

Confeção e avaliação de um sistema de remoção do CO₂ contido no biogás

Edney Alves Magalhães, Samuel Nelson Melegari de Souza*, Adriano Divino de Lima Afonso, Reinaldo Prandini Ricieri

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua Universitária 1619, Jardim Universitário, 85814-110, Cascavel, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: ssouza@unioeste.br

RESUMO. O biogás é um combustível alternativo produzido a partir da digestão anaeróbia de biomassa (dejetos orgânicos) e é constituído basicamente de metano e dióxido de carbono. A mudança na composição do biogás é de grande importância, pois aumenta a sua viabilidade de utilização como biocombustível. A remoção do dióxido de carbono (CO₂) faz com que o percentual de metano (CH₄) no biogás se eleve, tornando seu poder calorífico maior. Uma diminuição na concentração de ácido sulfídrico (H₂S) reduz a corrosão causada pelo biogás nos sistemas térmicos de geração de energia secundária. Este trabalho visou desenvolver um mecanismo físico químico de remoção do CO₂ contido no biogás. O equipamento elaborado foi uma coluna de absorção recheada, com 250 cm de altura e 30 cm de diâmetro, utilizando tubos de PVC rígido de 20 mm de diâmetro como recheio e água como solvente. Realizaram-se ensaios com as pressões internas da coluna variando entre 300 e 500 kPa e a vazão de biogás entre 190 e 670 cm³/s. O biogás possuía, originalmente, uma concentração de CO₂ de 33%. Com a utilização da coluna de absorção conseguiu-se que essa concentração se reduzisse para 15%, o que representou um aumento de 57% a mais no poder calorífico por unidade de massa.

Palavras-chave: coluna de absorção, metano, energia renovável, gás natural.

ABSTRACT. Development and appraisal of a Biogas CO₂ remotion system. The biogas is an alternative fuel produced by the biomass anaerobic digestion (organic waste) and is composed by methane and carbon dioxide. The shift in the composition of biogas is very important because it increases its use viability as biofuel. The remotion of carbon dioxide (CO₂) increases the methane (CH₄) concentration in biogas composition, making its heating value higher. A decrease of acid hydrosulphide (H₂S) concentration reduces the corrosion produced during the use of biogas in thermal systems for the secondary energy production. This work aimed to develop a physical and chemical mechanism for biogas CO₂ remotion. The device developed was an absorption column stuffed of 250 cm high and 30 cm of diameter, using pipe of PVC rigid of 20 mm of diameter as stuff and water as solvent. Tests were done with inside pressure and gas flow in the column between 300 and 500 kPa and 190 and 670 cm³/s. The original biogas has a concentration of 33% CO₂. With the utilization of the column absorption a reduction in CO₂ concentration of 15% was obtained, which showed an increasing of 57% in the lower heating value of biogas per unit of mass.

Key words: column of absorption, methane, renewable energy, natural gas.

Introdução

A enorme participação das fontes não-renováveis na oferta mundial de energia coloca a sociedade diante de um desafio: a busca por fontes alternativas de energia. E isso não pode demorar a ocorrer, sob o risco de o mundo, literalmente, entrar em colapso, pelo menos se for mantida a atual matriz energética, na qual o petróleo tem uma importância vital.

Atualmente, despontam novas fontes de energia que poderão no futuro desempenhar o papel que o petróleo desempenhou até o momento: a energia solar, o hidrogênio, a eólica e a biomassa.

O Brasil devido à sua vasta extensão territorial e por ser um país essencialmente agrícola, apresenta um alto potencial de recursos naturais geradores de energia, o que poderia substituir o suprimento dos energéticos convencionais, destacando-se a eólica, a solar, pequenas quedas de água e principalmente, a biomassa, pelo fato do Brasil ser um país com atividade agrícola em plena expansão.

A biomassa pode ser encontrada na natureza em diversas formas. As mais conhecidas são: a lenha, resíduos gerados pelas culturas agrícolas, agroindústrias e criação animal, florestas

energéticas e resíduos sólidos municipais (Voivontas *et al.*, 2001).

Atualmente, várias técnicas de aproveitamento da biomassa estão em fase de desenvolvimento e aplicação. Dentre as tecnologias de utilização da biomassa em conversão energética estão os processos termoquímicos (combustão direta, gaseificação, etc) e os biológicos (digestão anaeróbia).

Souza *et al.* (2003), estudando a disponibilidade de resíduos gerados pela a suinocultura estimou que a produção de dejetos na região Oeste do Estado do Paraná é cerca de 870.137 ton/ano, com um potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 155 GWh/ano. Sordi *et al.* (2003) estimaram que a disponibilidade de resíduo da avicultura nesta mesma região chega a 382.021 ton/ano, o que corresponde um potencial energético teórico de aproximadamente 142 MWh/ano. Desta forma, a utilização de biodigestores para o tratamento e produção de biogás apresenta-se como uma solução ecológica e energética para pólos agroindustriais.

A digestão anaeróbia de resíduos vegetais e animais em biodigestores produzem o biogás e o biofertilizante, sendo que o último tem aplicação na fertirrigação e o biogás é utilizado como fonte alternativa de energia na propriedade rural ou agroindústria na qual o sistema está implantado.

