulfídrico, amônia e dióxido de carbono presente no biogás. Iniciaram-se os testes do equipamento, adicionando a solução (A) ao equipamento desenvolvido.

Analisou-se inicialmente o biogás “in-natura”, e em seguida o biogás purificado em intervalos de 30 minutos. A Tabela 7 apresenta as variações das concentrações dos componentes do biogás no dia em que foi adicionada a solução (A).

Tabela 7. Variação da concentração dos componentes do biogás no dia em que foi adicionada a solução A.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Biogás o min. de reação	69%	31%	344,13 ppmV	48,31 ppmV
Em 30 min. de reação	71%	29%	164,75 ppmV	15,8 ppmV
Em 60 min. de reação	71%	29%	19,25 ppmV	10,93 ppmV
Em 90 min. de reação	71%	29%	19,28 ppmV	11,74 ppmV
Em 120 min. de reação	71%	29%	19,35 ppmV	11,82 ppmV
Em 150 min. de reação	71%	29%	19,27 ppmV	11,79 ppmV

Verificou-se que após 30 minutos de reação com a solução (A), a concentração de dióxido de carbono reduziu 2%, a concentração de gás sulfídrico reduziu 47,9% e a concentração de amônia reduziu 67,3%. Devido à redução destas concentrações, o teor de metano aumentou 2%.

Após 60 minutos de reação, o gás sulfídrico atingiu redução de 94,4%, a amônia atingiu redução de 77,37% e o dióxido de carbono e metano mantiveram-se constantes. Identificou-se que em 150 minutos não ocorreram variações significativas nas concentrações dos componentes do biogás, sendo assim, passou-se a analisar as concentrações diariamente, a fim de monitorar o comportamento da solução adicionada no equipamento desenvolvido. O gráfico da variação da concentração de CO₂ e CH₄ é apresentado na Figura 18 e o gráfico da variação da concentração de H₂S e NH₃ é apresentado na Figura 19.

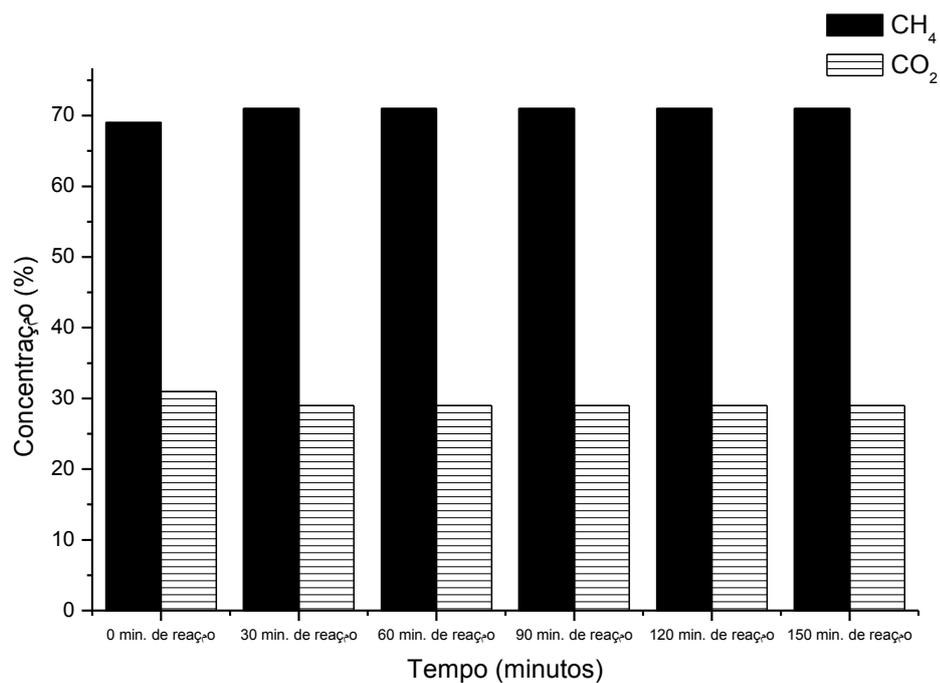


Figura 18. Variação da concentração do CH₄ e CO₂ no dia em que foi adicionada a solução A.

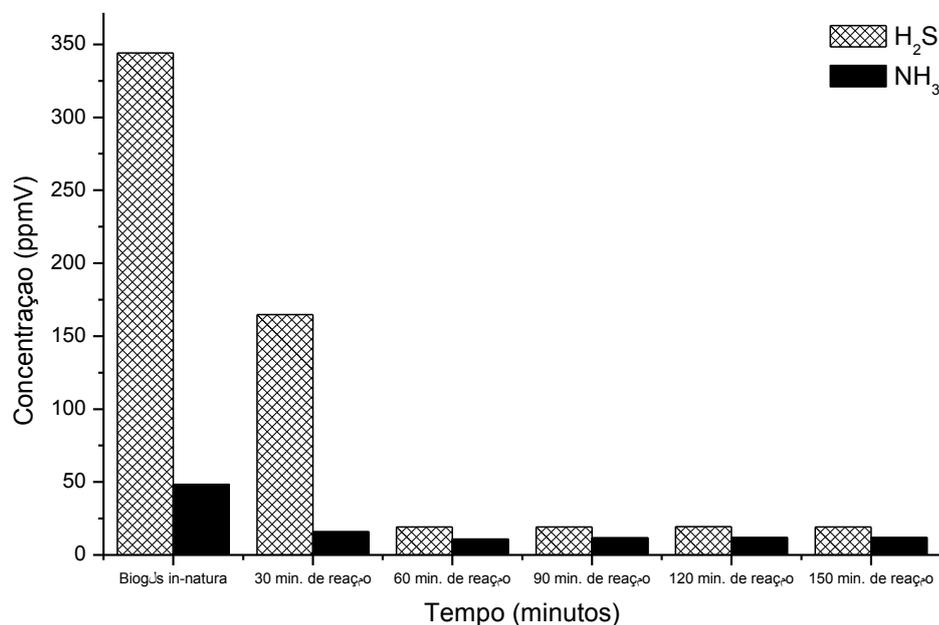


Figura 19. Variação da concentração do H₂S e NH₃ no dia em que foi adicionada a solução A.

As análises colorimétricas do gás sulfídrico, realizadas com o kit biogás, utilizam o método do azul de metileno. Após a leitura em fotocolorímetro, as amostras foram

armazenadas em tubos de ensaio de plástico resistente e posteriormente analisadas em espectrofotômetro UV-VIS, para confirmação dos resultados obtidos. Na figura 20, são mostrados os espectros de absorção do azul de metileno obtidos no dia em que se adicionou a solução A ao equipamento desenvolvido. O espectro de absorção obtido, permite visualizar que o corante azul de metileno em altas concentrações em água forma auto-agregados do corante com formação de bandas adicionais na região de 600 nm (dímeros).

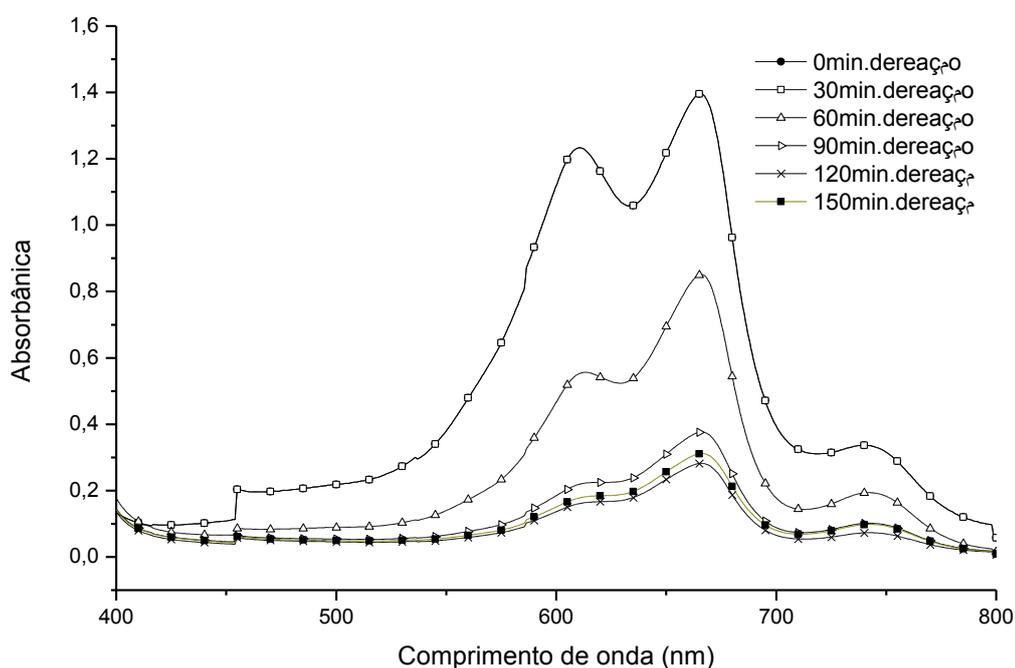


Figura 20. Espectro de absorção do azul de metileno obtido no dia em que se adicionou a solução A no equipamento.

