

ESTADO DA ARTE DAS ALTERNATIVAS PARA REMOÇÃO DO SULFETO DE HIDROGÊNIO (H₂S) DO BIOGÁS DA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS DA AGROPECUÁRIA, SEUS USOS, BENEFÍCIOS E VIABILIDADE ECONÔMICA DE 1969 A 2010 – 40 ANOS DE PESQUISAS

REVIEW OF ALTERNATIVES FOR REMOVING HYDROGEN SULFIDE (H₂S) FROM BIOGAS FROM ANAEROBIC FERMENTATION OF AGRICULTURAL WASTE AND ITS USES, BENEFITS AND ECONOMIC VIABILITY FROM 1969 TO 2010 – 40 YEARS OF RESEARCH

Neiton Silva Machado¹
Cristina Akemi Mogami²
Kátia Araujo da Silva³
Fábio Freire de Oliveira⁴

RESUMO: O objetivo desta revisão é apresentar os principais inconvenientes do sulfeto de hidrogênio (H₂S) no biogás da fermentação anaeróbia de dejetos agropecuários e expor as alternativas testadas por diversos autores, nas últimas décadas, para remover o H₂S do biogás. O método mais indicado para determinada situação está atrelado aos custos de instalação, facilidade de obtenção, manutenção e operação, além da eficiência dos sistemas de purificação. Existem inúmeras técnicas de remoção de H₂S que vêm sendo desenvolvidas no mundo por meio de processos de oxidação a seco; processos de adsorção; processos de biotratamento; processos de absorção física e processos de absorção química. No entanto, atualmente no Brasil são poucas as alternativas de baixo custo para purificação de biogás da fermentação anaeróbia de dejetos da agropecuária. O desenvolvimento de tecnologias e/ou processos para prover o seu aproveitamento pode contribuir com a disseminação de seu uso, além de ser uma alternativa interessante para empresas que queiram produzir e difundir sistemas de purificação de biogás da fermentação anaeróbia de dejetos da agropecuária. 190

Palavras- chave: Biodigestor. Filtro. Ácido sulfídrico.

¹ Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor da Universidade Federal do Vale do São Francisco (Univasf); Campus Ciências Agrárias (CCA); Colegiado de Engenharia Agrônômica (Ceagro). Petrolina, PE – Brasil.

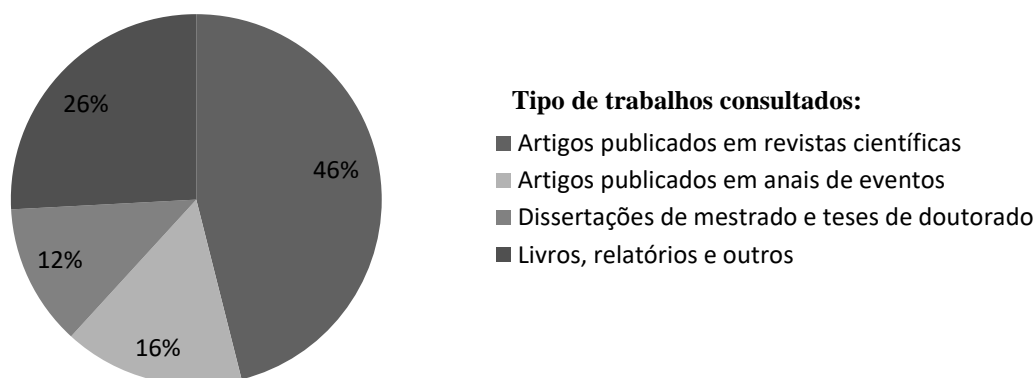
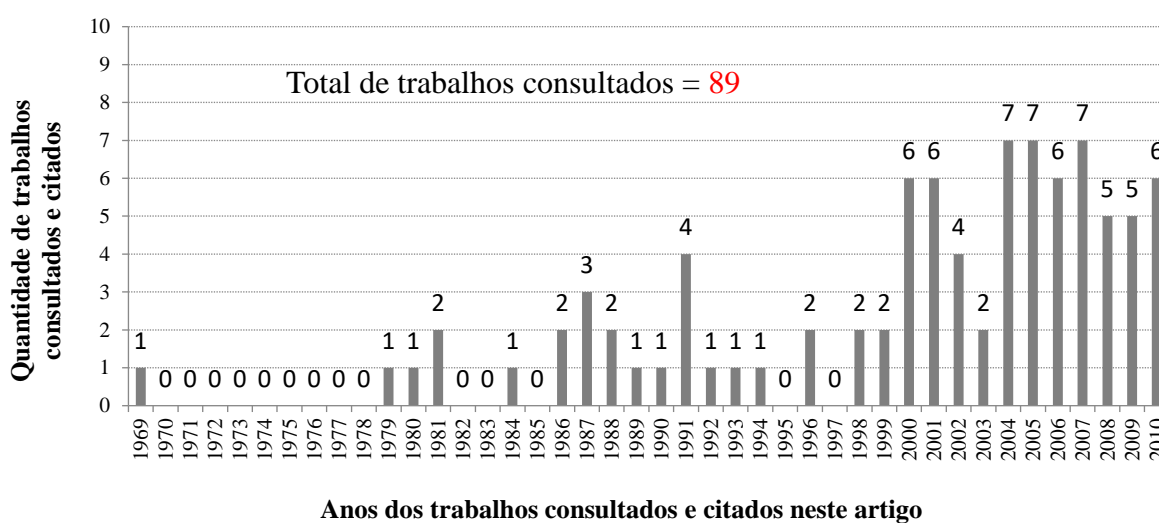
² Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professora do Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertão), Campus Zona Rural. Petrolina, Pernambuco, Brasil.

³ Mestre em agronomia/produção vegetal pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, (Univasf) – Campus Ciências Agrárias (CCA). Petrolina - Pernambuco - Brasil.

⁴ Doutor em técnicas energéticas e nucleares pela Universidade de Pernambuco (UFPE). Professor do Instituto Federal do Sertão Pernambucano (IFSertão), Campus Zona Rural. Petrolina - Pernambuco - Brasil.

ABSTRACT: The objective of this review is to present the main drawbacks of hydrogen sulfide (H₂S) in biogas from anaerobic fermentation of agricultural waste and to expose the alternatives tested by several authors, in the last decades, to remove H₂S from biogas. The most suitable method for a given situation is linked to installation costs, ease of obtaining, maintenance, and operation, in addition to the efficiency of purification systems. There are numerous H₂S removal techniques that have been developed around the world through dry oxidation processes; adsorption processes; biotreatment processes; physical absorption processes and chemical absorption processes. However, currently in Brazil there are few low-cost alternatives for the purification of biogas from anaerobic fermentation of agricultural waste. The development of technologies and/or processes to provide its use can contribute to the dissemination of its use, in addition to being an interesting alternative for companies that want to produce and disseminate biogas purification systems from the anaerobic fermentation of agricultural waste.

Keywords: Biodigestor. Filter. Hydrogen sulfide.



I. INTRODUÇÃO

No Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (Proinfa), criado com base na Lei nº 10.438/02 (BRASIL, 2002), tem como objetivo o aumento da participação da energia elétrica gerada por produtores independentes autônomos a partir de fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) e biomassa no sistema interligado nacional. Abre-se, portanto, uma oportunidade para sistemas de geração de energia elétrica, utilizando biogás como fonte primária de energia.

O modelo energético brasileiro recomenda a diversificação de fontes energéticas, sob a premissa da existência de tecnologia disponível no país. Também, neste enfoque, a Agenda 21 da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente estabeleceu na década de 90, como meta, a substituição de 20% das fontes energéticas por renováveis até o ano 2000 e 50% até o ano de 2020. Segundo os dados dos relatórios técnicos dos grupos de trabalhos do IPCC 2007 (Intergovernmental Panel on Climate Change), a concentração de metano na atmosfera vem aumentando significativamente desde 1750. Este aumento significativo de emissões de metano no mundo mais da metade é de origem antropogênica.

Atendendo a estas premissas, Souza et al. (2004) afirmam que o meio rural pode se destacar para fins energéticos por meio do processo de digestão anaeróbia de resíduos agrícolas. Desta forma, a produção do biogás purificado (com remoção de H₂S e CO₂) resulta em um gás combustível com, aproximadamente, 95% de metano e um alto poder calorífico.

Neste contexto, observamos na 27ª edição da COP (Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), que o Brasil reafirmou o seu legado de uma nação que prioriza a sustentabilidade sem abrir mão de seu desenvolvimento. Ademais, com a publicação da PORTARIA MMA Nº 232, DE 14 DE SETEMBRO DE 2022, que define critérios que incentivam o financiamento de programas e os projetos para Escolas+ Verdes, espera-se que haja um incremento significativo nos financiamentos e, conseqüentemente, nas pesquisas com biogás no Brasil.

192

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Biogás

O biogás é um gás resultante da fermentação da matéria orgânica feita por microorganismos na ausência de oxigênio. Este processo ocorre, basicamente, dentro de uma câmara fechada (biodigestor) ilustrado na Figura 1, onde o dejetto é degradado e o gás (biogás) resultante desta oxidação anaeróbia é canalizado e empregado nos mais diversos fins, tais como, aquecimento, resfriamento e geração de energia elétrica.

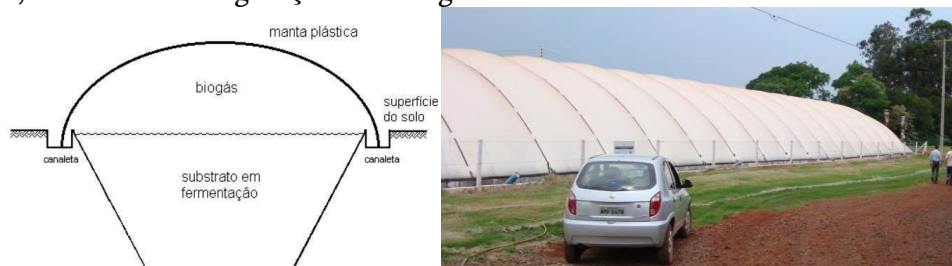


Figura 1. Ilustração de um biodigestor tubular “plug-flow” com um carro popular e duas pessoas para referência de tamanho do equipamento

Fonte: arquivo pessoal do primeiro autor.

O metano (CH₄), principal componente do biogás, não tem cheiro, cor ou sabor, porém os gases compostos por enxofre, presentes no biogás, possuem odor fétido similar a “ovo podre”.

A composição típica do biogás da fermentação anaeróbica de dejetos de suínos encontra-se representada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição típica do biogás da fermentação anaeróbica de dejetos de suínos

GÁS	SÍMBOLO	% NO BIOGÁS
Metano	CH ₄	50 a 80%
Dióxido de Carbono	CO ₂	20 a 40%
Hidrogênio	H ₂	1 a 3%
Nitrogênio	N ₂	0,5 a 3%
Sulfeto de Hidrogênio e Outros	H ₂ S, CO, NH ₃	1 a 5%

Fonte: (LA FARGE, 1979), (PINHEIRO,1999), (CCE, 2000) e (SOUZA, 2004).

Esta composição confere ao biogás um poder calorífico aproximado de 23000 kJm⁻³, o qual pode ser usado como fonte energética em propriedade rural. Entretanto, o metano puro, em condições de pressão de 101325 kPa e temperatura de 0 °C, possui poder calorífico equivalente a 35638 kJm⁻³. O biogás, com teor de metano variando entre 50% e 80% em volume, possui poder calorífico inferior, entre 17880 e 28840 kJm⁻³. Assim, cada 10% de CO₂ na mistura gasosa de biogás corresponde a, aproximadamente, 3600 kJm⁻³ a menos em seu poder calorífico (SANTOS, 2000).

Para efeito de cálculos, o Ministério de Minas e Energia utiliza poder calorífico médio equivalente de 19800 kJm⁻³ de biogás. Porém, dependendo da eficiência do processo de biodigestão, influenciado por fatores como carga orgânica, concentração de nutrientes, concentração de sólidos, pH, relação da demanda química de oxigênio e sulfato (DQO/SO₄⁻²), temperatura e pressão durante a fermentação, o biogás pode conter mais ou menos metano.