Nos sistemas agroindustriais existem diversas formas de aproveitamento do biogás, como exemplo, tem-se a utilização como fonte primária de energia em aquecedores de galpões e conjunto motor-gerador de eletricidade. Mesmo assim, necessita-se ainda de um maior desenvolvimento tecnológico para um melhor aproveitamento e melhoria de sua eficiência durante o uso final do biogás. Uma das formas de se melhorar o aproveitamento do biogás é reduzir a concentração de substâncias corrosivas como o ácido sulfídrico e aquelas que reduzam seu poder calorífico como o CO₂ (dióxido de carbono).

Propriedades do biogás

As propriedades físico-químicas do biogás têm influência na tecnologia utilizada para sua depuração e combustão. O biogás como mistura variável de diferentes gases tem poder calorífico e densidade variando com a concentração relativa de cada um dos constituintes. Os principais constituintes do biogás são o metano (CH₄) de 50% a 75% e o dióxido de carbono (CO₂) de 25% a 40%. Outros gases, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), o nitrogênio (N₂), o hidrogênio (H₂) e o monóxido de carbono (CO), estão também presentes na mistura, embora em quantidades bastante reduzidas (Pinheiro, 1999).

Essas propriedades são importantíssimas para a engenharia de equipamentos adequados ao biogás (CCE, 2000). Dentre elas estão: o poder calorífico e densidade.

O **poder calorífico** do biogás depende da porcentagem de metano (CH₄) nele existente. O metano puro, em condições normais (pressão a 1,0 atm e temperatura de 0°C), possui um poder calorífico de 9,9 kWh/m³, ao passo que o biogás com concentração de metano variando entre 50% e 80% tem um poder calorífico inferior de 4,95 a 7,9 kWh/m³ (CCE, 2000). Segundo o MME (2000), citado por Magalhães (2000), o poder calorífico médio do biogás é equivalente a 5,5 kWh/m³.

A **densidade** é um parâmetro muito útil para projetos de equipamento, armazenamento e compressão do biogás. Pode ser obtido por meio da equação:

$$\text{Densidade}_{\text{biogás}} = \frac{\frac{\%CH_4}{100} \times 0,679 + \left(\frac{100 - \%CH_4}{100} \right) \times 1,841}{1,206} \quad (1)$$

Na qual;

% CH₄ = percentual de metano (CH₄) no biogás.

Fonte: CCE (2000).

Remoção de CO₂

Lastella (2002), estudando a produção e a purificação do biogás, afirmou que a purificação do biogás com a remoção do CO₂ possibilita sua melhor utilização na geração de energia elétrica.

Além da energia elétrica, o biogás pode ser utilizado em todas as aplicações destinadas ao gás natural. Mas nem todos os dispositivos utilizam os mesmos padrões de gás, desta forma, a remoção de certos componentes do biogás faz-se necessária. Os principais componentes a serem removidos do biogás são: a água, o ácido sulfídrico (H₂S), as partículas e o dióxido de carbono (CO₂) (Ad-Nett, 2002).

O dióxido de carbono tem um efeito de diluição no biogás, reduzindo o seu conteúdo energético. Sua remoção é de particular interesse para algumas aplicações do biogás como, por exemplo, a utilização como biocombustível em veículos, injeção na rede de gás natural, entre outras.

A remoção do dióxido de carbono ou de qualquer outro gás por absorção é uma operação unitária, na qual um componente de uma mistura é dissolvido num líquido. Essa operação pode envolver reações químicas ou ser essencialmente física. Dentre os métodos químicos estão: absorção em carbonato de potássio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, TGN (Tufo Giallo

Napoletano), entre outros. Dentre os métodos físicos destacam-se: os crivos moleculares, a separação por membranas e em colunas absorção. Os métodos físicos são os mais conhecidos e utilizados, devido à fácil regeneração dos componentes utilizados para absorção, diferentemente dos métodos químicos. A vantagem deste método é que requer relativamente pouca energia, mas o CO₂ deve estar com a pressão parcial elevada (Wong e Bioletti, 2002).

As **colunas recheadas** são muito utilizadas nos processos de separação de gases por absorção. É um dispositivo relativamente simples em relação à coluna de bandeja. Normalmente de constituição simples, essas colunas consistem em um casco cilíndrico, uma placa perfurada para suporte do recheio e distribuição do solvente.

O funcionamento da coluna geralmente, é contracorrente, ou seja, o soluto (gás) entra na parte inferior da coluna, enquanto o solvente entra na parte superior, estabelecendo um contato líquido/gás numa direção contracorrente.

O **recheio** é o principal componente da coluna recheada, cuja função é promover uma maior superfície de contato entre o líquido e o gás, aumentando a taxa de absorção do sistema. Existem diversos tipos de recheios estudados que são citados por Fair *et al.* (1980). O recheio também é um fator importante no custo de construção da coluna, à medida que, as colunas com diâmetros acima de 60 cm são inviáveis quando recheadas. Os recheios são colocados nas colunas ao acaso ou ordenados, sendo constituídos de materiais como: cerâmicas, carbono, aço e polietileno (Maddox, 1980).

No processo de purificação do biogás, o interessante é retirar o CO₂ até que a porcentagem de metano fique próxima a do gás natural, para que possa ser utilizado nos mesmos usos finais. Segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo), na Portaria 128, de 28 de agosto de 2001, a porcentagem mínima de metano no gás natural deve ser de 68% e CO₂ máximo de 18% para a região Norte, enquanto para as demais regiões a porcentagem mínima de metano deve ser de 86% e máxima de CO₂ de 5%. Essa diferença entre regiões deve-se ao fato de que o gás natural da região Norte não se destina a veículos, caso a destinação seja veicular, as porcentagens devem seguir as demais regiões.