Por meio do espectro de absorção do azul de metileno obtido (análise qualitativa) é possível visualizar claramente a redução da concentração do gás sulfídrico presente no biogás. A diminuição da altura do pico é representada pela diminuição da concentração de azul do metileno, indicando que o H_2S foi absorvido pela solução.

As análises das concentrações dos componentes do biogás foram realizadas diariamente até não apresentar variação significativa, posteriormente analisada em dias alternados. A Tabela 8 apresenta a variação das concentrações dos componentes realizadas até a saturação da solução A.

Tabela 8. Variação das concentrações dos componentes presentes no biogás, após reação com a solução A.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Biogás (0 dia)	69%	31%	367,48 ppmV	47,26 ppmV
Purificado (2° dia)	71%	29%	20,77 ppmV	4,62 ppmV
Purificado (3° dia)	71%	29%	26,87 ppmV	4,73 ppmV
Purificado (4° dia)	71%	29%	31,97 ppmV	4,84 ppmV
Purificado (5° dia)	71%	29%	37,07 ppmV	4,95 ppmV
Purificado (7° dia)	71%	29%	42,17 ppmV	5,17 ppmV
Purificado (9° dia)	71%	29%	47,19 ppmV	5,39 ppmV
Purificado (11° dia)	71%	29%	52,32 ppmV	5,61 ppmV
Purificado (13° dia)	71%	29%	57,47 ppmV	5,83 ppmV
Purificado (16° dia)	71%	29%	60,24 ppmV	6,07 ppmV
Purificado (18° dia)	71%	29%	65,31 ppmV	6,24 ppmV
Purificado (20° dia)	71%	29%	80,21 ppmV	8,94 ppmV
Purificado (22° dia)	71%	29%	95,11 ppmV	11,64 ppmV
Purificado (24° dia)	71%	29%	110,10 ppmV	14,34 ppmV
Purificado (25° dia)	71%	29%	124,87 ppmV	17,02 ppmV

Os gráficos que representam a variação da concentração dos componentes presentes no biogás durante todo o período de reação com a solução (A) são apresentados nas Figuras 21, 22 e 23 respectivamente.

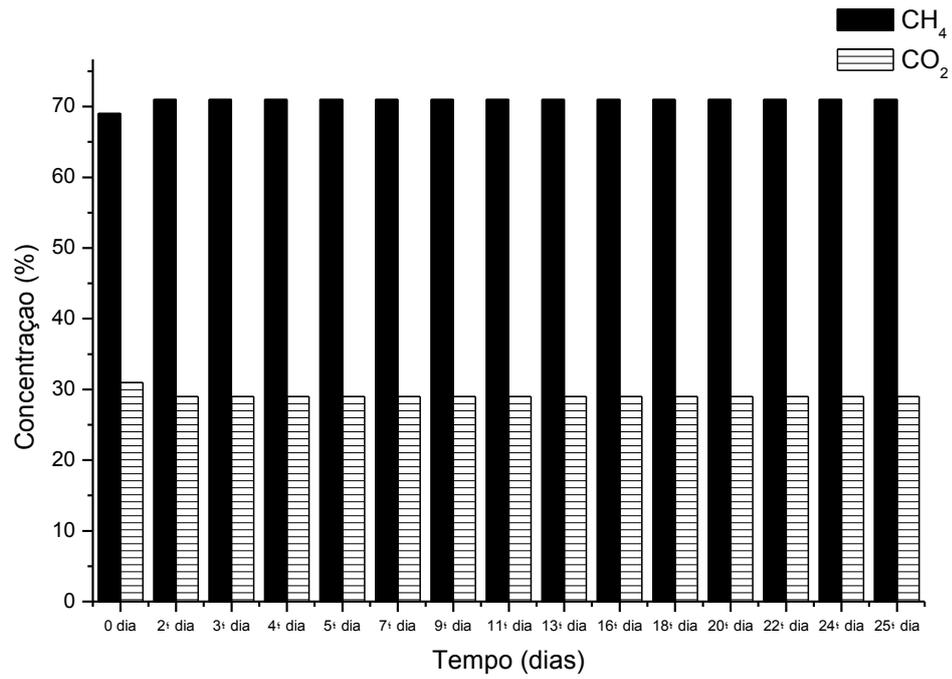


Figura 21. Variação da concentração do CH₄ e CO₂ no decorrer dos dias com a reação com a solução A.

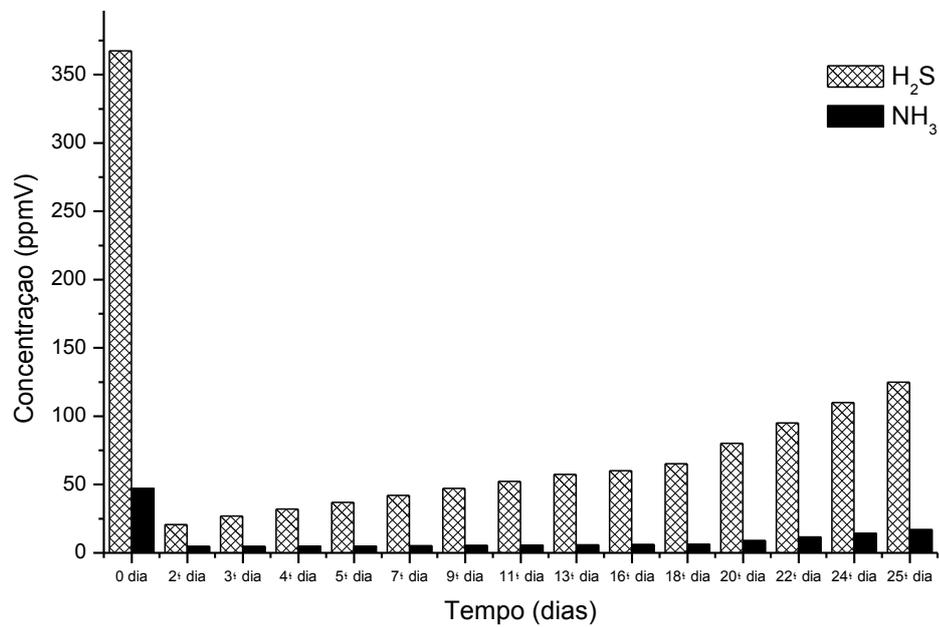


Figura 22. Variação da concentração do H₂S e NH₃ no decorrer dos dias com a reação com a solução A.