Biodigestores de tratamento de águas residuárias são ecossistemas muito complexos que contém muitas espécies microbianas. Em tais culturas mistas, as Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) competem na presença de sulfato com as arqueias metanogênicas e com as bactérias produtoras de hidrogênio por substratos disponíveis. Apesar dessa competição estar relacionada com os valores de pH do meio e a relação da concentração de matéria orgânica (DQO) e sulfato na água residuária, a consequência desta competição determinará a quantidade de produção de metano e, conseqüentemente, de H₂S no biogás.

2.2. Gás sulfídrico

O gás sulfídrico é um gás altamente tóxico e irritante, que atua sobre o sistema nervoso, os olhos e as vias respiratórias. O sulfeto de hidrogênio é conhecido pelo seu cheiro característico de “ovo podre”. A percepção inicial do seu odor varia de indivíduo para indivíduo. Porém, a concentração de 0,13 ppm (0,18 mg.m⁻³) é considerada suficiente para que o odor comece a ser percebido (DENG, 1992).

Por outro lado, segundo pesquisas de Beauchamp et al. (1984), os seres humanos podem perder a capacidade de sentir o odor de H₂S em concentrações acima de 100 a 150 ppm (140 - 210 mg.m⁻³), provavelmente devido a uma fadiga olfativa. Este é um caso perigoso, pois não pressentem o perigo da toxicidade aguda do sulfeto de hidrogênio no sistema nervoso e no pulmão. A intoxicação letal por sulfeto de hidrogênio ocorre em concentrações de 1000 a 2000 ppm (1390 a 2780 mg.m⁻³), devido à paralisia do centro respiratório e, conseqüentemente, a parada cardio-respiratória e, posteriormente, a morte (ACGIH, 1991).

Ademais, a intoxicação pela substância pode ser aguda, subaguda e crônica, dependendo da concentração do gás no ar, duração, frequência da exposição e da suscetibilidade individual.

Em geral, a produção de H₂S em sistemas anaeróbios tratando água residuária é um processo considerado indesejado, dado que sua produção causa uma série de problemas, como toxicidade (O'FLAHERTY; COLLERAN, 2000), corrosão (VINCKE et al., 2001), emissão de compostos odorantes (LENS; KUENEN, 2001), aumento da DQO no efluente líquido, bem como redução da qualidade e quantidade de biogás (LENS et al., 1998).

2.3. A corrosão associada ao H₂S

A corrosão associada ao H₂S pode ser definida como a deterioração total, parcial, superficial ou estrutural dos materiais por ataque químico ou eletroquímico, associado ou não aos efeitos mecânicos, sendo, então, classificada como corrosão química e corrosão eletroquímica (Merçon et al 2004; Mainier e Viola 2005)

2.3.1. Corrosão química

A corrosão química associada ao sulfeto de hidrogênio é um processo que corresponde ao ataque do sulfeto de hidrogênio anidro diretamente sobre o material metálico, sem a presença de água e sem a transferência de elétrons de uma área para outra. Inicialmente, ocorre a adsorção do gás (H₂S) na superfície do metal ou liga e, posteriormente, o ataque, formando uma película de sulfeto.

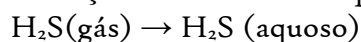
Ademais, as propriedades da película de sulfeto formadas na superfície dependerão de vários fatores tais como: a afinidade do metal ao H₂S, rugosidade, temperatura e pressão. O aumento da temperatura, da pressão e altas concentrações de sulfeto de hidrogênio aceleram a taxa de corrosão e, conseqüentemente, a película fica porosa e não aderente. Alguns aços-carbono de baixa liga podem formar uma película protetora, que acaba funcionando como uma "barreira" útil contra o intemperismo, o que torna este material mais resistente do que outros aços. Também se observa em gasodutos a formação de uma camada escura de sulfeto ferroso (FeS), preferencialmente, na geratriz superior (Machado, 2010).

194

2.3.2. Corrosão eletroquímica

Trata-se de um processo espontâneo, passível de ocorrer quando o metal ou liga está em contato com um eletrólito, onde acontecem, simultaneamente, as reações anódicas e catódicas. A transferência dos elétrons da região anódica para a catódica é feita por meio de um condutor metálico, e uma difusão de ânions e cátions na solução fecha o circuito elétrico. A intensidade do processo de corrosão é avaliada pelo número de cargas de íons que se descarregam no cátodo ou, então, pelo número de elétrons que migram do ânodo para o cátodo (Machado, 2010).

Neste caso, o eletrólito é uma solução de sulfeto de hidrogênio em água, dissociando-se segundo as reações definidas nas equações 1 e 2:



Com base nas constantes de dissociação que mostra a fração molar das espécies químicas: H₂S (aquoso), HS⁻ (sulfeto ácido) e S₂⁻ (sulfeto) em função do pH, verifica-se que a probabilidade do acontecimento da reação de dissociação (Eq. 1) é muitas vezes maior (cerca de 10⁸) do que a reação (Eq. 2), significando a pouca probabilidade da existência de íons S₂⁻ (sulfeto) em pH ácido. No entanto, a fração HS⁻ (sulfeto ácido) ocupa uma faixa de pH entre 4,5 a 12, conforme ilustrado na Figura 2.

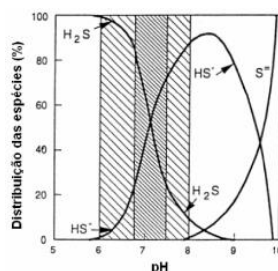


Figura 2. Distribuição de espécies de sulfeto para diferentes valores de pH; faixa de pH da digestão anaeróbia e pH ótimo para a digestão metanogênica.

Fonte: Lens et al. (1998).

A corrosão eletroquímica associada ao sulfeto de hidrogênio pode ser classificada em: corrosão por pite em presença de H₂S; corrosão grafítica em ferro fundido na presença de H₂S; corrosão microbológica por ação das bactérias redutoras de sulfato; corrosão sob tensão e corrosão sob fadiga.

O H₂S pode ser quantificado quimicamente pela passagem do biogás por uma solução aquosa de CuSO₄. A reação forma um precipitado (sólido) de coloração escura de fácil visualização, de acordo com a reação indicada na equação 3.



A determinação pode ser de maneira qualitativa (presença ou ausência de precipitado) ou quantitativa (massa de precipitado formado). Cuidados especiais devem ser tomados durante a amostragem de biogás no sentido de evitarem-se conclusões errôneas a respeito da presença e concentração de H₂S no biogás. Entretanto, a técnica mais eficiente de quantificação e caracterização de gases é a cromatografia gasosa (MACHADO, 2010).

2.4. Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Inúmeras técnicas de remoção de H₂S vêm sendo desenvolvidas, no mundo, nas últimas décadas, por meio de processos de oxidação a seco; processos de adsorção; processos de biotratamento; processos de absorção física e processos de absorção química. Dentre elas estão: adição de ar/oxigênio ao biogás (oxigenação), adição de cloreto férrico ao conteúdo do biodigestor, utilização de óxidos de ferro (limalha de ferro), carvão ativado, lavagem com hidróxido de sódio (NaOH) e lavagem com água também são citados (SANTOS, 2000). A Tabela 3 apresenta as principais técnicas de remoção de impurezas do biogás de forma mais sintetizada.

Tabela 3. Técnicas de remoção de impureza do biogás

Impureza	Descrição geral	Detalhes
Água	Adsorção	Sílica gel
		Peneira molecular
	Absorção	Alumina
		Etileno Glicol
Refrigeração	Adsorção	Temperatura (- 6,7 °C)
		Selexo
		Resfriamento a 2 °C
Hidrocarbonetos	Absorção	Carvão ativado
		Óleo leve
		Etileno glicol
		Selexo
		Temperatura entre (-6,7 e -33,9 °C)

	Combinação	Refrigeração com etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos
		Selexol
		Flúor
		Rectisol
	Adsorção	Soluções de sais alcalinos
		Potássio quente
		Potássio quente inibido
		Alcanolaminas
		Mono, di-tri-etanol amina
		Deglicolamina
		Ucarsol-CR
		Peneira molecular
		Carvão ativado
		Membrana de fibra oca
Siloxinaz	Separação por membrana	
	Adsorção	Carvão ativado

Fonte: 1(ALVES, 2000); 2(CAPSTONE, 2001)

Atualmente, no Brasil, são poucas as alternativas de baixo custo disponíveis no mercado para purificação de biogás da fermentação anaeróbia de dejetos da agropecuária. Logo, o desenvolvimento de tecnologias e/ou processos para prover o seu aproveitamento podem contribuir com a disseminação de seu uso, além de ser uma alternativa interessante para empresas que queiram produzir e difundir sistemas de purificação de biogás. Pois, a procura por novas fontes de energia sugere o biogás como um meio de prover hidrogênio para operação de células a combustível. Entretanto, ele necessita ser purificado antes de ser utilizado, uma vez que contém enxofre na forma de H₂S, que é um gás com odor fétido, tóxico e corrosivo (YUAN; BANDOSZ, 2007).

196

O tratamento bioquímico é efetivo para baixas concentrações de contaminantes em grande quantidade de ar. Por outro lado, o tratamento químico requer adição de substâncias agressivas, causando problemas ao meio ambiente, enquanto os processos físicos não eliminam, mas transferem os poluentes para um novo fluido a ser tratado (YUMONO; LAMMERS, 2004).

Buismanet al. (1991) relataram sobre remoção de sulfeto em reatores de biofilme pelas sulfobactérias incolores, as quais convertem sulfeto a enxofre elementar. Esses autores reportaram que foram obtidas eficiências de remoção acima de 90%, sob tempo de retenção hidráulica de 19 minutos. Outros microrganismos, não fotossintetizantes, oxidam sulfeto a enxofre ou a sulfato, reduzindo oxigênio e nitrato à H₂O e N₂, respectivamente.

Segundo Horikawaet al. (2004), que trabalharam com absorção química de H₂S para purificação de biogás, por meio de catálise via Fe/EDTA, comparado ao tratamento de absorção em água pura, comprovaram alto potencial de remoção do H₂S contido no biogás, alcançando até 100% de eficiência no tratamento utilizando Fe/EDTA, como catalisador.

Easteret al. (2005) comparou três diferentes materiais de preenchimento de biofiltro (solo, composto e meio sintético) na remoção de odor, H₂S, mercaptana, carbonil sulfeto e dimetil sulfeto. O biofiltro de solo proporcionou o melhor desempenho ao tratar odor, H₂S, mercaptana e carbonil sulfeto; e uma eficiência média de remoção de H₂S de 99% foi alcançada.

Magalhãeset al. (2006), ao desenvolver e avaliar um sistema de purificação de biogás, por meio de uma coluna de absorção de 2,5 m de altura e de 0,30 m de diâmetro, com seu interior preenchido com tubos de PVC rígido de 20 mm de diâmetro, com pressões variando entre 300 e 500 kPa e vazão de biogás de 0,0114 e 0,039 m³.min⁻¹, conseguiram aumentar o poder calorífico do biogás em 57%, por unidade de massa.

Koet al. (2006) estudaram a viabilidade e o potencial da utilização de solo vermelho como adsorvente para remoção do H_2S constituinte de gás de carvão mineral, utilizado a alta temperatura na gaseificação integrada de ciclo combinado.

Yuan e Bandosz(2007) verificaram a aplicabilidade de utilização de uma mistura de lama da indústria de galvanização de metal e lodo de esgoto, pirolisadas a 650, 800 e 950 °C, como fontes de adsorventes para remoção de H_2S do biogás concluíram que a remoção do sulfeto de hidrogênio nos materiais obtidos é complexa devido à competição entre H_2S e CO_2 pelos centros de adsorção e desativação desses centros pelo CO_2/H_2CO_3

Seredychet al. (2008) avaliaram o efeito da adição das cinzas de carvão ao lodo de esgoto pirolisado a 950 °C na remoção de sulfeto de hidrogênio do biogás e do ar, e concluíram que a adição de cinzas diminuiu a capacidade de dessulfurização.

Pipatmanomaiet al. (2009) realizaram avaliação econômica do uso de biogás para produção de eletricidade, com e sem sistema de remoção de H_2S , por meio de carvão ativado impregnado com 2% de iodeto de potássio, em pequenas explorações suínícolas na Tailândia, e concluíram que a eficiência de remoção de H_2S pode chegar a 100% com adsorção de 0,062 kg de $H_2S.kg^{-1}$ do adsorvente.