É possível que as variáveis e os parâmetros mais importantes no projeto de um sistema de absorção sejam os mais difíceis de descrever exatamente por meio matemático. O tipo de equipamento, a estrutura interna do equipamento, a razão líquido-gás, o solvente, o diâmetro e altura da coluna são escolhidos em geral, com base em

experiências obtidas da construção de outras colunas (Maddox, 1980).

Escolha do Solvente

Segundo Maddox, (1980), o solvente ideal deve ser não-volátil, puro, não corrosivo, estável, com baixa viscosidade, não espumante, não inflamável e que dissolve infinitamente o soluto. Infelizmente, esse solvente raramente se encontra e a escolha se faz com base na alternativa mais desejável, como por exemplo, o custo. Preferencialmente, dá-se prioridade na dissolução do soluto no solvente. Normalmente, o gás de saída está saturado de solvente, fazendo com que o fator custo do solvente seja analisado devido às perdas existentes.

No caso do CO₂, existem diversos solventes que podem ser utilizados. Em se tratando de solubilidade, o polietileno glicol vem sendo bastante utilizado, devido à alta solubilidade do CO₂ e do H₂S. Quando o fator a ser analisado é o custo do solvente em processos de remoção de CO₂, a água consiste num dos melhores produtos. O CO₂ e o H₂S são solúveis em água e esta pode ser encontrada abundantemente, possuindo um custo bastante reduzido (Ad-Nett, 2000).

Razão líquido/gás

A razão líquido/gás é um dos fatores mais importantes do processo de absorção de CO₂. É definida a quantidade (x) de solvente necessária para absorver uma quantidade (y) de soluto. Cada soluto possui uma solubilidade a um determinado solvente e é por meio dessa solubilidade que se determinou a vazão de solvente necessária para capturar o soluto existente numa mistura gasosa. Em se tratando de biogás e água, a solubilidade dos componentes existentes no biogás em água estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Solubilidade dos gases constituintes do biogás em água.

Temperatura (°C)	Volume de gás dissolvido na água (cm ³ /litro H ₂ O/atm)		
	CO ₂	H ₂ S	CH ₄
20	878	2.582	33,8
25	760	2.282	30,0
35	592	1.831	25,4

Fonte: CCE, 2000.

Por meio da solubilidade e da composição do gás a ser purificado pode-se determinar a circulação de solvente necessária no sistema pela equação:

$$V_L = \frac{V_B}{S \times P} \times \frac{N}{100} \quad (2)$$

Na qual:

V_L= vazão de água necessária (L/min);

V_B= vazão de biogás (cm³/min);

S = solubilidade do CO₂ em água (cm³/L/ atm);
P = Pressão de operação (atm);
N = nível de CO₂ no biogás (%).

Pressão de serviço

A pressão de serviço é a pressão em que a coluna de absorção de CO₂ irá operar durante o processo de absorção.

Segundo Myken *et al.* (2001), a absorção do CO₂ pela água se dá em pressões elevadas. Esse mesmo autor cita exemplos sobre a utilização das colunas de absorção, apresentando, na maioria dos casos, pressões de serviço numa faixa de 6 a 12 bar, obtendo uma porcentagem de metano na saída do sistema em torno de 95% e um percentual de 1 a 3% de CO₂.

Quando são utilizadas pressões elevadas, como as citadas por Myken *et al.* (2001), obrigatoriamente utiliza-se equipamentos e peças de maior porte, sendo normalmente onerosas, o que acarreta na dificuldade de implantação de sistemas de pequeno porte.

Desta forma, buscou-se neste trabalho, desenvolver um equipamento capaz de absorver o CO₂ contido no biogás que trabalhe em pressões menores e que utiliza água como solvente, objetivando que o biogás atinja uma concentração de metano próxima ou igual ao do gás natural, e ainda determinar os fatores que influenciam no processo de absorção, a eficiência de absorção do sistema e as propriedades finais do biogás.

Material e métodos

A experimentação consistiu na criação e avaliação de uma coluna recheada de absorção de CO₂ existente na mistura gasosa do biogás, utilizando água como solvente. Esse método físico de absorção foi idealizado em virtude das necessidades e da importância da remoção do CO₂ do biogás, seguindo o bom senso e a intuição no que diz respeito ao tipo de equipamento, a estrutura interna do equipamento, a razão líquido-gás, o solvente, o diâmetro e altura de uma coluna recheada.

Construção da Coluna de Absorção

A coluna de absorção foi construída levando em consideração as características principais de uma coluna, descritas anteriormente, no que se refere aos componentes e ao método de funcionamento de uma coluna recheada. Os materiais constituintes do protótipo da coluna de absorção seguiram os parâmetros que envolvem segurança de operação, corrosão dos equipamentos e custos de aquisição e operação.

O *cilindro vertical* da coluna de absorção possui diâmetro de 300 mm por 2500 mm de altura. Sua constituição é de aço galvanizado, com chapa de espessura de 3 mm. O fechamento das extremidades do cilindro foi feito em formato de “chapéu chinês”.