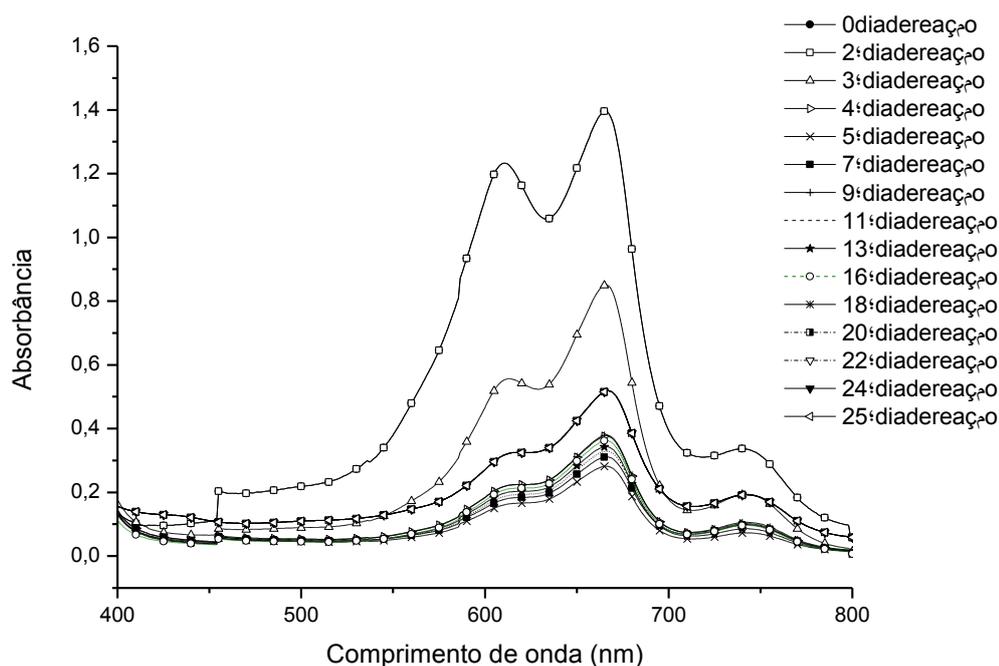


Figura 23. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução A.

A partir dos gráficos e tabelas apresentados, pode-se perceber que após 30 minutos de reação com a solução (A) a concentração de gás sulfídrico (principal componente a ser removido do biogás) apresentou redução de 47,9% e após 60 minutos reduziu 94,4%. A concentração de amônia no biogás reduziu 67,3% após 30 minutos de reação e 77,37% após 60 minutos de reação. Como consequência da redução dos compostos indesejáveis, o teor de metano aumentou 2%, aumentando seu potencial calorífico de 23.728 kJ m^{-3} para 24.415 kJ m^{-3} aproximadamente.

Com o monitoramento das concentrações dos componentes do biogás, pode-se identificar o momento em que a concentração do gás sulfídrico e amônia começaram a aumentar. A Figura 22 permite concluir que após o segundo dia de reação com a solução (A) a concentração de H_2S e NH_3 , começa a aumentar. Foi estipulado que a solução fosse trocada quando o percentual de redução atingisse 60% (o que indica que o biogás que está alimentando o grupo motor gerador está com apenas 40% da concentração inicial de H_2S), o qual foi atingido no 22º dia de reação. O tempo de saturação da solução foi calculado em horas de operação/funcionamento do motor. Conseguiu-se um tempo de 263 horas para a saturação da solução A.

O desempenho do motor foi avaliado pelo operador, o qual concluiu que o motor utilizando o biogás purificado pela tecnologia desenvolvida na Unioeste, apresentou maior estabilidade de trabalho, reduzindo consideravelmente as oscilações. Segundo o operador, as oscilações eram muito frequentes antes da instalação da tecnologia proposta. A redução das oscilações se deve ao aumento da quantidade e regularidade do metano alimentado no motor, o que não se verificava anteriormente devido à baixa qualidade e grande variabilidade da composição do biogás.

Após a saturação da solução A (60L), retirou-se a mesma do equipamento e armazenou-a em um recipiente de 200L, a qual foi analisada, para identificar sua composição e forma de tratamento, para posterior descarte. O resultado da análise desta solução não pode ser revelado devido a patente estar em fase de sigilo industrial.

Na sequência foi adicionada a solução (B) ao equipamento, a fim de realizar o monitoramento do seu comportamento, conforme foi realizado com a solução (A). A Tabela 9 apresenta a variação da concentração dos componentes do biogás, no dia que foi adicionada a solução B.

Tabela 9. Variação da concentração dos componentes do biogás no dia em que foi adicionada a solução B.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Biogás o min. de reação	69%	31%	379,04 ppmV	23,24 ppmV
Em 30 min. de reação	70%	30%	378,89 ppmV	9,8 ppmV
Em 60 min. de reação	71%	29%	15,14 ppmV	9,8 ppmV
Em 90 min. de reação	71%	29%	15,85 ppmV	9,8 ppmV
Em 120 min. de reação	72%	28%	15,73 ppmV	9,8 ppmV
Em 150 min. de reação	72%	28%	15,74 ppmV	9,8 ppmV

Verificou-se que esta solução apresentou comportamento diferente da solução A, pois após 30 minutos de reação com a solução (B), a concentração de dióxido de carbono reduziu 1%, a concentração de gás sulfídrico reduziu 0,03% e a concentração de amônia reduziu 57,8%, e devido à redução destas concentrações, o teor de metano aumentou 1%.

Após 60 minutos de redução o gás sulfídrico atingiu redução de 96%, a amônia manteve a redução de 57,8%, o dióxido de carbono reduziu 2% e o percentual de metano atingiu 71%. Observou-se que após 150 minutos de reação com a solução B, o teor de

metano atingiu 72% e a redução no teor de gás sulfídrico e amônia mantiveram-se constantes. O gráfico da variação da concentração de CO_2 e CH_4 é apresentado na Figura 24 e o gráfico da variação da concentração de H_2S e NH_3 é apresentado na Figura 25.

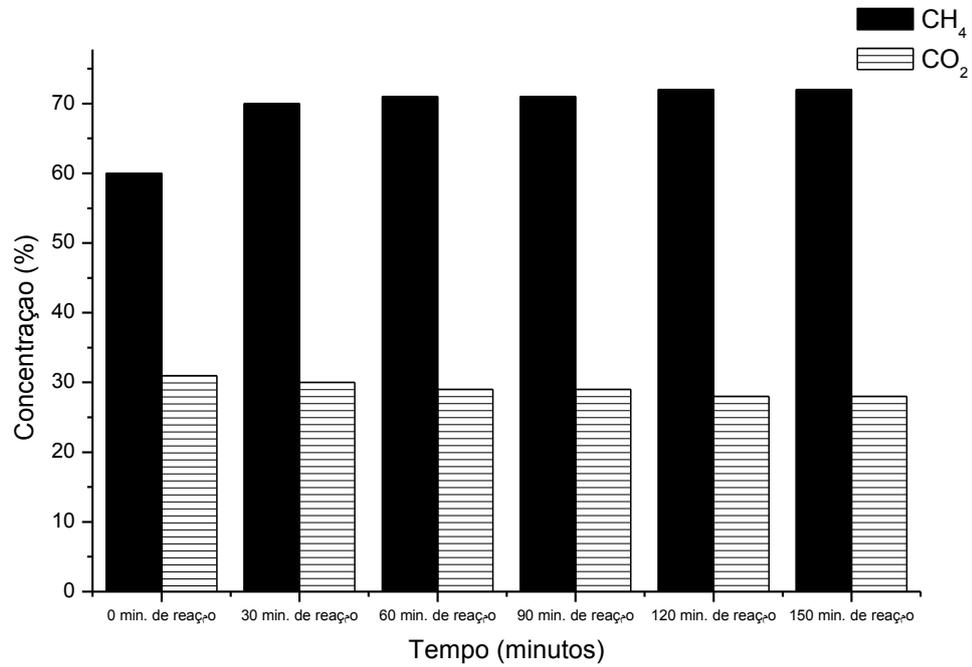


Figura 24. Variação da concentração do CH_4 e CO_2 no dia em que foi adicionada a solução B.