Lar e Xiujin (2009) estudaram, em escala laboratorial, a remoção de H_2S de biogás de água residuária de laticínio, utilizando como reagente o $FeCl_3$, concluindo que altas concentrações de H_2S na forma de FeS podem ser removidas totalmente do biogás, utilizando-se o $FeCl_3$ em digestor anaeróbio operado em batelada.

Osorio e Torres (2009) investigaram a eficiência de purificação do biogás com lavagem em água seguido de carvão ativado, para ser usado como biocombustível para veículos, e concluíram que, a partir da filtração, o efluente apresentou uma concentração de H_2S menor que 1 ppm e zero ou indetectáveis valores foram obtidos para até 58 elementos-traço analisados.

Xuet al. (2010), avaliando a tolerância de células combustíveis revestidas e não revestidas com $Ni-CeO_2$, aos efeitos do H_2S proveniente do biogás sintético, na concentração de 20 ppm de H_2S , chegaram à conclusão de que os efeitos eletroquímicos do H_2S causam grave degradação das células não revestidas quando operadas com biogás, levando à completa falha mecânica. Entretanto, a célula combustível revestida de $Ni-CeO_2$, apresentou excelente estabilidade durante o funcionamento com CH_4 e alguma tolerância à contaminação de H_2S .

Tippayawong e Thanompongchart (2010) trabalhando na melhoria da qualidade do biogás por meio da remoção simultânea de CO_2 e H_2S em um reator de coluna, utilizando soluções aquosas de hidróxido de sódio ($NaOH$), hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e mono-etanolamina (MEA) em fluxo contracorrente ao biogás, concluíram que as soluções foram eficazes em reagir com o CO_2 do biogás, com eficiência de remoção de mais de 90%. O H_2S foi removido para limite inferior à detecção. A saturação foi alcançada em cerca de 50 min para o $Ca(OH)_2$, e 100 min para $NaOH$ e MEA, respectivamente.

As tecnologias mais sofisticadas de tratamento de dejetos de suínos, como por exemplo, a separação de fases, tratamentos biológicos (lagoas anaeróbias, estabilizadoras ou facultativas) e etc., estão fora do alcance da grande maioria dos produtores, visto seu custo de aquisição. Por isso, uma das alternativas que vem sendo utilizada pelos suinocultores, e que tem demonstrado grande eficácia, é a utilização do biogás para gerar energia e diminuir a poluição provocada pelos dejetos das granjas (BECK, 2007).

O emprego de tecnologia da digestão anaeróbia para o tratamento dos dejetos é possível e desejável, uma vez que contribui para preservação do meio ambiente, viabiliza os modernos sistemas de produção e aperfeiçoa a relação entre custo-benefício do empreendimento. As modernas técnicas de produção agropecuária têm permitido um contínuo aumento na eficiência produtiva de alimentos e de insumos. Países que dispõem de melhor tecnologia conseguem reduzir a área, o número de animais e a quantidade de mão-de-obra necessária à produção

agrícola. Da mesma forma, o uso racional dos insumos e o correto manejo dos resíduos permitem aperfeiçoar os sistemas produtivos de maneira a se obter convívio harmonioso entre o homem e o, meio ambiente (HARDOIM; GONÇALVES,2003).

Neste sentido, Machado (2010) avaliou três sistemas físico-químicos alternativos de purificação de biogás da fermentação anaeróbica de dejetos de suínos utilizando óxido de ferro (limalha), hidróxido de cálcio (cal) e carvão vegetal e concluiu que a filtragem em série foi a que obteve o melhor rendimento de remoção do CO₂ e H₂S.

2.5. Dejetos da agropecuária

A quantidade de dejetos produzidos varia com o peso vivo dos animais, conforme ilustrado na Figura 3. Já a água ingerida vai influenciar a produção de urina, variando a quantidade de dejetos líquidos. A Tabela 4 representa a produção de dejetos em relação ao peso vivo do animal, e a Tabela 5 a quantidade de matéria prima necessária para a produção de 1 m³ de biogás. Ademais, a Tabela 6 representa a quantidade de metano produzida em função da quantidade de dejetos para diversas fontes de resíduos orgânicos.

O lançamento direto do esterco de suínos, sem o devido tratamento nos cursos de água, acarreta um grande impacto ambiental nas propriedades rurais devido à redução do teor de oxigênio dissolvido na água, disseminação de patógenos e contaminação das águas potáveis com amônia, nitratos e outros elementos tóxicos. Diagnósticos recentes têm demonstrado um alto nível de contaminação dos rios e lençóis de água superficiais que abastecem tanto o meio rural quanto o urbano. A capacidade poluente dos dejetos suínos, em termos comparativos, é muito superior à de outras espécies. Utilizando-se o conceito de equivalente populacional, um suíno, em média, equivale a 3,5 pessoas (DIESEL et al., 2002).

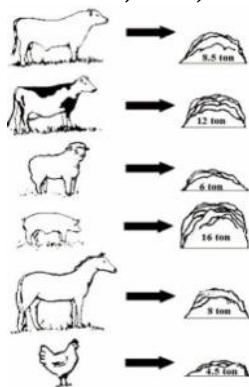


Figura3. Tonelada de esterco (sem cama) produzido por ano por 450 kg de peso vivo.

Fonte: Ensminger (1990) citado por Lucas Jr. (2005).

Tabela 4. Produção diária de resíduos líquidos e esterco de diversos animais

Resíduo	Umidade	Suíno	Gado de Corte	Gado de Leite	Frango de Corte	Ovinos
Líquido	% dia (função do peso vivo)	5,1	4,6	9,4	6,6	3,6
Sólido	Kg.animal.dia ⁻¹	2,3 - 2,5	10 - 15	10 - 15	0,12 - 0,18	0,5 - 0,9

Fonte: (KONZEN,1980); (OLIVEIRA, 1993; adaptado por SALOMON, 2007).

Tabela 5. Quantidade de rejeitos, para produção de 1 m³ de biogás

Matéria Prima	Quantidade (kg.m ⁻³ de biogás)
Esterco fresco de bovinos	25
Esterco seco de galinhas	2,3
Resíduo seco de vegetais	2,5
Esterco seco de suíno	2,86

Fonte: Castonón (2002) citado por Salomon(2007).

Tabela 06 Indicadores de conversão em metano, para diferentes fontes de resíduos orgânicos

Resíduo Orgânico	Unidade	Indicadores	Fonte
Vinhaça	m ³ CH ₄ .m ⁻³ vinhaça	14,23	(JOHANSSON et al., 1993)
Resíduo de ETE's	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹ DBO ₅	0,03	(VIEIRA; SILVA, 2002)
Dejetos de bovinos	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹	0,04	(CASTANÓN, 2002)
Dejetos de suínos	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹	0,35	(CASTANÓN, 2002)

Estações de tratamento de esgoto - ETE's:

De acordo com Diesel et al. (2002), a quantidade total de esterco produzida por um suíno varia de acordo com o seu desenvolvimento ponderal, mas apresenta valores decrescentes de 8,5 a 4,9% em relação ao seu peso vivo/dia, para a faixa de 15 a 100 kg. Cada suíno adulto produz em média 0,007 - 0,008 m³ de dejetos líquidos/dia ou 0,21 - 0,24 m³ de dejetos por mês. A Tabela 7 representa a produção diária de dejetos de suínos para diversas categorias. A composição dos dejetos de suínos está representada na Tabela 8.

Segundo Perdomo et al. (1999), a produção de suínos acarreta também um outro tipo de poluição, que é aquela associada ao problema do odor desagradável dos dejetos. Isto ocorre devido à evaporação dos compostos voláteis, que causam efeitos prejudiciais ao bem-estar humano e animal. Os contaminantes do ar mais comuns nos dejetos são: amônia, metano, ácidos graxos voláteis, H₂S, N₂O, etanol, propanol, dimetil sulfeto e carbono sulfeto. A emissão de gases pode causar graves prejuízos nas vias respiratórias do homem e animais, bem como a formação de chuva ácida através de descargas de amônia na atmosfera, além de contribuírem para o aquecimento global da terra.

Tabela 7. Produção diária de dejetos para diversas categorias

Categoria	Esterco (kgdia ⁻¹)	Esterco + Urina (kgdia ⁻¹)	Dejeto Líquido (Ldia ⁻¹)	Estrutura para estocagem (m ³ animal-1mês ⁻¹)	
				Esterco + Urina	Dejeto líquido
25 - 100 kg	2,3	4,9	7,0	0,16	0,25
Porcas de reposição e gestantes	3,6	11,0	10,0	0,34	0,48
Porcas em lactação com leitões	6,4	18,0	27,0	0,52	0,81
Macho	3,0	6,0	9,0	0,18	0,28
Leitões	0,35	0,95	1,40	0,04	0,05
Média	2,35	5,80	8,60	0,17	0,27

Fonte: adaptado de Tecpar (2002).

Tabela 8. Características químicas e físicas dos dejetos de suínos produzidos em uma unidade de crescimento e terminação manejada em fossa de retenção

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média
	-----mg.L ⁻¹ -----		
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	11530	38448	25543
Sólidos Totais	12697	49432	22399
Sólidos Fixos	4268	10408	6010
Sólidos Voláteis	8429	39024	16389
Nitrogênio Total	1660	3710	2374
Fósforo Total	320	1180	578
Potássio Total	260	1140	536

Fonte: (SILVA, 1996). Local: Sistema de produção de suínos da EMBRAPA suínos e aves

Diante do exposto, verifica-se o potencial energético dos dejetos e a necessidade de um estudo mais detalhado do processo de purificação do biogás a baixo custo, para fins de utilizá-lo como fonte energética em motores de combustão interna, uma vez que a geração de energia elétrica a partir de dejetos de suínos ainda é muito incipiente no Brasil e no mundo. No entanto, é bastante favorável o seu desenvolvimento, em função do ciclo de alta nos preços dos combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, o que poderá tornar viável esta modalidade (LEMONS et al., 2008).

A necessidade de substituição dos combustíveis derivados de petróleo sempre foi impulsionada pela busca de alternativas preferencialmente renováveis, oriundas da biomassa, tanto para os óleos combustíveis quanto para a gasolina. A procura de alternativas apoia-se nas oscilações de preço e de oferta de petróleo, e nas previsões de sua escassez (CASTELLANELLI et al., 2008), já que a maior parte da energia consumida no mundo é obtida a partir da queima de carvão, de gás natural e de derivados de petróleo, como a gasolina, o querosene e o óleo diesel, sendo este último um combustível amplamente utilizado para alimentar motores de combustão interna (SORANSO et al., 2008).

2.6. Usos do biogás da fermentação anaeróbica de dejetos da agropecuária

2.6.1. Geração de calor

O biogás produzido em biodigestores rurais normalmente é armazenado a baixa pressão em gasômetros e vem sendo utilizado por meio da combustão em equipamentos para geração de calor, como queimadores de fogões, fornalhas, campânulas de aquecimento etc. (SILVA et al., 2005). Ademais, quanto à pressão do biogás armazenado em biodigestores, Amestoy e Ferreyra (1987) citam os limites de 80 a 500 mm H₂O. Ortolaniet al. (1986) recomendam 150 e 200 mm H₂O, respectivamente, para pressão de serviço de biodigestores nos modelos indiano e chinês.

Amestoy e Ferreyra (1987) avaliaram equipamentos para o aquecimento de água com biogás e recomendaram que a velocidade de saída da mistura de biogás e ar nos orifícios da grelha seja aproximadamente de 0,5 a 0,8 m.s⁻¹, com taxa de ar primário de 0,8 a 0,9. Santos (1990) utilizaram, para o dimensionamento, taxa de ar primário em torno de 0,6. Mesmo sob essa menor aeração, a área total dos orifícios da grelha foi da ordem de 1,384 mm².