O *recheio* constituiu-se de tubos de PVC com diâmetro de 20 mm e comprimento de 1500 mm em número suficiente para preencher toda a área da base do cilindro. Nesses tubos foram feitas cavidades inclinadas (Figura 1B), no intuito de melhorar a distribuição e homogeneidade do molhamento dos tubos pelo solvente. Note, nessa mesma figura a posição das cavidades, as quais estão dispostas da mesma maneira na coluna. A distribuição (Figura 1A) foi feita de forma ordenada e homogênea, para que o recheio, em toda sua extensão, seja molhado igualmente, fazendo com que o gás que entrar na coluna tenha o maior contato possível com o solvente.

O *suporte do recheio* foi construído por meio de uma chapa cilíndrica totalmente perfurada de aço galvanizado, com orifícios de diâmetro aproximado de 3 mm e distantes aproximadamente, 5 mm uns dos outros. Esse suporte está afixado a 150 mm acima da entrada do gás para garantir sua expansão e distribuição antes de passar pelas furações do suporte, assim a passagem do gás pelo recheio da coluna ocorre de forma uniforme (Figura 2).

O *conjunto moto-bomba* utilizado para o bombeamento do solvente na coluna deve ter uma potência suficiente para recalcar o solvente, sendo maior que a pressão de trabalho da coluna. A vazão também deve ser levada em consideração, pois esse conjunto deve possuir capacidade de bombear uma quantidade de solvente maior de que a mínima necessária para absorção do CO₂ contido na mistura gasosa. O conjunto moto-bomba utilizado foi o da marca Schneider, com potência de 2 cv, trifásico. De acordo com o fabricante do equipamento, a capacidade máxima de recalque de água é igual a 74 mca, com vazão máxima de 1,67 l/s.

A *entrada do solvente* ocorreu por meio de um tubo de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro, localizado a 50 mm do topo da coluna (Figura 2).

Ao entrar na coluna deve ser distribuído de forma que molhe uniformemente o recheio. Para isso, faz-se necessário a utilização de um sistema de distribuição capaz de suprir tal necessidade e que atenda a vazão de solvente demandada pelo conjunto moto-bomba. Vale ressaltar que uma vazão muito pequena torna a questão da eficiência de distribuição impraticável. Para este projeto, idealizou-se como *sistema de distribuição de solvente*, a utilização de um crivo de aço

galvanizado semelhante a um chuveiro para o molhamento uniforme do recheio.

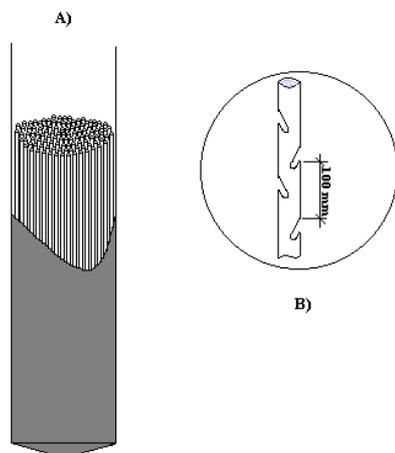


Figura 1. Detalhamento do recheio.

Sistemas de controle

A **medida da vazão** de solvente foi efetuada por um hidrômetro, fornecido pela Companhia de Abastecimento do Paraná (Sanepar), possuindo uma precisão de 0,0001 m³. O controle da vazão foi feito por meio de um registro de esfera, mas nada impede que se utilize qualquer outro modelo de registro, desde que esse suporte a pressão interna do sistema.

O **sistema de saída solvente** (Figura 2) é composto de uma tubulação de 20 mm de diâmetro de aço galvanizado, soldada na parte inferior da coluna, a cerca de 50 mm de sua extremidade, controlada por uma válvula de alívio que permite a saída do solvente assim que a pressão ou o nível desejado do solvente no interior do cilindro vertical seja atingido. Vale salientar que a válvula deve possuir capacidade de expelir no mínimo a mesma quantidade de solvente que entrar na coluna. Desta forma, a válvula de controle da saída do solvente, instalada na tubulação de saída da mistura, era do tipo mola, a qual controlava e mantinha estabilizado o nível interno de solvente no cilindro vertical, visualizado pelo medidor de nível de solvente que ligava a entrada de gás com a saída de solvente. Visualiza-se ainda na Figura 2, um dreno, responsável pela eliminação das impurezas que possam sedimentar no fundo da coluna.

Pode-se também verificar na Figura 2, a posição do sistema medidor do nível de solvente no cilindro vertical, constituído por uma tubulação transparente ligando a tubulação de entrada do gás com a tubulação de saída do solvente.

A **entrada do gás** na coluna foi efetuada por meio de uma tubulação de aço galvanizado com 20 mm de diâmetro, situada a 420 mm da base da

coluna (Figura 2). O compressor utilizado para injetar biogás na coluna de absorção foi o mesmo responsável pelo abastecimento de biogás às granjas de suínos da propriedade. Foi por meio da injeção do biogás que a coluna atingiu as pressões de serviço desejadas.

O **controle da pressão** do interior do cilindro vertical acontece por meio da instalação de uma válvula reguladora de pressão, que permite controlar a pressão interna, mantendo-a constante, independente da pressão montante. Acoplada a essa válvula está um manômetro com precisão de 0,25 kgf/cm², que indica a pressão desejada a ser trabalhada.