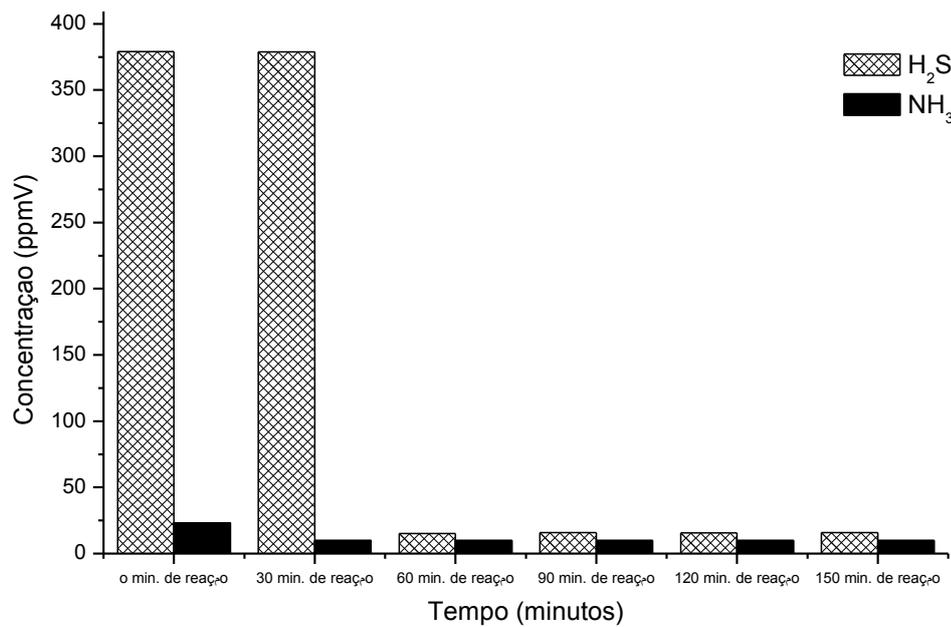


Figura 25. Variação da concentração do H_2S e NH_3 no dia em que foi adicionada a solução B.

Conforme procedimento realizado com a solução A, após a leitura em fotocolorímetro, as amostras das análises do gás sulfídrico foram armazenadas em tubos de ensaio de plástico resistente e posteriormente analisadas em espectrofotômetro UV-VIS, para confirmação dos resultados obtidos. Na Figura 26, são mostrados os espectros de absorção do azul de metileno obtidos no dia em que se adicionou a solução B ao equipamento desenvolvido.

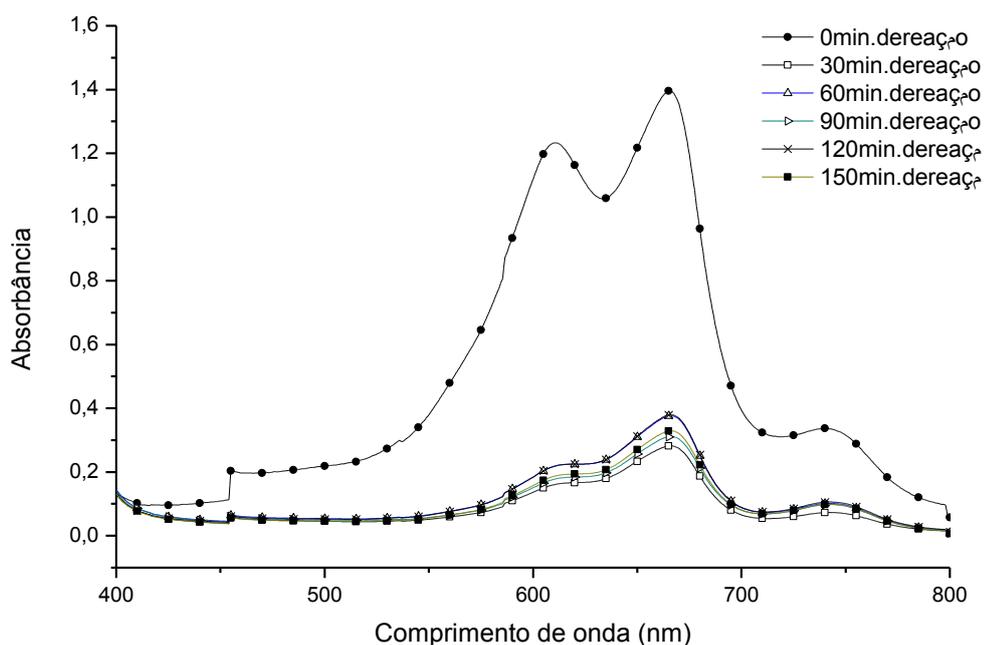


Figura 26. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução B.

As análises das concentrações dos componentes do biogás foram realizadas diariamente até não apresentar variação significativa, posteriormente analisada em dias alternados. A Tabela 10 apresenta a variação das concentrações dos componentes realizadas até a saturação da solução B.

Tabela 10. Variação das concentrações dos componentes presentes no biogás, após reação com a solução B.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
Biogás (0 dia)	69%	31%	365,76 ppmV	32,54 ppmV
Purificado (2º dia)	74%	26%	17,61 ppmV	9,8 ppmV
Purificado (3º dia)	75%	25%	21,95 ppmV	9,72 ppmV
Purificado (5º dia)	75%	25%	26,91 ppmV	9,48 ppmV
Purificado (7º dia)	75%	25%	29,18 ppmV	9,43 ppmV
Purificado (9º dia)	75%	25%	33,98 ppmV	9,39 ppmV
Purificado (11º dia)	75%	25%	69,60 ppmV	8,25 ppmV
Purificado (13º dia)	75%	25%	86,62 ppmV	7,49 ppmV
Purificado (14º dia)	75%	25%	103,64 ppmV	6,47 ppmV
Purificado (15º dia)	75%	25%	140,82 ppmV	5,49 ppmV

Os gráficos que representam a variação da concentração dos componentes presentes no biogás durante todo o período de reação com a solução (B) são apresentados nas Figuras 27, 28 e 29 respectivamente.

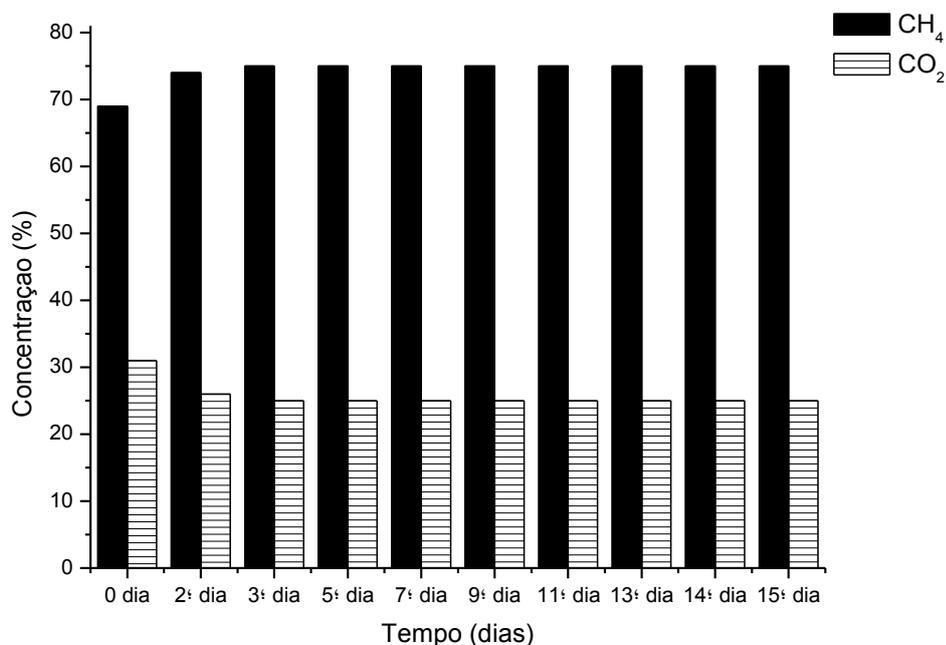


Figura 27. Variação da concentração do CH₄ e CO₂ no decorrer dos dias com a reação com a solução B.