Estudos foram desenvolvidos por Silva et al. (2005) para dimensionar e adaptar o injetor do queimador principal de um aquecedor de água, tipo acumulação de 75 L. O diâmetro do injetor foi redimensionado em função da pressão de serviço de 100 mm de coluna d'água e do poder calorífico inferior do biogás de 21600 kJ m⁻³, garantindo a manutenção da potência calorífica do equipamento de 20900 kJ h⁻¹. Os resultados demonstraram que o queimador adaptado operou com biogás adequadamente, apresentando chama estável. A eficiência média do aquecedor foi

de 68%, para ganho térmico de 36,7 °C, correspondendo à temperatura final da água igual a 62,7 °C, sendo consumido 0,796 m³ de biogás, aquecendo 75 L de água em 72 minutos.

Santos et al. (2007) avaliaram a adaptação (diâmetro do injetor) e o desempenho (consumo e eficiência de aquecimento) de um aquecedor tipo campânula, adaptado para queimar biogás. Foram avaliados cinco injetores com perfurações de 1,0053; 1,5080; 1,5708; 1,7672 e 1,980 mm². As pressões do biogás na entrada do aquecedor foram 100; 120; 150; 170 e 200 mm de coluna d'água. Os resultados indicaram a viabilidade da utilização dos aquecedores já existentes em granjas e no mercado, e que as temperaturas do ar foram semelhantes às obtidas com o combustível GLP (gás liquefeito de petróleo).

Inúmeros projetos vêm sendo implementados por empresas privadas visando a comercialização de créditos de carbono, dentre estes, a comercialização do metano proveniente de dejetos de suínos produzidos em biodigestores. Porém, na maioria dos casos, o metano gerado não é aproveitado pelos agricultores como fonte energética, sendo queimado em queimadores específicos.

2.6.2. Geração de frio

Processos agroindustriais envolvendo resfriamento podem ser citados no trabalho de Silva e Cortez (1991), no qual foi utilizado um biodigestor instalado na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, alimentado por dejetos bovinos, para acionamento de um sistema de refrigeração por absorção.

Pouco conhecidas no Brasil, as bombas de calor são empregadas no aquecimento de residências e processos industriais em países mais desenvolvidos. São equipamentos muito eficientes, pois utilizam racionalmente a energia que as aciona, podendo gerar um efeito de 3 a 5 vezes superior à energia elétrica utilizada, e assim, recuperam calor de uma fonte térmica como o ar ou a água, fazendo pouco uso de trabalho mecânico (CORTEZ; NEVES FILHO, 1996). Entretanto, não se trata de uma tecnologia recente o conceito de utilização do “efeito quente”, produzido em sistemas de refrigeração que tiveram início em 1852 com William Thompson (Lord Kelvin), a quem é creditada tal invenção. No entanto, as primeiras utilizações comerciais de bombas de calor datam do início do século XX. Hoje, no mundo, existem muitos tipos e aplicações já conhecidas e comercialmente bem estabelecidas.

Jordan (2005) desenvolveu três bombas de calor água/água com fluido refrigerante R22 acionada a biogás, gás natural e eletricidade. A bomba de calor alimentada a biogás foi utilizada em processos de aquecimento e resfriamento em sistemas de produção de leite, sendo que as demais foram apenas testadas em laboratório para efeito de comparação. O motor que o autor utilizou foi do ciclo Otto, originalmente à gasolina, da marca Honda, modelo GXV 240, monolicindro, resfriado a ar, e com potência de 8 cv. O consumo de biogás pelo motor, para acionamento da bomba de calor, foi de aproximadamente 1,92 m³h⁻¹. O autor afirma que, em laboratório, para uma condição inicial com a temperatura da água do banco de gelo igual a 3,5 °C, e a temperatura da água do reservatório quente igual a 25 °C, a capacidade estimada de produção de energia térmica para a bomba de calor, com 10 horas de operação, foi de aproximadamente 219 kg de gelo, 0,414 m³ de água fria próximo de 0 °C, e 1 m³ de água quente a, aproximadamente, 50 °C.

Os resultados obtidos por Jordan (2005) mostraram um potencial de economia, com a redução dos custos com energia da ordem de 92%, quando se comparou o desempenho econômico da bomba de calor a biogás em relação ao equipamento de refrigeração e ao aquecedor elétrico.

Segundo Oliveira e Mata (1999), as fórmulas utilizadas para determinação do coeficiente de performance e do fator de performance de bombas de calor são definidas pelas Equações 4 e 5:

$$COP = \frac{h_2 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$FP = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

h_1 = entalpia na entrada do compressor, kJ.kg^{-1}

h_2 = entalpia na saída do compressor, kJ.kg^{-1}

h_4 = entalpia na saída do condensador, kJ.kg^{-1}

h_5 = entalpia na entrada do evaporador, kJ.kg^{-1}

2.6.3. Geração de energia elétrica

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica aciona um gerador que a converte em energia elétrica. As turbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo “Ciclo - Otto” são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética. Embora os motogeradores, de modo geral, possuam maior eficiência de conversão elétrica, as turbinas a gás podem apresentar aumento de sua eficiência global de conversão quando operadas em sistemas de cogeração (calor e eletricidade). Entretanto, a adaptação de motores automotivos de combustão interna vem sendo cada vez mais usada pelos produtores rurais, devido ao menor custo de aquisição, comparado a conjuntos motogeradores vendidos comercialmente (Machado, 2010).

202

O consumo de biogás de um conjunto motogerador é aproximadamente $0,646\text{m}^3\text{cv}^{-1}$, considerando que 1 kWh equivale a $0,7355\text{cv}$, temos um consumo de $0,4751\text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$. Para Aisse e Obladen (1982) citado por Coldebella et al. (2006), o consumo de biogás em motores de combustão interna é de $0,45\text{ m}^3\text{HP}^{-1}$.

Segundo Silveira (1994), sistemas de cogeração, utilizando motor de combustão interna, podem aproveitar de 50 a 70% da energia do combustível, na forma de calor, e de 23 a 30% na forma de eletricidade. De maneira contrária, Santos (2000) afirma que 1 m^3 de biogás é equivalente a $6,5\text{ kWh}$ de energia elétrica e que a eficiência dos sistemas de cogeração varia entre 30 e 38%, ou seja, $2,0 - 2,5\text{ kWh}$, condizente com os resultados encontrados por Coldebella et al. (2006), que foram de 32,3% de eficiência e $2,1\text{ kWh}$.

O poder calorífico inferior do biogás é de $6,5\text{ kWh.m}^{-3}$ e a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motores ciclo Otto) é de, aproximadamente, 25% (CCE, 2000). A equivalência energética entre o biogás altamente purificado e a eletricidade é de 1 m^3 de biogás equivale a $1,43\text{ kWh}^{-1}$ de energia (SORDI, 2004). Partindo desse princípio, tem-se que a eficiência de transformação de biogás em energia é dada pela razão entre a energia produzida pela equivalência de 1 m^3 de biogás, de acordo com a Equação 6.

$$\text{Eficiência}(\%) = \frac{\text{Energia produzida em kWh.m}^{-3}}{6,5\text{ kWh.m}^{-3}} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Beber (1989) afirma que valores de eficiência energética menores que 1 demonstram que o sistema importa, praticamente, toda a energia consumida no processo produtivo. O rendimento pode ser calculado de acordo com a Equação 7.

$$\eta = \frac{\Sigma E_{Saída}}{\Sigma E_{Consumo}} \tag{Eq. 7}$$

Em que:

$\Sigma E_{Saída} = \Sigma (ED_{Saída} + EI_{Saída})$

$\Sigma E_{Consumo} = \Sigma (ED_{Consumo} + EI_{Consumo})$

ED = Estimativa de energia direta

EI= Estimativa de energia indireta

ESaída= Estimativa de energia que sai no processo de produção (em forma de produto)

EConsumo= Estimativa de energia consumida no processo de produção

Thomas e Delval (1987) estudaram as características do biogás obtido a partir da digestão anaeróbia de resíduos vegetais e dejetos animais, como combustíveis em sistemas microgeradores numa suinocultura com 3.000 matrizes, em Taiwan. O estudo baseou-se em duas alternativas de microcogeração: a primeira utilizando o sistema TOTEM; a segunda alternativa usando o sistema Duvant-Crepelle, que utiliza motor diesel-gás com capacidades de produção elétrica entre 196 a 894 kW. O balanço energético foi realizado considerando o biogás com poder calorífico inferior, de 23020 kJ.m⁻³. Os resultados obtidos do balanço de energia para a unidade de cogeração Totem são mostrados na Tabela 9 e para o sistema Duvant-Crepelle, na Tabela 10.

Tabela 9. Balanço energético para o Totem, segundo Angonese (2006)

Porcentagem CH ₄ (%)	62	74
PCI (kJN.m ⁻³)	22.600	29.031
Consumo introduzida (kW)	8,33	6,51
Energia introduzida (KW)	52,2	52,5
Energia mecânica (kW)	15,2	12,6
Rendimento do motor (%)	29	24
Potência elétrica (kW)	13,8	11,5
Calor recuperado (kW)	36,8	37,2
Rendimento global (%)	97	93

Fonte: (ANGONESE et al.,2006)

Tabela 10. Balanço energético de sistemas Duvant-Crepelle

Tipo de motor	4VJG		5VJG	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Versão	(1)	(2)	(1)	(2)
Consumo de gás (m ³ h ⁻¹)	80,8	153,1	101,0	191,4
Energia introduzida (kW)	583,5	1.065,2	729,5	1.331,6
Energia mecânica (kW)	216,3	397,8	271,0	494,6
Rendimento do motor (%)	37,1	37,4	37,2	37,2
Potência elétrica (kW)	196	368	248	460
Calor recuperado (kW)	249,4	454,9	311,7	568,6
Rendimento glogal (%)	76,4	77,3	76,7	77,3

(1) Aspirado; (2) Sobrealimentado. Fonte: (ANGONESE et al., 2006).

Stahl (1981) descreveu a utilização de um sistema de cogeração de 22,5 kVA com posterior adequação de cargas térmicas e elétricas, para suprir os usos finais de uma propriedade agrícola.

Koelsch e Jewell (1986) elaboraram estudo de um sistema de cogeração de 15 kVA em uma propriedade rural, com resíduos de gado leiteiro e detalhes das variações das cargas e das misturas do biogás como combustível para o motorizador.

Quesada et al. (1987) obtiveram uma eficiência energética de 6%, avaliando um sistema de produção de suínos no Rio Grande do Sul. Entretanto, esse estudo não apresenta sistema de tratamento com obtenção de biogás e os autores não consideraram a utilização dos fertilizantes. A possibilidade de integração de atividades dentro de uma mesma propriedade e aproveitamento total dos resíduos, proporciona maior sustentabilidade, em termos de eficiência energética e ambiental.

Muitos estudos têm sido realizados visando o uso do biogás como combustível em sistemas de cogeração nas áreas rurais. A exemplo, Siebenmorgen (1988) apresentou trabalho de produção de eletricidade e aquecimento de água, utilizando unidade de cogeração de 40 kVA em uma propriedade rural com resíduos de gado leiteiro.

Fischer e Schrattenholzer (2001) estabeleceram estudo de caso sobre o uso de biogás como combustível alternativo em uma propriedade rural, com um rebanho suíno de 3200 cabeças em fase de terminação e tratamento de dejetos por meio de digestor anaeróbico.

Souza (2004), avaliando o desempenho de um motor ciclo Otto, do modelo AP 1.8 l, utilizando biogás como combustível, encontrou resultados que mostraram bom desempenho desse motor trabalhando com taxas de compressão de 12,5:1 e ponto de ignição adiantado em 45°; esta taxa de compressão é a mesma de motores que utilizam álcool como combustível. Os resultados mostraram que o motor convertido a biogás pode produzir potência máxima acima de 45 kW, podendo com isso ser acoplado a um gerador de 35 kVA, tornando uma propriedade rural, com disponibilidade de biogás, autossuficiente em energia elétrica.

204

Entretanto, um fator muito importante e não contabilizado por Souza (2004), que pode comprometer o uso de sistemas geradores a biogás para energia elétrica, é a vida útil dos sistemas, uma vez que na composição do biogás existem componentes corrosivos (H₂S) que degradam as partes metálicas do sistema. Isto faz com que o tempo de retorno do capital, superior a cinco anos, seja, na prática, maior que a vida útil do motor usado no conjunto gerador.