O **controle da vazão do biogás** foi realizado por um equipamento que regula e mede o fluxo de vazão de gás. Esse equipamento, da marca Cole-Parmer, tem precisão de 6,7 cm³/s e foi instalado logo após a válvula reguladora de pressão.

A **saída do gás** é constituída de uma tubulação de aço galvanizado de 20 mm de diâmetro, localizada no ápice da coluna, ou seja, no extremo do fechamento em forma de “chapéu chinês”. Nessa tubulação, instalou-se uma válvula igual àquela do sistema de entrada do gás para controlar a saída do gás metano. Acoplado a essa válvula encontra-se um manômetro que mede a pressão de saída do gás metano. Também foi instalada uma válvula de segurança, com o intuito aumentar a segurança do sistema caso a válvula venha a falhar e causar uma explosão. A Figura 3 mostra detalhadamente o protótipo da coluna de absorção de CO₂ do biogás com a distribuição e a nomenclatura de todos seus componentes, com exceção do conjunto moto-bomba e do compressor.

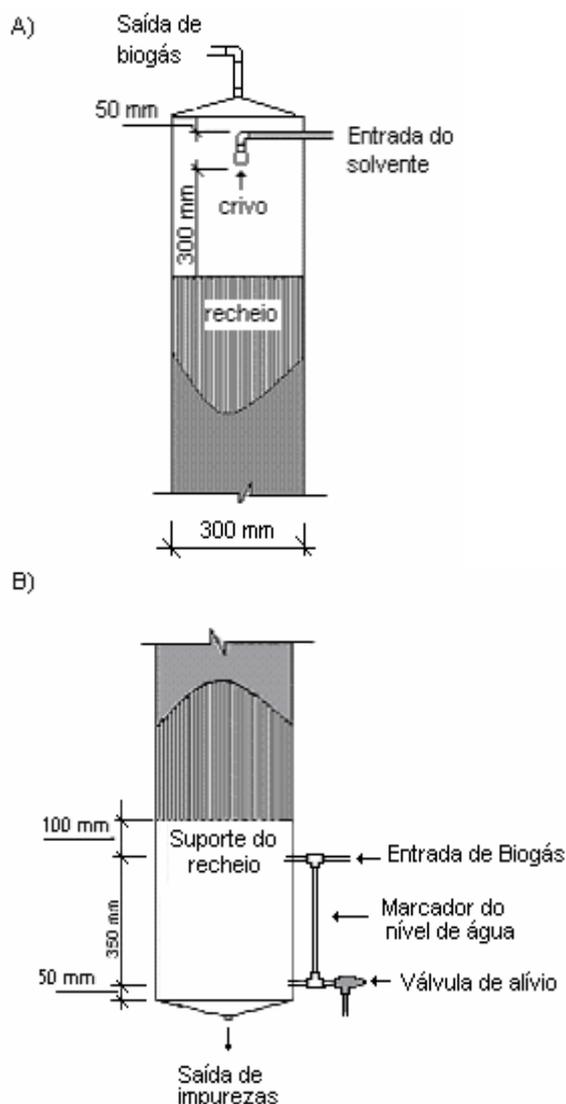


Figura 2. Dimensões da coluna de absorção.

NOTA: Acima estão a parte superior (A) e inferior (B) da coluna de absorção desenvolvida e suas dimensões.

Local da construção, da montagem e dos ensaios da Coluna de Absorção

A construção e a montagem da coluna de absorção foram realizadas na empresa Metal Arte, localizada na cidade de Cascavel, Estado do Paraná, e nos laboratórios de Energia e Hidráulica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste.

O experimento foi instalado em uma das propriedades da empresa GLOBOAVES cujo nome é GLOBOSUÍNOS. Está localizada na Estrada Melissa a 8 km do bairro Jardim Melissa, da cidade de Cascavel. Essa propriedade possui granjas responsáveis pelo fornecimento de leitões aos produtores de suínos vinculados a empresa.

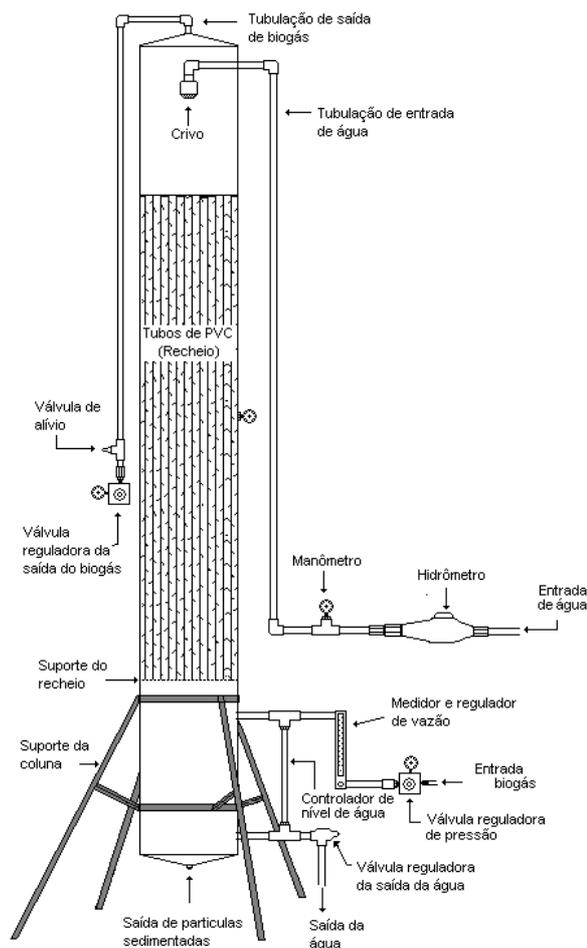


Figura 3. Desenho esquemático da Coluna de Absorção de CO_2 e seus componentes.