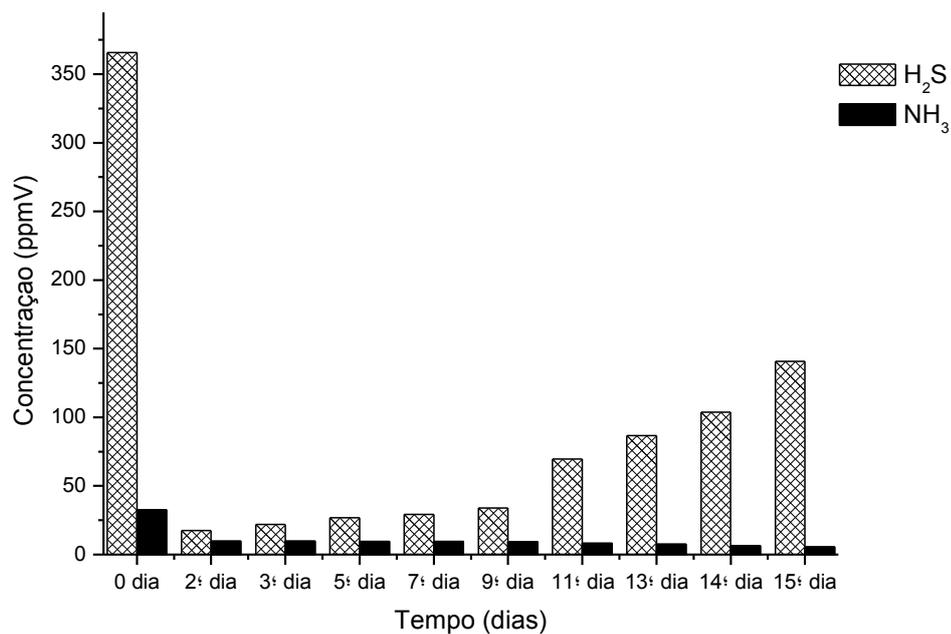


Figura 28. Variação da concentração do H₂S e NH₃ no decorrer dos dias com a reação com a solução B.

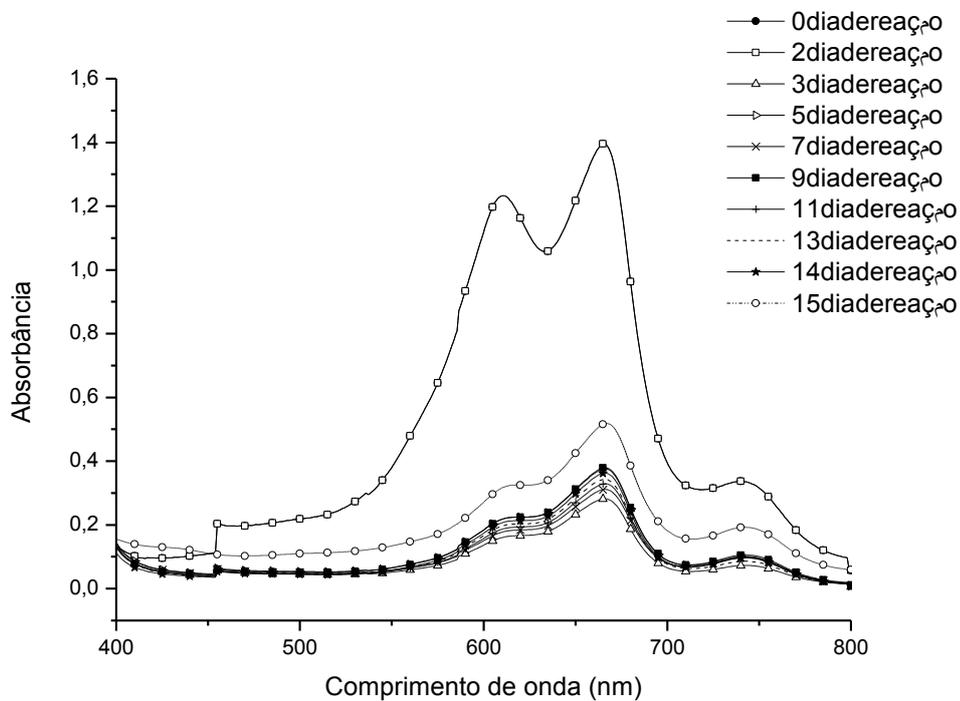


Figura 29. Espectros de absorção do azul de metileno obtidos no decorrer dos dias com a reação com a solução B.

A partir dos gráficos e tabelas apresentados, pode-se perceber que após 60 minutos de reação com a solução (B) a concentração de gás sulfídrico (principal componente a ser removido do biogás) apresentou redução de 96%. A concentração de amônia no biogás reduziu 57,8% após 60 minutos de reação e manteve-se constante até o 10º dias, depois deste período continuou reduzindo, no último dia de teste atingiu redução de 83,1%. Como consequência da redução dos compostos indesejáveis, o teor de metano aumentou 6%, atingindo 75% de metano no biogás, aumentando seu potencial calorífico de 23.728 kJ m⁻³ para 25.791 kJ m⁻³ aproximadamente.

Com o monitoramento das concentrações dos componentes do biogás, pode-se identificar o momento em que a concentração do gás sulfídrico começou a aumentar. A Figura 28 permite concluir que após o segundo dia de reação com a solução (B) a concentração de H₂S, começou a aumentar. Foi estipulado que a solução fosse trocada quando o percentual de redução atingisse 60%, o qual foi atingido no 15º dia de reação. O tempo de saturação da solução B foi alcançado em 209 horas.

A diferença de dias de operação do motor com as soluções A e B, ocorreram devido à quantidade de horas que o motor trabalhava por dia. No período de testes com a solução A, o motor trabalhava em média 10 horas por dia, e com a solução B, o motor trabalhava em media 15 horas por dia. A diferença foi de 54 horas, o que representa 3,6 dias de trabalho do motor com 15 horas de operação, o que torna esta diferença insignificante, diante da eficiência de redução do gás sulfídrico e aumento do percentual de metano conseguido com a solução B.

As análises de CH₄ e CO₂ realizadas em cromatógrafo gasoso comprovaram o aumento da concentração do metano após purificação com a solução B. Foram realizadas análises somente do biogás “in-natura” e do biogás purificado com a solução B, pois durante os testes com a solução A, o equipamento estava na manutenção.

A fim de verificar se os picos obtidos condiziam com o pico de metano e dióxido de carbono, realizou-se análise cromatográfica utilizando gás metano puro (5 µL) (pureza 99,995%), dióxido de carbono puro (5 µL) (pureza 99,95%) e ar (5 µL). As amostras foram coletadas nos cilindros que estavam localizados no mesmo laboratório onde se encontra o cromatógrafo gasoso.

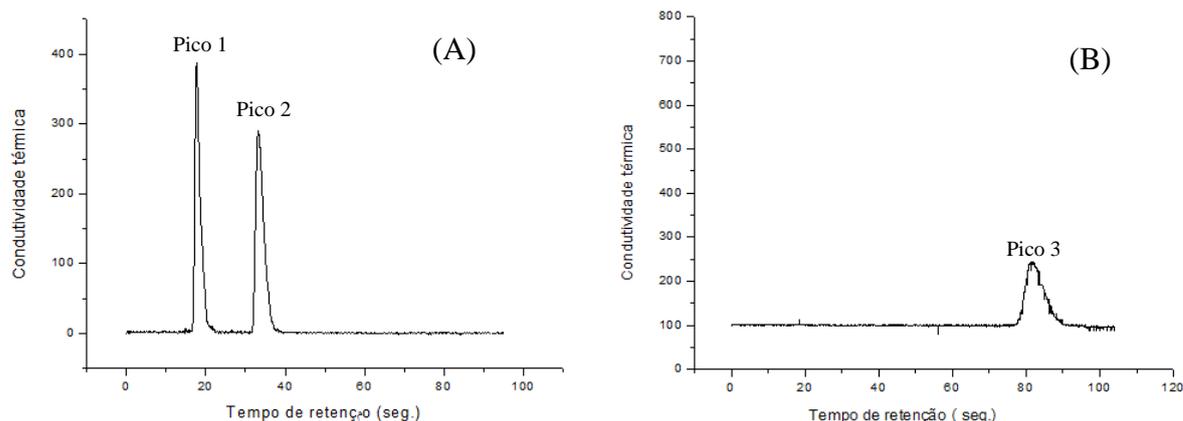


Figura 30. Cromatograma do ar e metano puro (A) e dióxido de carbono puro (B).

As análises foram realizadas em duplicata. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores das áreas de cada pico encontrado nas análises cromatográficas, sendo biogás “in-natura” 1 representado por (BN1), biogás “in-natura” 2 representado por (BN2), biogás purificado 1 representado por (BP1) e biogás purificado 2 representado por (BP2).