Coldebella et al. (2006), avaliando a viabilidade técnica e econômica da utilização de biogás de dejetos de bovinocultura e de suinocultura, concluíram que as eficiências dos processos foram de 11,7 e 14,5% na produção de energia elétrica, no conjunto motobomba utilizado para irrigação, e de 4,14 e 10,3% no conjunto motorizador, ambos acionados com o biogás da fermentação anaeróbia dos dejetos de bovinocultura e suinocultura, respectivamente.

Angonese et al. (2006), avaliando a eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor, concluíram que a participação percentual dos coeficientes energéticos (MJ), dos itens resultantes do sistema produtivo (Saída), são 13% para o biogás, 30,2% para o biofertilizante e 56,8% para os suínos e que a eficiência energética do sistema de produção de suínos em terminação é 0,38.

Siripornakarachai e Sucharitakul (2007), na Tailândia, fizeram modificações e regulagens em um motor diesel Hino K-13 CTI, de 13000 cilindradas, e com 24 válvulas para funcionar com biogás, acoplado a um motor de indução trifásico quatro pólos, para geração de energia elétrica.

Segundo Lemos et al. (2008), a energia gerada (por meio do biodigestor) pelos dejetos de um rebanho de mil suínos, foi estipulada em 2,5 kWh, em média - o suficiente para atender à demanda de uma escola ou três casas, conforme estudos do Centro de Pesquisas em Energias Alternativas e Renováveis (CPEAR).

Trevisan e Monteggia (2009) desenvolveram técnicas para maximizar a produção de biogás enriquecido com hidrogênio, em condições anaeróbias, por meio da remoção de matéria orgânica, com potencial de aplicação ao tratamento dos efluentes líquidos da suinocultura, realizado em dois reatores sequenciais em batelada, um acidogênico e outro metanogênico, operados em série. O sistema apresentou eficiência de 60 a 69% na remoção da matéria orgânica. As concentrações de hidrogênio variaram de 7 a 9% no gás produzido do reator acidogênico, nos períodos de aumento da carga orgânica. No reator metanogênico, a concentração de metano variou de 65 a 70%. A vantagem deste processo é que o biogás enriquecido com hidrogênio gera maior energia por unidade de massa.

De forma geral, podemos afirmar que o rendimento dos equipamentos de transformação da energia contida no biogás de dejetos agrícolas é relativamente baixo e variável, conforme observado nos resultados dos trabalhos científicos consultados. Entretanto, Salomon (2007) afirma que o potencial de geração de eletricidade, a partir do biogás, corresponde de 1,17 a 1,26% do total da potência instalada no país que é, de acordo com o Balanço Nacional Energético (BRASIL, 2004), de aproximadamente 90732 MW.

Segundo Muños et al. (2000), em ensaios realizados com motor Honda 270 cm³, alimentado com biogás bruto e mantidos o ponto de ignição e a taxa de compressão da gasolina, as curvas de torque e potência tiveram um decréscimo de 50% em relação ao combustível original.

Huang e Crookes (1998) simularam biogás injetando metano e gás carbônico em proporções diferentes em um motor de ciclo Otto, e os autores definiram como sendo a melhor taxa de compressão a de 13:1, por atender a todas as misturas. Para uma taxa de 15:1, em algumas composições, ainda houve detonação. Entretanto, conforme Ortiz-Cañavate et al. (1981), a taxa de compressão não pode exceder a 12:1, pois a composição do biogás não é constante, e isto pode levar à detonação em alguns momentos. Já o ponto de ignição deve ser avançado, pois a velocidade de combustão do biogás é mais lenta.

Com relação ao desempenho de motores a duplo combustível, Ortiz-Cañavate et al. (1981), trabalhando com um motor FORD, com volume de 3294 cm³ e razão de compressão de 16,5:1, acionado com 20% a diesel e o restante a biogás com 60% de metano, observaram que a potência do motor assim alimentado (42,5 kW) foi 12% maior que a potência do motor alimentado a 100% com diesel (37,8 kW) na rotação nominal. Porém, a eficiência térmica a duplo combustível foi menor. Por outro lado, a temperatura dos gases de exaustão foi maior.

Ademais, Mitzlaff (1988) apresenta valores da temperatura de exaustão de 500 a 700 °C para motores alimentados a duplo combustível. O autor afirma que a temperatura de exaustão em motores a duplo combustível é maior que a temperatura em motores na versão diesel e para preservar as válvulas de exaustão a temperatura na saída do cilindro, não deve exceder 550 °C.

Souza (2004) e Souza et al. (2010), avaliando o desempenho de um motor ciclo Otto, utilizando biogás como combustível, concluíram que a maior potência do motor utilizado para o biogás foi obtida quando se utilizou a taxa de compressão 12,5:1, mesclador de gases longo e ponto de ignição adiantado em 45°, pois nestas condições obteve-se a potência máxima de 100% superior ao original. O ponto de ignição e a taxa de compressão com os melhores resultados obtidos para o biogás também são os mesmos utilizados com o Gas Natural Veicular (GNV). A Figura 4 e a Figura 5 representam parte dos resultados encontrados por Souza (2004) e Souza et al. (2010).

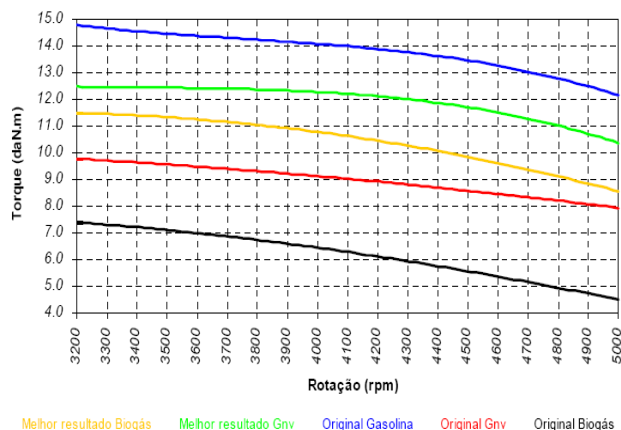


Figura 4. Variação do torque do motor nas condições originais e após a conversão.

Fonte: (SOUZA, 2004).

Ademais, Souza (2004) afirma que no Brasil há empresas que produzem e comercializam grupos geradores para utilização do biogás. Entretanto, sabe-se que algumas destas empresas, apesar de promoverem a alimentação do motor com gás, consideram o rendimento deste baseado nas curvas de torque e potência do motor com o combustível original, que é, normalmente, a gasolina.

2.7. Benefícios e dificuldades da geração de energia elétrica por meio de biogás no Brasil

206

O CENBIO (2001) aponta, de forma geral, as seguintes vantagens da produção de energia elétrica a partir de biogás:

2.7.1. Para a sociedade:

1) Geração de empregos e eliminação ou redução de subempregos; 2) Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável que vem sendo tratada como resíduo; e 3) Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico.

2.7.2. Para as prefeituras:

1) Possibilidade de receita extra, proveniente da energia gerada com biogás e vendida às concessionárias; 2) Contribuição para a viabilidade econômica do tratamento do lixo; e 3) Menor rejeição social das instalações de saneamento, uma vez que elas passam a ser gerenciadas de forma melhor, representando um exemplo a ser seguido.

2.7.3. Para as estações de tratamento de esgotos, gerenciadoras de aterros e outras:

1) Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária; 2) Possibilidade eventual de venda de eletricidade à rede; e 3) Possibilidade de uso de processos de cogeração, ou seja, a geração de eletricidade tem como subproduto calor, a ser usado no tratamento do esgoto, ou mesmo, ser vendido a terceiros.

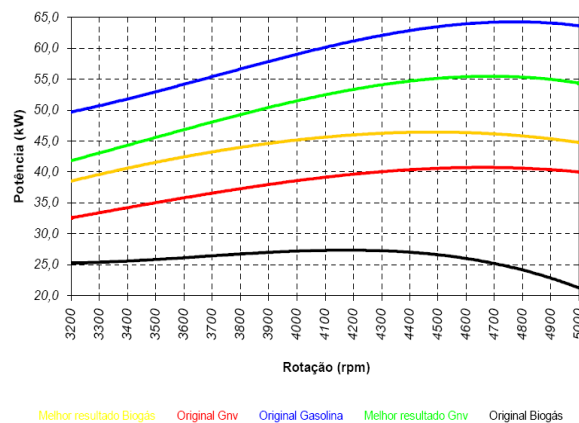


Figura 5. Variação da potência do motor nas condições originais e após a conversão.

Fonte: (SOUZA, 2004).

2.7.4. Para o meio ambiente:

1) Redução das emissões de metano para a atmosfera, pois este é um importante gás de efeito estufa. O seu potencial de aquecimento global é muito maior que o de CO₂; 2) Redução do consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo efeito estufa; 3) Redução na geração de odor para as vizinhanças, de chorume e de contaminação do lençol freático; e 4) Melhoria nas condições dos lixões, que representam mais de 70% da condição de disposição nacional do lixo.

2.8. As principais barreiras existentes

2.8.1. Tecnológicas:

1) Limpeza do gás; e 2) Necessidade de planta de demonstração no país.

2.8.2. Econômicas:

1) Investimento elevado, dependendo da fonte de biogás; e 2) A análise econômica convencional desconsidera benefícios ambientais (emissões de metano - saneamento).

2.9. Estudos de viabilidade econômica do uso do biogás da fermentação anaeróbia de dejetos da agropecuária

Segundo Avellaret al. (2000), o custo de produção de energia elétrica, usando-se biogás, é continuamente menor do que o de gás natural, e ainda é mais baixo do que o valor estabelecido pela concessionária. O tempo de amortização do custo do investimento na planta leva 7,8 anos com gás natural e 3,8 anos com o biogás, mesmo com a utilização de tecnologia de dessulfurização do biogás. 207

O custo do m³ de biogás está relacionado à capacidade de produção de biogás e ao custo do investimento necessário.

Santos (2000) relata que em uma propriedade, cuja demanda de energia elétrica seja de 40kW, são necessárias 258 cabeças de suínos (matrizes), o que resultaria em uma produção de 200 m³.dia⁻¹ de biogás, com um rendimento de R\$ 200,00 por animal, para a instalação do biodigestor e do conjunto motogerador R\$ 440,00.kW⁻¹. Para essa produção e esse investimento, o custo do m³ seria de 0,21; 0,13; 0,11; e 0,10 reais para um tempo de amortização de 5, 10, 15 e 20 anos, respectivamente.

De acordo com a metodologia descrita por Souza et al. (2004), Coldebella et al. (2006) determinou a viabilidade do uso do biogás de suinocultura e bovinocultura para geração de energia elétrica e bombeamento, para irrigação no oeste do Paraná. Os autores utilizaram uma taxa de desconto de 8%, a qual seria a taxa usual de financiamento do Governo Federal nas atividades de produção agrícola. Para os gastos com operação e manutenção durante o ano, com cerca de 4% do investimento total, e por meio da tarifa de energia paga pela propriedade, obtiveram o tempo de retorno do investimento.

Os resultados das análises econômicas da viabilidade do uso do biogás de bovinocultura e suinocultura, para geração de energia elétrica e acionamento de bombas para irrigação, realizado por Coldebella et al. (2006), segundo a metodologia de Souza et al. (2004), encontram-se representados nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11. Custo do biogás (m³), de acordo com o tempo de amortização do investimento para bovinocultura e suinocultura

Tempo de amortização (anos)	Custo do biogás da bovinocultura (R\$.m ⁻³)	Custo do biogás da suinocultura (R\$.m ⁻³)
5	0,394	0,107
10	0,229	0,063
15	0,184	0,050
20	0,164	0,045

Fonte: (COLDEBELLA et al., 2006).

Tabela 12. Custo de eletricidade (MWh) para a propriedade 1, com biogás da bovinocultura, de acordo com o tempo de amortização e o tempo de operação do gerador

Tempo de amortização (anos)	Custo da eletricidade (R\$.MWh ⁻¹)				
	4 horas de operação	6 horas de operação	8 horas de operação	10 horas de operação	12 horas de operação
5	856,71	818,72	799,72	788,33	780,73
10	498,21	476,11	465,07	458,44	454,02
15	400,19	382,44	373,57	368,24	364,69
20	356,79	340,97	333,06	328,31	325,15

Fonte: (COLDEBELLA et al., 2006).