Funcionamento da Coluna de Absorção

Inicia-se o funcionamento da coluna pelo acionamento do sistema de bombeamento do solvente, controlando o fluxo de solvente pelo hidrômetro e registro instalados na tubulação de recalque e a pressão do solvente, pelo manômetro e registro de gaveta do conjunto moto-bomba. Ao mesmo tempo, acompanha-se o nível interno de solvente no cilindro vertical, regulando a válvula de saída da mistura solvente e dióxido de carbono. Simultaneamente, é injetado o biogás à pressão e vazão desejadas, sendo esse controle da pressão efetuado pelo manômetro e válvula de controle de pressão e o controle da vazão, pelo medidor de vazão e registro de agulha. O acompanhamento da estabilidade da pressão interna é feito pelo manômetro instalado no corpo do cilindro vertical. Depois de estabilizada a pressão interna desejada de trabalho, é regulada a válvula de saída de gás metano, procurando manter a pressão interna do cilindro vertical constante.

Testes realizados

Os testes realizados com a coluna de absorção foram no intuito de avaliar a capacidade de absorção de CO₂ em diferentes níveis de pressão de serviço e em diferentes vazões de biogás, verificando os fatores que influenciam no processo de absorção e, se possível, encontrando as condições de operação de melhor eficiência de absorção de CO₂ pela coluna.

Para tanto foram feitos ensaios variando-se: a vazão de biogás (de 190 a 650 cm³/s), vazão de solvente média 0,200 L/s, a uma temperatura de 25°C e as pressões de serviço dentro de uma faixa de 300 a 500 kPa. Essa faixa de pressão foi escolhida devido a algumas restrições de alguns equipamentos utilizados, como a potência do conjunto moto-bomba e a resistência do cilindro vertical.

Os níveis de CO₂ foram determinados utilizando o aparelho medidor de nível de CO₂ “ORSAT”.

Resultados e discussão

A Figura 4 apresenta a coluna de absorção de dióxido de carbono e seus diversos componentes desenvolvida e avaliada. A coluna de absorção é constituída de um cilindro vertical, um sistema de bombeamento hidráulico, tubulações, válvulas, manômetros, medidores e registros.

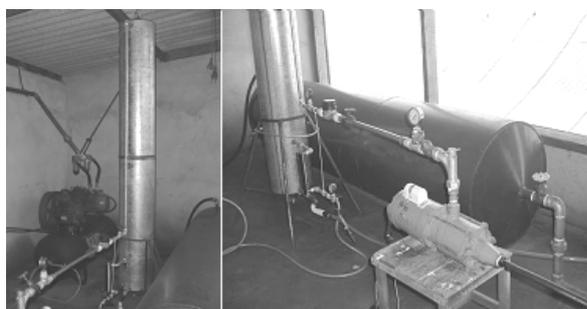


Figura 4. Coluna de absorção desenvolvida

NOTA: à esquerda, apresenta-se o cilindro vertical e à direita o conjunto moto-bomba e os componentes de medição e controle.

Dados coletados

O biogás provindo diretamente do biodigestor possuía um teor médio de CO₂ de 33%, estando condizente com os níveis de 25 a 40% de CO₂, citado por Pinheiro (1999). Foram realizados 5 ensaios com 4 repetições cada, gerando os seguintes resultados médios apresentados na Tabela 2, que mostra também a respectiva análise de comparação de médias.

Tabela 2. Comparação de médias das variáveis estudadas.

Análise Estatística dos dados – Comparação de Médias			
Ensaio	Pressões Médias (kPa)	Vazões Médias de Biogás (cm ³ /s)	Nível de CO ₂ (%)
1	329,52 A	437,50 A	22,0 A
2	348,14 A	208,33 B	19,5 B
3	448,65 B	581,25 C	22,0 A
4	446,20 B	220,83 B	17,5 C
5	480,53 C	207,08 B	15,3 D

NOTA: colunas em que valores seguidos da mesma letra apresentam valores iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey de comparação de médias.

Pode-se perceber na Tabela 1 que para uma mesma vazão de biogás quanto maior a pressão de serviço da coluna maior a absorção de CO₂ (ensaios 2, 4 e 5). Isso se deve ao fato de que a solubilidade do CO₂ em água está em função da pressão em que se encontram os componentes. Percebe-se também nessa tabela que para uma mesma pressão, uma menor vazão de biogás proporciona um maior poder de absorção do sistema. Isso provavelmente, estar relacionado com o tempo de retenção do biogás na coluna devido a vazão do biogás, na qual uma menor vazão propicia um maior tempo de contato entre a água e o CO₂.

A vazão de solvente não foi considerada um fator influenciador no processo de absorção, pois a vazão utilizada nos testes está muito acima da vazão mínima necessária calculada pela equação 2. Essa vazão utilizada foi a mínima conseguida com o equipamento utilizado.

Para melhor visualizar construiu-se gráficos que apresentam a influência dos fatores que afetam o processo de absorção de CO₂. Esses gráficos foram construídos comparando-se ensaios de mesma pressão de serviço para diferentes vazões de biogás e vice-versa, apresentando as quatro repetições dos ensaios.