Tabela 11. Análises cromatográficas das amostras do biogás “in natura”.

PICO	BN1	BN2	MÉDIA DO PICO
1	844,56	886,67	865,61
2	1861,25	1800,88	1831,06
3	2033,71	1949,77	1991,74

A partir da Tabela 11, foi possível a construção do cromatograma representado na Figura 31.

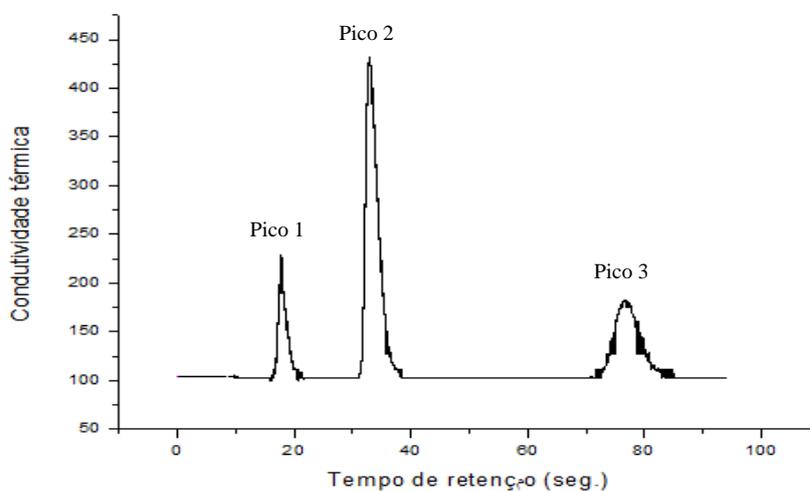


Figura 31. Cromatograma do biogás “in-natura”.

Tabela 12. Análises cromatográficas das amostras do biogás purificado.

PICO	BP1	BP2	MÉDIA DO PICO
1	856,89	897,52	877,20
2	1897,34	1985,60	1941,47
3	2065,59	1678,97	1872,28

A partir da Tabela 12, foi possível a construção do cromatograma representado na Figura 32.

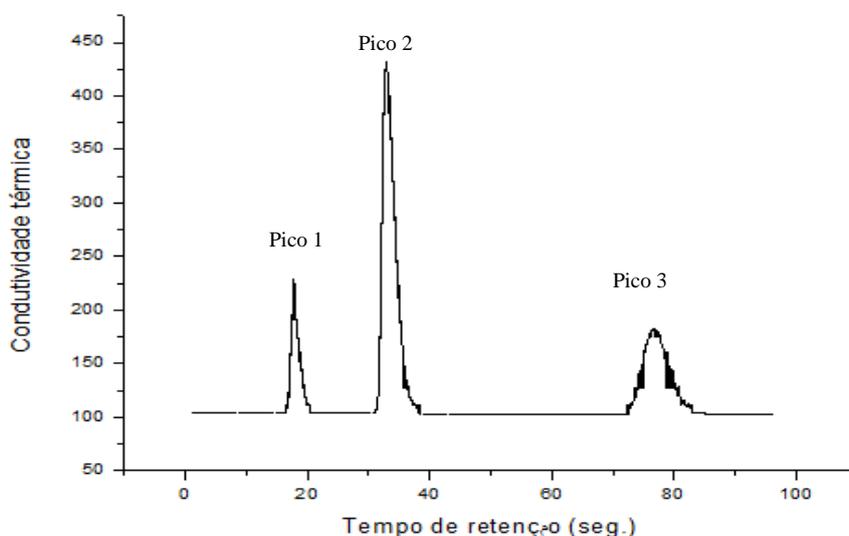


Figura 32. Cromatograma do biogás purificado com a solução B.

Com estas análises e seus respectivos picos, ressalta-se que o primeiro pico representa a contaminação presente no biogás (presença de ar), que pode ter ocorrido no momento da coleta do biogás. O segundo pico representa o metano e o terceiro pico o dióxido de carbono.

A partir das análises em cromatógrafo gasoso, comprovou-se o aumento de 6% de metano e redução de 6% de dióxido de carbono no biogás purificado com a solução B. O desempenho do motor alimentado com o biogás purificado com a solução B apresentou melhor estabilidade de trabalho e não ocorreram mais oscilações, comparando com a solução A, e com o sistema convencional utilizado antes da instalação da tecnologia alternativa. A redução das oscilações se deve ao aumento da quantidade e regularidade do metano alimentado no motor. Inicialmente o mesmo estava sendo alimentado com 69% de

metano, e com a solução B, passou a ser alimentado com 75% de metano, o que proporcionou maior estabilidade de trabalho.

Com os resultados obtidos (solução A e B), apresenta-se a Tabela 13, com a comparação da eficiência de ambas as soluções.

Tabela 13. Comparação da eficiência das soluções A e B.

Parâmetro	Solução A	Solução B
% de redução de H ₂ S	94,4%	96%
% de redução de NH ₃	77,37%	83,1%
% de redução de CO ₂	2%	6%
% aumento de CH ₄	2%	6%
Período de saturação (horas)	263 horas	209 horas
Funcionamento do motor	Estável	Estável
Vida útil do motor	46.880 horas	51.200 horas

A partir desta tabela, conclui-se que a solução B, se apresentou mais eficiente na remoção do gás sulfídrico (principal componente a ser removido do biogás), pois atingiu 96% de redução. A concentração de amônia reduziu 83,1% e a concentração de dióxido de carbono reduziu 6%. Consequentemente a concentração de metano aumentou 6%, melhorando a qualidade do biogás de 69% para 75% de metano, o que melhorou o funcionamento do motor, e proporciona uma vida útil de aproximadamente 51.200 horas para o grupo motor gerador de energia elétrica.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

As tecnologias convencionais para a remoção/separação dos compostos indesejáveis do biogás possuem limitações/gargalos tecnológicos, sendo os principais a necessidade de altas pressões no fluxo do biogás (para vencer a perda de carga dos equipamentos), os materiais utilizados para a depuração do biogás (adsorventes e absorventes) saturam rapidamente, maior número de manutenções, o que interrompe a continuidade operacional do equipamento e na maioria dos casos elevados custos.

O sistema proposto para a purificação do metano contido no biogás, devido à praticidade e melhor desempenho, quando comparado com os sistemas convencionais, configurou-se como um método e tecnologia inovadora, após a constatação dos requisitos de novidade, atividade inventiva, aplicação industrial e suficiência descritiva o que resultou num pedido de patente.

Após os testes operacionais (na situação real), por meio do qual foram confirmados os resultados de laboratório (percentual de redução do gás sulfídrico atingiu 96% e o potencial de redução da amônia atingiu 83,1%), a tecnologia foi objeto de uma transferência de tecnologia para a empresa Biogás Motores Estacionários LTDA.

Do ponto de vista ambiental, a tecnologia desenvolvida contribui para a redução dos impactos ambientais provocados pelo biogás (chuva ácida provocada pelo contato do gás sulfídrico com a água e, aquecimento global, causado pelo lançamento de dióxido de carbono na atmosfera), além de incentivar os produtores de suínos a tratar os dejetos de forma correta, pois é fato que o aproveitamento do biogás gerado em biodigestores anaeróbicos é uma alternativa lucrativa para os produtores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPECS - Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína. **De olho no mercado interno**. Revista Safra, São Paulo – SP, 2011.

ALVES, S. M.; MELO, C.F.M.; WISNIEWSKI, A. **Biogás: uma alternativa de energia no meio rural**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1980. 23p. (EMBRAPA-CPATU, Miscelânea, 4).

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

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://documentos.aidis.cl/Trabajos%20Poster/Tema%20VI%20-20Residuos%20S%F3lidos/VI-Euder-Brasil-1.doc>>.

Acesso em Janeiro de 2011.

ANGONESE, A. R; CAMPOS, A. T; ZACARKIM, C. E; MATSUO, M. S; CUNHA, F. **Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.10, n.3, p.745–750, 2006 Campina Grande, PB.