Tabela 13. Custo de eletricidade (MWh) para a propriedade 2, com biogás da suinocultura, de acordo com o tempo de amortização e o tempo de operação do gerador

Tempo de amortização (anos)	Custo da eletricidade (R\$.MWh ⁻¹)				
	4 horas de operação	6 horas de operação	8 horas de operação	10 horas de operação	12 horas de operação
5	239,83	193,39	170,18	156,25	146,96
10	139,47	112,47	98,96	90,86	85,46
15	112,03	143,91	79,49	72,99	68,65
20	99,88	80,54	70,87	65,07	61,20

Fonte:(COLDEBELLA et al., 2006).

Frareet al. (2006), estudando as correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás, concluíram que o método do Custo Anualizado Equivalente se mostrou adequado para a estimativa do custo do metro cúbico do biogás purificado. Para tanto, foram utilizados valores indicados por autores brasileiros, como sendo os mais comuns nos projetos de novos processos. Os autores também afirmam que as metodologias apresentadas, tanto por Guthrie (1969) quanto por Turton et al. (2003), permitem uma rápida estimativa dos custos dos equipamentos e/ou de instalação de uma nova planta de processo. Embora as correlações de Guthrie (1969) e de Turton et al. (2003) sejam intensivamente utilizadas em programas de otimização e de simulação de plantas industriais, o uso de correlações envolvendo equipamentos nacionais torna possível a modificação ou o projeto de um novo processo, com dados mais adequados à realidade nacional. Os resultados deste trabalho estão representados nas Figuras 6,7 e 8.

Longo (2007), estudando a viabilidade econômica na geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da suinocultura, na comunidade da Linha Aparecidinha - Santa Helena - PR, concluiu que o tempo de retorno de capital é de 6 anos, com viabilidade econômica na geração

de energia elétrica a partir do biogás, e que a geração distribuída tem futuro promissor para a atividade de suinocultura.

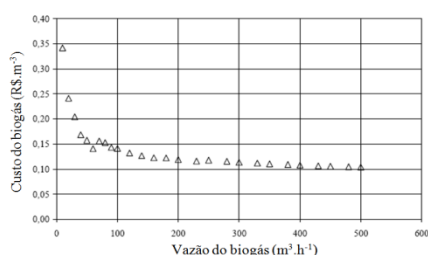


Figura 6. Custo do biogás purificado em função da vazão alimentada, considerando os custos de compra de Guthrie (1969) e o método de Perlingeiro (2005). Fonte: (FRARE et al., 2006).

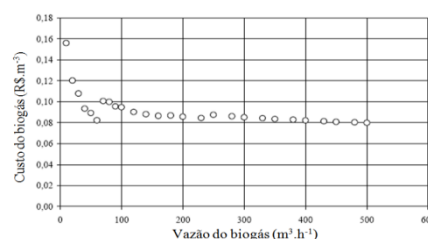


Figura 7. Custo do biogás purificado em função da vazão alimentada, considerando o valor de equipamentos nacionais. Fonte: (FRARE et al., 2006).

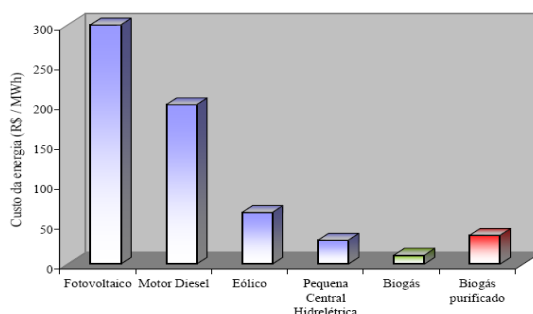


Figura 8. Estimativa de custos na geração de energia, incluindo os custos do biogás purificado. Fonte: (FRARE et al., 2006).

Ademais, os custos totalizados no estudo de Longo (2007) foram de R\$ 499.253,89, referentes ao sistema de tratamento composto por biodigestor, lagoa secundária e kit de segurança, conforme mostrado na Figura 9.

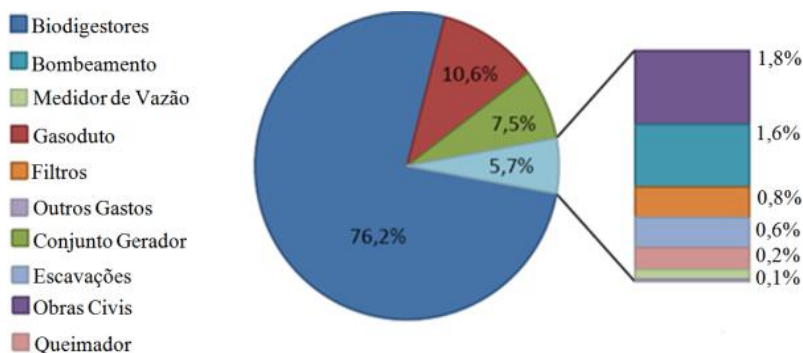


Figura 9. Distribuição percentual do investimento no sistema de tratamento de dejetos de suínos, por meio de biodigestor, seguido de lagoa secundária. Fonte: (LONGO, 2007).

Noronha e Gimenes (2006), mensurando os custos de implantação de biodigestores na suinocultura com objetivo de avaliar a geração de energia elétrica produzida pelo biogás de origem do dejetos suíno, perceberam que a quantidade de energia produzida influencia os custos de produção a ponto de ser um diferencial competitivo para as cooperativas que operam em sistemas integrados (Tabela 14). Os autores concluíram que a energia elétrica não influencia os custos da suinocultura a ponto de ser considerada diferencial competitivo, mas a implantação do biodigestor poderá ser viável, visto os ganhos adicionais que poderão ser gerados.

Tabela 14. Demonstrativo dos custos por animal em granja de ciclo completo para 22 terminados por matriz ano

Variáveis de Custo	Custo.Animal-1 (R\$)	Δ (%)
Custos fixos		
Depreciação das instalações	6,70	27,92
Depreciação dos equipamentos	1,92	8,00
Remuneração / Capital médio	11,28	47,00
Remuneração / reprodutores	1,52	6,33
Remuneração / Capital de giro	2,58	10,75
Custos Fixos Total	24,00	15,75
Custos Variáveis		
Alimentação	93,54	72,86
Mão de obra	11,37	8,86
Produtos veterinários	5,04	3,93
Transporte	4,10	3,19
<i>Energia e combustível</i>	<i>2,16</i>	<i>1,68</i>
Manutenção e conservação	2,30	1,79
Funrural	3,95	3,08
Eventuais	5,93	4,62
Custos Variáveis total	128,39	84,25
Custo Total	152,39	

Fonte: (NORONHA; GIMENES, 2006).

Cervi et al. (2010), estimando a viabilidade econômica de um sistema bio integrado para geração de eletricidade a partir do aproveitamento de dejetos de suínos concluíram que o sistema de produção de biogás é viável do ponto de vista econômico, se o consumo de energia elétrica for de 35 kWh por dia, em média, onde o valor presente líquido (VLP) é de R\$ 9.494,90, e a taxa interna de retorno (TIR) é de 9,34% ao ano.

Conforme Nogueira (2001), o valor presente líquido (VPL) é um indicador que permite avaliar a viabilidade econômica do projeto durante seu período de vida útil. O VPL é definido pelo valor atual dos benefícios menos o valor atual dos custos ou desembolsos.

Nogueira e Zürn (2005), em estudo sobre o desenvolvimento de um novo modelo para dimensionamento de sistemas integrados de recursos energéticos renováveis, aplicados em ambientes rurais, com a utilização de ferramentas de simulação e otimização, concluíram que o dimensionamento dos sistemas energéticos e os custos são fundamentais para a tomada de decisões em projetos de energização rural, considerando critérios técnicos e econômicos.

Alem do mais, Catapan et al (2010) afirmam que o uso do biodigestor tem papel fundamental na suinocultura atual, visto que proporciona a produção do biogás com uma composição rica em gases de grande potencial gerador de energia elétrica.

2.10. Ilustrações da realidade dos sistemas de aproveitamento e filtragem do biogás adotado por alguns produtores rurais no Brasil

A seguir, as figuras 10,11 e 12 mostram um registro fotográfico de alguns detalhes de várias plantas de biogás oriundo da fermentação anaeróbia de dejetos da pecuária e seus respectivos sistemas de filtragem, adaptados pelos produtores rurais, e seu aproveitamento para fins de geração de energia elétrica. Este registro foi efetuado durante o treinamento de doutorado do primeiro autor na Universidade Federal de Viçosa, de agosto de 2007 a junho de 2010. Desde

então, ele vem atuando na área de construções rurais, bioenergia e convivência com o semiárido na Universidade Federal do Vale do São Francisco.

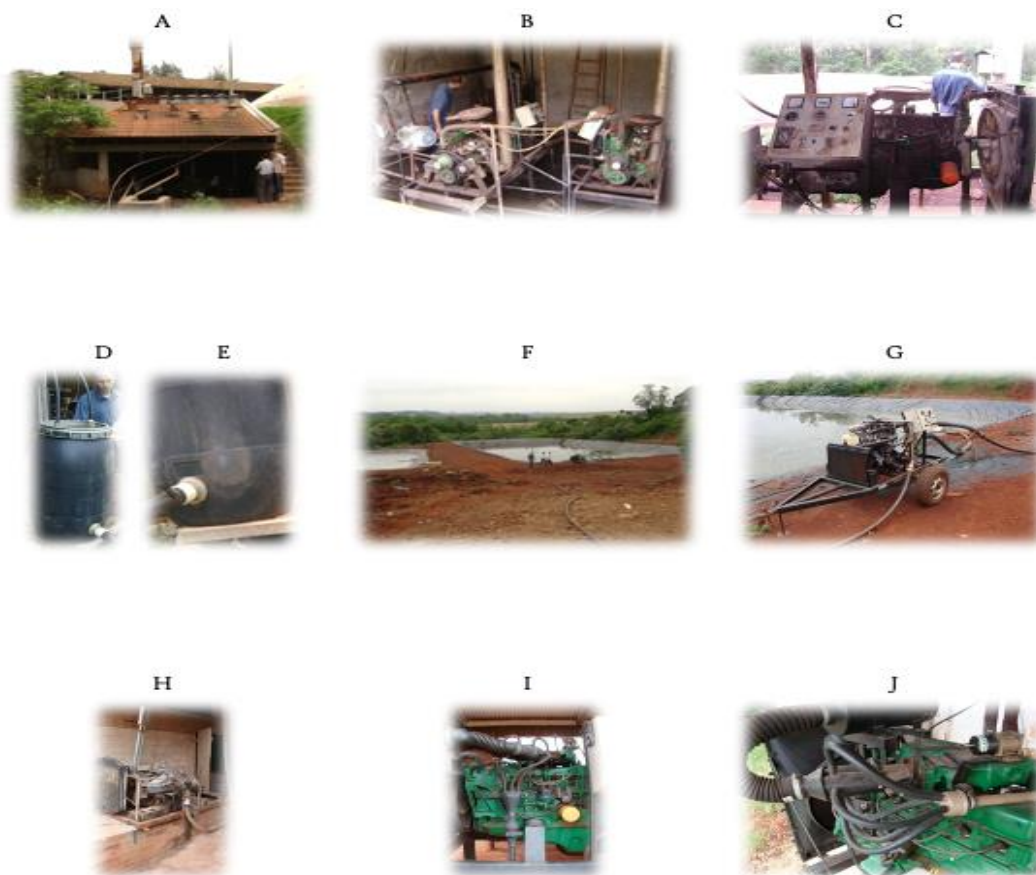


Figura 10. Ilustração dos sistemas de aproveitamento e filtragem do biogás em propriedades rurais na região de Toledo-PR: A) Vista geral da casa de máquina; B) Ilustração do sistema motogerador alimentado a biogás; C) Detalhe do painel de controle do conjunto motogerador; D) Sistema de filtragem a seco do biogás (limalha de ferro); E) Detalhe do sistema de drenagem do filtro (torneira instalada no fundo do tambor); F) Vista geral do sistema motobomba alimentado com biogás; G) Detalhe do sistema de motobomba alimentado com biogás; H) Vista geral do sistema motogerador alimentado a biogás; I) Detalhe do sistema de injeção e controle do biogás no carburador do motor; J) Detalhe do sistema de injeção do biogás no carburador do motor. Fonte: arquivo pessoal do primeiro autor.