Pode-se perceber na Figura 5 que o ensaio 2 por possuir uma menor vazão de biogás, proporcionou uma maior absorção de CO₂ pela coluna do que o ensaio 1. Percebe-se também que, dentro de um mesmo ensaio, a diminuição da vazão propicia um maior poder de absorção pela coluna. Isso pode ser também visualizado na Figura 6, onde o ensaio 4 proporcionou uma maior absorção do que o ensaio 3 por possuir uma vazão de biogás menor.

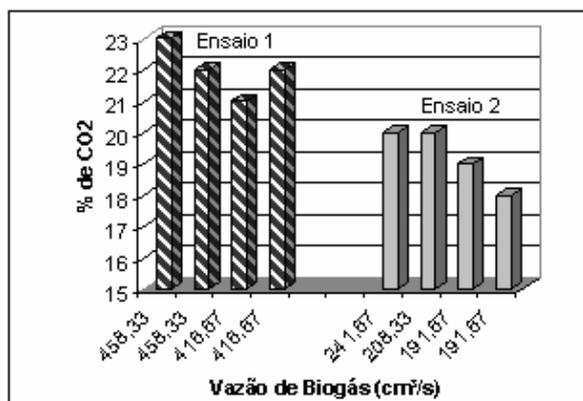


Figura 5. Concentração de CO₂ para vazões diferentes e pressão de serviço igual (ensaio 1 e 2).

As diferenças encontradas dentro de um mesmo ensaio para situações idênticas de pressão e vazão de solvente, apresentados nos ensaios, podem estar relacionadas com a operação do equipamento medidor do nível de CO₂, pois trata-se de um equipamento não eletrônico passível de erro. Mas estatisticamente, esses valores podem ser considerados iguais ao nível de 5% de significância.

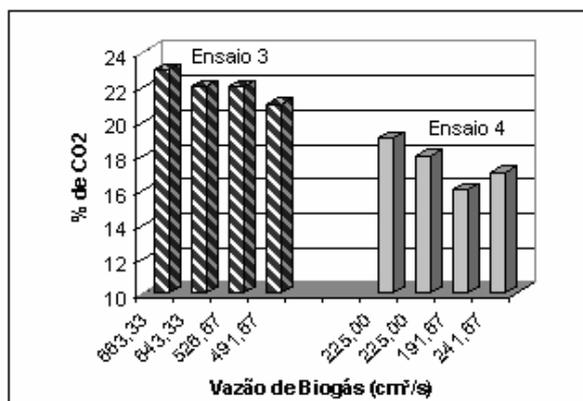


Figura 6. Concentração de CO₂ para vazões diferentes e pressão de serviço igual (ensaio 3 e 4).

Essas reduções possuem diferença significativa ao nível de 5% de significância, ou seja, a variação da vazão de biogás possui influência significativa no processo de absorção de CO₂ do biogás. Possivelmente, isso se deve ao fato de que quanto menor a vazão de biogás que entra no cilindro vertical maior o tempo de retenção do biogás, o que promove, conseqüentemente, um maior tempo de contato entre o CO₂ e a água, aumentando assim, a eficiência de absorção.

Comparando-se agora a influência da pressão no processo de absorção de CO₂ as Figuras 7 e 8 apresentam influência das diferentes pressões para uma mesma vazão.

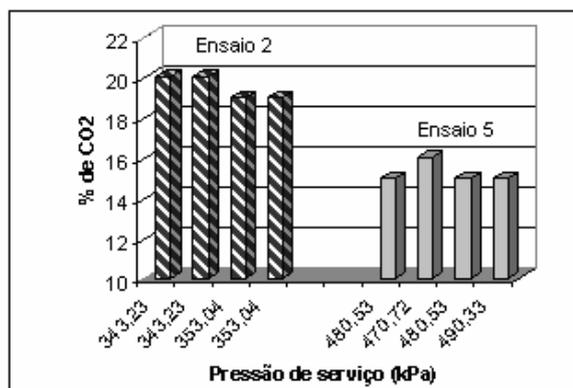


Figura 7. Concentração de CO₂ para diferentes pressões de serviço e vazão semelhantes (grupos 2 e 5).

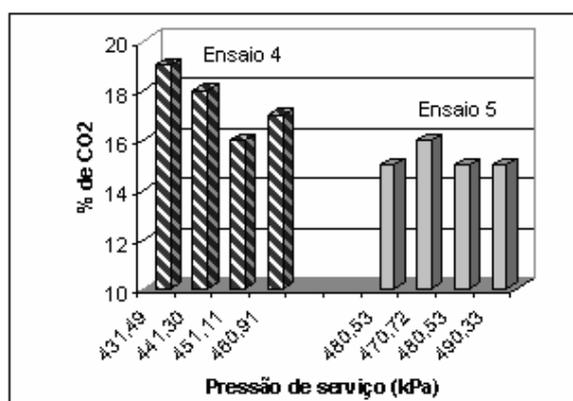


Figura 8. Concentração de CO₂ para diferentes pressões de serviço e vazões semelhantes (grupos 4 e 5).