BARANCELLI, G. T. **Estudo da implantação de um biodigestor para produção de biogás e biofertilizante a partir de rejeitos da suinocultura**. Rio Grande do Sul: universidade federal do rio grande do sul, 2007. Trabalho de conclusão de curso.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://pt.scribd.com/doc/62176565/estimativa-da-producao-de-biogas-a-partir-de-dejetos-suinos-avaliacao-da-eficiencia-energetica-do-metano-e-geracao-de-creditos-de-carbono>>.

Acesso em março de 2011.

BAJRACHARYA, T. DHUNGANA, A; THAPALIYA, N; HAMAL, G. **Purification and compression of biogas: a research experience**. Journal of the Institute of Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 1-9, 2001.

BRASIL. Lei de Crimes Ambientais - Lei 9605 de 12 de fevereiro de 1998.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/104091/lei-de-crimes-ambientais-lei-9605-98#art54>>

Acesso em abril de 2012.

BRITO, A. S. Aperfeiçoamento no processo e equipamento de obtenção de metano puro a partir de biogás ou gás natural com alta concentração de dióxido de carbono.

PI: 8302548. Publicado em 18 de dezembro de 1984.

CALLES, A. Filtro para retenção de gás sulfídrico e retirada de umidade de biogás.

PI: 0703011-8 A2. Publicado em 10 de março de 2009.

CAMILOTTI, D; CAMILOTTI, F; CAMPOS, J. Processo e equipamento para separação e depuração do biogás. PI: 0804416-3 A2. Publicado em 13 de julho de 2010.

CAMPOS, S. D. Tóxicos/Intoxicações, Gás Sulfídrico (H₂S). Publicado por: Dra. Shirley de Campos em 31/08/2003.

Documento eletrônico disponível na URL:

<www.drashirleydecampos.com.br/noticias/5758>

Acesso em maio de 2012.

CANEVATI, S. Separação de misturas CH₄/CO₂/N₂ por Processos Adsorptivos.

Portugal – Porto: Universidade do Porto. 2005. 256p. Tese (Doutorado).

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12021/2/Texto%20integral.pdf>>

Acesso em maio de 2013.

CATAPAN, A; CATAPAN, D. C; CATAPAN, E. Alternative forms of electricity generation from the biogas: An approach to the cost of generation of energy. Custos e

@gronegocio. Revista on line - v. 7, n. 1 - Jan/Apr - 2011.

CATELO, A. O; DORADO, M. A; AGBISIT, E. **Backyard and commercial piggeries in the philippines: Environmental consequences and Pollution control options.**

Infohouse, Estados Unidos, 2004.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://infohouse.p2ric.org/ref/13/12938.pdf>>

Acesso em abril de 2012.

CHASTAIN, J. P; CAMBERATO, J. J; ALBRECHT, J. E; ADAMS, J. **Swine Manure Production and Nutrient Content.** *CAMM Poultry Chapter 3a*, last edit - January, 2003 jpc.

Documento eletrônico disponível na URL:

<https://www.clemson.edu/extension/livestock/livestock/camm/camm_files/swine/sch3a_03.pdf>

Acesso em maio de 2012.

COSTA, J. A. V; ANDRADE, M. R. **Produção e purificação de biogás utilizando biomassa de microalgas e/ou cianobactérias.** PI: 0703245-5 A2. Publicado em 10 de fevereiro de 2009.

CROMWELL, G. **Nutrients in Swine Manure - Potential Environmental Pollutants.** *The University of Kentucki – College of agriculture, 2001.*

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://www.uky.edu/Ag/AnimalSciences/pubs/nutrientsinswinemanurepotentialpollutants.pdf>>

Acesso em abril de 2012.

CURIONI, A. **Processo de purificação de biogás e correspondente equipamento.** PI: 8503745. Publicado em 17 de março de 1987.

CURIONI, A. **Processo de depuração de biogás e correspondente equipamento utilizado para depuração de biogás.** PI: 0504929-6 A. Publicado em 7 de agosto de 2007.

DARTORA, V; PERDOMO, C. C; TUMELERO, I. L. **Manejo de dejetos de suínos.** Boletim informativo Bipers, nº 11 – ano 7, Concórdia – SC, 1998.

Documento eletrônico disponível na URL:

<www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=publicacoes&cod...186>

Acesso em fevereiro de 2012.

DIESEL, R. **Articulação da Embrapa Suínos e Aves com a Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural – EMATER/RS.**

Boletim Informativo de Pesquisa - Embrapa Suínos e Aves e Extensão EMATER/RS. 2002.

DUPONT; A, ACCORSI. **Journal of Hazardous Materials**, Volume 136, Issue 3, 25 August 2006, Pages 520-525.

Documento eletrônico disponível na URL

<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGF-4J7307F-3&_user=10&_coverDate=08%2F25%2F2006&_alid=1094090621&_rdoc=33&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5253&_sort=r&_docanchor=&view=c&_ct=8803&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=77ae0e11dc8c1b70c17ce16a41adc8c1>.

Acesso em maio de 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária. **Produção animal.** Brasília – DF, 2010.

FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY. **Biogas process for sustainable development.** 2012.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://sarasparivar.org/PDF/Biomass-for-Rural-Automotive-Applications.pdf>>

Acesso em maio de 2012.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura.** Cascavel – PR. Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE. 211p. Dissertação (Mestrado), 2012.

FILHO, L. S. C. **Unidade de limpeza de gás metano proveniente do biogás de aterros sanitários, de estações de tratamento de esgoto sanitário e biodigestores, através de processo de coleta, retenção de poluentes por meio de filtragens, torre de lavagem, com finalidade de aproveitamento energético.** PI 0400658-5 A. Publicado em 11 de outubro de 2005.

FRARE, L. M; GIMENES, M. L; PEREIRA, N. C. **Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás.** Revista Engenharia Sanitária e ambiental, v. 14, n. 2, pg. 167-172, abr/jun, 2009.

Documento eletrônico, disponível na URL:

<<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a04v14n2.pdf>>

Acesso em novembro de 2012.

GAMA GASES. **Propriedades dos gases – Amônia.** Revisão 4, 2007.

Documento eletrônico disponível na URL:

<http://www.gamagases.com.br/propriedades_amoniam.htm>

Acesso em maio de 2012.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR.** Florianópolis - SC. Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC. 105p. Dissertação (Mestrado), 2003.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://pt.scribd.com/doc/50676170/28/Os-Dejetos-Suinos-e-a-Poluicao-do-Solo-e-da-Agua>>

GUO, L. G. **Potential of biogas production from livestock manure in China-GHG emission abatement from manure-biogas-digestate.** Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. System Master's Thesis within the Industrial Ecology programme, 2010.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/136686.pdf>>

Acesso em maio de 2012.

HEYWOOD, J. **Internal Combustion Engines Fundamentals**. McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-100499-8. 1988.

HORIKAWA, M. S. **Chemical absorption of H₂S for biogás purification**. *Braz. J. Chem. Eng.* São Paulo, v.21, n.3, p.415-422, July/Sept, 2004.

HOUSE, H; **Alternative energy sources – biogas production**. London Swine Conference – Today's Challenges... Tomorrow's Opportunities 3-4 April 2007.

Documento eletrônico disponível na URL:

<http://www.londonwineconference.ca/proceedings/2007/LSC2007_HHouse.pdf>

Acesso em fevereiro de 2012.

HUMBAD, A; KUMAR, S; BABU, B. V. **Carbon credits for energy self sufficiency in rural India – A case study**. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research 2009 Volume (issue) 22(2): 187-197*

Documento eletrônico disponível na URL:

<[http://discovery.bits-pilani.ac.in/~bvbabu/EEST%20Part%20A%2022%20\(2\)%20187-197.pdf](http://discovery.bits-pilani.ac.in/~bvbabu/EEST%20Part%20A%2022%20(2)%20187-197.pdf)>

Acesso em Julho de 2012.

IBGE - **Efetivo dos rebanhos por tipo de rebanho** – série PPM01-agropecuária, 2008.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/producaoagropecuaria/defaulttab.shtm>>

Acesso em Maio de 2011.

Instituto Carbono Brasil. **Mudanças climáticas – Gases do efeito estufa, 2013**.