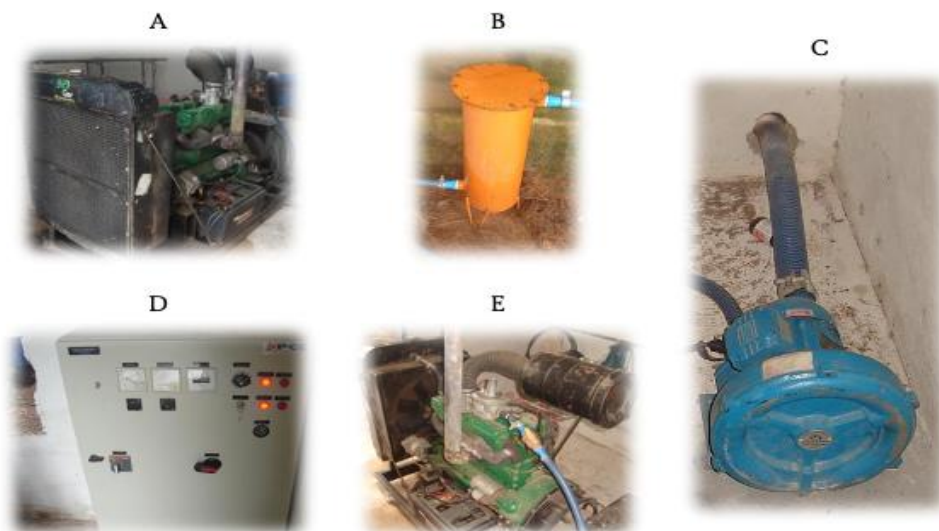


Figura 11. Ilustração dos sistemas de aproveitamento e filtragem do biogás em Oratório-MG: A) Conjunto motogerador; B) Sistema de filtragem do biogás com limalha de ferro; C) Sistema de pressurização do biogás; D) Sistema de controle do conjunto motogerador; E) Detalhe do sistema de alimentação e controle da vazão do biogás. Fonte: arquivo pessoal do primeiro autor.

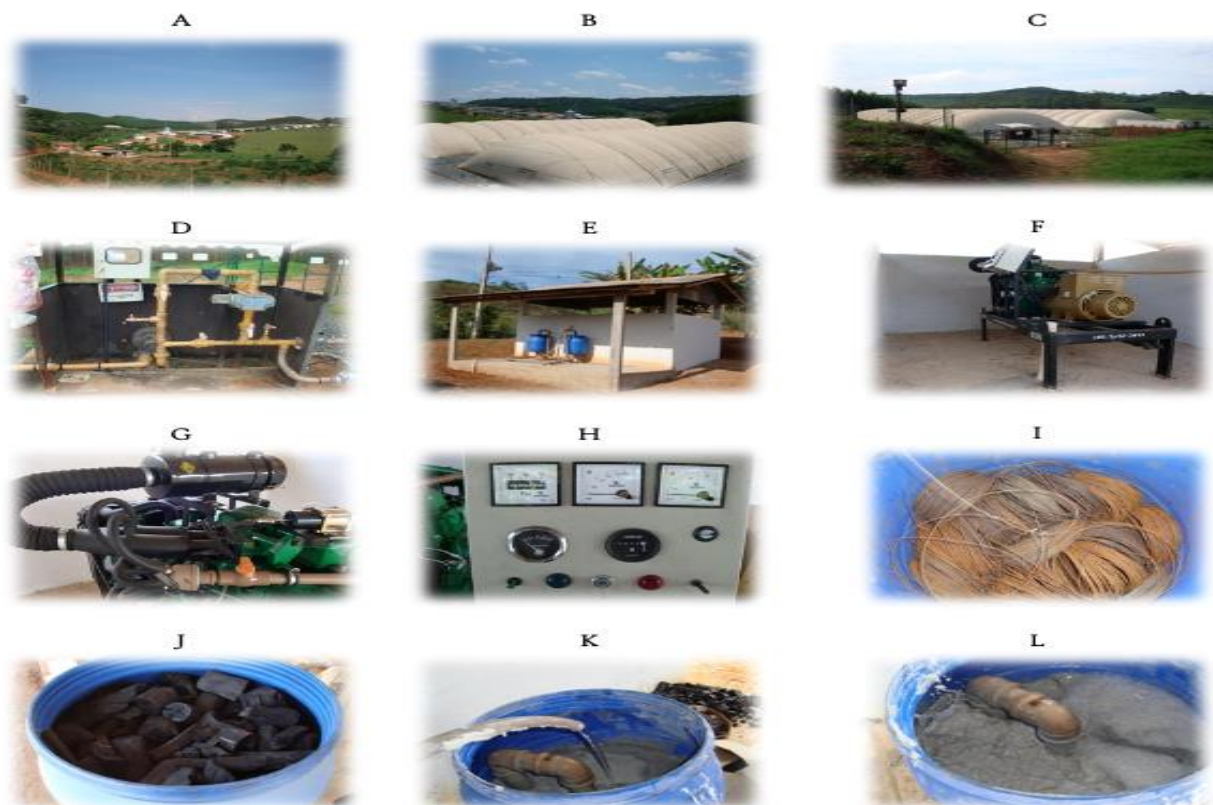


Figura 12. Ilustração do sistema de aproveitamento e filtragem do biogás no local de execução do projeto de doutorado do primeiro autor: A) Vista geral da propriedade no município de Teixeira-MG; B) Vista geral dos biodigestores tubulares de fluxo contínuo; C) Vista geral do sistema de controle do biogás; D) Detalhe do sistema de controle e medição do biogás; E) Vista geral do sistema de filtragem do biogás; F) Vista geral do conjunto motogerador de 36kVA; G) Detalhe do sistema de injeção e controle da pressão do biogás no carburador do motor; H) Detalhe do sistema de controle do motogerador; I) Detalhe do enchimento do filtro de via seca; J) Detalhe do processo de remoção de umidade do biogás; K) Detalhe do enchimento do filtro de via úmida; L) Detalhe do sistema de borbulhamento do biogás na solução de Hidróxido de Cálcio. Fonte: arquivo pessoal do primeiro autor.

Maiores detalhes técnicos do sistema de purificação do biogás ilustrados na Figura 12 podem ser encontrados na tese de doutorado do primeiro autor cujo título é “Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás produzido na fermentação de dejetos de suínos visando sua utilização em motores de combustão interna para geração de energia elétrica” defendida no dia 09 de junho de 2010, no departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa-MG.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, verifica-se que o estudo de implementação de sistemas de purificação do biogás a baixo custo, para cogeração de energia elétrica oriundo da fermentação anaeróbia de dejetos da agropecuária pode contribuir para redução dos custos de produção, agregação de valor ao produto final, redução das emissões de metano, proporcionando o desenvolvimento sustentável do setor no Brasil.

Numa visão prática, os projetos de cogeração devem evitar conexões de metais dissimilares, frestas, arestas, mudanças bruscas de direção de fluxo, etc; bem como, prever a sobre espessura de corrosão, possibilitando fácil acesso a áreas suscetíveis à corrosão e soldas bem-acabadas.

Na expectativa de evitar ou inibir o processo corrosivo provocado pelo sulfeto de hidrogênio (H₂S), nos materiais e nos equipamentos, recomendam-se procedimentos anticorrosivos, tais como: purificação do biogás; seleção de materiais específicos para biogás que ofereça resistência ao ataque do H₂S residual; revestimentos (metálicos, inorgânicos e orgânicos); proteção catódica; inibidores de corrosão; produtos removedores de H₂S e biocidas. Tendo sempre em mente que o uso de quaisquer das técnicas de purificação do biogás mencionadas anteriormente para obtenção de um bom resultado dependerá de vários fatores, tais como: aplicabilidade, utilização industrial ou não, custo, segurança, condições operacionais e, principalmente, conhecimento técnico para indicação e implementação adequada.

4. AGRADECIMENTOS

À Fundação de amparo à pesquisa do estado de Minas Gerais (Fapemig) pela bolsa e financiamento do projeto de doutorado do primeiro autor, à equipe do Portal do Agronegócio, aos proprietários e colaboradores das propriedades rurais visitadas, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, durante o período de execução do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACGIH - AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. Hydrogen sulfide. Documentation of the threshold limits values and biological exposure indices. In: **AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS INC.**, 1991, Cincinnati. 6th ed. Cincinnati, p.786-788, 1991. 213

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 142 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Instituto de Física, Faculdade de Economia e Administração e Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2000.

AMESTOY, E. A.; FERREYRA, R. D. Utilização delbiogás. In: **SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA**, 1987, Montevideo. **Anais...** Montevideo: Comisión de Agroenergia, FAO, 1987. 63 p.

ANDERSON CATAPAN, DARIANE CRISTINA CATAPAN, EDILSON ANTONIO CATAPAN. Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: Uma abordagem do custo de geração da energia. In: **XVII Congresso Brasileiro de Custos** – Belo Horizonte – MG, Brasil, 3 a 5 de novembro de 2010

ANGONESE, A. R.; CAMPOS, A. C.; 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**, Campina Grande, v.10, n.3, p.745-750, 2006.

AVELLAR, L. H. N.; CARROCCI, L. R.; SILVEIRA, J. L. A utilização de subprodutos agroindustriais na geração de energia em unidades co-geradoras. **Revista Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, Rio Grande do Norte, n. 13, 2000.

BEAUCHAMP, R. O.; BUS, J. S.; POPP, J. A.; BOREIKO, C. J.; ANDJELKOVICH, D. A. A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity. **CRC Critical Reviews in Toxicology**, v. 13, p.25-97, 1984.

BEBER, J. A. C. Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais. 295 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria-RS, 1989.

BECK, A.M.O biogás de suínos como alternativa energética sustentável. In: **XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2007, Foz do Iguaçu. **Anais... A energia que move a produção: um diálogo sobre integração projeto e sustentabilidade**. Foz do Iguaçu - PR: ENEGEP, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - **Lei n.º 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002**. Publicado no DOU 29 de abril de 2002, p. 22, 2002.

BUISMAN, C. N. J.; LETTINGA, G.; PAASSCHENS, C. W. M.; HABETS, L. H. A. Biotechnological sulfide removal from effluents. **Water Science and Technology**, London, v.24, p.347-356, 1991.

CAPSTONE MICROTURBINE PERFORMANCE SPECIFICATIONS – **Renewable CR65 e CR65-ICHP**, 2001. Disponível em: http://www.microturbine.com/_docs/BiogásSellSheetwRenCR65&CR65_ICHP_4R1.pdf. Acesso em: 02/03/2023.

CASTANÓN, N.J.B. **Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais**. São Paulo: Universidade de São Paulo-USP, 2002. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização, 2002. 214

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S.N.M.; SILVA, S.L.; KAILER, E.K. Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinâmométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.145-153, 2008.

CCE - Centro para Conservação de Energia. Guia Técnico do Biogás. Ed. JE92 Projectos de Marketing Ltda, Algés, Junho, 2000

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Levantamento do Potencial Real de Geração de Excedentes no Setor Sucroalcooleiro** - BIO.COM. São Paulo, 2001.

CERVI, R.G; ESPERANCINI, M.S.T; C. BUENO, O.C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n. 5, p.831-844, 2010.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bovinocultura de leite. In: **6º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL (AGRENER GD)**, 2006, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2006.

CORTEZ, L. A. B.; NEVES FILHO L. C. Aplicação de bombas de calor na agricultura e na agroindústria brasileira, 1996, La Serena. In: **III CONGRESSO NACIONAL DE ENERGIA**, 1996, La Serena. **Anais...** Chile, 1996, p. 337-343.

DENG, J. F. **Hydrogen sulfide**. In: SULLIVAN, J. B.; KRIEGER, G. R. eds. Hazardous materials toxicology: clinical principles of environmental health. Baltimore: Williams & Wilkins, 1992. p.711-717.