Observa-se nas Figuras 7 e 8 que o aumento da pressão de serviço influenciou no processo de absorção de CO₂, onde o ensaio 5, por possuir maiores pressões obteve melhor resultado no processo de absorção, ou seja, menor nível de CO₂ que o ensaio 2 e 4. Desta forma, verifica-se que quanto maior a pressão de serviço maior a eficiência de absorção, podendo ser visualizado até mesmo dentro de um mesmo ensaio. Isso comprova que a solubilidade do CO₂ na água está em função da pressão em que se encontram os componentes, sendo que quanto maior a pressão maior a solubilidade do CO₂.

Propriedades estimadas do biogás purificado

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios realizados pode-se estimar as propriedades do biogás purificado.

O *poder calorífico* foi estimado levando em consideração que ele depende da porcentagem de metano existente no biogás e que o metano puro apresenta um poder calorífico de 9,9 kWh/m³. Desta forma, 10% de CO₂ na mistura gasosa do biogás representa aproximadamente 1 kWh/m³ a menos no poder calorífico. Com isso, estimou-se um aumento do poder calorífico de 6,6 kWh/m³ para 8,4 kWh/m³,

o que representa um acréscimo de aproximadamente 27% no poder calorífico com a purificação do biogás.

A *estimativa da densidade* do biogás foi feita por meio da equação 1, que leva em consideração os níveis de CH₄ existente na mistura gasosa. Por meio dessa equação, estimou-se uma redução da densidade de 0,88 kg/m³ para 0,71 kg/m³, o que representa 20% a menos na densidade do biogás purificado.

Em termos de poder calorífico por unidade de massa, o biogás que provinha do biodigestor (67% de CH₄) teria um poder calorífico de 7,53 kWh/kg, enquanto que com o biogás purificado (85% de CH₄), este teria um poder calorífico de 11,86 kWh/kg. Desta forma, com o aumento do poder calorífico e a diminuição da densidade do biogás ocorre um aumento de 4,33 kWh/kg, o que representa um aumento aproximado de 57% no poder calorífico por unidade de massa.

Conclusão

Com a construção e avaliação do desempenho da coluna de absorção recheada no processo de absorção de CO₂ do biogás pode-se concluir que os fatores que influenciaram no processo de absorção foram a pressão de serviço e a vazão de biogás. Quanto maior a pressão de serviço e quanto menor a vazão de biogás que entra na coluna, maior a taxa de absorção, ou seja, melhor a eficiência de absorção.

O ponto ótimo de funcionamento da coluna foi operando com pressão média de aproximadamente 480 kPa e vazão média de 207 cm³/s, obtendo uma concentração de CO₂ de 15,25%, o que está dentro do patamar estabelecido pela ANP, em relação ao nível de metano que o gás natural deve possuir, tornando o biogás apto a ser utilizado nos mesmos usos finais, com exceção do GNV (gás natural veicular).

Para o biogás com concentração de CO₂ de 15,25%, estimou-se um aumento de aproximadamente 57% no poder calorífico por unidade de massa, com o conseqüente aumento no teor de metano (67% para 85%) e diminuição da densidade de 0,88 kg/m³ para 0,71 kg/m³.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Proc. 478601/01-8) pelo financiamento deste trabalho.

Referências

- AD-NETT. Anaerobic digestion of Agro-Industrial Wastes: Information Networks. Technical Summary on Gas Treatment. Netherlands. 2000. 31 p
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Portaria 128, de 28 de agosto de 2001. p. 10
- CCE – CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA. Guia Técnico de Biogás. Amadora – Portugal, 2000. 117 p
- FAIR, J.R. *et al.* Sistema líquido/gás. In: PERRY, R.H.; CHILTON C. H. (Ed.) *Manual de Engenharia Química*. 5. ed. Traduzido por: H. Macedo, L. M. Barbosa e P. E. de F. Barbosa. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980. Original inglês.
- LASTELLA, G. *et al.* Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production its purification. Pergamon Energy Conservation & management. 2002.
- MADDOX, R. N. Absorção de gases. In: PERRY, R. H.; CHILTON C. H. (Ed.) *Manual de Engenharia Química*. 5. ed. Traduzido por: H. Macedo, L. M. Barbosa e P. E. de F. Barbosa. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980. Original inglês.
- MAGALHÃES, E. A. *Análise da viabilidade na utilização do biogás de uma granja de suínos*. Monografia (Conclusão de Curso)-Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Unioeste. Cascavel, 2000.
- MYKEN, A. *et al.* Adding gas from biomass to the gas grid. Swedish Gas Center. Sweden. 2001.
- PINHEIRO P. C. C. Apostila da disciplina de sistemas térmicos: Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.
- SORDI, A. *et al.* Potencial energético dos resíduos de aviário de frangos de corte na região Oeste do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32. 2003. Goiânia – GO. Anais.... Goiânia – GO, CONBEA/SBEA. 2003.1 CD-ROM.
- SOUZA, S. N. M. *et al.* Geração própria de energia elétrica com aproveitamento de biogás da suinocultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 32. 2003. Goiânia – GO. Anais.... Goiânia – GO, CONBEA/SBEA. 2003.1 CD-ROM.
- VOIVONTAS, D. *et al.* Assessment of biomass potential of power production: a GIS based method. *Biomass Bioenerg.* Kidlington, v. 20 . p.101-112, 2001.
- WONG S; BIOLETTI R. Carbon Dioxide separation technologies. Edmonton, Alberta: Carbon & Energy Management. Alberta Research Council. T6N1E4, 2002.

Received on February 03, 2004.

Accepted on June 03, 2004.