Documento eletrônico, disponível na URL:

<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/mudancas_climaticas/gases_do_efeito_estufa>

Acesso em março de 2013.

KOSSMANN, W.; PONITZ, U. **Digest V.1 Biogas Basics**. Information and Advisory Service. 1999.

LARSEN, R.E; MINER, J. C; BUCKHOUSE, J.A; BUCKHOUSE, M. **Water quality benefits of depositing manure away from streams.** Bioresource Technology, 48:113-118. 1994.

Documento eletrônico disponível na URL:

< <http://www.agronext.iastate.edu/immag/pubs/smanure.pdf>>

Acesso em abril de 2012.

LAUFER, A. **Avaliação de processo alternativo de biodigestão para tratamento de resíduos sólidos orgânicos domésticos.** Toledo – Pr. Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE. 111p. Dissertação (Mestrado).

LANDAHL, G. **Biogas as Vehicle Fuel – An European Overview.** Trendsetter Report N. 2003:3. Estocolmo, Suécia. 2003.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://213.131.156.10/xpo/bilagor/20040115134708.pdf>>

Acesso em: 01/2010.

LINDE-GAS. **Dióxido de carbono, 2009.** Documento eletrônico disponível na URL:

<http://www.lindegas.com.br/International/Web/Lg/BR/LikeIgbr.nsf/docbyalias/prod_ig_co2>

Acesso em junho de 2012.

LOVATTO, P. A. **Manejo de dejetos.** Revista Suinocultura Geral, Capítulo 09 Dejetos. Santa Maria – RS, 2005.

Documento eletrônico disponível na URL:

< http://w3.ufsm.br/suinos/CAP9_dej.pdf>

Acesso em abril de 2012.

MASSÉ, D; MASSE L; XIA, L; GILBERT, Y. **Biogas scrubbing, compression and storage:perspective and prospectus in Indian context S.S.** Rajendra Prasad Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology, New Delhi 110 016, India, september 2004.

Documento eletrônico disponível na URL:

<http://translate.googleusercontent.com/translate_c?depth=1&hl=pt-BR&langpair=en|pt&rurl=translate.google.com.br&u=http://jas.fass.org/content/88/13_electronic_suppl/E112.full&usg=ALkJrhgxfuk0ki21KFb-8x0ctd4MmREzSA>

Acesso em junho de 2012.

MATTIAS, J. L; CERETTA, C. A; NESI, C. N; GIROTTO, E; TRENTIN, E. E; LOURENZI, C. R; VIEIRA, R. C. B. **Copper, zinc and manganese in soils of two watersheds in Santa Catarina with intensive use of pig slurry.** Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.34 no.4 Viçosa July/Aug. 2010.

Documento eletrônico disponível na URL:

<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832010000400040&script=sci_arttext>.

Acesso em março de 2011.

MERCADO, A. G. **Remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás em instalação piloto com óxido de ferro.** Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, 124p. Dissertação (Mestrado), 2010.

MERCANDO, C. **Sistema para beneficiamento do biogás e processo para lavagem, separação e o aproveitamento do gás metano nele contido.** PI: 8400579. Publicado em 29 de janeiro de 1985.

OLIVEIRA, P.A. **Programas eficientes de controle de dejetos na suinocultura,** In: I Congresso Latino Americano de Suinocultura, 143-158, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais.** Concórdia: EMBRAPA - Suínos e aves.

ORRICO, A. C. A; JUNIOR, J. D. L; JUNIOR, M. A. O. **Caracterização e biodigestão anaeróbica dos dejetos de caprinos.** Eng. Agric. Jaboticabal, v.27, n.3, p. 639-647, dez, 2007.

ORTIGÃO, R. L. C. R; MIRANDA, K. H. F; MACHADO, C. R. **Sistema de dessulfurização de biogás.** PI: 9601138-6 A. Publicado em 6 de janeiro de 1998.

ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestores rurais: modelos Indiano, Chinês e Batelada**. Jaboticabal, FUNEP, 1991. 3p.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – estudo de caso**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 152p. Dissertação (Mestrado), 2000.

RABOBANK; Food & agribusiness research. **The world beef industry: market study**. Holanda, 2004.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://www.rabobank.com/publications/studies/mkt12.htm>>

Acesso em junho de 2012.

RASI, S. **Biogas composition and upgrading to Biomethane**. Academic dissertation to be publicly discussed, by permission of the Faculty of Mathematic and Science of the University of Jyväskylä, in the Building Ambiotica, YAA303, on July 3, 2009.

RODRIGUES, M. **Processo e equipamento para filtragem do biogás**. PI: 0804787- A2. Publicado em 22 de setembro de 2009.

SAMPAIO, C. A. D. P; NAAS, I. D. A; SALGADO, D. D. A. **Amônia, gás sulfídrico, metano e monóxido de carbono na produção de suínos**. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.5, n.2, 2006. Documento eletrônico disponível na URL:

<http://rca.cav.udesc.br/rca_2006_2/artigo_sampaio.pdf>.

Acesso em maio de 2012.

SCHMID, M. **O mercado de créditos de carbono para projetos energéticos**. 5º Congresso Internacional de Bioenergia - Curitiba, PR, Agosto de 2010.

SILVA, F. C. M. **Tratamento dos dejetos suínos utilizando lagoas de alta taxa de degradação em batelada**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. 115p. Dissertação (Mestrado).

SOUZA, C. D. F; et al. **Produção volumétrica de metano – dejetos suínos**. Ciência Agrotecnologia, Lavras, volume 32, nº 1, p. 219-224, jan/fev, 2008.

STRAPAZZON, A. J. **Avaliação da eficiência de tratamento de dejetos de suínos, utilizando um procedimento de compostagem misto, em propriedade rural no vale do Taquari, RS, Brasil.** Santa Cruz do Sul. Universidade de Santa Cruz do Sul, 2008. 64p. Dissertação (Mestrado).

TECPAR – Instituto de tecnologia do Paraná. Curitiba-PR, 2012.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://portal.tecpar.br/index.php/pt/component/search/?searchword=produ%C3%A7%C3%A3o+de+su%C3%ADnos&ordering=&searchphrase=all>>

Acesso em maio de 2012.

TURDERA, M. V; YURA, D. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados.** Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul - UEMS. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural, 2006.

Documento eletrônico disponível na URL:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000100062&script=sci_arttext>

Acesso em fevereiro de 2012.

VIJAY, V. K; CHANDRA, R; SUBBARAO, P. M. V; KAPDI, S. S. **Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications.** Ministry of Non-conventional Energy Sources Report, Renewable energy in India and business opportunities, MNES, Govt. of India, New Delhi, 2001.

ZAHN, J. A; HATFIELD, Y. L; DO, Y. S; SPIRITO, A. A. D. **pollution from swine production facilities differing in waste management practice.** Water Environment Federation Hyatt Regency, Cincinnati, OH AIR, April 16-19, 2000.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://www.sraproject.org/wpcontent/uploads/2007/12/airpollutionfromswineproduction.pdf>>

Acesso em abril de 2012.

Zhao, Q; Leonhardt, E; MacConnel, C; Freae, C; Chen, S. **Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion.** Climate Friendly Farming, CSANR Research Report 2010 – 001.

Documento eletrônico disponível na URL:

<<http://csanr.wsu.edu/publications/researchreports/CFF%20Report/CSANR2010-001.Ch09.pdf>>

Acesso em outubro de 2012.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012. 52 p. Dissertação (Mestrado).

Documento eletrônico, disponível na URL:

<http://cacphp.unioeste.br/pos/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Helcio_A_Zilotti.pdf>

Acesso em Fevereiro de 2013.

WILLWERS, E.M; ALVES, L. R; STADUTO, J. A.R; GERMANN, C. **Análise da concentração dos setores de criação, de abate e de processamento da carne de suínos no Oeste do Paraná.** RACE, UNOESC, v. 11, n. 1 Edição Especial Agronegócios, p. 103-130, jan./jun. 2012. Documento eletrônico disponível na URL:

<editora.unoesc.edu.br/index.php/race/article/download/1452/pdf> Acesso em Maio de 2012.