DIESEL, R.; MIRANDA, C.R.; PERDOMO, C.C. **Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos**. Boletim Informativo de Pesquisa-Embrapa Suínos e Aves e Extensão. EMATER/RS, ANO 10 BIPERS, n. 14, 2002.

EASTER, C.; QUIGLEY, C.; BURROWES, P.; WITHERSPOON, J.; APGAR, D. Odor and air emissions control using biotechnology for both collection and wastewater treatment systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 113, p. 93-104, 2005.

FISCHER, G.; SCHRATTENHOLZER, L. Global bioenergy potentials through 2050. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 20, n. 3, p.151-159, 2001.

FRARE, L.M.; GIMENES, M.L.; PEREIRA, N.C. Correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 29-37, 2006.

GUTHRIE, K.M. Data, and techniques for preliminary capital cost estimation. **Chemical Engineering**, New York, v. 76, n. 6, p. 114-142, 1969.

HARDOIM, P.C.; GONÇALVES, A.D.M.A. Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. In: ENCONTRO DE ENERGIA NOMEIO RURAL, 2003, Lavras. **Anais...** Lavras-MG, 2003.

HORIKAWA, M. S.; ROSSI, F.; GIMENES, M. L.; COSTA, C. M. M.; DA SILVA, M. G. C. Chemical absorption of H₂S for biogas purification. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 21, n. 3, p.415-422, 2004.

HUANG, J.; CROOKES, R.J. Assessment of simulated biogás as a fuel for the spark ignition engine. **Elsevier Science Fuel**, Amsterdã, v.77, n. 15, p. 1793-1801, 1998.

IPCC (2007), Working group II contribution to the intergovernmental panel on climate change. Climate change 2007: climate change impacts, adaptation and vulnerability, summary to policymakers, Bruxelas.

JOHANSSON, T. B.; KELLY, H., REDDY; A. K. N.; WILLIAMS, R. H. Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity. **Island Press**, Washington, p.1160, 1993.

JORDAN, R. A. **Desenvolvimento de uma bomba de calor água-água acionada a biogás para utilização em processos de aquecimento e resfriamento em sistemas de produção de leite**. 2005. 261 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Construções Rurais, Universidade de São Paulo-USP, Campinas - SP, 2005.

KO, T. H.; CHU, H.; LIN, H. P.; PENG, C.Y. Red soil as a regenerable sorbent for high temperature removal of hydrogen sulfide from coal gas. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdã, v. B136, p.776-783, 2006.

KOELSCH, R.; JEWELL, W. Cogeneration of electricity and heat from biogas. **ASAE**, St Joseph, v. 2, n. 2, p. 220-227, 1986.

KONZEN, E.A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida.** 1980. 56 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais-UFGM, Belo Horizonte, 1980

LA FARGE, B. **Le Biogaz - Procédés de Fermentation Méthanique.** Paris: Masson, 1979. 237 p.

LAR, J. S.; XIUJIN, L. Removal of H₂S during anaerobic bioconversion of dairy manure Biotechnology and bioengineering. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, China, v.17, n. 2, p.273-277, 2009.

LEMONS, B. P.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A.; CASTRO, N. J. Geração de energia elétrica a partir de dejetos suínos: um enfoque sobre os aspectos técnicos e econômicos. In: **III SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA – SISEE**, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.

LENS P. N. L.; VISSER A.; JANSEN A. J. H.; HULSHOFF POL L. W.; LETTINGA G. Biotechnological treatment of organic sulphate-rich wastewaters. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, London, v.28, p.41-88, 1998.

LENS, P. N. L.; KUENEN, J. G. The biological sulfur cycle: novel opportunities for environmental biotechnology. **Water Science and Technology**, London, v. 44, n. 8, p. 57-66, 2001.

LONGO, E.S. **Estudo da viabilidade econômica na geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente da suinocultura - Comunidade da linha Aparecidinha - Santa Helena - PR.** 2007. Foz do Iguaçu. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Faculdade União das Américas, Foz do Iguaçu – PR, 2007.

216

LUCAS JR. J. Laminados de PVC – Solução para biodigestores. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO PVC**, 2005. São Paulo. **Anais...** São Paulo: São Paulo, 2005.

MACHADO, N.S. **Remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás produzido na fermentação de dejetos de suínos visando sua utilização em motores de combustão interna para geração de energia elétrica.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa-UFV, Viçosa - UFV, 2010.

MAGALHÃES, E. A.; SOUZA, S. N. M.; AFONSO, A. D. L.; SILVA, J. N. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.14, n. 4, p. 226-237, 2006.

MAINIER, F.B.; VIOLA, E.D.M. O sulfeto de hidrogênio (H₂S) e o meio ambiente In: **II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT’2005**

MERÇON, F.; GUIMARÃES, P.I.C.; MAINIER, F.B. Corrosão: Um exemplo usual de fenômeno químico. **Química Nova Na Escola** N° 19, MAIO 2004

BRASIL - Ministério de Minas e Energia – Balanço energético nacional 2004. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/balanco-energetico-nacional/5-edicoes-anteriores/01-ben-2004-ano-base-2003-pdf.pdf>> Acessado em 24 de março de 2023>.

MITZLAFF, K.V. **Engines for biogas.** Viesbaden: Veiweg, 1988. 133p.

MUNÓZ, M; MORENO, F.; MOREA-ROY, J.; RUIZ, J.; ARAUZO, J. Low heating value gas on spark ignition engines. **Biomass e Bioenergy**, Amsterdã, v. 18, p. 431-439, 2000.

NOGUEIRA, C.E.C.; ZÜRN, H.H. Modelo de dimensionamento otimizado para sistemas energéticos renováveis em ambientes rurais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.341-348, 2005.

NOGUEIRA, E. **Análise de investimentos**. In: BATALHA, M. O. Gestão agroindustrial. 2.ed. São Paulo: Atlas, v.1,2001. 692 p.

NORONHA, A.C.G.; GIMENES, R.M.T. Mensuração dos custos de implantação de biodigestores na suinocultura - Gestão econômica e social de cooperativas In: **V ENCONTRO DE PESQUISADORES LATINO-AMERICADO DE COOPERATIVISMO**, 2006.

O'FLAHERTY, V.; COLLERAN, E. Sulfur problems in anaerobic digestion. In: **LENS, P. N. L.; HULSHOF POL L. (Eds) ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES TO TREAT SULFUR POLLUTION – PRINCIPLES AND ENGINEERING**, 2000, London. **Anais...**London: International Water Association, 2000, p. 467-489.

OLIVEIRA, J.R.; MATA, M. E. R. M. C. Desenvolvimento experimental de uma bomba de calor: simulação de secagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade 'carioca'. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.73-77, 1999.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: EMBRAPA-CNPSEA (Documentos), 1991. 188p.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HILLS, D.J.; CHANCELLOR, W.J. (1981). Diesel engine modification to operate on biogas. **ASAE**, St. Joseph, p.808-13.

ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M.; LUCAS JÚNIOR, J. **Biodigestores rurais indiano e chinês**. FCAV/UNESP: Jaboticabal.(Boletim Técnico, 9), 1986. 25 p.

OSORIO, F.; TORRES, J. C. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. **Renewable Energy**, Amsterdã, v.34, p.2164-2171, 2009.

PERDOMO, C. C.; COSTA, R. R. H; MEDRI, W.; MIRANDA, C. R. **Dimensionamento de sistemas de tratamento (decantador de lagoas) e utilização de dejetos suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves (Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 234), 1999. 5 p.

PERLINGEIRO, C.A.G. **Engenharia de processos – análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PINHEIRO P. C. C. **Sistemas térmicos**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, (Apostila didática), 1999. 32 p.

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, Amsterdã, v.86, p.669-674, 2009.

QUESADA, G. M.; BEBER, J. A. C.; SOUZA, S. P. Balanços energéticos - uma proposta metodológica para o Rio Grande do Sul. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.39, n.1, p.20-28, 1987.

SALOMON K.R. **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** 2007. Itajubá. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTOS, A.M. **Queimadores de gás com ar induzido - teoria e projeto.** São Carlos: EESC/USP, 1990, 29 p.

SANTOS, P. **Guia Técnico de Biogás.** Amadora-Portugal: CCE – Centro para a Conservação de Energia, 2000. 117 p.

SANTOS, T.M.B.; LUCAS JR., J.; SILVA, F.M. Avaliação do desempenho de um aquecedor para aves adaptado para utilizar biogás como combustível. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.3, 2007.

SEREDYCH, M.; STRYDOM, C.; BANDOSZ, T.J. Effect of fly ash addition on the removal of hydrogen sulfide from biogas and air on sewage sludge-based composite adsorbents. **Waste Management**, Amsterdã, n.28, p. 1983-1992, 2008.

SIEBENMORGEN, T. J. Integration of a cogeneration system into a swine operation: 1. Model development and system description. **ASAE**, St Joseph, v. 31, n. 5, p. 1556-1565, 1988.

SILVA, A.; CORTEZ, L. A. B. **Projeto integrado de utilização de biogás e energia solar visando a operação de um sistema de refrigeração de leite por absorção.** 39 p. Campinas. Dissertação (Mestrado), UNICAMP, Campinas, 1991.

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

SILVA, F. M.; LUCAS JUNIOR, J.; BENINCASA, M.; OLIVEIRA, E. Desempenho de um aquecedor de água a biogás. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.608-614, 2005.

SILVEIRA, J.L. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: Estudo de casos para o setor terciário.** 193 p. Campinas. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Campinas-UNICAMP, Campinas - SP, 1994.

SIRIPORNAKARACHAI, S.; SUCHARITAKUL, T. Modification and tuning of diesel bus engine for biogás electricity production. **International Journal of Science and Technology Thailand**, India, v. 1, n.2, p. 194-207, 2007.

SORANSO, A. M.; GABRIEL FILHO, A.; LOPES, A.; SOUZA, E. G.; DABDOUB, M. J.; FURLANI, E.A.; F. T., CAMARA. Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.5, p.553-559, 2008.

SORDI, A. **Potencial de conservação de energia nos processos de produção em uma propriedade rural.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UNIOESTE, Cascavel-PR, 2004.

SOUZA, J. **Desempenho de um motor de combustão interna ciclo Otto operando com gás natural e Biogás.** 2004. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). UNIOESTE, Cascavel-PR, 2004.

SOUZA, R.G.; SILVA, F.M.; BASTOS, A.C. Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 190-195, 2010.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

STAHL, J. R. An internal combustion engine fueled with biogas integrated into an Ethanol Plant. **ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 1, p. 202-205, 1981.

TECPAR - INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ. 2002. Disponível em: <http://www.tecpar.br>. Acesso em agosto de 2010.

THOMAS, D. G.; DELVAL, P. Utilisation du biogaz dans les moteurs thermiques. **Informations Chimie**, Paris, v. 283, p. 147-149, 1987.

TIPPAYAWONG, N.; THANOMPONGCHART, P. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. **Energy**, Amsterdã, v. 35, p.4531-4535, 2010.

TREVISAN, V.; MONTEGGIA, L. O. Produção de biogás a partir de efluente da suinocultura utilizando digestão anaeróbia em dois estágios. In: **I SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE ANIMAIS GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS ANIMAIS**, 2009, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2009. 219

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes.** New Jersey: Prentice Hall, 2003. 1007 p.

VIEIRA, S.M. M.; SILVA, J.W. **Primeiro inventário brasileiro sobre emissões antrópicas de gases do efeito estufa.** Relatório de Referência - emissão de metano no tratamento e na disposição de resíduos no Brasil. CETESB, 2002. 86 p.

VINCKE, E.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. Analysis of the microbial communities on corroded sewer pipes - case study. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlim, n. 57, p.776-785, 2001.

XU, C.; ZONDLO, J.W.; GONG, M.; BLANCAS, F.E.; LIU, X.; CELIK, I.B. Tolerance tests of H₂S-laden biogas fuel on solid oxide fuel cells. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 195, n. 15, p. 4583-4592, 2008.

YUAN, W.; BANDOSZ, T. J. Removal of hydrogen sulfide from biogas on sludge-derived adsorbents. **Fuel**, v.86, p.2736-2746, 2007.

YUMONO, A. S.; LAMMERS, P. S. Odor Pollution in the Environment and the Detection Instrumentation. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development**, v. 4, 2004.